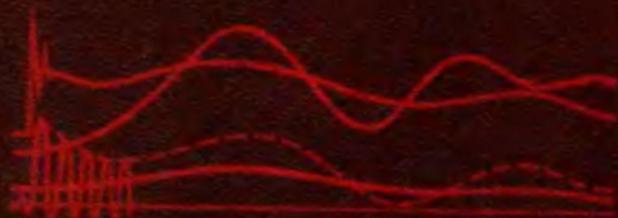


В. А. ВЕНИКОВ

ПЕРЕХОДНЫЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ



В. А. ВЕНИКОВ

ПЕРЕХОДНЫЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ

ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ

ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ДОПУЩЕНО
МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНИКА ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗОВ



МОСКВА
"ВЫСШАЯ ШКОЛА"
1985

ББК 31.27
В 29
УДК 621.311

За третье издание учебника «Переходные электромеханические процессы в электрических системах» Валентину Андреевичу Веникову присуждена Государственная премия СССР за 1981 год

Рецензент — проф. Д. А. Арзамасцев (зав. кафедрой «Автоматизированные электрические системы» Уральского политехнического института им. С. М. Кирова)

Веников В. А.

В29 Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1985. — 536 с., ил.

В пер.: 1 р. 80 к.

В книге рассматриваются переходные режимы электроэнергетических систем, имеющих автоматическое регулирование. Дается описание физики процессов и современных методов расчета устойчивости, поведения узлов нагрузки, самовозбуждения, слабых связей и т. д. Особое внимание уделяется вопросам устойчивости и качества.

В 4-е издание (3-е вышло в 1978 г.) включено много новых вопросов, изменена компоновка материала, даны указания о методах проработки его, приведены темы рефератов.

В $\frac{2302040000-475}{001(01)-85}$ 120—85

ББК 31.27
6П2.11

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга, сначала выпускавшаяся как монография (1958), а затем как учебник (1964, 1970 и 1978), в настоящем, четвертом, издании переработана так, что ее материал отвечает содержанию дисциплины «Переходные электро-механические процессы в электрических системах», читаемой на всех электро-энергетических специальностях в соответствии с программами, утвержденными Министерством высшего и среднего специального образования СССР в 1984 г. Книга в полном объеме является учебником для специальностей 0301, 0302, 0303а, 0304, 0650; с купюрами она может использоваться для специальностей 0307, 0311, 0314, 0315, 1510. Построение учебника — частично концентрическое — предусматривает легко реализуемую возможность выборочного использования его материала во всех тех случаях, когда данная дисциплина почему-либо излагается в несколько измененной или сокращенной форме. При этом сохраняются идеи, главные для научного направления, отраженного в книге. Для этого направления наиболее существенным является особое внимание к физике явлений при наибольшем приближении трактовки их, по возможности простого, математического описания к практическим задачам инженера-энергетика. Настоящая дисциплина и соответствующий ей учебник не ставят задачи дать студенту полное руководство к алгоритмированию, программированию и проведению современных, достаточно сложных расчетов электромеханических переходных процессов, осуществляемых инженером, как правило, на ЦВМ. При изучении этой дисциплины студент должен не столько получить навыки в технике расчетов, сколько выработать понимание допущений и ограничений, связанных с физикой явлений и заложенных в основе расчетных методов, научиться практически подходить к инженерной оценке полученных результатов. Давно высказанные крупнейшим инженером и математиком А. Н. Крыловым соображения о том, что настоящий инженер должен не просто пользоваться результатами математических формул, «перемалывающих, как мельница, то, что в них засыпают», но чувствовать в наглядно воспринимаемых их содержании, не только остаются в силе в наше время, но и приобретают новый смысл. Он заключается в требовании физической интерпретации тех формализованных решений сложных задач, которые относительно легко разрешаются как чисто математические с помощью современной вычислительной техники с ее колоссальными в этом отношении возможностями. Однако именно эти возможности стимулируют проблему апробации корректности не только тех алгоритмов и программ, с помощью которых выполняются быстрые «машинные решения», но и проблему достоверности получаемых результатов, их обзорности и удобства практических применений. Нерациональное использование вычислительных машин привело к продолжению

афоризма, высказанного выше и звучащего так: «Пусть мельница бездействует при отсутствии зерна, нежели перемалывает сорняки» ...

Инженер должен понимать, что вычислительная машина в зависимости от заложеного материала может одинаково быстро и эффективно выдать и ошибочные, и правильные ответы. И студентам, и преподавателям следует помнить слова П. А. Дирака, сказавшего, что математика есть орудие, специально приспособленное для овладения всякого рода абстрактными понятиями, и в этом отношении ее могущество беспредельно... Но не следует забывать, что математика есть только орудие и что нужно уметь владеть физическими идеями безотносительно к их математической форме. Тогда и только тогда вычислительная машина будет, как назвал ее У. Г. Эшби, «усилителем мозга». Для этого будущему инженеру необходимо прежде всего воспитывать вкус и способности к физической интерпретации результатов анализа. В связи с этим при изучении научно-технической дисциплины и в настоящее время полностью сохраняется задача овладения простейшими, не формализованными методами и приемами исследований, такими, например, как способ площадей при оценке качаний генераторов, практические критерии статической устойчивости, связанные с пониманием физики текучести режима, и многими другими энергетическими научными представлениями, являющимися элементами инженерного мышления. Здесь существенно прежде всего ориентация на понимание физики явлений, а не на исследование, основанное на формализованном их описании, которое так эффективно проводится на базе современной вычислительной техники. Будущий специалист должен понять, что инженерное дело — это не только наука, дающая возможность получения формул, и ремесло (вычисление по этим формулам), но и искусство, позволяющее выбрать необходимые методы и приемы, которые дают достоверные результаты и наиболее быстро ведут к цели.

Электрические системы все в большей степени становятся и будут становиться автоматически регулируемыми и управляемыми сложными системами, перерастая в системы кибернетического типа. Но это не только не изменяет высказанные выше соображения, но, напротив, усиливает их. Так, в частности, можно ожидать, что относящиеся к энергетике задачи кибернетического характера будут настолько сложны, что и сколь угодно совершенной вычислительной математике не удастся сразу без участия человека находить адекватные техническим аспектам методы исследования и получать достаточно полные описания систем при действующих в них возмущениях. Вместе с тем, широко пропагандируемые как неограниченные, возможности формализованного подхода* подталкивают инженера к все большему и большему «уточнениям», в том числе и в смысле учета второстепенных факторов, практически не влияющих, но осложняющих не только расчеты, но и обозримость их результатов и в связи с этим зачастую приводящих в конечном счете к ошибкам. Именно поэтому для поколений современных и будущих инженеров не меньшее, чем для прошлых, значение будут иметь физические представления о главнейших свойствах системы, факторах, влияющих в тех или иных режимах, и различных подходах к проектированию и эксплуатации энергосистем. Все отмеченное не означает какого-

*Обычно, говоря о мощи вычислительной математики, вспоминают Лавуазье, в 1846 г. аналитически «на кончике пера» открывшего планету Нептун. Однако это открытие приобрело настоящую цену, когда в 1848 г. Галле нашел эту планету телескопом. Таково содержание математических и физических методов, а не торжество одних над другими.

либо даже малейшего умаления роли вычислительной техники: ее место и значение так же существенны, как и понимание физики явлений. Однако в данном учебнике нет возможности ни по уровню подготовки студентов, ни по отведенному времени довести данную учебную дисциплину до подробного программирования расчетов на вычислительных машинах. Но несмотря на это, лектор должен все время иметь в виду последующие вычислительные применения, вплотную подводя через анализ физики процессов к ним студентов.

Дисциплина «Переходные процессы» и соответствующий ей учебник формируются как фундамент, обеспечивающий дальнейшее построение специального обучения, применяющего методы вычислительной техники, средства автоматизации, кибернетизации при проектировании и управлении электроэнергетическими системами. По существующим учебным планам она читается раньше дисциплин, посвященных автоматизации электрических систем. Это обстоятельство предопределило введение в учебник элементарных сведений по автоматическому регулированию, которые даются в простейшей форме, поскольку они необходимы только для обеспечения подхода к рассмотрению современной электрической системы как единого целого, включающего не только силовые элементы системы, но ее регулирующие и управляющие устройства.

Особенность построения четвертого издания книги, вызванная стремлением облегчить ее изучение и вместе с тем придать ей известную универсальность, заключается в ее концентричности и независимости ряда разделов. С этим же обстоятельством связано выделение в тексте учебника материала, содержащего обязательный минимум, и поясняющего материала, который набран петитом. Проработке его в зависимости от конкретных условий может отводиться разное время. Он может использоваться и как дополнительный материал, углубляющий дисциплину и используемый в УИРах и НИРСах. Для двух-трех рефератов, выполняемых студентами при проработке данной дисциплины, может быть использован материал, отмеченный «звездочкой». Этот материал обязателен только для специальностей «Кибернетика электрических систем» (0304), «Электрические станции» (0301), «Электрические системы и сети» (0302). Однако его не должны упускать из внимания ни студенты, ни преподаватели других специальностей.

Построение учебника предусматривает его изучение студентами разных специальностей по разделам. Так, его гл. 1—5 составляют вполне законченный раздел, содержащий общие сведения о теории переходных процессов и способах их исследования. Для студентов ряда специальностей и для неэнергетических факультетов этих глав с дополнениями § 7.2, § 7.3 уже может быть достаточно для изучения.

Раздел учебника, включающий гл. 7—9, развивает материал первых шести глав и дает достаточно подробные сведения о статической и динамической устойчивости — протекании процессов во времени при больших и малых возмущениях. Он касается также актуального вопроса о поддержании частоты в системах.

Специальный раздел (гл. 11—12) рассматривает имеющие большое значение переходные процессы в нагрузках электрических систем; гл. 11 — малые нарушения режима, а гл. 12 — процессы при больших изменениях мощности и скорости.

При ограниченном числе часов, отводимых на данную дисциплину (например, для специальности 0303 и аналогичных ей), следует сосредоточить внимание студентов на процессах в нагрузках, как наиболее характерных. Обязательными

для изучения должны быть гл. 1, 2, 4, 5 и далее гл. 11 и 12, которые в данном случае следует рассматривать как центральные.

В отличие от предыдущих изданий в данном изложении проблема статической устойчивости начинается с рассмотрения регулируемой системы, частным случаем которой является нерегулируемая система. Это связано с тем, что современное регулирование является не «дополнением», а органической и существенной частью системы, изменяющей решающим образом ее свойства в требуемом направлении. В книге подчеркивается, что возможен подход к статической устойчивости как к динамической, но при таких возмущениях, когда в силу их малости место их приложения и значение не влияют на установление характера процесса и оценку его устойчивости. На такие новые моменты, возможно не привычные и для преподавателей, здесь специально обращается внимание.

Принятое концентрическое построение учебника (и соответственно дисциплины) с постепенным наращиванием глубины рассмотрения явлений и учета их сложности предполагает и индуктивный подход к изучению предмета. Необходимо учесть, что заманчивое на первый взгляд чисто дедуктивное построение, при котором в вводной части могла бы быть представлена общая теория переходных процессов и устойчивости с дальнейшим логическим изложением формально-математического аппарата и его пользования, не приводит, как показал многолетний опыт преподавания, к положительным результатам, поскольку логика восприятия студентами главного в дисциплине, а именно физики явлений, и стремление к проблемной постановке лекций неизбежно требуют постепенности в подходе к изложению, в конечном счете оправдывающей именно индуктивный подход*. Существенно также, что при этом подходе облегчается подкрепление данной дисциплины упражнениями, лабораторными занятиями и, что очень важно, регулярным индивидуальным самоконтролем, заключающимся в проведении не менее трех раз в процессе изучения материала репетиционных проверок, осуществляемых с помощью машин-экзаменаторов.

В конце каждой лекции студент отвечает на вопросы, мобилизующие его внимание на подведение итогов изложенного материала. Бланки для ответов раздаются в перерыве после первого часа и служат одновременно и для контроля присутствия на лекции, и для оценки качества работы на ней. Параллельно с лекциями предусматривается проведение лабораторных работ и выполнение типового расчета. Во время лекции должен проводиться показ слайдов и коротких кинофильмов (5—7 мин), иллюстрирующих проблемы анализа и улучшения качества переходных процессов.

Трудоемкость воспроизведения графического материала на обычной меловой доске в значительной мере снимается применением «динамических плакатов»: незаконченных рисунков, раздаваемых перед лекцией и завершаемых в процессе ее студентами вместе с лектором, который при этом пользуется проекцией рисунков через кодоскоп. Все это способствует более быстрому усвоению материала (экономится 25—30% времени).

* Говоря о подходе к изложению, нельзя забывать о его утилитарности, и в этой связи хочется вспомнить слова Л. Янга о том, что здравый смысл подсказывает нам: надо излагать предмет на том языке, который всего более подходит для достижения результата; всякая методика — это что-то вроде общественного транспорта, чем скорее она помогает добраться до цели, тем она лучше.

Главы книги снабжены контрольными вопросами и темами рефератов, которые должны составляться всеми студентами и некоторые из них (выборочно) зачитываться (5—7 мин) на лекционном потоке или в группе на упражнениях. Прорабатывать вопросы и примеры, приведенные в конце глав, необходимо одновременно с рассмотрением теории. Для лучшего усвоения дисциплины рекомендуется обращаться к учебным пособиям, содержащим практические примеры анализа переходных процессов. Список литературы, приведенный в конце книги, напоминает о ранее проработанном материале, а также обеспечивает дальнейшее расширение учебной дисциплины, увеличивая возможности выполнения УИР и СНИР. Однако приведенный список литературы с учетом назначения книги содержит только ограниченное число ссылок на работы, имеющих непосредственное отношение к разделам дисциплины и полезных при проведении типовых расчетов курсовых и дипломных проектов. Ссылки на литературу в подстрочных сносках по тексту сделаны так, чтобы помочь студентам углубить при желании знания по отдельным вопросам, более подробно обосновывающим некоторые положения учебника.

Разумеется, приведенная литература является не полной библиографией — она не исчерпывает использованных при написании учебника многочисленных отечественных и зарубежных публикаций; в книге не дано специальных ссылок на использованные в ней личные научные работы автора и исследования, проведенные его сотрудниками и учениками.

В приложении также сжато дан краткий исторический обзор теории электро-механических переходных процессов. Желательно, чтобы лектор в заключительной (именно в заключительной, а не в вводной) беседе коснулся этой проблемы и отметил роль ученых, развивающих ее.

Как отмечалось в предисловиях к предыдущим изданиям, учебник отражает идеи и методы московской научной школы электрических систем, берущей начало в работах П. С. Жданова, С. А. Лебедева. В дальнейшем развитии этой школы, равно как и в создании настоящего учебника, автор пользовался поддержкой и непосредственной помощью своих учеников и сотрудников. В их числе он благодарит д-ра техн. наук И. В. Литкенс, канд. техн. наук В. А. Строева, канд. техн. наук С. Ю. Сыромятникова, канд. техн. наук Е. В. Путятину, канд. техн. наук Н. В. Федотову и др. Очень плодотворна была работа с многочисленными аспирантами (В. Голов, Т. Погосян, Ф. Оруджев и др.). Они участвовали не только в выполнении примеров, экспериментов, расчетов, но и в отработке ряда научных положений, способствуя созданию научной школы кафедры. Особую благодарность автор выражает рецензенту Д. А. Арзамасцеву, замечания которого были полезны при отработке рукописи данного издания.

По предыдущим четырем (включая монографию) изданиям книги и пяти зарубежным ее переводам имелись многочисленные рецензии, советы и замечания, которые с благодарностью учел автор. Автор надеется, что и по данному четвертому изданию учебника, в котором, несомненно, также имеются дискуссионные моменты и неизбежные погрешности, читатели не менее активно, чем раньше, выскажут свои замечания и пожелания, за которые он заранее приносит большую благодарность.

Замечания и пожелания направляйте в издательство «Высшая школа»: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная, 29/14.

Автор

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АВМ	— аналоговая вычислительная машина	КЭС	— конденсационная электростанция
АВР	— автоматический ввод резерва	ЛЭП	— линия электропередачи
АПВ	— автоматическое повторное включение	МИСВ	— механизм изменения скорости вращения
АРВ	— автоматический регулятор возбуждения	Н	— нагрузка
АРВ с. д.	— автоматический регулятор сильного действия	НН	— низкое напряжение
АРВ п. д.	— автоматический регулятор пропорционального действия	НЧ	— низкая частота, низкочастотный
АРН	— автоматическое регулирование напряжения	ОС	— обратная связь
АД	— асинхронный двигатель	ОЭС	— объединенная энергосистема
АЛАР	— автоматическая ликвидация асинхронного режима	ПД	— пропорциональное действие
АПНУ	— автоматическое предотвращение нарушения устойчивости	ПУ	— противоаварийное управление
АДС	— автоматическое деление сети	ПА	— противоаварийная автоматика
АРЧ	— автоматическое регулирование (регулятор) частоты (в системе)	ПП	— полупроводник, полупроводниковый
АРЧВ	— автоматический регулятор частоты вращения (агрегата — АРС)	ППТ	— передача постоянного тока
АСУ	— автоматизированная система управления	ПС	— подстанция
АСУП	— автоматизированная система управления производством (промышленностью, процессом)	ПТ	— полупроводниковый триод, транзистор
АСДУ	— автоматизированная система диспетчерского управления	РДС	— регулятор «до себя»
АЧР	— автоматизированная частотная разгрузка	РЗ	— релейная защита
АЭС	— атомная электростанция	РПН	— регулирование под нагрузкой
ВК	— вычислительный комплекс	РУ	— распределительное устройство
БЭС	— большая система энергетики	САР	— система автоматического регулирования
ВЛ	— воздушная линия	САОМ	— система аварийного ограничения мощности
ВН	— высокое напряжение	СВН	— сверхвысокое напряжение
ВПТ	— вставка постоянного тока	СД	— сильное действие, синхронный двигатель
ГАЗС	— гидроаккумулирующая электростанция	СУ	— статическая устойчивость
ГОС	— гибкая обратная связь	СГ	— синхронный генератор
ГЭС	— гидроэлектростанция	СК	— синхронный конденсатор
ДУ	— дифференциальное уравнение	СМ	— синхронная машина
ДП	— диспетчерский пункт	ТЭС	— тепловая электростанция
ДУ	— динамическая устойчивость	УВМ	— управляющая вычислительная машина
ЖОС	— жесткая обратная связь	УПК	— устройство продольной компенсации
ИРМ	— источник реактивной мощности	УРОВ	— устройство резервирования отката выключателя
КЛ	— кабельная линия	ЦВМ и АВМ	— цифровая и аналоговая вычислительная машина
КПД	— коэффициент полезного действия	ЭВМ	— электронная вычислительная машина
КРУ	— комплексное распределительное устройство	ЭЛТ	— электронно-лучевая трубка, дисплей
		ЭС	— электростанция
		ЭЭС	— электроэнергетическая система
		ЧАПВ	— частотное автоматическое повторное включение
		ШБМ	— шины бесконечной мощности

ГЛАВА 1

ХАРАКТЕРИСТИКА КУРСА

§ 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ И ЕЕ РЕЖИМАХ

Энергетика, имеющая огромное значение в развитии человеческого общества, превратилась в большую систему кибернетического типа, т. е. систему целенаправленную, оптимизируемую при прогнозировании, проектировании и эксплуатации.

Большая система энергетики состоит из отдельных взаимосвязанных систем или подсистем, функционирующих как единое целое, но при решении практических задач часто рассматриваемых отдельно.

Одной из таких подсистем является *электроэнергетическая система* — та часть энергетической системы, в которой теплота и различные виды энергии преобразуются в электрическую энергию, передаваемую на расстояние, распределяемую по потребителям, где она вновь преобразуется. В настоящей дисциплине будет изучаться *электромеханическая часть* электроэнергетической системы, далее называемая *электрической*.

Электрическая система представляет собой совокупность взаимодействующих элементов, которые можно разбить на две группы:

— *силовые элементы*, вырабатывающие (например, генераторы, с их первичными двигателями), преобразующие (трансформаторы, выпрямители, инверторы), передающие и распределяющие (линии передач, сети) и потребляющие (нагрузки) электрическую энергию;

— *элементы управления*, регулирующие и изменяющие состояние системы (регуляторы возбуждения синхронных машин, регуляторы частоты, реле, выключатели и т. п.).

Все элементы системы функционально связаны единством генерирования, передачи и потребления электрической энергии. В нормальном рабочем состоянии, или, как будем называть в дальнейшем, *нормальном режиме*, система должна надежно обеспечить потребителя электрической энергией нормированного, достаточно постоянного качества. При этом было бы желательно, чтобы режим

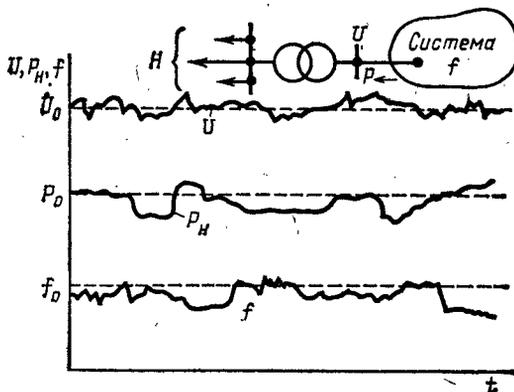


Рис. 1.1. Изменения параметров нормального режима системы:

U — напряжение на шинах подстанции, питающей нагрузку; P_H — поток мощности, потребляемой нагрузкой H ; f — частота в системе. Индекс 0 означает номинальное (нормальное) значение

системы был совершенно неизменным. Однако такого полностью «установившегося режима» реально существовать не может. Нагрузка в системе колеблется: непрерывно происходят «малые изменения» (флуктуаций) числа подключенных потребителей — их мощности и состава, т. е. нагрузка «дышит» (рис. 1.1). Кроме этих малых отклонений, реже, но также довольно часто, происходят более

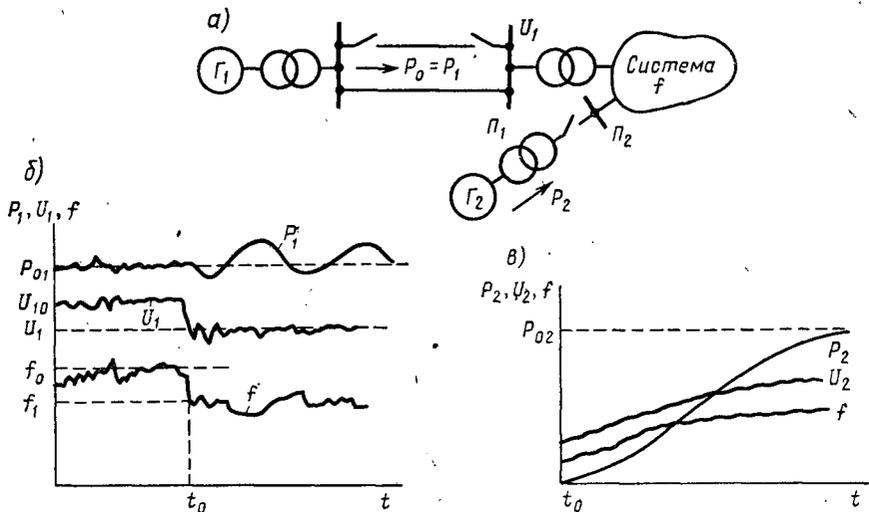


Рис. 1.2. Изменение параметров при нормальных переходных режимах в системе:

а — схема системы; б — отключение линии электропередачи $Л_1$, питающей подстанцию $П_1$ от генератора $Г_1$; U_1 — напряжение на шинах подстанции $П_1$; P_1 — поток мощности от генератора $Г_1$; в — включение мощного генератора $Г_2$ и набор им нагрузки; U_2 — напряжение на шинах подстанции $П_2$; P_2 — поток мощности от генератора $Г_2$; индекс 0 — начальное значение, 1, 2 — установившееся

крупные «большие изменения», связанные с вариациями значений вырабатываемых и потребляемых мощностей и конфигурации системы — включением и отключением генераторов линий передач, трансформаторов, мощных подстанций (узлов нагрузки). Такие изменения — переходы от одного режима к другому во время нормальной работы системы — называются *нормальными переходными режимами* (рис. 1.2).

Электрическая система, как и любая другая система, может иногда подвергаться аварийным воздействиям. Аварии могут быть вызваны:

— или *н а р у ш е н и е м* режима системы — перегрузками отдельных элементов и их автоматическим отключением и делением системы на части — «развалом системы»;

— или *р а з р у ш е н и е м* отдельных элементов системы. Например, из-за внешних воздействий (ветер, гололед) могут разрушиться опоры электропередачи. Из-за внутренних воздействий, обусловленных возросшими токами при коротком замыкании, могут разрушиться генераторы, трансформаторы, реакторы и подстанции (см. П1). Состояние системы во время таких аварий и последующий переход к новому рабочему состоянию называется *аварийным переходным режимом* (рис. 1.3).

Изучение режимов электрической системы требует рассмотрения не только электромагнитных явлений, обуславливающих возможность получения, передачи и потребления электрической энергии, но и механических явлений в ее элементах: в первичных двигателях, их автоматических регуляторах, генераторах, двигателях нагрузки, где электрическая энергия вновь преобразуется в механическую. Таким образом, необходимо рассматривать и электрическое, и механическое состояние системы, или *электромеханические режимы*.

Система, объединяющая отдельные элементы, может иметь свойства, не выявляющиеся у этих элементов. Режимы системы могут существенно отличаться от режимов ее элементов или даже режимов подсистем*.

Электрическая система, как и любая искусственная (т. е. созданная человеком) система, предназначена для нормального выполнения функций, т. е. для работы в нормальном установившемся режиме. Однако обеспечение ее качественной, надежной работы возможно только в том случае, если и любой (нормальный, аварийный) переходный режим будет удовлетворять определенным требованиям.

Цель настоящей дисциплины — научить будущего инженера понимать происходящие физические явления в любом переходном режиме, рассчитывать его и управлять им так, чтобы облегчить возможные последствия и тем более не допустить, чтобы они привели к технической и социально-экономической катастрофе, как это было в некоторых «национальных — общесистемных» авариях, например в США или Франции. А для этого необходимо прежде всего осветить физику интересующих инженера режимов, изложить методы их количественных расчетов и описать те приемы, мероприятия и установки, с помощью которых можно управлять переходными режимами, придавая им желательный характер. При этом приводится наиболее простое математическое описание переходных режимов, появляющихся при изменениях электромеханического состояния системы. Аналитические методы исследования излагаются здесь главным образом для того, чтобы облегчить понимание происходящих явлений и обеспечить дальнейшее овладение теми более сложными методами анализа, которые применяют в практике проектирования и эксплуатации электрических систем.

Студент должен получить представление о мероприятиях, обеспечивающих нормальную работу системы при малых возмущениях (статическая устойчивость) и благополучный исход различных аварийных режимов (динамическая и результирующая устойчивость). Поэтому здесь необходимо изучать установившиеся

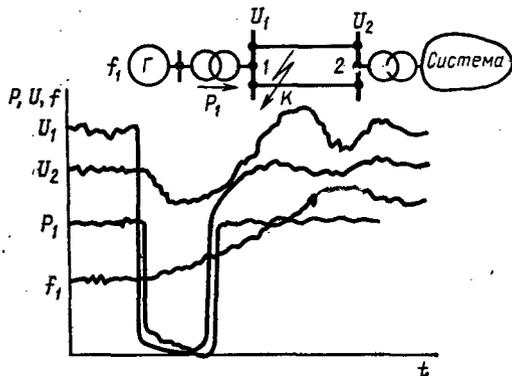


Рис. 1.3. Переходный аварийный режим в системе

Короткое замыкание в точке K на одной из линий электропередач вблизи шин питающей подстанции 1 и последующее отключение этой линии. Система остается устойчивой. U_1, U_2 — напряжения на шинах подстанций 1 и 2; P_1 — поток мощности от генератора; f_1 — частота в системе

* Здесь проявляется свойство *системности*, или *эмерджентности*.

вся нормальные режимы, при которых начинается переходный режим, и выяснять условия существования послеаварийных режимов.

Все элементы электрической системы рассматриваются во взаимодействии, которое устанавливается на основе показателей, определяющих «системные свойства» (параметров режима), статических и динамических характеристик (см. ниже). Вопросы конструктивного выполнения элементов системы здесь не рассматриваются. Электрические системы, изучаемые в данной дисциплине, предполагаются в той или иной мере автоматизированными. Режим автоматизированной системы находится с учетом непрерывного действия автоматических устройств, реагирующих на все возмущения режима системы, воздействующих на нее и, в свою очередь, вызывающих ее ответные реакции.

Знание поведения системы после любых возмущений оказывается, таким образом, необходимым для оценки действия устройств автоматического регулирования, правильного их выбора и обеспечения работы системы в нормальных и аварийных условиях.

К числу элементов электрической системы, действие которых подлежит далее рассмотрению, следовательно, относятся также и устройства автоматического регулирования. Но ни вопросы конструирования устройств автоматического регулирования, ни вопросы анализа их внутренних свойств не входят в настоящую дисциплину. Они изучаются в других дисциплинах на основе сведений, приведенных здесь. Устройства автоматического регулирования рассматриваются при этом только как некоторые элементы, преобразующие параметры режима в величины, которые воздействуют на другие элементы системы, изменяя ее режим.

§ 1.2. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В настоящей дисциплине рассматриваются *переходные режимы электрической системы** — переходы одного ее состояния в другое. *Режим* — состояние системы, которое характеризуется показателями, количественно определяющими ее работу. Эти показатели называются *параметрами режима* P_p . К ним относятся значения мощности, напряжения, тока, углов сдвига векторов э. д. с., напряжений, токов, частоты и т. д. Параметры режима связаны соотношениями, в которые входят параметры системы.

Параметры системы — это показатели P_c , количественно определяющие физические свойства системы как некоторого материального сооружения, зависящие от схемы соединений ее элементов и принимаемых допущений. К параметрам системы относятся значения полных, активных и реактивных сопротивлений, проводимостей элементов, собственных и взаимных сопротивлений, коэффициентов трансформации, постоянных времени, коэффициентов усиления, и т. д. Например, ток в сопротивлении

$$i = \dot{U}/R,$$

где i и \dot{U} — параметры режима; R — параметр системы.

* 1. Система определяется как целое, представленное из элементов, находящихся в отношениях и связях между собой и образующих определенное единство. 2. Под электрическими системами понимаются системы переменного тока, в отдельных случаях имеющие элементы (звенья, участки) постоянного тока. 3. В дальнейшем для сокращения термин «электрическая» иногда опускается.

Ток в ветви сложной системы определяется параметрами режима (э. д. с. $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dots, \dot{E}_k$) и параметрами системы (проводимостями $\dot{Y}_{11}, \dot{Y}_{12}, \dots, \dot{Y}_{1k}$):

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 \dot{Y}_{11} + \dot{E}_2 \dot{Y}_{12} + \dots + \dot{E}_k \dot{Y}_{1k}.$$

Ряд параметров системы в той или иной мере зависит от режима а. Такая система будет *нелинейной*. Однако во многих практических задачах параметры этой системы обычно можно полагать неизменяющимися, считая систему линейной. Случаи, когда нелинейность, обусловленную изменением параметров системы, необходимо учесть, будут специально оговариваться.

Нелинейность другого вида в изучаемой системе, обычно учитываемая при анализе, обусловлена характером соотношений между параметрами ее режима. Например, мощность P , связанная квадратичной зависимостью с напряжением U и синусоидальной — с углом расхождения векторов напряжений по концам передачи δ , будет нелинейной функцией этих величин:

$$P = U^2/R; P = (U_1 U_2/X) \sin \delta,$$

где R, X — параметры системы.

Режимы электрической системы разделяются на две большие группы: *установившиеся режимы* и *переходные режимы*, которые иногда называются *неустановившимися* или *нестационарными*.

Внутри этих групп различают следующие виды режимов:

— *нормальные установившиеся* — длительные режимы, применительно к которым при проектировании электрической системы определяются ее основные технико-экономические характеристики;

— *нормальные переходные* — режимы, во время которых система переходит от одного рабочего состояния к другому;

— *аварийные* — установившиеся и переходные режимы, для которых определяются технические характеристики устройств, предназначенных для ликвидации аварии, и выясняются условия дальнейшей работы системы;

— *послеаварийные установившиеся* — режимы, которые в общем случае характеризуются изменением нормальной схемы системы, например отключением какого-либо элемента или ряда элементов. В послеаварийном режиме система может работать с несколько ухудшенными технико-экономическими характеристиками по сравнению с характеристиками нормального режима.

В любых режимах реальной электрической системы, в том числе и в установившихся, параметры режима непостоянны, они непрерывно изменяются — отклоняются от некоторого среднего значения, но эти отклонения в установившемся режиме настолько малы, что режим может практически оцениваться как установившийся; в переходных режимах отклонения существенны.

Для режимов указанных видов устанавливаются и более мелкие градации. Так, говоря о режиме того или иного вида, обычно имеют в виду состояние системы на некотором интервале времени. При этом указывают значение или другие признаки этого интервала (например, режим «... после отключения короткого замыкания», «... до срабатывания релейной защиты от повышения напряжения» и т. п.).

Любые переходные режимы возникают в результате изменения параметров системы, вызванных какими-либо причинами. Эти причины, называемые возму-

щающими воздействиями, приводят к появлению начальных отклонений параметров режима — возмущений режима.

Процессы. Режим системы не является чем-то единым, он состоит из множества различных процессов, схематически показанных на рис. 1.4. Под процессом вообще понимается последовательная смена каких-либо явлений. В электрических системах и их элементах таких процессов, составляющих

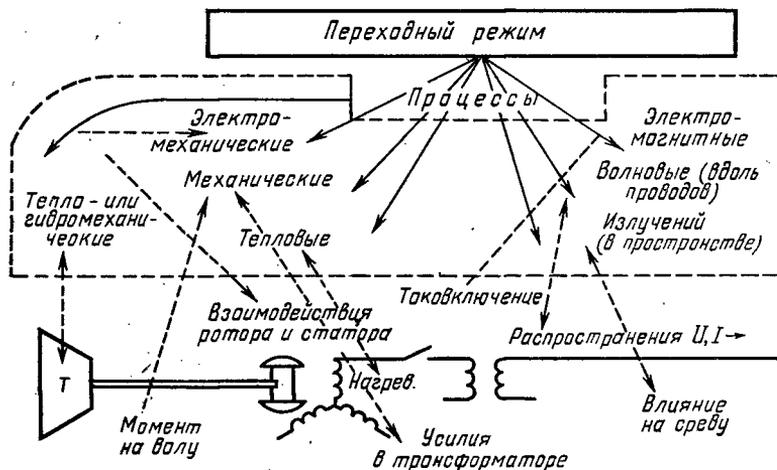


Рис. 1.4. Переходный режим блока «генератор — трансформатор — линия» при включении его в работу и процессы, составляющие этот режим

любой режим, огромное количество (рис. 1.4). Рассматриваемые здесь электро-механические процессы — это последовательное изменение электромагнитных явлений в электрических цепях при одновременном изменении механических явлений во вращающихся машинах.

Выделение только части процессов (в данном случае электро-механических) не случайно. При решении любых инженерных задач из многообразия процессов выделяют только те, которые непосредственно относятся к изучаемому вопросу. В данной дисциплине при рассмотрении переходных режимов внимание сосредоточивается главным образом на нормальных и аварийных переходных электро-механических процессах, а поэтому в название дисциплины входит термин «процессы», а не «режимы».

§ 1.3. ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

При переходах системы от одного установившегося режима (состояния равновесия) к другому происходит изменение количества той энергии, которая была связана с электрической или электро-механической цепью в исходном режиме. Это явление, единое по своей природе, при анализе принимается состоящим из ряда процессов, каждый из которых отражает изменение определенной группы параметров режима. Выделенная группа параметров режима, характеризующая

данный процесс, называется *параметрами процесса*. При более строгом подходе переходные процессы надо было бы рассматривать одновременно во времени и пространстве (например, появление тока при коротком замыкании и распространение электромагнитных волн в пространство вдоль воздушных линий, кабелей, обмоток машин и трансформаторов). Однако решение задачи можно упростить, учитывая только наиболее существенные для конкретной задачи факторы. Такое упрощение принято в настоящей дисциплине, где рассмотрение переходных процессов ведется только во времени, но не в пространстве. Переходные процессы при этом, так же как и режимы, различаются по ряду признаков:

— по условиям протекания; так, в нормальных переходных режимах можно судить о нормальных переходных процессах, в аварийных режимах — об аварийных переходных процессах. Такое деление несколько условно, так как физическая природа процесса не зависит от того, является он нормальным или аварийным;

— по причинам возникновения — по видам возмущающих воздействий и значениям возмущений. Под возмущением при этом понимаются отклонения параметров режима, происходящие в начале переходного процесса в связи с появлением новых, т. е. не проявившихся ранее, факторов, изменяющих (возмущающих) режим. Эти факторы, являющиеся причиной возмущений и называемые возмущающими воздействиями и т. д. При этом можно рассматривать реальные физические причины переходного процесса или независимо от физических причин вводить в расчет некоторые пробные отклонения (большие или малые) параметров режима, на какое-то время изменяющие исходный режим;

— по допущениям, сделанным при составлении дифференциальных уравнений, т. е. по полноте математического описания;

— по скорости протекания процессов в системе, причем следует иметь в виду, что переходный процесс, начавшийся в момент возмущения режима, в линейной системе теоретически длится бесконечно долго. Практически считают, что процесс закончился, если параметр, характеризующий его изменение, отличается от теоретического установившегося значения на некоторое конечное значение, зависящее от конкретных условий;

— по структуре исследуемой системы, которая может быть или простой, содержащей радиальные передачи, или сложной, состоящей из ряда параллельных контуров;

— по допущениям, сделанным при математическом описании; эта градация переходных процессов особенно разнообразна, поэтому обычно приходится ограничиваться только некоторыми наиболее существенными признаками.

При исследованиях переходных процессов часто вводится *линеаризация* — упрощение реальной нелинейной системы, при котором имеющиеся в ней нелинейности при исследовании переходных процессов не учитываются. Нелинейные параметры режима принимаются постоянными или представляются линейными зависимостями.

Квазипереходные процессы. Приставка «квази», означающая «как бы», указывает на то, что при рассмотрении переходных процессов часть их параметров в течение всего процесса или отрезка его Δt вопреки реальности принята постоянной (E'_0 на рис. 1.5) или изменяющейся по заранее заданному закону, на-

пример экспоненциальному (E_q на рис. 1.5); иногда часть параметров процесса может совсем не учитываться. Непрерывное изменение параметра процесса иногда заменяется ступенчатым — дискретным (см. штриховую линию). Разумеется, эти допущения справедливы, если показано, что они практически оправданы в данной задаче.

Полное и упрощенное описание. Если математическое описание изучаемых процессов учитывает все *основные в данной постановке задачи* составляющие процесса, то соответствующие уравнения называются *полными*. Если же часть влияющих, но в данной задаче менее существенных составляющих процесса и соответственно часть его параметров не учтена или учтена неполно и с заведомыми искажениями, допустимыми в данном исследовании, то уравнения называются *упрощенными*.

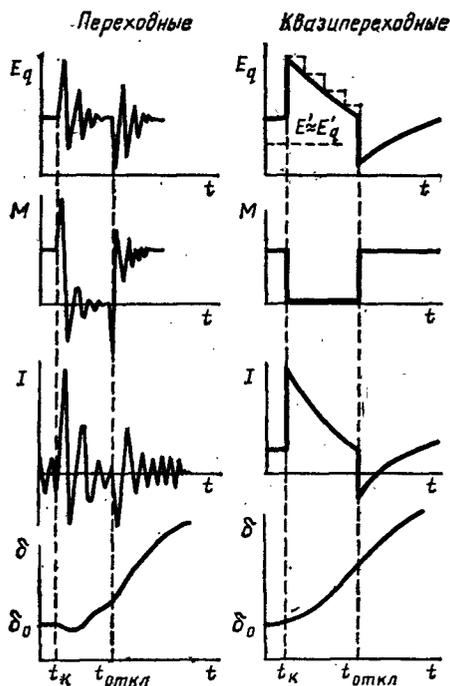


Рис. 1.5. Представление реального переходного процесса квазипереходным на примере трехфазного короткого замыкания и его последующего отключения:

I — ток в статоре генератора; δ — угол поворота генератора; M_T — момент турбины; E_q — э. д. с. генератора, являющаяся функцией тока возбуждения; E'_q — э. д. с. за переходным сопротивлением

Рассмотрим подробнее нормальные переходные процессы. Такие процессы сопровождают текущую эксплуатацию системы. Они связаны в основном с изменениями нагрузки, а также с реакцией на них регулирующих устройств. Эти процессы возникают при обычных коммутационных операциях: включении и отключении генераторов, трансформаторов и отдельных линий электропередач; нормальных эксплуатационных изменениях схемы коммутации системы; включении и отключении отдельных генераторов и нагрузок или изменении их мощности.

При нормальной работе системы всегда имеются некоторые малые возмущающие воздействия, вызывающие малые возмущения режима, например изменения нагрузки. Следовательно, происходят непрерывно и соответствующие действия регулирующих устройств. Это означает, что строго неизменного режима в системе не существует и установившийся режим представляет собой ряд переходных процессов, вызванных малыми возмущениями. При этом предполагают, что отклонения параметров режима, связанные с возмущениями, происходят около некоторого условно принятого исходного равновесного состояния.

Отклонения должны быть более или менее (в зависимости от конкретных требований) постоянными. Разумеется, что эти малые возмущения не должны вызывать нарушения устойчивости режима, не допуская прогрессивно возрастающего изменения (включая и амплитуду колебаний) параметров режима. Система должна быть устойчива при малых возмущениях, иначе говоря, она должна обладать статической устойчивостью.

Статическая устойчивость — это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим, весьма близкий к исходному (если возмущающее воздействие не снято).

Нормальные переходные процессы возникают и при больших возмущениях в виде резких и существенных изменений режима системы. Их причиной может быть изменение схемы соединения системы, появляющееся, например, при отключении агрегатов или линий электропередачи, несущих значительные нагрузки; при нормальном включении или отключении линий с большой зарядной мощностью; при включении генераторов методом самосинхронизации и т. д. При этом появляются такие значительные отклонения параметров режима от их исходного состояния, что учет наиболее существенных нелинейных зависимостей [например, $P = f(\delta)$] становится в большинстве случаев обязательным.

Аварийные переходные процессы, вызванные короткими замыканиями и последующими отключениями аварийных участков, а в некоторых случаях их повторными включениями, обязательно требуют при анализе учета нелинейностей. По отношению к большим возмущениям вводится понятие динамической устойчивости системы.

Динамическая устойчивость — это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние или состояние, практически близкое к исходному (допустимому по условиям эксплуатации системы). Если после большого возмущения синхронная работа системы сначала нарушается, а затем после некоторого, допустимого по условиям эксплуатации асинхронного хода восстанавливается, то считается, что система обладает *результатирующей устойчивостью*.

Этот вид устойчивости иногда считают разновидностью динамической устойчивости, различая синхронную динамическую устойчивость и динамическую устойчивость (результатирующую).

Иногда в зарубежной (особенно американской) литературе различают *переходную устойчивость* (Transient Stability), определяемую при рассмотрении процесса на интервале нескольких секунд, и *динамическую устойчивость* (Dynamic Stability), связанную с процессами, исследование которых ведется на протяжении нескольких минут. В этом случае требуется учет динамических характеристик таких элементов системы, как паровые котлы, атомные реакторы, напорные трубопроводы гидростанций, динамические характеристики релейной защиты и устройств системного регулирования, например регулирования частоты и мощности.

В отечественной литературе обычно пользуются одним термином «динамическая устойчивость», а при рассмотрении ее на большом интервале времени добавляют: «при длительных переходных процессах».

Введенные выше понятия «малых» и «больших» возмущений условны. *Малое возмущение* в этом понимании — это возмущение, влияние которого на характер поведения системы проявляется практически независимо от места появления возмущающего воздействия и его значения. В связи с этим система в диапазоне режимов, близких к исходному, может рассматриваться как линейная. *Большое возмущение* — это возмущение, влияние которого на характер поведения системы существенно зависит от времени существования, значения и места появления возмущающего воздействия, в связи с чем система во всем диапазоне исследования должна рассматриваться как нелинейная.

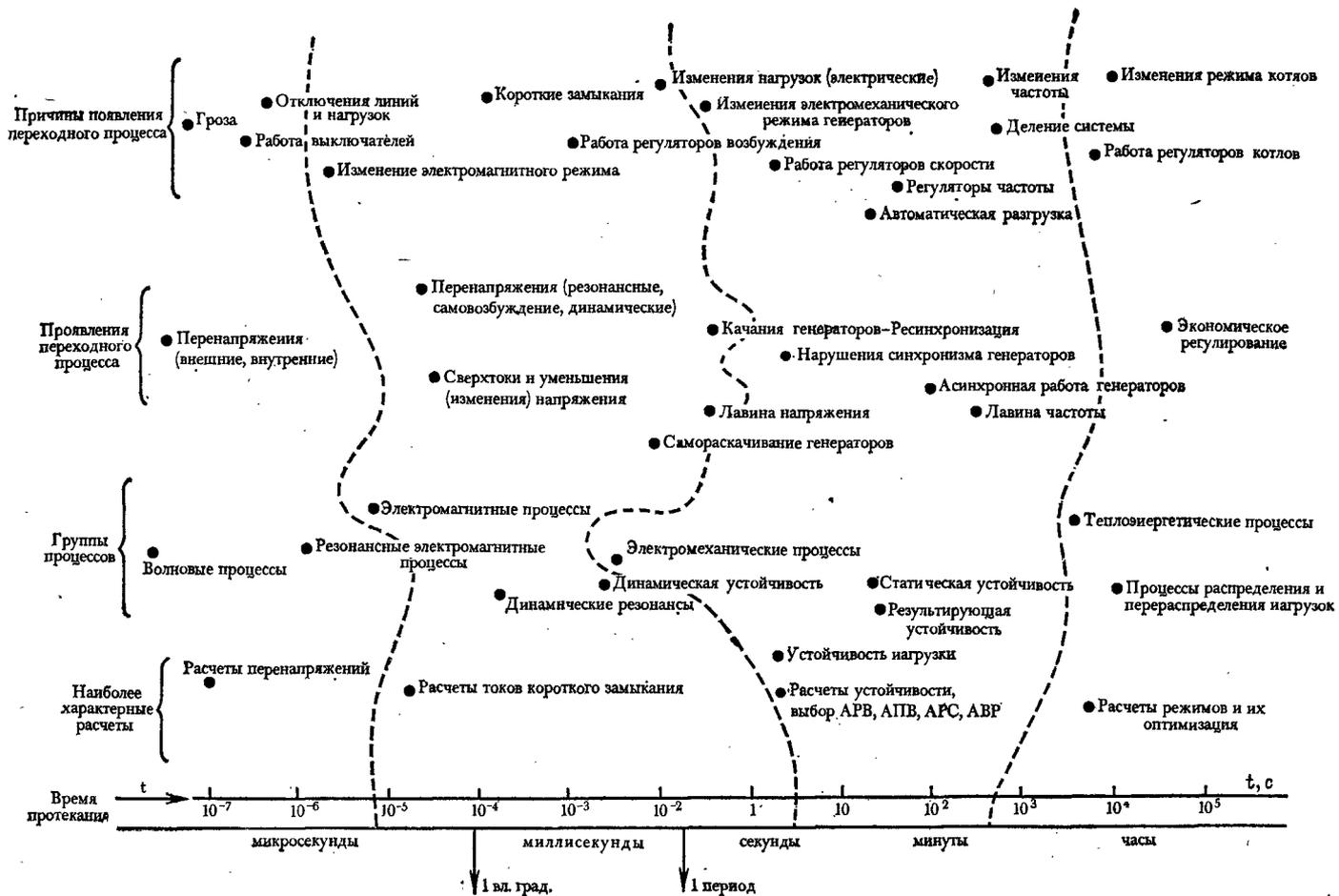


Рис. 1.6. Переходные процессы в электроэнергетической системе и группы их

Все процессы, которые происходят или могут происходить в электрической системе, можно разделить по времени их протекания (от микросекунд до десятков часов), по причинам их появления и способам исследования на четыре большие группы. Учитывая, что границы между этими группами несколько условны, их можно представить графически так, как это сделано на рис. 1.6. Настоящая дисциплина рассматривает в основном процессы третьей группы, хотя в ряде случаев изучаются и проблемы, связанные с влиянием процессов в смежных группах.

§ 1.4. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В ОБУЧЕНИИ. ПРЕДМЕТ ИЗУЧЕНИЯ

Изучение переходных процессов основывается на знаниях, полученных в предшествовавших общеобразовательных дисциплинах, — математике, теоретической механике, основах электротехники, — и в ряде специальных дисциплин, посвященных изучению режимов отдельных элементов системы — электрических машин и аппаратов, электрических сетей, переходных электромагнитных процессов.

Для настоящей дисциплины существенно прежде всего то, что отдельные процессы, происходящие в элементах электрических систем, изучаются в их взаимосвязи. Здесь при постановке научных проблем и практических задач реализуется *системный подход*, т. е. учитывается множество связей между элементами системы, составляющими в совокупности подсистемы, и отдельными процессами, в них происходящими. Прямые и обратные связи между подсистемами и всей системой в принятой методике изучения получают отражение как единое целое. Можно, следовательно, сказать, что выявлению особенностей и качественно новых свойств, определяющихся при количественном изменении (объединении большого числа отдельных элементов в единую электрическую систему), и обучению пониманию возникающих явлений посвящена данная дисциплина.

Однако только понимания инженеру еще недостаточно; он должен предвидеть протекание процессов и управлять ими. Для этого надо уметь рассчитывать процессы, предсказывая по изменениям параметров системы количественные изменения ее режима; устанавливать, когда и какие воздействия должны получать элементы системы от регулирующих устройств, для того чтобы переходный процесс приобретал желательный характер.

Понимание и умение предполагает наличие определенных знаний.

Необходимо знать исходные математические выражения, описывающие явления; главные расчетные формулы; терминологию; важнейшие понятия.

Необходимо знать основные параметры электрических систем и их элементов, значения физических величин, участвующих в процессах. Хотя главная цель обучения — это выработка понимания физики явлений, от учащегося требуется все же запоминание определенного, небольшого по объему фактического материала в виде формул и числовых характеристик.

Изучаемая дисциплина предшествует по времени и содержанию рассмотрению электрических систем, дальних электропередач, автоматизации и защиты электрических систем и диспетчерского управления. Она является основой для последующего изучения методов и приемов, применяемых при практических

расчетах переходных процессов. *Расчеты эти в дальнейшем полностью формализуются*, в первую очередь за счет матричного представления всех вычислительных операций. Это обстоятельство и переход к математическим моделям, содержащим программы для расчетов, приводят к тому, что физическая сторона рассчитываемых процессов неизбежно скрывается. Между тем именно роль физико-технических представлений особенно велика в современных условиях, когда управление переходными процессами средствами автоматики, кибернетики и вычислительной техники становится главной задачей специалиста, проектирующего и эксплуатирующего электроэнергетические системы. Поэтому при изучении дисциплины особое внимание надо уделить физической стороне проблемы, имея в виду, что применение вычислительной техники будет осваиваться позднее.

Следовательно, предметом изучения являются переходные взаимосвязанные электромагнитные и механические — *электромеханические* — процессы в электрических системах и установившиеся режимы, предшествовавшие переходным процессам и заканчивающие их.

Контрольные вопросы

- 1.1. Что такое электрическая система и из каких элементов она состоит?
- 1.2. Дайте определение режимов и процессов. Назовите различные виды режимов и процессов в электрических системах.
- 1.3. Что понимается под статической, динамической и результирующей устойчивостью системы?
- 1.4. Предмет изучения и цели дисциплины «Переходные процессы».
- 1.5. Определите нелинейность и ее виды в электрической системе.
- 1.6. Что называется параметрами режима, процесса и параметрами систем?
- 1.7. По каким признакам различаются переходные процессы?
- 1.8. Что понимается под квазипереходными процессами?
- 1.9. Каковы причины и последствия системных аварий?
- 1.10. В чем заключается системный подход к изучению переходных процессов?

Темы рефератов

1. Системные аварии, особенности их протекания и пути предотвращения тяжелых последствий.
2. Разделение переходных процессов в электрических системах на группы и особенности процессов, изучаемых в данной дисциплине.

**ОСНОВЫ РАСЧЕТОВ УСТАНОВИВШИХСЯ ИСХОДНЫХ
И КВАЗИПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ**

§ 2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачи, связанные с изучением переходных электромеханических режимов и составляющих их процессов, сводятся в основном к определению изменений токов, мощностей и перемещений роторов во времени. Они требуют прежде всего получения характеристик нормальных режимов. Без знания исходного нормального режима, при котором начинаются переходные процессы, и установившегося послеаварийного режима, их заканчивающего, нельзя иметь достаточно полного представления о работе изучаемой системы и ее переходных режимах.

Режим (рис. 2.1) характеризуют параметры системы Π_c ($\Pi_c = x_d, x_d', r$ и т. д.) и параметры процессов $\Pi_{пр}$ ($\Pi_{пр} = U, i, P, Q$ и т. д.). Параметры системы как совокупности элементов, обладающих определенными физическими свойствами, могут рассматриваться:

— как неизменяющиеся ($\Pi_c = \text{const}$) в условиях исследуемого процесса — в этом случае их называют линейными;

— как нелинейные, если они зависят от параметров процессов $\Pi_c = f(\Pi_{пр 1}, \dots, \Pi_{пр n})$;

— могут иметь вероятностно-детерминированный характер, т. е. могут не быть постоянными и изменяться в зависимости от времени или какого-либо параметра процесса по определенному (известному) закону;

— могут иметь некоторые случайные изменения, не отвечающие какому-либо вероятностному закону. В этом случае говорят о системе параметров, заданных с разбросом, иногда называемых *размытыми* или *неопределенными*.

При дальнейшем изложении везде, где это не будет специально оговорено, параметры системы во время исследуемого процесса будут приниматься постоянными, т. е. система в этом смысле будет *линейной*. Все установившиеся режимы и переходные процессы описываются системами уравнений *алгебраических* и *дифференциальных*. Системы алгебраических уравнений вида

$$\Phi(\Pi_{пр}, \dots, \Pi_c, \dots) = 0 \quad (2.1)$$

связывают между собой параметры системы и параметры ее установившегося (квазиустановившегося) режима.

Для изучения переходных процессов могут быть составлены системы дифференциальных уравнений первого порядка вида

$$d\Pi_{пр}/dt = \psi(\Pi_{пр}, \dots, \Pi_c). \quad (2.2)$$

При некоторых допущениях, предусматривающих отказ от учета части электромагнитных переходных процессов на участке схемы (рис. 2.1), сеть, содержащая элементы R, L, C , будет характеризоваться только алгебраическими уравнениями вида (2.1). Для части схемы, отражающей вращающиеся электриче-

ские цепи (генераторы, двигатели), будут справедливы дифференциальные уравнения вида (2.2).

Уравнения (2.2), записанные для вращающихся электрических машин, и уравнения сети (2.1) можно объединить в общую систему, позволяющую получить

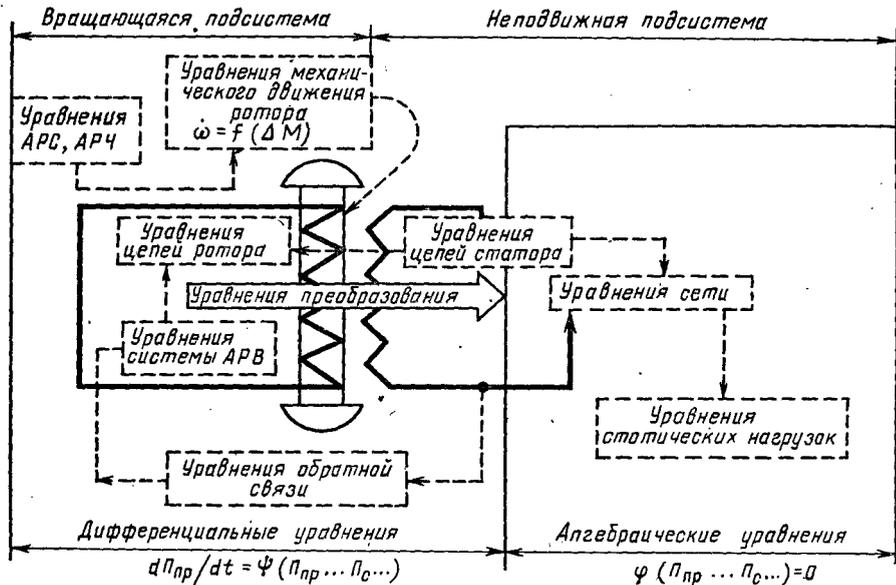


Рис. 2.1. Структура электроэнергетической системы и ее математического описания

решение поставленной выше задачи — нахождение параметров процессов $\Pi_{пр} = f(t)$. Для этого надо переписать уравнения для вращающихся машин, связав их с неподвижными цепями сети, осуществив «приведение параметров» или «преобразование координат». Процедура такого пересчета производится с помощью математических соотношений, обычно называемых уравнениями связи или матрицами преобразования (рис. 2.1).

§ 2.2. ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ. ПРИМЕНЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ И ВЗАИМНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ

После указанных преобразований и «приведения» исследуемая система может быть представлена для изучения установившегося или квазипереходного режима в ином виде (рис. 2.2). Теперь систему можно рассматривать как n -полюсник, содержащий линейную пассивную электрическую схему, у которой в точках $j = 1, 2, \dots, n$ за сопротивлениями Z_j подключены электродвижущие силы E_j (э. д. с.), представляющие электрические машины 1, 2, ..., n .

Вместо какого-либо генератора в схему может быть введена нагрузка. Тогда его э. д. с. станет равной нулю, а сопротивление или будет постоянным ($Z_n = \text{const}$), или будет функцией режима системы [$Z_n = \varphi(U_j, f)$]. В этом случае схема становится **н е л и н е й н о й**. Токи, а следовательно, и мощности в любой

ветви схемы могут быть определены через матрицу проводимостей n -полюсника Y (рис. 2.2). Ток со стороны генератора будет определяться соотношением $\dot{I} = Y \cdot \dot{E}$. Если э. д. с. \dot{E} в данной схеме известны, то для определения токов и мощностей надо найти проводимости Y . Матрица Y имеет диагональные Y_{nn} и недиагональные Y_{jk} элементы.

Известно*, что $Y_{nn} = y_{nn} \leq \psi_{nn} = g_{nn} + jb_{nn}$ является собственной проводимостью, т. е. комплексной величиной (в общем случае), определяющей модуль и фазу тока в какой-либо ветви n схемы от действия э. д. с., приложенной в этой ветви при отсутствии э. д. с. во всех остальных ветвях. Величина $Y_{nk} = y_{nk} \leq \psi_{nk}$ является взаимной проводимостью между узлами n и k . Это комплексная величина, определяющая модуль и фазу тока в какой-либо ветви n от действия э. д. с., приложенной в другой ветви k , при отсутствии э. д. с. во всех остальных ветвях. Любую из этих проводимостей можно представить как

$$Y = g \mp jb = ye^{\mp j\psi} = ye^{\mp j(90-\alpha)} = \mp jye^{\pm i\alpha},$$

где

$$\psi = \arctg(b/g); \alpha = 90 - \psi; Y = \mp jye^{\pm i\alpha} = y(\sin \alpha \mp j \cos \alpha) = y(r/z \mp jx/z);$$

здесь верхний знак отвечает индуктивной проводимости, а нижний — емкостной (рис. 2.3).

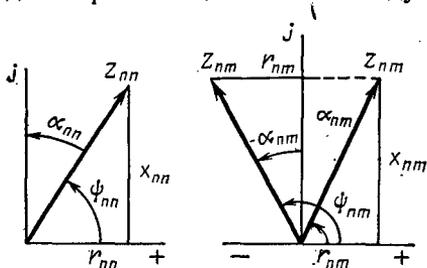


Рис. 2.3. Структура собственных z_{nn} и взаимных z_{nm} сопротивлений

ный коэффициент пропорциональности между током в одной ветви схемы и напряжением в другой ветви. Поэтому она может иметь отрицательную вещест-

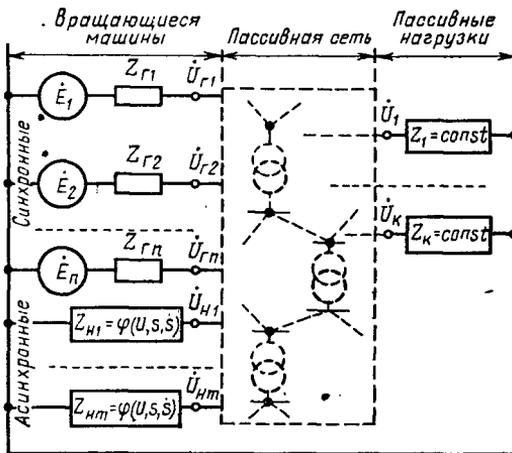


Рис. 2.2. Исходная расчетная схема электроэнергетической системы

При определении взаимной проводимости часто получают отрицательные значения ее вещественной составляющей, т. е. $-g$, и соответственно для угла $\alpha = \arctg(g/b)$. Это может вызвать недоумение, так как у какого-либо реального элемента отрицательная составляющая проводимости может быть только в активной схеме (при наличии в этом элементе источника энергии). Однако взаимная проводимость характеризует не реальный элемент, а представляет собой некоторый комплекс-

* См.: Электрические системы: Математические задачи электроэнергетики/Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1981; Электрические системы: Электрические сети/Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1971.

венную составляющую и в пассивных схемах. У собственных проводимосте Y_{nn} , Y_{kk} , определяемых как отношения тока к напряжению в данной точке схемы, активные составляющие не могут быть отрицательными, если отдельные ветви схемы не содержат отрицательных активных сопротивлений, т. е. некоторых источников мощности, наличие которых в данном случае из рассмотрения исключается. Таким образом, углы α_{nn} и α_{kk} собственных проводимостей и их вещественные составляющие всегда положительны; угол α_{nm} может быть как положительным, так и отрицательным.

Величины, обратные собственным проводимостям, называются *собственными сопротивлениями*, а величины, обратные взаимным проводимостям, — *взаимными сопротивлениями*.

Для того чтобы найти активные и реактивные мощности, токи и напряжения в любом элементе системы при установившемся режиме или очень медленном его изменении применяют известный способ наложения (суперпозиции). Для этого необходимо, чтобы все синхронные машины были представлены некоторыми постоянными сопротивлениями с приложенными за ними э. д. с., а асинхронные двигатели нагрузки — пассивными элементами. Рассматриваемая система при этом должна быть или линейной, или посредством каких-либо преобразований из нее должны быть выделены линейные части. После преобразований схема системы может быть положена в основу расчетов установившихся или квазипереходных режимов. Она становится *схемой замещения*, объединяющей генераторы (источники напряжения в виде э. д. с. \dot{E} и сопротивления Z_r), нагрузки и элементы сети (см. рис. 2.2.).

Электрическая сеть представлена в схеме замещения линейной пассивной электрической цепью, режим которой может быть описан узловыми уравнениями, связывающими напряжения в узловых точках этой сети с токами генераторов и нагрузок. Для сети, содержащей n узлов, эти уравнения в матричной форме записи имеют вид

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \dots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

где за положительное принято направление тока в сеть.

Элементы матрицы узловых проводимостей сети Y_0 легко определяются по схеме замещения сети*:

- диагональный элемент Y_{ii} ($i = 1, \dots, n$), называемый *собственной проводимостью узла i* , равен сумме проводимостей ветвей сети, связанных с узлом i ;
- недиагональный элемент Y_{ij} ($i, j = 1, \dots, n; i \neq j$), называемый *взаимной проводимостью узлов i и j* , равен проводимости ветви, соединяющей эти узлы**.

* См.: Электрические системы: Математические задачи электроэнергетики/Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1981.

** В задачах расчета установившихся режимов электрических систем используется также форма записи матрицы Y_0 , когда недиагональные элементы в (2.3) имеют знак плюс; в этом случае они определяются как проводимости ветвей схемы замещения, взятые с обратным знаком.

Рассмотрим линейную схему замещения электрической системы при представлении нагрузок постоянными сопротивлениями $Z_R = \text{const}$. Полагая, что к первым m узлам сети ($i = 1, \dots, m < n$) подключены генераторы, а к остальным узлам ($j = m + 1, \dots, n$) — нагрузки, запишем уравнения нагрузок с учетом положительных направлений токов согласно (2.3):

$$\dot{I}_j = - (1/Z_{Hj}) \dot{U}_j = - Y_{Hj} \dot{U}_j, \quad j = m + 1, \dots, n. \quad (2.4)$$

Объединив (2.3) и (2.4), получаем

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \dots & -Y_{1(m)} & -Y_{1(m+1)} & \dots & -Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -Y_{m1} \dots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \dots & -Y_{mn} \\ \hline -Y_{(m+1)1} \dots & -Y_{(m+1)m} & Y_{(m+1)(m+1)} & \dots & -Y_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -Y_{n1} & \dots & -Y_{n(m+1)} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \\ \hline \dot{U}_{m+1} \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \\ \hline -Y_{H(m+1)} \dot{U}_{(m+1)} \\ \vdots \\ -Y_{Hn} \dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

или

$$\begin{bmatrix} Y_{11} \dots & -Y_{1m} & -Y_{1(m+1)} & \dots & -Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -Y_{m1} \dots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \dots & -Y_{mn} \\ \hline -Y_{(m+1)1} \dots & -Y_{(m+1)m} & [Y_{(m+1)(m+1)} + Y_{H(m+1)}] & \dots & -Y_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -Y_{n1} \dots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \dots & [Y_{nn} + Y_{Hn}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \\ \hline \dot{U}_{(m+1)} \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \\ \hline 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Приведение уравнений (2.3) к виду (2.6) соответствует введению постоянных сопротивлений нагрузок в схему замещения сети. Это привело к изменению собственных проводимостей нагрузочных узлов Y_{jj} ($j = m + 1, \dots, n$) и исключению токов нагрузок как внешних переменных сети. В соответствии с указанным разделением (2.6) на блоки, эти уравнения

можно записать в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} Y_{ГГ} & Y_{ГН} \\ Y_{НГ} & Y_{НН} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_Г \\ \dot{U}_Н \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_Г \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Порядок системы уравнений (2.7) равен n , но его можно понизить до $m < n$, исключив из состава переменных напряжения нагрузок.

Способ понижения порядка используется в том случае, когда в задачу расчета режима не входит определение $\dot{U}_Н$. Раскроем (2.7):

$$Y_{ГГ} \dot{U}_Г + Y_{ГН} \dot{U}_Н = \dot{I}_Г; \quad (2.7a)$$

$$Y_{НГ} \dot{U}_Г + Y_{НН} \dot{U}_Н = 0. \quad (2.7b)$$

Из (2.7b) получим

$$\dot{U}_Н = -Y_{НН}^{-1} Y_{НГ} \dot{U}_Г.$$

Подставив последнее выражение в (2.7a), получаем

$$(Y_{ГГ} - Y_{ГН} Y_{НН}^{-1} Y_{НГ}) \dot{U}_Г = \dot{I}_Г,$$

или

$$Y_C \dot{U}_Г = \dot{I}_Г, \quad (2.8)$$

где

$$Y_C = Y_{ГГ} - Y_{ГН} Y_{НН}^{-1} Y_{НГ}.$$

Элементы матрицы проводимостей в (2.8) в отличие от (2.3) требуют для своего определения сложных вычислений, и только диагональные элементы этой матрицы имеют ясную физическую трактовку. Действительно, рассмотрим произвольное (i -е) уравнение системы (2.8):

$$-Y_{ci1} \dot{U}_{Г1} - \dots - Y_{ci(i-1)} \dot{U}_{Г(i-1)} + Y_{cii} \dot{U}_{Гi} - Y_{ci(i+1)} \dot{U}_{Г(i+1)} - \dots - Y_{cim} \dot{U}_{Гm} = \dot{I}_{Гi}. \quad (2.9)$$

Собственная проводимость узла Y_{cii} может быть определена как отношение тока к напряжению узла i при равенстве нулю напряжений всех остальных узлов (т. е. при замыкании этих узлов накоротко), иными словами, Y_{cii} — входная проводимость схемы относительно узла i . Так как в рассматриваемой пассивной цепи активные сопротивления ветвей положительны, то и активная составляющая Y_{cii} будет положительна, а знак реактивной составляющей будет определяться соотношением индуктивных и емкостных сопротивлений ветвей схемы.

Взаимная проводимость узлов Y_{cij} ($j \neq i$) может быть определена как взятое с обратным знаком отношение тока в узле i к напряжению в узле j при равенстве нулю напряжений всех остальных узлов, т. е. является коэффициентом пропорциональности между током в одном узле схемы и напряжением в другом и физического аналога, в отличие от собственной проводимости, не имеет. В связи с этим знак активной составляющей взаимной проводимости может оказаться отрицательным для пассивной схемы, активные сопротивления ветвей которой положительны.

Для линейной схемы замещения электрической цепи и представления нагрузок постоянными сопротивлениями схема замещения электрической системы с учетом э. д. с. и сопротивлений генераторов также будет линейной. Уравнения узловых напряжений для электрической системы можно получить, дополнив (2.8) уравнениями

$$\dot{E}_{Гi} - \dot{U}_{Гi} = Z_{Гi} \dot{I}_{Гi}; \quad i = 1, \dots, m,$$

или в матричной форме

$$\dot{E}_G - \dot{U}_G = Z_G \dot{I}_G, \quad (2.10)$$

где \dot{E}_G , \dot{U}_G , \dot{I}_G — векторы э. д. с., напряжений и токов генераторов; Z_G — диагональная матрица сопротивлений генераторов.

Обозначив $Z_G^{-1} = Y_G$, запишем (2.10) в виде

$$Y_G \dot{E}_G - Y_G \dot{U}_G = \dot{I}_G. \quad (2.11)$$

Подставив \dot{I}_G из (2.11) в (2.8), получим

$$-Y_G \dot{E}_G + (Y_C + Y_G) \dot{U}_G = 0. \quad (2.12)$$

Объединив (2.11) и (2.12) в матричное уравнение, запишем систему узловых уравнений электрической системы в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} Y_G & -Y_G \\ -Y_G & Y_C + Y_G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_G \\ \dot{U}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_G \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Порядок системы уравнений (2.13) равен удвоенному числу генераторов, т. е. $2m$. Если в задачу расчета режима не входит определение \dot{U}_G , то порядок (2.13) можно понизить до m аналогично тому, как это делалось при получении (2.8). Исключив \dot{U}_G из (2.13), получим систему уравнений порядка m :

$$Y_0 \dot{E}_G = \dot{I}_G, \quad (2.14)$$

где

$$Y_0 = Y_G - Y_G (Y_C + Y_G)^{-1} Y_G.$$

Таким образом, представление генераторов и нагрузок в схеме замещения электрической системы в виде элементов электрической цепи, содержащих постоянные сопротивления, позволяет понижать порядок системы узловых уравнений путем исключения пассивных узлов.

Собственные и взаимные проводимости, т. е. элементы матрицы узловых проводимостей линейной электрической цепи, определяются через проводимости ветвей цепи, если узловые уравнения записаны для всех узлов [определение элементов матрицы Y_G в (2.3)]. При расчете этих проводимостей существенные трудности возникают, если из указанной полной системы узловых уравнений необходимо исключить уравнения пассивных узлов, т. е. узлов, к которым не подключены источники тока или э. д. с.

§ 2.3. РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ И ВЗАИМНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ И СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для линейной схемы расчет собственных и взаимных проводимостей и сопротивлений* может быть произведен четырьмя способами.

1. **Способ наложения.** Система может быть в этом случае представлена схемой, показанной на рис. 2.4, а. Заменяем рассмотрение этой схемы последовательным рассмотрением подсхем, показанных на рис. 2.4, б, в. Этим подсхем

* Эти сопротивления в данной дисциплине определяются как величины, обратные соответствующим проводимостям, и не имеют того значения, которое они имели в курсе теоретической электротехники.

должно быть столько, сколько в схеме (рис. 2.4, а) имеется ветвей, содержащих э. д. с. Ток в любой ветви будет

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{13} - \dot{I}_{1n} - \dots - \dot{I}_{1k},$$

где \dot{I}_{11} — собственный ток; $\dot{I}_{12}, \dot{I}_{13}, \dot{I}_{1n}, \dot{I}_{1k}$ — взаимные токи.

Под *собственным током* понимается составляющая тока в любой ветви, вызванная действием э. д. с., приложенной в данной ветви при отсутствии (равенстве нулю) э. д. с. в других ветвях. Под *взаимным током* понимается составляющая тока в какой-либо ветви, вызванная действием э. д. с. в другой ветви при равенстве нулю э. д. с. во всех остальных ветвях.

Очевидно, что

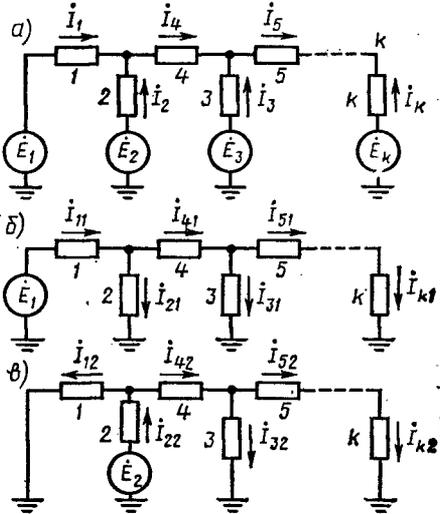


Рис. 2.4. Схема определения собственных и взаимных сопротивлений способом наложения:

а — исходный режим расчетной схемы; б — подсхема при действии э. д. с. E_1 ; в — подсхема при действии э. д. с. E_2

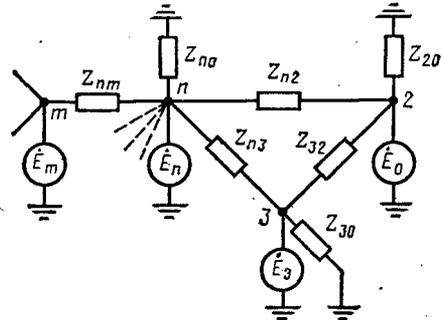


Рис. 2.5. Схема определения собственных и взаимных сопротивлений или проводимостей способом преобразования

$$\dot{I}_{nn} = \dot{E}_n Y_{nn}; \dot{I}_{nm} = \dot{E}_m Y_{nm},$$

где Y_{nn} — собственная проводимость, равная \dot{I}_{nn}/\dot{E}_n ; Y_{nm} — взаимная проводимость, равная \dot{I}_{nm}/\dot{E}_m .

2. **Способ преобразования.** Собственные и взаимные проводимости для любой схемы могут находиться путем преобразования. При этом любая схема приводится к виду схемы, показанной на рис. 2.5. Исходя из преобразованной схемы, легко найти взаимные и собственные проводимости:

$$Y_{n2} = 1/Z_{n2}; \quad Y_{n3} = 1/Z_{n3} \text{ и т. д.};$$

$$Y_{nn} = 1/Z_{n0} + 1/Z_{n2} + 1/Z_{n3} + \dots + 1/Z_{nm} \text{ и т. д.}$$

3. **Способ единичных токов.** Для определения Y_{kk} , т. е. собственной проводимости какой-либо ветви, начинающейся точкой k , и ее взаимной проводимости с точкой n ($n = 1, 2, 3$) поступают следующим образом. Предполагают, что и

ветви k (см. рис. 2.4, а) приложена некая расчетная э. д. с. ΔE_k , значения и фаза которой* приняты такими, что в ветви n от действия только этой э. д. с. (при равных нулю э. д. с. во всех остальных ветвях) протекает ток $I_{nk} = 1$. Зная ток в ветви n , находим, что падение напряжения в ней $\Delta U_n = I_{nk} Z_n = 1 \cdot Z_n$. Очевидно, что напряжение, приложенное в точке присоединения сопротивления Z_n , равно ΔU_n . Производя далее токораспределение, находим токи и напряжения во всех ветвях и в конечном счете ток I_{kk} и э. д. с. ΔE_k . При этом взаимная проводимость $Y_{nk} = 1/\Delta E_k$, а собственная проводимость $Y_{kk} = I_{kk}/\Delta E_k$.

4. Способ матричного определения собственных и взаимных проводимостей. Это определение может быть проведено согласно рекомендациям, сделанным в § 2.2. В этом случае** для определения собственных и взаимных проводимостей составляются специальные программы и вычисления обычно проводятся на ЦВМ. Иногда рекомендуется*** собственную проводимость какого-либо узла k (точки) сложной схемы определять делением определителя M матрицы узловых проводимостей (полинома проводимостей ветвей деревьев) на полином M_{k0} проводимостей двух соответствующих деревьев (для узлов k и 0) или

$$Y_{k0} = Y_{kk} = M/M_{k0}.$$

Взаимная проводимость между узлами n , k будет выражаться как

$$Y_{nk} = M/[M_{kn, 0m} - M_{km, 0n}],$$

где для определения $M_{kn, 0m}$ и $M_{km, 0n}$ необходимо выявить пути между узлами kn и $0m$, а затем между узлами kt и $0n$, где k, n, t — номера узлов****.

Способ матричного определения оправдан только при сложных схемах. С помощью ЦВМ такие расчеты без особых затруднений позволяют находить проводимости для сетей, имеющих до 3000 узлов и более. Однако при проведении расчетов на ЦВМ обычно нет надобности отдельно вычислять собственные и взаимные проводимости, с тем чтобы далее находить режим, определяя токи, потоки мощностей, напряжения в узлах и т. д. Все эти операции (или та часть из них, которая необходима для конкретных целей исследования) совмещается в одной программе***** или программе с подпрограммами.

§ 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ

В расчетах установившихся режимов и квазипереходных процессов электрических систем генераторы обычно представляют схемой замещения в виде э. д. с. E_q за сопротивлением x_q . Для неявнополюсных машин ($x_d = x_q$) в схему замещения будет входить э. д. с. E_q , пропорциональная току возбуждения*****. В общем случае эти э. д. с. изменяются с изменением режима. В частных случаях э. д. с. в схеме замещения генератора может быть постоянной. Это относится, например, к установившимся режимам нерегулируемого неявнополюсного генера-

* Эта э. д. с. отсутствует в реальной схеме и является расчетной, «воображаемой».

** См. также: Электрические системы: Электрические сети/Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1971, § 5.9.

*** См.: Сенди К. Современные методы анализа электрических систем. — М.: Энергия, 1971, § 4.4.

**** См.: Андерсон П., Фуад Л. Управление энергосистемами и устойчивость/Пер. с англ. — М.: Энергия, 1980.

***** См.: Брамеллер А., Аллан Р., Хэмэм Я. Слабозаполненные матрицы/Пер. с англ. — М.: Энергия, 1979.

***** Схемы замещения и э. д. с. генератора рассматривались в дисциплинах «Электрические машины» и «Электромагнитные переходные процессы»; см. также § 2.5, рис. 2.7 и гл. 6.

тора ($E_q = \text{const}$). Кроме того, при изучении переходных процессов, возникающих во время каких-либо возмущений в системе (см. гл. 1), изменяющуюся э. д. с. E_q генератора, отвечающую изменяющемуся току возбуждения, можно, хотя и очень приближенно*, заменить э. д. с. $E' = \text{const}$, приложенной за сопротивлением x' .

Таким образом, схема замещения генератора включает постоянную или переменную э. д. с., приложенную за тем или иным сопротивлением. Для системы, содержащей m генераторов, ток в каждом из них может быть определен в соответствии с (2.14) по выражению

$$I_i = -Y_{i1}\dot{E}_1 - \dots - Y_{i(i-1)}\dot{E}_{i-1} + Y_{ii}\dot{E}_i - Y_{i(i+1)}\dot{E}_{i+1} - \dots - Y_{im}\dot{E}_m, \quad (2.15)$$

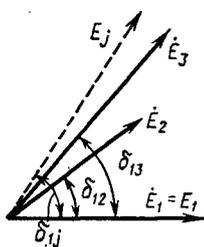


Рис. 2.6. Векторная диаграмма э. д. с. системы и ее представление на плоскости

или

$$I_i = \dot{E}_i Y_{ii} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \dot{E}_k Y_{ik}.$$

Представим входящие в (2.15) комплексные величины в полярной форме, выделив их модули и аргументы.

Э. д. с. генераторов могут быть записаны (рис. 2.6) как

$$\dot{E}_i = E_i e^{j\delta_i}.$$

Проводимости ветвей представлены в виде

$$Y = 1/Z = 1/(r + jx) = g - jb = -jye^{j\alpha},$$

где

$$g = \frac{r}{r^2 + x^2}; \quad b = \frac{x}{r^2 + x^2}; \quad \alpha = \arctg(r/x) = \arctg(g/b).$$

С учетом принятых обозначений (2.15) запишем как

$$I_i = -E_i e^{j\delta_i} j y_{ii} e^{j\alpha_{ii}} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m E_k e^{j\delta_k} j y_{ik} e^{j\alpha_{ik}}. \quad (2.16)$$

В расчетах удобно представлять выражение для I_i в виде двух составляющих одна из которых (q_i) направлена по E_i , а другая (d_i) отстает от E_i на 90° :

$$I_i = e^{j\delta_i} (I_{qi} - jI_{di}). \quad (2.17)$$

С учетом (2.15) выражения для составляющих тока примут вид

$$I_{qi} = E_i y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m E_k y_{ik} \sin (\delta_i - \delta_k - \alpha_{ik}); \quad (2.18)$$

* Подробнее об обоснованности такого допущения см. ниже.

$$I_{di} = E_i y_{ii} \cos \alpha_{ii} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m E_k y_{ik} \cos (\delta_i - \delta_k - \alpha_{ik}). \quad (2.19)$$

§ 2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ

Комплекс полной мощности \hat{S}_i , протекающей через какую-либо точку схемы, определяется как произведение комплекса э. д. с. или напряжения в данной точке на сопряженный комплекс тока*. Например, мощность, выдаваемая источником i ,

$$\hat{S}_i = \dot{E}_i \hat{I}_i.$$

Подставив в это выражение (2.17), получим

$$\hat{S}_i = E_i (I_{qi} + j I_{di}) = E_i I_{qi} + j E_i I_{di}.$$

Определив $\hat{S}_i = P_i + j Q_i$, можно записать:

$$P_i = E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m E_i E_k y_{ik} \sin (\delta_i - \delta_k - \alpha_{ik});$$

$$Q_i = E_i^2 y_{ii} \cos \alpha_{ii} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m E_i E_k y_{ik} \cos (\delta_i - \delta_k - \alpha_{ik}).$$

Для сокращения записи обычно используют обозначения взаимных углов $\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k$, тогда

$$P_i = E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m E_i E_k y_{ik} \sin (\delta_{ik} - \alpha_{ik}); \quad (2.20)$$

$$Q_i = E_i^2 y_{ii} \cos \alpha_{ii} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m E_i E_k y_{ik} \cos (\delta_{ik} - \alpha_{ik}). \quad (2.21)$$

Выражения (2.18) — (2.21) справедливы при представлении генераторов и синхронных двигателей, входящих в схему замещения системы э. д. с. $E = E_q, E', E''$ и E_Q (для явнополюсной машины). Эти э. д. с., показанные на векторной диаграмме (рис. 2.7), находятся по формуле

* Как известно, комплекс мощности можно получить и умножением комплекса тока на сопряженный комплекс напряжения, что приводит к изменению знака реактивной мощности.

$$E_i = \sqrt{\left(U_k + \frac{P_k r + Q_k x_i}{U_k}\right)^2 + \left(\frac{P_k x_i - Q_k r}{U_k}\right)^2}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{P_k x_i - Q_k r}{U_k^2 + P_k r + Q_k x_i} \quad (2.22)$$

Здесь U_k — напряжение узловой точки k системы, к которой подключен данный генератор; P_k, Q_k — мощности, поступающие к точке k от этого генератора.

В сопротивлениях (x, r) в записанных выше и ниже выражениях входят сопротивления как генератора, так и внешней цепи (от E до U). При определении э. д. с. E_i генератор вводится в x_i реактансом x_r , который имеет следующие значения:

E_i	E_q	E'_q	E''_q	E_Q
x_r	$x_d = x_q$	x'_d	x''_d	$x_q \neq x_d$

Вводя в расчет явнополюсной машины э. д. с. E_q , нельзя получить простую схему замещения*. (Ее не существует, так как $x_d \neq x_q$.) В этом случае внутренняя электромагнитная мощность генератора, подключенного к узловой точке с напряжением U_k , может быть определена как $P = E_q I_q$, или

$$P = \frac{E_q^2 z_q^3 \sin \alpha_q}{z_c^4} + \frac{E_q U_k z_q^2}{z_c^4} \left[z_d \sin(\delta - \alpha_d) + \frac{r(x_d - x_q)}{z_q} \cos(\delta - \alpha_q) \right] + \frac{U_k^2 z_d z_q (x_d - x_q)}{z_c^4} \cos(\delta - \alpha_q) \sin(\delta - \alpha_d) + \dots \quad (2.23)$$

Здесь

$$z_c = \sqrt{r^2 + x_q x_d}; \quad z_q = \sqrt{r^2 + x_q^2}; \quad z_d = \sqrt{r^2 + x_d^2}; \quad \operatorname{tg} \alpha_q = r/x_q; \\ \operatorname{tg} \alpha_d = r/x_d.$$

* Явнополюсная машина ($x_d \neq x_q$) не имеет обычной схемы замещения в виде постоянных сопротивлений и э. д. с., приложенной за ним.

Схема замещения явнополюсной машины содержит э. д. с. E_Q , зависящую от режима, приложенную за постоянным сопротивлением x_q . Если не вводить э. д. с. E_Q , а оперировать э. д. с. E_q , то эта э. д. с. должна быть приложена за зависящим от режима сопротивлением $x_d \xi$. В самом деле, в любой (явно- или неявнополюсной) машине физическая величина E_q пропорциональна току возбуждения, является основной при анализе. При этом для любой машины $E_q = I_d x_d$ и $E_d = I_q x_q$. Если $x_d \neq x_q$, то падение напряжения в машине $\Delta E = E_q - U_r$, где $|\Delta E| = \sqrt{(I_d x_d)^2 + (I_q x_q)^2}$. Но, согласно рис. 2.7, $I_d = I \sin \psi$, $I_q = I \cos \psi$. Следовательно, $\Delta E = I x_d \xi$, где $\xi = \sqrt{\sin^2 \psi + (x_q/x_d)^2 \cos^2 \psi}$. Здесь $\psi = \delta + \varphi$ характеризует режим машины.

Отсюда очевидно, что сопротивление $x_d \xi$ зависит от режима, меняясь от x_q до x_d в зависимости от ψ . При $x_d = x_q$, $x_d \xi = \operatorname{const} = x_d$; $\xi = 1$. Подробнее см.: Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. — М.: Энергия, 1980, § 58—4, Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1970, § 4.1.

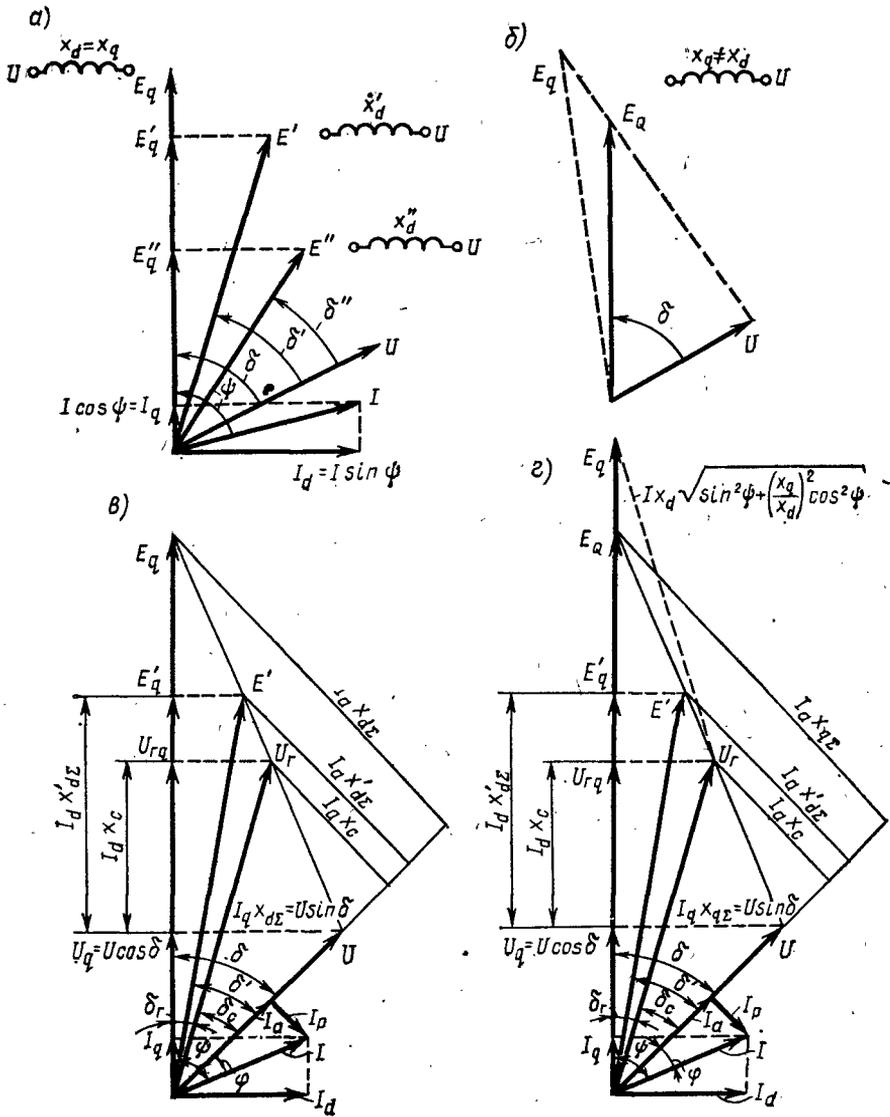


Рис. 2.7. Векторные диаграммы синхронной машины:

a — вид упрощенных диаграмм э. д. с. и соответствующих им схем замещения; *б* — вид упрощенной диаграммы явнополюсного генератора, отвечающей искусственной схеме замещения: E_Q и приложенная за x_q ; *в* — полная векторная диаграмма системы, состоящей из синхронной неявнополюсной машины, связанной реактивным сопротивлением x_q с шинами неизменного напряжения; *г* — то же, векторная диаграмма в случае явнополюсной машины. Здесь I_d, I_q — продольные и поперечные составляющие токи; U_r — напряжение генератора; $U = \text{const}$ — напряжение системы; E_q — э. д. с., приложенная за x_q ; E' — э. д. с., приложенная за x'_d ; E_Q — фиктивная э. д. с., зависящая от текущего режима системы

Выдаваемая данным генератором в точку k мощность при выражении ее через E_q будет записана следующим образом:

$$P_k = \frac{E_q U_k}{z_c^2} z_q \sin(\delta + \alpha_q) - U_k^2 \frac{r}{z_c^2} + \frac{U_k^2}{2} \frac{x_d - x_q}{z_c^2} \sin 2\delta. \quad (2.24)$$

Заменяя в (2.23) и (2.24) E_q на E'_q ; x_d на x'_d ; z_c на $z'_c = \sqrt{r^2 + x'_d x_q}$ $z'_d = \sqrt{r^2 + (x'_d)^2}$ и т. д., получим соответственно значения P и P_k , выраженные* через э. д. с. E'_q (квазипереходная характеристика).

Аналогичную замену можно провести для выражения мощностей P и P_k , записанного через э. д. с. E'_q .

Приведем простые выражения мощности, записанные применительно к простейшей двухмашинной системе (рис. 2.8). Для двухмашинной схемы (рис. 2.8, а) из (2.20), (2.17) с учетом того, что $\delta_{in} = -\delta_{ni}$, получим

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{E_1^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \\ Q_1 &= \frac{E_1^2}{z_{11}} \cos \alpha_{11} - \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Если считать, что потоки мощности направлены** из точки 2 (генерация), то

$$P_{2Г} = \frac{E_2^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21})$$

или

$$\left. \begin{aligned} P_{2Г} &= \frac{E_2^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}); \\ Q_{2Г} &= \frac{E_2^2}{z_{22}} \cos \alpha_{22} - \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Если принять, что потоки мощности направлены к точке 2 (нагрузка); т. е. $P_2 = P_{2н} = -P_{2Г}$; $Q = Q_{2н} = -Q_{2Г}$, то характеристики $P_2 = f(\delta)$ и $Q_2 = \varphi(\delta)$ будут иметь вид, показанный на рис. 2.8, б, где $\alpha = \alpha_{12}$, $\delta = \delta_{12}$.

* Направление выбирается условно и уточняется расчетом.

** В дальнейшем мощности в зависимости от того, через какую э. д. с. они выражены, будут обозначаться $P_{E'q}$, $P_{E'q'}$, P_U , $P_{E'}$ и т. д. При этом угол α_{12} может быть как положительным, так и отрицательным, что обуславливает сдвиг максимума P_1 , P_2 к углу $90^\circ - \alpha$ или углу $90^\circ + \alpha$ (рис. 2.8).

Для простейшей схемы (рис. 2.8, в) $Z_{12} = Z = Z_{11}$, угол $\alpha = \alpha_{12} = \alpha_{11} = \arcsin(r/Z)$ всегда положителен и максимумы характеристик P_1 и P_H сдвигаются соответственно влево и вправо:

$$P_1 = \frac{E^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta - \alpha); \quad Q_1 = \frac{E^2}{z} \cos \alpha - \frac{EU}{z} \cos(\delta - \alpha);$$

$$P_{2H} = -\frac{U^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta + \alpha); \quad Q_{2H} = -\frac{U^2}{z} \cos \alpha + \frac{EU}{z} \cos(\delta + \alpha).$$

В этих выражениях э. д. с. может быть принята согласно (2.22).

Выражение для определения мощности через E'_q (квазипереходная характеристика изображена на рис. 2.9) записывается аналогично (2.24) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} P_{1(E'_q)} &= \frac{E'_q U}{x'_d} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_q - x'_d}{x_q x'_d} \sin 2\delta; \\ Q_{1(E'_q)} &= \frac{E'_q U}{x'_d} \cos \delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_q + x'_d}{x_q x'_d} \cos 2\delta. \end{aligned} \right\} (2.27)$$

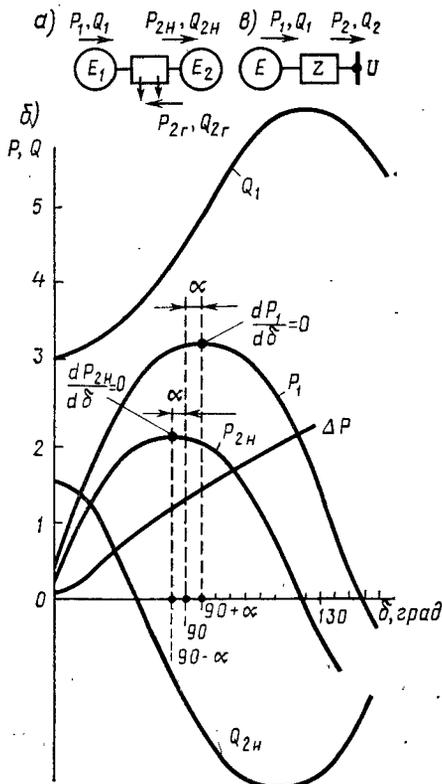


Рис. 2.8. Характеристики мощности в простейшей системе:

P_1 — характеристика мощности генератора, сдвинутая вправо на угол α : $P_1 = \frac{E^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_2 U}{Z_{12}} \sin(\delta - \alpha)$; P_{2H} — характеристика мощности приемного конца (нагрузки): $P_{2H} = -\frac{E^2}{Z_{12}} \sin \alpha_{12} + \frac{E_2 U}{Z_{12}} \sin(\delta + \alpha)$; ΔP — потери мощности, равные $P_1 - P_2 = I^2 r$

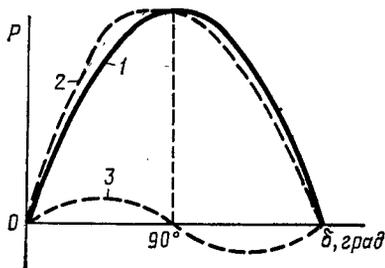


Рис. 2.9. Влияние учета явнополюсности:

1 — характеристика при $x_d = x_q$; 2 — при учете $x_d \neq x_q$; 3 — слагающая, обусловленная явнополюсностью $\frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_q x_d} \times \sin 2\delta$

§ 2.6. СИСТЕМА, ИМЕЮЩАЯ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Расчет с использованием способа собственных и взаимных проводимостей в системе, имеющей нелинейные элементы, возможен, если вести его путем последовательных приближений (итераций), задаваясь рядом напряжений на нелинейном элементе и отыскивая то, которое удовлетворит балансу мощностей (актив-

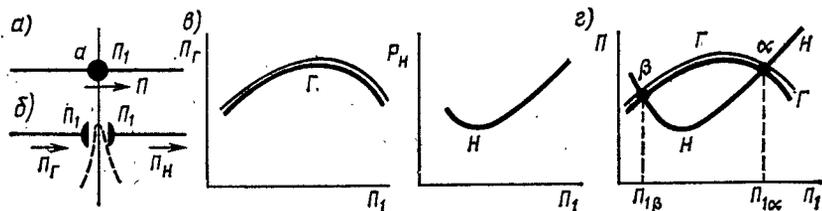


Рис. 2.10. Расчет режима методом пересечения характеристик, раздельное построение характеристик «генерации» (Γ) и «нагрузок» (H), для выделенной точки a в системе:

a — выделенная точка с параметром режима P , зависящим от P_1 (например, реактивная мощность от напряжения); b — условное разделение системы в точке a ; δ — раздельное построение характеристик $P_n = \varphi(P_1)$ и $P_{n1} = \varphi(P_1)$ при независимом переменном P_1 ; ε — совмещение характеристик Γ и H и определение точек возможного существования режимов α и β

ных и реактивных) во всех узлах исследуемой системы. При таких расчетах используется метод пересечения характеристик*, которым пользуются графически или аналитически, отыскивая точку возможного режима решением (обычно итеративным) соответствующей системы уравнений.

При использовании метода пересечения характеристик можно задаться рядом значений какого-либо параметра режима P_1 в узловой точке сети (рис. 2.10, a). Далее эта точка как бы разделяется на две и отдельно строятся характеристики для левой и правой половины рассматриваемой схемы (рис. 2.10, b). При этом под параметром P_1 могут пониматься напряжения, токи, активные и реактивные мощности, «подтекающие» со стороны источника (P_n и P_{n1} на рис. 2.10, b). Очевидно, что, задавая параметром P , можно, как показано на рис. 2.10, b , построить характеристики «генерации» (Γ) и «нагрузки» (H), т. е. тех параметров режима, например мощностей и токов, которые могут «подтекать» к точке a или которые могут от нее «оттекать». Совмещая эти две характеристики, построенные в функции параметра режима P_1 (значениями которого сначала произвольно задавались), выявляют точки α , β , лежащие на пересечении характеристик Γ и H и, следовательно, являющиеся рабочими точками (рис. 2.10, ε). При построении характеристик для левой (Γ) и правой (H) частей схемы (рис. 2.10) можно применить способ взаимных проводимостей.

§ 2.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК

Применяя описанные способы определения токов, мощностей и напряжений в любом элементе системы, можно найти максимальные нагрузки, т. е. те наи-

* См.: Электрические системы. Электрические сети/Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1971, § 4.4.

большие значения, которые могут иметь токи, мощности и напряжения в каком-либо элементе системы. Так, например, максимальная мощность линии, имеющей по концам напряжения U_1 и U_2 и представленной в схеме замещения чисто реактивным сопротивлением x_n ,

$$P_m = U_1 U_2 / x_n.$$

Эта мощность будет достигнута при максимально возможном угле по передаче $\delta_m = 90^\circ$.

При представлении той же линии полным сопротивлением максимальная мощность, определенная по генераторному концу,

$$P_m = (U_1^2 / z_n) \sin \alpha_{11} + U_1 U_2 / z_n,$$

при этом угол $\delta_m = 90^\circ \pm \alpha_{12}$.

Если линия в расчетной схеме представлена четырехполюсником, имеющим параметры A, B, C, D , то мощность линии ограничена максимальным значением $P_{mд} = (U_1^2 D / B) \cos(\psi_B - \psi_D) + U_1 U_2 / B$ при $\delta_m = 90^\circ \pm \psi_B$. При данной

постановке задачи наличие максимума в значении P обусловлено только свойствами передачи энергии переменным током и не связано с факторами практического характера, например температурным режимом оборудования, изменением напряжения у нагрузок и т. д. Ограничения последнего вида, выявленные расчетом или экспериментом, соответственно указывают на пределы по нагреву, потерям, напряжению короны и т. п.

Максимальная мощность системы электропередачи (x_n, r_n), включающей генераторы (x_r) и трансформаторы (x_T), будет

$$P_m = (E^2 / z) \sin \alpha_{11} + E U_2 / z = \frac{E}{z} \left(U_2 + \frac{E r_n}{z} \right),$$

$$\text{где } z = \sqrt{(x_r + x_T + x_n)^2 + r_n^2};$$

Максимальные мощности системы электропередачи (P_m) и линии ($U_1 U_2 / z_n$) можно сделать равными, если применять такое регулирование возбуждения генераторов, которое позволило бы при изменениях нагрузки поддерживать постоянное напряжение U_1 в начале и U_2 в конце передачи, исключив этим влияние реактивных сопротивлений генераторов, трансформаторов.

В системе электропередачи, имеющей промежуточные пассивные нагрузки (рис. 2.11), максимальная мощность, отдаваемая генератором,

$$P_m = E^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E U_2 y_{12}.$$

Практически максимальная мощность является предельной, и при ней система работать не может: при приближении к этому значению она не выдерживает

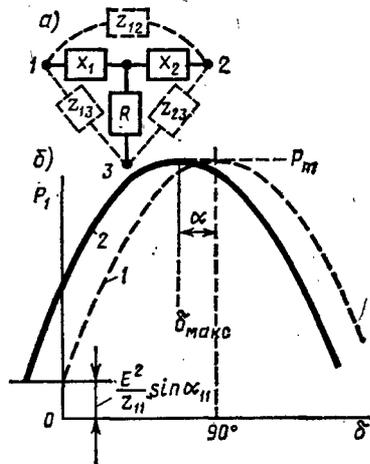


Рис. 2.11. Система передачи с промежуточной нагрузкой R :

a — схема замещения; b — характеристика $P_n = P(\delta)$ при передаче мощности через систему, имеющую схему согласно рис. 2.11: 1 — характеристика $(EU/x) \sin \delta$ при $|x_1| = |Z_{12}|$, приподнятая на $(E^2/Z_{11}) \sin \alpha$; 2 — характеристика 1, сдвинутая влево на угол α , превращающаяся в характеристику $P_2 = (E^2/Z_{11}) \sin \alpha_{11} + (EU/Z_{12}) \sin(\delta + \alpha)$

не только резких толчков, связанных с появлением аварий, но и малых изменений режима, непрерывно происходящих в системе, — ее режим будет «уползать» от нормального значения. Если передаваемая мощность P_1 при $E_q = \text{const}$ представляется выражением (2.23), то для определения максимального ее значения необходимо вычислить $c_1 = \partial P_1 / \partial \delta = \partial P_{E_q} / \partial \delta$. Далее из условия $c_1 = 0$ следует найти* отвечающий этому условию угол δ_m . Подставив значение угла в (2.23), установим P_{1m} . В общем случае, согласно (2.23) ($x_d \neq x_q$), значение

$$c_1 = \frac{E_q U z_q^2}{z_c^4} \left[z_d \cos(\delta - \alpha_d) - \frac{r(x_d - x_q)}{z_q} \sin(\delta - \alpha_q) \right] + \frac{U^2 z_d z_q}{z_c^4} (x_d - x_q) \cos(2\delta - \alpha_q - \alpha_d). \quad (2.28)$$

В частном случае при $x_q = x_d$ и $r \neq 0$

$$c_1 = (E_q U / z_c) \cos(\delta - \alpha_d). \quad (2.29)$$

При неучете активного сопротивления при $x_q \neq x_d$

$$c_1 = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta + U^2 \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \cos 2\delta. \quad (2.30)$$

Если передаваемая мощность представлена квазипереходной характеристикой, полученной из (2.23) заменой E_q на E'_q , x_d на x'_d и т. д., то значение $c_2 = \partial P / \partial \delta = \partial P_{E'_q} / \partial \delta$ может быть получено из (2.28) такой же заменой. В частном случае при неучете активного сопротивления и $x_d = x_q$ получим

$$c_2 = \frac{E'_q U}{x'_d} \cos \delta - U^2 \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \cos 2\delta = c_1 + \frac{U^2 (x_d - x'_d)}{x_d x'_d} \sin^2 \delta.$$

Принимая $c_2 = 0$, находим $\delta_{\text{макс}}$, подставляя значение которого в P_1 при $E'_q = \text{const}$ находим максимальное значение мощности.

На рис. 2.12, а и б показаны предельные режимы, определенные согласно изложенным соображениям.

Предельные нагрузки. Кроме максимальных нагрузок для основных элементов системы (генераторов, трансформаторов, синхронных компенсаторов) определяют предельные нагрузки, т. е. ограничивают передаваемую мощность значениями отдельных параметров режима: тока статора, тока возбуждения — и другими значениями, установленными по условиям работы первичного агрегата (мощности турбины), по нагреву обмоток статора, ротора, а также возбuditеля и подвозбудителя. При этом указывают время, в течение которого данная предельная нагрузка может быть допущена.

Кроме понятий максимальной и предельной нагрузок, не всегда четко различаемых, часто вводят еще понятие *пропускной способности* элемента системы (линии, трансформатора и т. д.), определяя ее как ту *наибольшую мощность, которую с учетом всех факторов* (устойчивости, нагрева и т. д.) *можно передать* через данный элемент. Иногда пропускную способность определяют так же, как

* Графическим построением или подбором.

и предельную нагрузку, при этом указывают: «пропускная способность по току», «по устойчивости» и т. д.

Предельные нагрузки ограничиваются не только техническими характеристиками, но и экономическими показателями. Обычно расчет режимов исходного, производящего переходному, и послеаварийного, закончившего переходный, производят для работающей или полностью спроектированной системы,

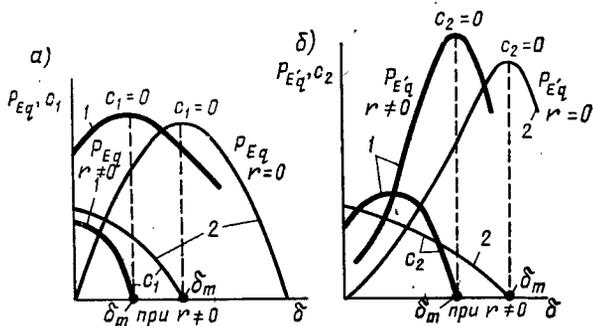


Рис. 2.12. Характеристики мощности P_{Eq} и $P_{E'q}$ при учете и без учета активного сопротивления в цепи статора и их производные $c_1 = \partial P_{Eq} / \partial \delta$ и $c_2 = \partial P_{E'q} / \partial \delta$:

— без учета r ; — при учете r

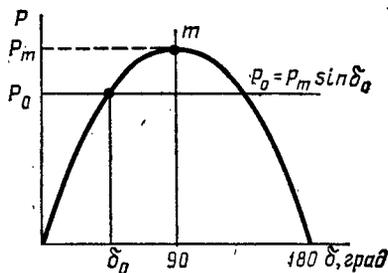


Рис. 2.13. Соотношения для определения коэффициента запаса

для которой технико-экономические показатели уже определены, а технические ограничения выявлены.

Поэтому расчеты переходных режимов и участвующих в них процессов, а также исходного и послеаварийных режимов обычно проводятся без учета ограничений, как экономических, так и технических. Коэффициент запаса K_z устойчивости режима при этом определяется по приближению к теоретическому максимуму передаваемой мощности P_m . Его значение, определенное согласно рис. 2.13, будет $(P_m - P_0) / P_0$. Разумеется, при необходимости упомянутые выше соображения и ограничения могут быть учтены при последующем анализе.

При расчетах переходных процессов на стадии проектирования, выборе мероприятий, улучшающих устойчивость и качество переходного процесса, выборе схем системы, установлении требований к защите, коммутирующим устройствам и т. д. учет экономических показателей вариантов возможных решений и сопоставление их между собой обязательны.

Материал этой главы является основой для расчетов исходных (нормальных) режимов, предшествующих переходным режимам, а также режимов послеаварийных, заканчивающих переходные. Расчеты этих режимов проводятся приближенно в основном в предположении линейности параметров с использованием метода наложения (собственных и взаимных проводимостей). Этот же метод применяется при изучении переходного процесса, который рассматривается полностью (или по некоторым временным участкам) как некая группа квазипереходных процессов (постоянство тех или иных параметров режима). Расчетные выражения, полученные в настоящей главе, будут использованы при анализе в последующих главах.

Контрольные вопросы

- 2.1. Чем отличаются линейные, нелинейные, вероятностные и размытые параметры системы и режимов? Приведите примеры.
- 2.2. Какими уравнениями (алгебраическими, дифференциальными) и при каких допущениях представляются установившиеся и переходные режимы? В чем особенность математического представления электрических вращающихся машин и как объединяются эти представления с представлениями статических цепей?
- 2.3. Что такое собственные и взаимные проводимости и сопротивления?
- 2.4. Назовите четыре способа определения собственных и взаимных сопротивлений.
- 2.5. Как определяются токи и мощности через э. д. с., собственные и взаимные сопротивления? Какие допущения и ограничения при этом делаются?
- 2.6. Почему явнополусная машина не имеет схемы замещения?
- 2.7. Что такое максимальные и предельные нагрузки и как они определяются?
- 2.8. Чем определяется знак реактивной составляющей в комплексе мощности?
- 2.9. Как графически и аналитически находятся значения э. д. с. E_q , E'_q , E' , E_Q ?
- 2.10. Нарисуйте и объясните векторную диаграмму простейшей системы (э. д. с., ток, напряжение).

Темы рефератов

1. Физика установившихся и переходных режимов и связанные с ней особенности их математического описания.
2. Схемы замещения синхронной машины, работающей в системе, и их применение при изучении переходных процессов.

ТРЕБОВАНИЯ К РЕЖИМАМ И ПРОЦЕССАМ

§ 3.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕЖИМАМ

После нормального переходного или аварийного режима, благополучно заканчивающегося, система возвращается к установившемуся режиму, исходному или практически близкому к нему. Режимы электрических систем, как установившиеся, так и переходные, должны отвечать определенным требованиям, которые надо иметь в виду при проведении расчетов (см. П2). Так, в нормальном рабочем режиме системы, принимаемом, как правило, за исходный, должны быть обеспечены:

1) *качество* — снабжение потребителей энергией, отвечающей по показателям установленным нормативам*;

2) *надежность* — снабжение потребителей энергией без длительных перерывов и без снижения ее качества, причем длительность перерыва или вообще его отсутствия, возможность отклонения от заданного качества определяются соответствующими нормативами для данной системы и данного вида потребителей. Надежность системы обеспечивается безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и долговечностью ее элементов. Надежная система должна длительно сохранять эксплуатационные показатели, такие, как производительность, экономичность, рентабельность;

3) *живучесть* — способность противостоять воздействию внешних сил и длительное время сохранять это состояние. Понятие «живучесть» (или выживаемость), возникшее в экологических и биологических задачах, применяется при рассмотрении взаимодействия сложных систем между собой и со средой. Таким образом, в понятии живучести много общего с устойчивостью. В энергетике под *живучестью* понимается способность системы так противостоять любым возмущениям, чтобы они не вызвали каскадного развития аварии с массовым нарушением питания потребителей. В качестве показателей живучести используют отключившуюся нагрузку, недоотпуск продукции потребителям и т. д. При пользовании такими показателями понятие живучести становится шире аналогичных понятий безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости, устойчивоспособности или устойчивости;

* Качество энергии характеризуется главным образом значением и частотой напряжения потребителя. Дополнительными показателями качества энергии являются симметрия напряжений многофазной системы, синусоидальность формы кривой напряжения (действующее значение всех гармоник составляет менее 5% от основной). Согласно ГОСТ 13109—67, при нормальной работе отклонения напряжения на зажимах двигателей и аппаратов допускаются от -5 до $+10\%$ от нормального значения, а отклонения частоты $\pm 0,1$ Гц, иногда разрешается отклонение частоты до $\pm 0,2$ Гц сверх допустимой, усредненной за 10 мин.

4) *экономичность* — надежное снабжение потребителей энергией удовлетворительного качества при возможно меньших затратах средств на ее производство и передачу (экономия топливно-энергетических ресурсов и снижение потерь).

Переходные режимы электрических систем практически всегда *должны заканчиваться некоторым желательным* (по тем или иным соображениям) *установившимся режимом*. Существенно, чтобы этот режим был осуществим при параметрах, принятых в расчете, и если осуществим, то был бы устойчив и достаточно надежен для того, чтобы система могла длительно работать, не боясь относительно небольших случайных изменений (малых возмущений), которые не должны приводить к нарушению ее устойчивости. Переходный режим и входящие в него наиболее важные для данной инженерной задачи процессы также должны отвечать определенным требованиям, которые фиксируют качество переходных процессов. При оценке качества переходных процессов необходимо, чтобы мероприятия, предпринимаемые для улучшения качества, были экономичны, а также чтобы происходящие изменения параметров режима не могли существенно снизить качество энергоснабжения потребителей. Для этого прежде всего необходимо, чтобы рассматриваемые переходные процессы заканчивались достаточно быстро. Так, например, если толчок (изменение) нагрузки или какая-либо коммутационная операция будет вызывать длительные колебания роторов генераторов системы и соответственно колебания напряжения у потребителей, то переходный процесс будет неудовлетворительным по условиям обеспечения потребителей качественной энергией. Неудовлетворительным будет и качество переходного процесса, если вследствие него возникнут новые переходные процессы, которые в конечном счете могут привести к неустойчивости системы или недопустимому понижению качества энергии, отдаваемой потребителю. Нельзя считать переходный процесс удовлетворительным, если после его окончания система будет иметь малый запас устойчивости. Иначе говоря, *переходные процессы, составляющие в совокупности переходный режим, должны быть такими, чтобы после их завершения установился режим, отвечающий определенным требованиям*.

Особенно важно их соблюдение для послеаварийного режима, устанавливающегося после ликвидации аварии. Эти требования включают обеспечение *осуществимости, наблюдаемости и управляемости* устанавливающегося (самоустанавливающегося) режима. В случае длительного существования этот режим должен отвечать и тем четырем требованиям, которые были сформулированы применительно к исходному режиму и прежде всего устойчивости, как основной составляющей живучести. Заметим, что если *самоустанавливающийся режим* не удовлетворяет каким-либо из предъявляемых требований, то он должен корректироваться, или, как иногда говорят, должен быть *введен в допустимую область*.

Рассмотрим подробно показатели, относящиеся к данной дисциплине. Остальные показатели (качество, надежность, экономичность, живучесть) изучаются в других дисциплинах.

§ 3.2. КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Качество процессов, возникающих при переходе системы от одного режима к другому, можно оценить по следующим показателям:

- 1) время, в течение которого заканчивается процесс;

- 2) характер процесса (апериодический, колебательный);
- 3) возможное влияние данного процесса на режим системы и ее подсистем (раскачивание других машин, входящих в систему, снижение напряжения) и неустойчивость нагрузки;
- 4) опасность переходного процесса для оборудования системы (перегрев проводов сети, обмоток электрических машин);
- 5) потери мощности (и энергии) во время переходного процесса;

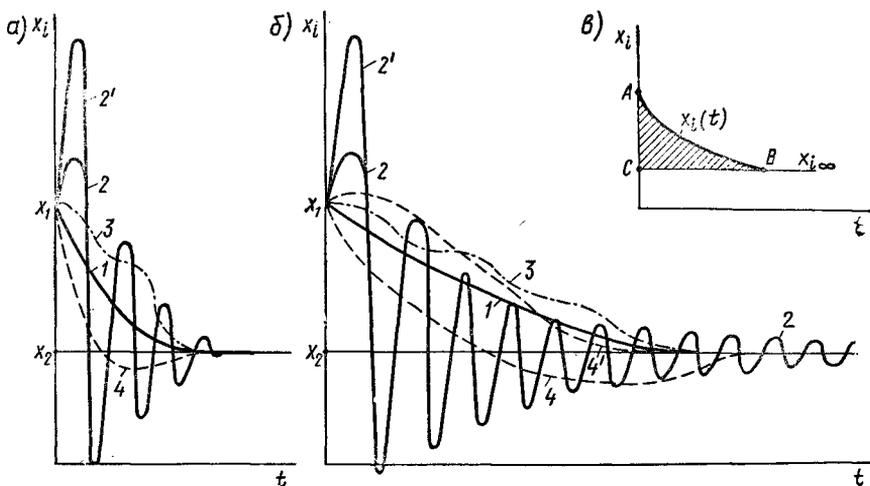


Рис. 3.1. К определению качества переходного процесса при переходе от Π_1 к Π_2

6) стоимость дополнительных мероприятий, улучшающих данный переходный процесс.

Оценка переходного процесса по времени протекания и характеру производится прежде всего по изменению его параметров Π . Процесс может или быстро заканчиваться новым установившимся режимом (рис. 3.1, а), или затягиваться на довольно длительное время (рис. 3.1, б). Он может быть апериодическим 1, колебательным 2, монотонным 3 или промежуточным между колебательным и монотонным, когда $\Pi_1 - \Pi_2$ не меняет знака (процесс 4') или меняет знак только один раз (процесс 4). Колебательный процесс может иметь большое отклонение — выброс (кривая 2') — или малое (кривая 2). Этот процесс может протекать при относительно малом (рис. 3.1, а) или большом (рис. 3.1, б) числе колебаний.

Быстрое затухание переходного процесса, апериодичность или хотя бы его монотонность в большинстве отраслей, применяющих автоматическое регулирование, считаются исчерпывающими показателями хорошего качества переходного процесса. Однако для определения качества переходного процесса в энергосистемах этих показателей недостаточно. Установившейся методологии определения их для энергосистем нет, поэтому приведем сначала показатели качества процессов в смежных областях, а затем в электроэнергетике. В теории автоматического регулирования качество переходного процесса (апериодического

или близкого к нему) количественно оценивают площадкой ABC (рис. 3.1, в) или величиной

$$I_1 = \int_0^t [P_i(t) - P_i(\infty)] dt,$$

где $P_i(t)$ — текущее значение; $P_i(\infty)$ — установившееся значение параметра переходного процесса.

Для колебательного процесса аналогично вводят величину

$$I_2 = \int_0^t [P_i(t) - P(\infty)]^2 dt.$$

Чем меньше I_1 и I_2 , тем лучше протекание процесса.

Однако минимум I_2 не дает полностью правильной оценки, так как он еще не гарантирует минимальной колебательности переходного процесса, а длительно повторяющиеся колебания (как, например, процесс 2 на рис. 3.1, б) могут иногда вызывать раскачивания в других частях системы и этим быть опасны. Лучшие результаты для оценки качества переходного процесса дает критерий

$$I_3 = \int_0^t V(P_1, P_2, \dots, P_n) dt, \quad (3.1)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n — параметры режима; V — некоторая специально подобранная определенно-положительная квадратичная форма, составленная из параметров режима рассматриваемой системы; в простейшем случае

$$V = P_1^2 + P_2^2 + \dots + \sum_{k=1}^n P_k^2.$$

Приведенными выше критериями, особенно критерием I_3 , можно достаточно хорошо оценить качество переходных процессов в ряде автоматически регулируемых неэнергетических объектов. Например, для автоматически управляемого самолета, корабля или ракеты крайне важно, чтобы не было отклонений от курса «рыскания» и переход от одного направления к другому был аperiodичен. В то же время для электроэнергетической системы, как правило, не существенно, сделают роторы генераторов какой-либо станции во время переходного процесса на несколько колебаний больше или меньше.

Поэтому записанные выше критерии не отвечают на вопрос о качестве переходного процесса электроэнергетической системы в целом. Для этого нужно оценить не столько поведение того ее элемента, в котором происходит переходный процесс, сколько влияние данного элемента на режим всей системы. Так, безусловно, нужно потребовать, чтобы во время «хорошего» переходного процесса в системе напряжение $u(t)$ не могло понижаться до значений, опасных с точки зрения устойчивости генераторов и двигателей системы. Но отклонение напряжения во время переходного процесса нельзя оценить только мгновенным изменением его абсолютного значения. Важно, какое время существовало это отклонение. Поэтому часто оценку проводят, определяя среднеквадратичное откло-

нение относительно того напряжения — U_0 , которое для данной части системы оптимально:

$$I_4 = \int_0^t \left[\frac{u(t) - u_0}{u_0} \right]^2 dt. \quad (3.2)$$

Аналогичный критерий можно ввести для оценки отклонений частоты. Все рассмотренные критерии будут иметь различные числовые значения для конкретных систем.

Переходный процесс в какой-либо части системы может оказаться не опасным, но вызвать неприятные последствия в других частях системы. Пусть, например, в системе, показанной на рис. 3.2, авария на линии L_2 и последующее ее отключение не приведет к нарушению связи по линии L_1 станции 1 с системой, но переходный режим станции 2 (качания, асинхронный ход с последующей ресинхронизацией и т.д.) может вызвать понижение напряжения U на шинах приемной системы и опрокидывание двигателей D , входящих в нагрузку H , т. е. лавину напряжения (см. гл. 11). Примером другой аварии может быть выход из синхронизма станции 1 под влиянием качаний станции 2.

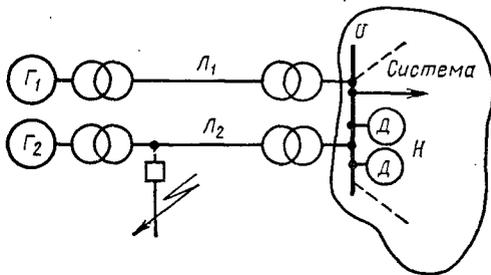


Рис. 3.2. Схема влияния переходного процесса в одной части системы на ее другие участки

Таким образом, в критерий качества переходного процесса должен войти показатель, отражающий влияние этого процесса на всю систему или на смежные подсистемы; отсюда появляется необходимость характеризовать качество переходного процесса не одним каким-либо критерием, а комплексом критериев, отражающих группу влияющих факторов. При этом *влияние факторов* должно указываться *не только непосредственно в переходном процессе, но и в послеаварийном режиме*. В общем виде комплекс-критерии могут быть записаны в следующей форме:

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} K_i K_j + \sum_{i=1}^{i=n} K_i K_s, \quad (3.3)$$

где K_{Σ} — суммарный показатель качества переходного процесса; K_i — весовой коэффициент, отражающий значимость данного параметра в переходном процессе; K_j — показатель качества для какого-либо из параметров режима (напряжения, частоты, угла и т. п.) данного процесса; K_i — показатели качества параметров последующих процессов, развивающихся в результате цепочки событий, которые могут быть вызваны данным переходным процессом; K_s — весовой коэффициент, учитывающий влияние и вероятность появления того или иного последствия.

Наиболее неприятными последствиями неправильно рассчитанного или неверно управляемого переходного процесса будут нарушение устойчивости параллельной работы отдельных станций и подсистем, отделение их друг от друга с

дальнейшей несинхронной работой, а в ряде случаев и с отключением («погашением») нагрузки. Такой «развал», являющийся тяжелой системной аварией (см. П1), не может произойти, *если качество переходных режимов и отдельных процессов удовлетворяет определенным требованиям.*

Соблюдение требований к переходному процессу, вытекающих из условий работы отдельных элементов системы, также определяет его качество. Так, ток роторов и статоров электрических машин (генераторов, двигателей) ограничивается повышением температуры обмоток*, перегрев которых неблагоприятно сказывается на механических и электрических свойствах изоляции. Нельзя превышать по условиям нагрева и допустимые токи в линиях электропередач и сетях. Ограничивается ток механическими усилиями, возникающими в машине и могущими вызвать ее разрушение. Имеет предел и несимметрия токов: составляющая тока обратной последовательности, появляющаяся при несимметрии, создает в машине магнитное поле, вращающееся относительно ротора с двойной угловой скоростью и наводящее в массе («бочке») ротора токи двойной частоты. Они создают в машине дополнительный нагрев, механические усилия и вибрации. Процесс перехода синхронных генераторов в асинхронный режим, работа в этом режиме и ресинхронизация ограничиваются рядом факторов. Важнейшие из них: дополнительные потери и вызванный ими нагрев, механические усилия между обмотками ротора и статора, большие колебания потребления реактивной мощности, вызывающие колебания напряжения в системе.

Эти колебания могут неблагоприятно сказаться на качестве и устойчивой работе других частей системы и ее нагрузок. Решая вопрос о допустимости, продолжительности какого-либо аварийного режима и необходимости ограничений входящих в него процессов, следует принять во внимание и потери энергии, появляющиеся во время переходного режима, и экономию топлива, которая может быть получена благодаря управлению режимом (например, сокращением числа пусков агрегатов). Так, в случаях, когда допускается асинхронный ход и последующая ресинхронизация (результатирующая устойчивостью), нет надобности отключать генератор от сети и снова пускать его. Для мощного турбоагрегата это будет длительной и дорогостоящей процедурой. При оценке качества переходного процесса необходимо учесть, что: 1) механические усилия в различной аппаратуре, в частности разрывная мощность выключателей, не позволяют увеличивать аварийные токи сверх некоторых допустимых; 2) работа нагрузок при пониженном или колеблющемся напряжении неблагоприятна и в ряде случаев может привести к нарушениям производственного процесса.

Отрицательный эффект переходного процесса может проявляться не только непосредственно во время его протекания, но и после его завершения. Примерами такого последствия при пониженных показателях качества переходного процесса могут быть:

пониженные уровни напряжения, вызывающие значительную саморазгрузку потребителей (а иногда и лавину напряжения);

пониженный уровень частоты, приводящий к снижению производительности паровых котлов;

термическая перегрузка оборудования (линий, трансформаторов, генераторов).

* Например, ток возбуждения современных турбогенераторов можно увеличить до максимальных (потолочных) значений на время, не большее 15 с.

Перечисленные (и аналогичные им) послеаварийные режимы в течение короткого времени (секунды, десятки секунд) могут проходить безболезненно, но затем, если режим не будет введен в область длительно допустимых значений его параметров, неминуемо наступает дальнейшее развитие аварии — эскалация аварийных событий. Поэтому показатели качества K_j , K_l , входящие в (3.3), должны быть, как правило, интегральными (включать время существования опасного отклонения параметров режима). Показатель качества процесса для одного из параметров может представлять собой функционал различного вида. Одним из наиболее распространенных показателей является критерий

$$K_i = \frac{1}{T} \int_0^T \Pi_i^2 d\Pi, \quad (3.4)$$

где Π_i — параметр режима.

В критерий вида (3.4) должны войти и некоторые экономические оценки. Так, если для нейтрализации возможных последствий переходных режимов осуществляются специальные мероприятия, то их стоимость должна быть сопоставлена с ущербом, который может появиться в результате того или иного неблагоприятно протекающего процесса, и это сопоставление должно получить отражение в критерии (3.3).

Общепринятого подхода к определению комплексных критериев вида (3.3), (3.4) пока нет. Определение их для энергосистем сложных структур требует проведения больших и трудоемких исследований. Поэтому о них здесь упоминается только в порядке постановки задачи.

Заметим, что условие максимального ускорения протекания переходного процесса, хотя и может использоваться при решении ряда задач, не всегда является предпочтительным критерием.

§ 3.3. ОСУЩЕСТВЛЯЕМОСТЬ РЕЖИМА

Для осуществления исходного режима, предшествующего переходному, и режима, который должен установиться после возмущения и вызванного им переходного процесса, необходим баланс мощности. Так, передача мощности P от генераторов, турбины которых развивают мощность P_T , возможна только в том случае, если $P_T = P$, где P — электрическая мощность электропередачи.

Математически существование режима определяется возможностью решения уравнений $P_T = \varphi(\Pi)$ и $P_m = \psi(\Pi)$, где Π — параметр режима. Например, если рассматривается простейшая система «станция — шины бесконечной мощности», представленная в схеме замещения э. д. с. E , реактивным сопротивлением x и неизменным напряжением U , то режим может существовать, если характеристики $P_T = \varphi(\delta)$ и $P = \psi(\delta)$ пересекаются, причем обычно $P_T = \text{const}$, $P = (EU/x)\sin\delta$.

Также необходимо, чтобы активная мощность, вырабатываемая генераторами системы P_G , была равна мощности, поглощаемой в нагрузках P_H и теряемой во всех элементах системы ΔP :

$$P_T = P_H + \Delta P = P. \quad (3.5)$$

В цепях переменного тока аналогичное условие существует и для реактивной мощности:

$$Q_r = Q_n + \Delta Q = Q. \quad (3.6)$$

Активная и реактивная мощности связаны соотношением

$$S^2 = P^2 + Q^2,$$

где S — полная мощность.

Уравнения (3.5) и (3.6) нельзя, следовательно, рассматривать как независимые и пользоваться ими без дополнительных условий, отражающих те или иные связи. В каждом случае, вообще говоря, необходимо проводить исследование этих связей. Однако практика работы современных энергетических систем, параметры которых изменяются в определенных диапазонах, позволяет установить закономерности, которыми может и должен пользоваться инженер в своей работе. Так, известно, что изменение активной мощности, вырабатываемой генераторами, главным образом влияет на изменение частоты в системе, оказывая сравнительно небольшое влияние на напряжение. Можно приблизительно определить отклонение частоты в системе от номинальной ($f_0 = 50$ Гц) выражением

$$\Delta f = (\Sigma P_{rj}^0 - \Sigma P_{ni} - \Sigma \Delta P_k) / \Sigma P_{rj}^0 \sigma, \quad (3.7)$$

где P_{rj}^0 — мощность генератора j , соответствующая частоте f_0 ; P_{ni} — мощность нагрузки i ; ΔP_k — потери мощности на участке сети k ; σ — средний по системе коэффициент неравномерности: $\sigma = 1/(50\varepsilon)$.

Выражение (3.7) получается из известных приближенных соотношений

$$\Sigma P_{rj} = \Sigma P_{ni} + \Sigma \Delta P_k; P_{rj} = P_{rj}^0 \left(1 - \frac{\Delta f}{50\varepsilon_j}\right) = P_{rj}^0 (1 - \sigma_j \Delta f), \quad (3.7a)$$

где ε_j — коэффициент статизма регуляторов скорости в рабочей зоне.

Из (3.7) очевидно, что если система не имеет резерва и P_{rj}^0 не может быть увеличено при возрастании P_{ni} , то при $\Sigma P_{ni} > \Sigma P_{rj}^0$ неизбежно понижение частоты.

Из (3.7) следует, что регулирование частоты и поддержание ее заданного значения обеспечивается регулированием активной мощности генераторов. При сделанных выше допущениях кратко сформулируем:

| уровень частоты связан с балансом активной мощности, или $\Delta f \approx \varphi(\Delta P)$.

Реактивная мощность, выдаваемая станциями системы, связана с напряжением на шинах нагрузки U_n и возбуждением генераторов: $E \equiv i_{\text{возб}}$. Для радиальной сети, суммарное сопротивление которой x , справедлива зависимость

$$U_n^2 = \left(E - \frac{Q_n + \Delta Q}{E} x\right)^2 - \left(\frac{Px}{E}\right)^2, \quad (3.8)$$

где Q_n — реактивная мощность нагрузки; ΔQ — потери в сети и генераторе.

Из (3.8) следует, что регулирование напряжения на нагрузке U_n и поддержание его заданного значения обеспечиваются регулированием возбуждения генераторов $E \equiv i_n$, что, в свою очередь, означает регулирование генерируемой реактивной мощности. Согласно (2.26),

$$Q_r = Q_n + \Delta Q = \frac{E^2}{x} - \frac{EU}{x} \cos \delta,$$

откуда с учетом упомянутого условия следует:

уровень напряжения в сети (на нагрузке) связан с балансом реактивной мощности, или $\Delta U \approx \psi(\Delta Q)$.

Следовательно, для осуществяемости заданного режима или «введения в режим» необходимо воздействовать на баланс реактивных мощностей (осуществить регулирование возбуждения) и активных мощностей (осуществить регулирование турбины станции).

Необходимость баланса активной и реактивной мощности приводит к следующему правилу. В установившемся режиме графические зависимости $P_r =$

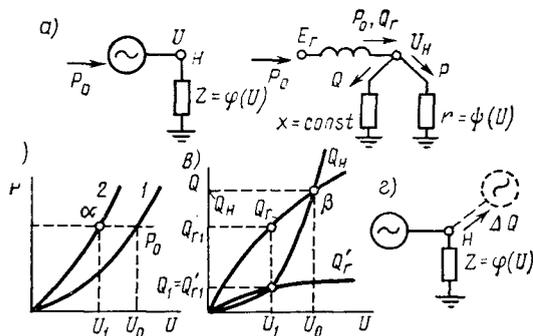


Рис. 3.3. Условия существования установившегося режима в простейшей системе:

а — исходные схемы и распределение мощности; б — зависимость определения установившегося режима; в — баланс реактивной мощности как условие существования; г — схема подключения балансирующего (регулирующего) источника реактивной мощности

$= \varphi_1(P)$ и $P_H = \varphi_2(P)$ всегда имеют общую точку, пересекаясь между собой или хотя бы касаясь друг друга при $P = P_1$. При этом зависимости $Q_r = \psi_1(P)$ и $Q = \psi_2(P)$ также должны иметь общую точку при том же значении $P = P_1$. Такой графоаналитический способ определения параметров установившегося режима широко применяется на практике. Для пояснения его приведем несколько примеров.

1. В схеме, приведенной на рис. 3.3, а, нагрузка нелинейна, так как входящее в нее активное сопротивление зависит от приложенного напряжения: $r = \psi(U)$ и соответственно $Z = \varphi(U)$. Предположим, что значение этого сопротивления уменьшилось с r_0 до r_1 . Какие параметры будет иметь новый установившийся режим, если активная мощность генератора постоянна, а значение сопротивления x не изменяется?

В качестве характерного параметра P возьмем напряжение в точке H . Перестроим характеристику мощности I , построенную при сопротивлении r_0 , увеличив ее ординаты в отношении r_0/r_1 (рис. 3.3, б); получим новую характеристику 2. Точка пересечения α характеристики 2 с характеристикой мощности генератора P_0 указывает на значение напряжения, которое должно установиться, если режим будет существовать. Для его существования необходим баланс реактивной мощности. При напряжении U_0 он соблюдался: характеристики мощности Q_r , поступающей от генератора, и мощности нагрузки Q_H пересекались в точке β . При U_1 мощность Q_{r1} , отдаваемая генератором, больше мощности, потребляемой нагрузкой. Следовательно, режим при $P_0 = \text{const}$ и $r = r_1$ не может существовать.

Для его осуществления надо изменить реактивную мощность, отдаваемую генератором

в точку подключения нагрузки H , уменьшив возбуждение генератора и тем самым снизив его э. д. с. E_r . Регулируя E_r , получаем зависимость $Q_r' = f(U)$, при которой (при $U = U_1$) $Q_{r1}' = Q_{r1}$, т. е. существование режима обеспечено (рис. 3.3, а).

Осуществить режим можно другим путем — подключением к точке H (рис. 3.3, а) некоторой дополнительной реактивной нагрузки $Q_{r1} - Q_1$, поглощающей избыток мощности.

2. Рассмотрим электропередачу (рис. 3.4, а) от станции, связанной трехцепной электропередачей с шинами неизменного (т. е. постоянного по амплитуде и частоте) напряжения.

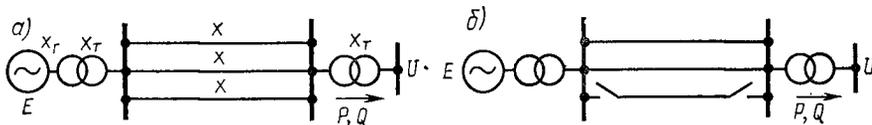


Рис. 3.4. Исходная схема системы и схема после изменения

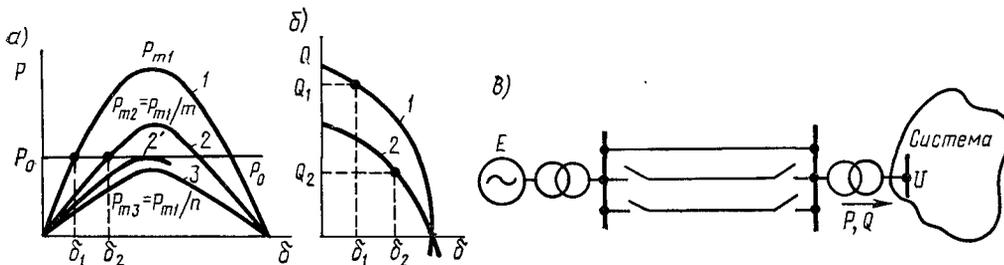


Рис. 3.5. Характеристики активной (а) и реактивной (б) мощности системы, показанной на рис. 3.4:

1 — характеристика, соответствующая схеме, представленной на рис. 3.5, а; 2 — то же, для рис. 3.5, б; 3 — то же, для активной мощности при отключении двух цепей в схеме рис. 3.4

Заметим, что шины, где приложено такое напряжение, часто называют шинами бесконечной мощности (ШБМ). Обычно шины системы, мощность которой в пять раз больше мощности передачи, можно считать ШБМ.

Предположим, что одна цепь линии электропередачи отключилась и схема приняла вид, показанный на рис. 3.4, б. Сопротивление между точками приложения неизменных э. д. с. E и напряжения U выросло в отношении $m = (x_r + 2x_T + x/2)/(x_r + 2x_T + x/3)$. Соответственно максимальное значение активной мощности $P = P_{m2} \sin \delta$ (δ — угол между векторами \vec{E} и \vec{U}) стало в m раз меньше (рис. 3.5, а). Если активная мощность, отдаваемая генератором, не изменилась, то угол δ , рассматриваемый в качестве характерного параметра, увеличился с δ_1 до δ_2 . Новое значение реактивной мощности Q_2 , найденное по характеристике 2 (рис. 3.5, б) при угле δ_2 , будет отличаться от прежнего значения Q_1 . Таким образом, после изменения параметров системы (в данном случае сопротивления в m раз) режим осуществим, если имеется возможность свободного изменения реактивной мощности. Характеристика 2' (рис. 3.5, а) может касаться линии $P_0 = \text{const}$, тогда режим, отвечающий точке касания, будет критическим. Если отключить две цепи электропередачи (рис. 3.5, а), то сопротивление увеличится в $n = (x_r + 2x_T + x)/(x_r + 2x_T + x/3)$ раз. Соответственно в n раз уменьшится максимум характеристики $P = P_{m3} \sin \delta$, которая в этом случае не пересечется с характеристикой $P_r = P_0 = \text{const}$ (и не коснется); следовательно, существование режима будет невозможно (рис. 3.5, а, кривая 3).

3. Рассмотрим электрическую систему, показанную на рис. 3.6, а, где нагрузка H , потребляющая при напряжении U_0 активную P_{r0} и реактивную Q_{r0} мощности, покрывается

четырьмя станциями, причем $\sum_1^4 P_i = P_{Г0}$ и $\sum_1^4 Q_i = Q_{Г0}$. Режим характеризуется графиками, представленными на рис. 3.6, б, в.

Предположим, что одна из станций отключилась и новая характеристика реактивной мощности $Q_{Г1} = f(U)$ пересекается с характеристикой $Q_H = f(U)$ при напряжении U_1 (рис. 3.6, б). Именно это напряжение и установится в послеаварийном режиме, если активная мощность оставшихся в работе трех станций будет автоматически регулироваться так, чтобы при $U = U_1$ наступил баланс активных мощностей (рис. 3.6, в). Практически в системах, аналогичных показанным на рис. 3.6, а, новый установившийся режим определяется по пересечению характеристик Q_H и $Q_{Г0}, \dots, Q_{Г2}$, а станция, регулирующая частоту, обеспечивает баланс активных мощностей.

Если бы мощность отключенной станции была слишком велика, то послеаварийный режим мог бы оказаться неосуществимым по двум причинам:

— «не хватило» реактивной мощности — характеристика $Q_{Г2} = f(U)$ генерации реактивной мощности (кривая $Q_{Г2}$ на рис. 3.6, б) не пересеклась с характеристикой Q_H ;

— «не хватило» активной мощности — регулирующая частоту станция не обеспечила баланс активной мощности.

Заметим, что критическим режимом будет режим в точке k , где $\partial Q_H / \partial U = \partial Q_{Гk} / \partial U$. Таковы простейшие случаи проверки осуществимости режима.

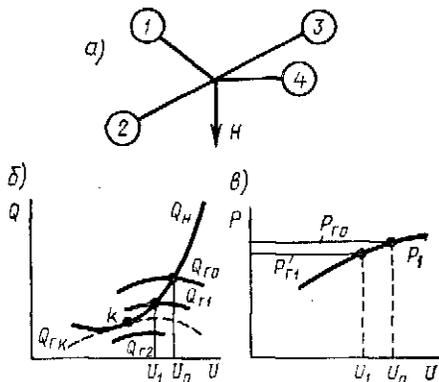


Рис. 3.6. К определению условий существования режима и его параметров по балансу реактивной мощности:

а — схема системы; б — характеристики $Q = f(U)$; в — характеристики $P = f(U)$

Понятия «нехватки» — «недостачи» активной и реактивной мощностей условны. Употребляя их, имеют в виду, что значения частоты и напряжений в системе не должны выходить из некоторого заданного нормативами диапазона. Именно при этом и можно условно говорить о небалансе активной мощности (условно, так как физически в каждый данный момент генерируемая мощность равна мощности, потребляемой в нагрузке и запасаемой в электромеханических элементах).

§ 3.4. УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕЖИМА СИСТЕМЫ

Рассмотрим систему, состоящую из двух станций конечной мощности. Если нагрузка представлена постоянными сопротивлениями, то уравнения системы, согласно (2.20), будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12} \sin (\delta - \alpha_{12}); \\ P_2 &= E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} - E_1 E_2 y_{12} \sin (\delta - \alpha_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Преобразуем (3.9) к виду

$$p_1 = \sin (\delta - \alpha_{12}) \text{ и } p_2 = -\sin (\delta + \alpha_{12}), \quad (3.10)$$

где

$$p_i = \frac{P_i - E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii}}{E_1 E_2 y_{12}}, \quad i = 1, 2.$$

На рис. 3.7 представлены соответствующие характеристики.

Тогда после исключения из (3.10) величины δ получим, что величины p_1 , p_2 и α_{12} связаны соотношением

$$p_1^2 + p_2^2 + 2p_1 p_2 \cos 2\alpha_{12} = \sin^2 2\alpha_{12},$$

которое является уравнением эллипса*, построенного в координатах p_1 , p_2 (рис. 3.8). Внутри эллипса режимы могут осуществляться.

В более сложной системе (число станций больше двух; учет нагрузки статическими характеристиками; учет регулирования) характеристики $p = f(\delta)$ уже не будут синусоидаль-

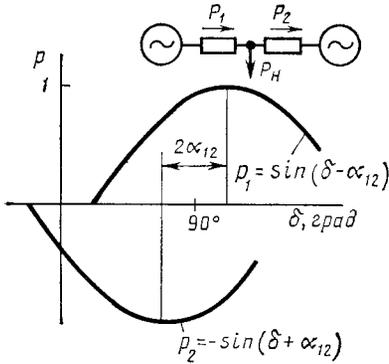


Рис. 3.7. Характеристики мощности $P = f(\delta)$ системы «две станции — нагрузка»

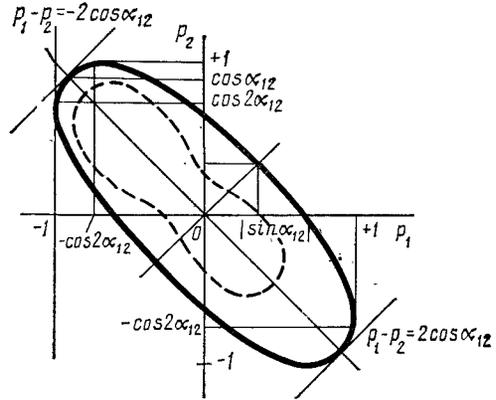


Рис. 3.8. Соотношения допустимых мощностей в системе, показанной на рис. 3.7, по условиям существования (эллипс мощностей)

ными, а эллипсы $p_1 = f(p_2)$ и т. д. будут деформированы, как это показано штриховой линией на рис. 3.8.

Для системы «две станции — шины неизменного напряжения U_0 » (рис. 3.9) режим будет описываться двумя уравнениями:

$$P_1 = E_1 U_0 y_{10} \sin \delta_1 + E_1 E_2 y_{12} \sin (\delta_1 - \delta_2) + \dots ; \quad (3.11a)$$

$$P_2 = E_2 U_0 y_{20} \sin \delta_2 + E_2 E_1 y_{21} \sin (\delta_2 - \delta_1) + \dots , \quad (3.11б)$$

где y_{10} , y_{20} — взаимные проводимости между станциями и шинами; $y_{12} = y_{21}$ — взаимная проводимость между генераторами.

Принимая мощность P_2 заданной постоянной величиной, можно из (3.11а) найти угол $\delta_1 = f(P_2, E_1, E_2, y_{20}, y_{21}, \delta_2)$ и, подставив его в (3.11а), определить и построить (рис. 3.10) $P_1 = f(\delta_1)$ при разных P_2 . Эти зависимости показывают области возможного существования режимов системы.

В еще более сложных случаях (три станции и более при отсутствии ШБМ) выявление условий осуществимости требует исследования описывающих режим нелинейных алгебраических уравнений. Так, уравнения сети, отражающие баланс мощности в ее узлах, имеют вид

$$\widehat{S}_i = \widehat{U}_i \sum_k (\dot{U}_i - \dot{U}_k) Y_{ik}, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, n+1, \quad (3.12)$$

* См.: Морозкин Ю. В., Чертова П. И. Метод расчета стационарного режима сложных электрических систем. — Электричество, 1974, № 3, с. 202—211.

где \hat{S}_i, \hat{U}_i — соответственно сопряженные комплексы мощности и напряжения в i -м узле, Y_{ik} — комплексные проводимости ветвей, соединяющих узлы i и k .

Итерационный процесс решения таких уравнений может или сходиться и давать решение, или расходиться. Первый случай указывает на существование режима, второй не дает непосредственного указания на его осуществление, а требует дополнительной проверки. Нелинейные уравнения вида (3.12) имеют несколько решений, что указывает на теоретичес-

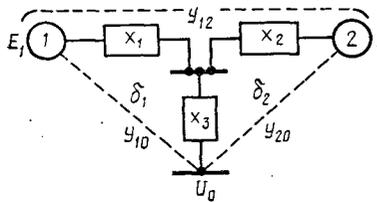


Рис. 3.9. Исследуемая система из двух станций, нагрузки и ШБМ

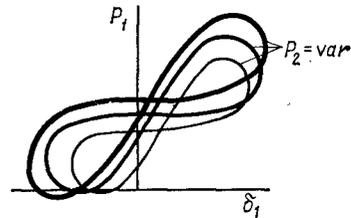


Рис. 3.10. Условия существования режима в системе рис. 3.9:

a — деформация эллипса мощностей; b — возможные нагрузки станции 1; c — возможные нагрузки станции 2

кую* возможность неоднозначности установившихся режимов. Возникает задача построения при заданных условиях некоторых областей, являющихся функциями параметров режима, и отыскание в них подобластей, где будет содержаться не более одного решения, т. е. единственного режима, и областей, в которых решения не будет; иными словами, режим не сможет установиться и существовать.

Сложная система. Для электрической системы, содержащей m электростанций, вместо (3.9) необходимо записать

$$P_i = E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{k \neq i}^m E_i E_k y_{ik} \sin (\delta_{ik} - \alpha_{ik}), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.13)$$

Исследование этой системы уравнений позволит выявить те соотношения параметров, при которых режим теоретически будет неоднозначен или вообще не сможет существовать. Разность между параметрами найденного режима, оцененного как существующий, и параметрами режима, отвечающего границе области существования, косвенно укажет на степень надежности. В частности, очевидно, что все устойчивые режимы будут находиться внутри области существования. Расчеты этого рода очень сложны и требуют таких допущений (обычно $E = \text{const}$, мощности нагрузок задают $Z_n = \text{const}$, частота постоянна), которые делают результаты условными. Поэтому здесь ограничимся простейшими расчетами, полагая, что вся система уже функционирует и осуществимость режима можно проверить, выделив только одно ее сомнительное звено — передающее звено (рис. 3.5) или узел (рис. 3.6).

* В практике эксплуатации систем не наблюдалось случаев, когда режим был бы неоднозначен.

§ 3.5. УПРАВЛЯЕМОСТЬ И НАБЛЮДАЕМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для успешного функционирования электрической системы необходимо в нормальных и переходных режимах осуществлять управление. В простейших случаях управление осуществляется человеком-оператором; в более сложных (современных) — эргатически: сочетанием человека и автоматических устройств; в будущем — кибернетически, т. е. управляющими машинами, действующими по замкнутому циклу с обратной связью. Для реализации любого из этих трех вариантов управления необходимо, чтобы система обладала свойством *наблюдаемости*, при котором можно оценить все параметры ее режима в той их части, которая непосредственно может быть измерена приборами, записана, а также сразу (или после преобразований) подана на вычислительную машину. Оценка может производиться по некоторым функциям параметров режима.

Управляемость прежде всего требует устойчивости режима, причем система должна быть инвариантна к помехам, т. е. обладать способностью противостоять возмущениям, возникающим при ее функционировании, и сохранять при этом свои свойства. Способность к управляемости в аспекте устойчивости частично уже заложена непосредственно в характеристики системы, обеспечивающие ей *саморегулирование*, а частично связана с действием регулирующих устройств. Главное свойство системы, обладающей управляемостью, — это ее способность переходить из некоторого начального (нулевого) режима в требуемый режим и обратно под действием некоторой последовательности управляющих воздействий.

Наблюдаемость, без которой нельзя реализовать управляемость, связана с топологическими* свойствами электрической системы. В самом деле, режим электрической системы задается мощностями, векторами э. д. с. генераторов и напряжений в узлах, а также регулируемыми коэффициентами трансформации. Для исследования переходного режима к этим параметрам добавляются механические и электрические постоянные инерции, генераторов, коэффициенты регуляторов возбуждения и скорости. Все параметры действуют на режим и непосредственно проявляются в определенных точках системы, элементы которой (генераторы, трансформаторы, линии, нагрузки) пространственно (геометрически) и электрически (по схеме замещения) размещены на некотором удалении друг от друга. Следовательно, для того чтобы с учетом этого размещения сделать систему наблюдаемой, необходимо определенным образом разместить измерительные устройства. При этом нельзя не считаться с тем обстоятельством, что получаемая информация содержит погрешности, связанные с неточностью замеров, неодновременностью измерений, шумами в каналах связи, ошибками преобразований аналоговых измерений в цифровые (при вводе их в ЦВМ) и ошибками персонала. Некоторые наблюдаемые параметры режима являются параметрами не детерминированной системы, а стохастической**, что и должно быть учтено при обеспечении ее наблюдаемости.

Проблема обеспечения наблюдаемости системы включает в себя вопросы идентификации отдельных динамических объектов электрических систем, т. е.

* Местоположением отдельных объектов системы (topos — место, logos — понятие).

** Детерминированная система — такая, действия которой однозначно определяются приложенными воздействиями и в этом смысле параметры ее режима строго определены. В стохастической системе действия случайны и параметры режима зависят от вероятностных соотношений, присущих данной системе.

построения математических моделей, подобных исследуемым объектам по поведению, или моделей, функционально им подобных. Важное значение в этой проблеме имеет задача распознавания аварийных ситуаций в электрических системах. Математически эту задачу представляют разделением n -мерного пространства, в котором находятся векторы, изображающие режим на две непересекающиеся области: 1) аварийных ситуаций; 2) нормальных ситуаций. Для аварийных ситуаций оказывается необходимо выбрать комплекс наиболее информативных для заданной задачи параметров, определить наиболее эффективные процессы ликвидации этих аварий. В рамках изучаемой дисциплины нет возможности рассматривать далее общие вопросы управляемости и наблюдаемости* Имея их в виду, будем считать системы полностью и однозначно определенными — детерминированными, наблюдаемыми и управляемыми.

Контрольные вопросы

- 3.1. Какие четыре основных требования предъявляются к установившемуся исходному и послеаварийному режимам?
- 3.2. Какими показателями характеризуется качество электроэнергии?
- 3.3. Что такое осуществимость режима?
- 3.4. Что такое управляемость и наблюдаемость режима?
- 3.5. Назовите показатели качества переходного процесса.
- 3.6. В чем идея оценки качества переходного процесса комплекс-критерием и какова структура такого критерия?
- 3.7. С чем связан уровень частоты в системе?
- 3.8. С чем связан уровень напряжения в системе?
- 3.9. В чем заключается графоаналитический способ определения параметров установившегося режима?
- 3.10. Как понимать часто употребляемое на практике выражение: «не хватило активной (или реактивной) мощности»?

Темы рефератов

1. Качество режимов и качество переходных процессов.
2. Уровень напряжения и выработка реактивной мощности.
3. Уровень частоты и выработка активной мощности.

* См.: *Веников В. А., Кенгерлинский Г. А.* Информация в электроэнергетике. В сб. *Информация и кибернетика/Под ред. А. И. Берга.* — М.: Советское радио, 1967, с. 260; *Гамм А. З., Голуб И. И., Кесельман И. Я.* Наблюдаемость электроэнергетических систем. — *Электричество*, 1975, № 1, с. 12; *Богатырев Л. Л., Стихин Г. П.* Использование методов теории распознавания образов для управления режимами сложных энергетических систем. — *Электричество*, № 12, 1975, с. 6; *Негойце К.* Применение теории систем к проблемам управления. — М.: Мир, 1981, с. 179.

ГЛАВА 4

УСТОЙЧИВОСТЬ КАК ГЛАВНОЕ УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

§ 4.1. УСТОЙЧИВОСТЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ПРОСТЕЙШИЕ МЕТОДЫ ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрическая система, обеспечивающая своим нормальным функционированием работу промышленности, транспорта, быта населения — всю жизненную деятельность городов, районов и всей страны, должна работать надежно. Основным условием надежной работы является ее *устойчивость*, под которой понимают *способность системы восстанавливать свое исходное состояние* — нормальный рабочий режим или режим, практически близкий к нему, *после какого-либо* (большого или малого) *нарушения этого режима*, иначе называемого возмущением. Различают два вида устойчивости:

статическую устойчивость, рассматриваемую в двух аспектах:

— как свойство заданного установившегося режима самовосстанавливаться при ничтожно малых отклонениях параметров его режима P_r от исходных значений, а не «сползать» от них;

— как свойство *постепенно ухудшающегося установившегося режима* противостоять малым отклонениям и малым колебаниям вплоть до некоторого *предельного режима*. Эти два варианта подхода к устойчивости показаны на простейшем стилизованном аналоге на рис. 4.1, а, б;

динамическую устойчивость, рассматриваемую при больших (обычно нелинейных) отклонениях параметров P_r , часто сопровождающихся изменениями конфигурации и параметров электрической системы (числа работающих элементов) и значений их параметров. Различают два вида динамической устойчивости:

синхронную устойчивость — сохранение режима при больших колебаниях, но без проворота (180 — 360°) ротора генератора;

результатирующую устойчивость — восстановление режима после кратковременного нарушения (например, при работе в течение некоторого времени генераторов электрической системы или ее частей несинхронно), но при восстановлении нормальной синхронной работы после нескольких проворотов ротора. Это восстановление может происходить *самостоятельно в силу внутренних свойств системы* или *под действием специальных устройств системной автоматики*. На рис. 4.2, а, б показаны простейшие стилизованные аналоги двух видов динамической устойчивости.

Для обеспечения устойчивости система должна работать с некоторым запасом, характеризуемым *коэффициентом запаса* K_z , т. е. при таких параметрах режима, которые отличаются в $K_z > 1$ раз от критических — тех, при которых может произойти нарушение устойчивости. Для определения запаса устойчивости в данной (работающей или прогнозируемой) системе, параметры которой известны,

и для выбора мероприятий, улучшающих устойчивость, необходим анализ (расчеты) устойчивости с определением критических параметров. В ряде случаев необходим переход к задачам синтеза, например к нахождению изменений параметров режима во времени: $P_p = f(t)$, т. е. установлению вида переходного процесса с выявлением вносимых с помощью устройств системной автоматики воздействий, которые придадут переходному процессу желательный по тем или иным соображениям характер. Выбор устройств и мероприятий, действующих во время протекания процесса, например таких, которые способствуют восстановлению синхронизма после его нарушения и обеспечивают этим результирующую устойчивость, относится к задаче управления переходным процессом.

В настоящей главе будут рассмотрены простейшие случаи устойчивости режима по условиям сползания и синхронная динамическая устойчивость.

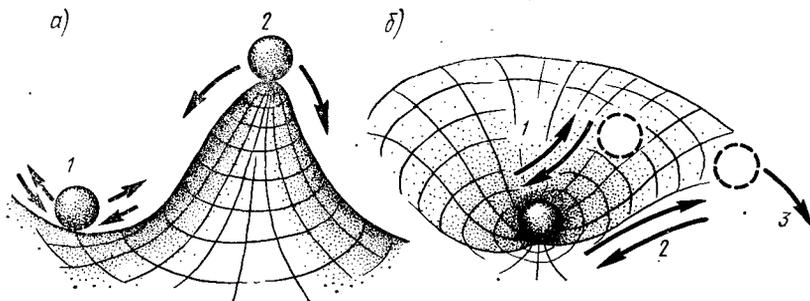


Рис. 4.1. Статическая устойчивость (стилизованнные аналоги) положения (режима):

а — устойчивое 1 и неустойчивое 2 положения; б — колебательная устойчивость 1 и неустойчивость в процессе колебаний 2 с выходом из режима 3

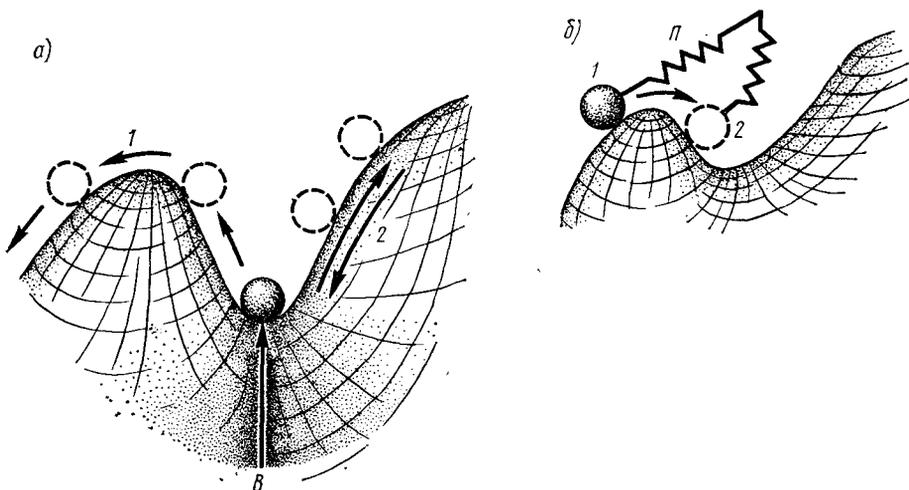


Рис. 4.2. Динамическая устойчивость (стилизованнные аналоги):

а — синхронная устойчивость: В — возмущение; 1 — неустойчивый процесс, 2 — колебания; б — результирующая устойчивость: возвращение в исходное состояние 1 из неустойчивого состояния 1

**§ 4.2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ПО УСЛОВИЯМ СПОЛЗНИЯ
[ТЕКУЧЕСТИ] ПАРАМЕТРОВ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА.
ПРАКТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ**

Выше было указано, что установившийся режим электрической системы может быть неустойчивым. В этом случае малые возмущения приводят к прогрессирующему изменению параметров режима, которые в начале процесса происходят

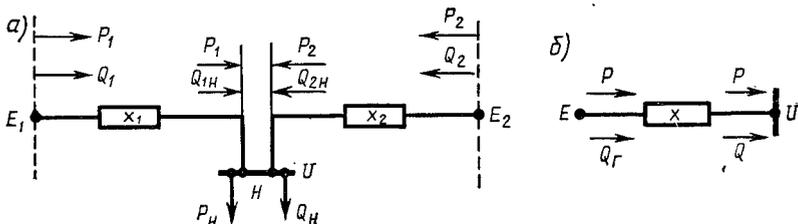


Рис. 4.3. Исследуемая система:
а — исходная схема; б — схема замещения

очень медленно, проявляясь в виде самопроизвольного изменения, называемого иногда *сползанием (текучестью)* параметров нормального режима системы.

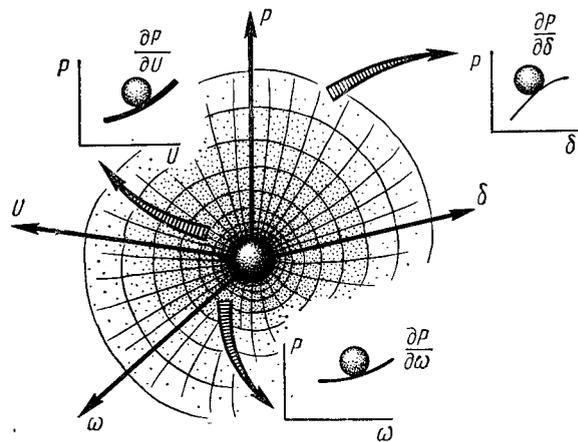


Рис. 4.4. Наглядные стилизованные аналоги статических характеристик $P = \varphi(\delta, U, \omega)$

Здесь P_1, P_2 — активные мощности, отдаваемые генераторными станциями 1 и 2; Q_1 и Q_2 — соответствующие реактивные мощности; P_H, Q_H — активная и реактивная мощности в узле нагрузки. Это так называемые *статические характеристики*, простейшие аналоги которых наглядно представлены на рис. 4.4.

Предположим, что отклонение режима вызывается изменением мощности одной из турбин, изменением активной или реактивной мощности нагрузки или одновременным действием этих факторов. Предполагая последнее, запишем два

Условия возникновения текущести выявляются из анализа соотношений, характеризующих нормальный режим системы.

Рассмотрим характерную систему (рис. 4.3, а). Установившийся режим такой системы определяется общими зависимостями, которые могут быть выражены аналитически или представлены графически:

$$P_1 = \varphi_1(\delta_1, U, \omega);$$

$$Q_1 = \psi_1(\delta_1, U, \omega);$$

$$P_2 = \varphi_2(\delta_2, U, \omega);$$

$$Q_2 = \psi_2(\delta_2, U, \omega);$$

$$P_H = \varphi(U, \omega); \quad Q_H = \psi(U, \omega).$$

Здесь P_1, P_2 — активные мощности, отдаваемые генераторными

уравнения моментов на валах генераторов* и два уравнения баланса мощности при отклонении режима:

для станции 1

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + 0 + \frac{\partial P_1}{\partial U} \Delta U + \left(\frac{\partial P_1}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{T1}}{\partial \omega} \right) \Delta \omega = \Delta P_1;$$

для станции 2

$$0 + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_2}{\partial U} \Delta U + \left(\frac{\partial P_2}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{T2}}{\partial \omega} \right) \Delta \omega = \Delta P_2;$$

для нагрузки 3

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \left(\frac{\partial P_1}{\partial U} + \frac{\partial P_2}{\partial U} - \frac{\partial P_H}{\partial U} \right) \Delta U + \left(\frac{\partial P_1}{\partial \omega} + \frac{\partial P_2}{\partial \omega} - \frac{\partial P_H}{\partial \omega} \right) \Delta \omega = \Delta P_H;$$

$$\frac{\partial Q_{1H}}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial Q_{2H}}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \left(\frac{\partial Q_{1H}}{\partial U} + \frac{\partial Q_{2H}}{\partial U} - \frac{\partial Q_H}{\partial U} \right) \Delta U + \left(\frac{\partial Q_{1H}}{\partial \omega} + \frac{\partial Q_{2H}}{\partial \omega} - \frac{\partial Q_H}{\partial \omega} \right) \Delta \omega = \Delta Q_H.$$

(4.1)

Здесь значения $\partial P/\partial \delta$, $\partial P/\partial U$, $\partial P/\partial \omega$, $\partial Q/\partial \delta$ и т. д., являющиеся коэффициентами при отклонениях параметров режима ($\Delta \delta$, ΔU , $\Delta \omega$), характеризуют не движение системы, а только ее тенденцию к этому движению. Они рассматриваются при малых отклонениях этих параметров как постоянные величины. Полагая, что значения ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_H , ΔQ_H известны, с помощью системы уравнений (4.1) легко найти любое из указанных отклонений параметров режима, т. е. $\Delta \delta_1$, $\Delta \delta_2$, ΔU , $\Delta \omega$. Например,

$$\Delta \delta_1 = (M_{11}/D) \Delta P_1 + (M_{12}/D) \Delta P_2 + (M_{13}/D) \Delta P_H + (M_{14}/D) \Delta Q_H.$$

Здесь M_{11} , M_{12} , M_{13} , M_{14} — соответствующие миноры; D — главный определитель системы уравнений (4.1):

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & 0 & \frac{\partial P_2}{\partial U} & \frac{\partial P_1}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{T1}}{\partial \omega} \\ 0 & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U} & \frac{\partial P_2}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{T2}}{\partial \omega} \\ \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial U} + \frac{\partial P_2}{\partial U} - \frac{\partial P_H}{\partial U} & \frac{\partial P_1}{\partial \omega} + \frac{\partial P_2}{\partial \omega} - \frac{\partial P_H}{\partial \omega} \\ \frac{\partial Q_{1H}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_{2H}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_{1H}}{\partial U} + \frac{\partial Q_{2H}}{\partial U} - \frac{\partial Q_H}{\partial U} & \frac{\partial Q_{1H}}{\partial \omega} + \frac{\partial Q_{2H}}{\partial \omega} - \frac{\partial Q_H}{\partial \omega} \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

* При очень малых медленных отклонениях режима мощность и момент, выраженные в относительных единицах, принимаются равными $P_* = P/P_0 = M/M_0 = M_*$, поскольку $P_* = \omega_* M_*$, где $\omega_* \approx 1$. Однако влияние зависимости (статическая характеристика) мощности от частоты учитывается.

Аналогично тому, как определялось $\Delta\delta_1$, могут быть найдены значения $\Delta\delta_2$, ΔU , $\Delta\omega$. Если при не равных нулю минорах M определитель D окажется равным нулю, то это будет означать, что любое очень малое отклонение величин ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_H , ΔQ_H (всех или какой-либо одной) может вызвать неограниченно большие изменения параметров режима $\Delta\delta_1$, $\Delta\delta_2$, ΔU , $\Delta\omega$, т. е. параметры режима будут самопроизвольно уплывать от исходных значений. Критерием, указывающим на критический режим, будет условие

$$D = 0.$$

Принятый здесь подход к анализу является приближенным уже потому, что в нем выявляется только тенденция системы к неустойчивости без учета характера движения, зависящего от инерционных постоянных системы. *Практические критерии*, таким образом, выявляют только возможную текущую *режима* (сползание), или, как называют иначе, *апериодическую неустойчивость*, не выявляя той неустойчивости, которая может проявляться в виде колебаний — колебательной неустойчивости (самораскачивания).

Принимая на основе практических соображений ряд дальнейших ограничений, например «закрепляя» (принимая постоянными) те или иные параметры режима или, как говорят, «закрепляя сомнительные координаты», из условия $D = 0$ получим частные критерии, т. е. критерии, действующие при тех или иных ограничениях, так называемые *практические критерии устойчивости*. Так, при постоянстве частоты в системе ($\Delta\omega = 0$) напряжения в узловой точке ($\Delta U = 0$) и мощности турбин ($P_{T1} = P_{T2} = \text{const}$) критический по устойчивости режим наступит при

$$dP_i/d\delta_i = 0, \quad (4.3)$$

где $i = 1, 2$ и т. д.

Это очевидно из первого и второго уравнений (4.1), которые дают

$$\Delta\delta_1 = \frac{\Delta P_1}{\partial P_1/\partial\delta_1}; \quad \Delta\delta_2 = \frac{\Delta P_2}{\partial P_2/\partial\delta_2}.$$

При закреплении частоты ($\Delta\omega = 0$) и сохранении баланса активной мощности в узле нагрузки ($\Delta P_H = 0$) условием критического по устойчивости режима будет

$$\partial Q_H/\partial U - \partial(Q_{1H} + Q_{2H})/\partial U = 0.$$

Обозначая $Q_{1H} + Q_{2H} = Q_G$ и учитывая, что дифференцирование происходит только по одной переменной, запишем

$$d(Q_H - Q_G)/dU = 0, \text{ или } d\Delta Q/dU = 0. \quad (4.4)$$

Если учесть, что $\Delta Q = \varphi(E_a)$, где E_a — э. д. с. эквивалентного генератора системы, то вместо (4.4) можно записать

$$dE_a/dU = 0, \text{ или } dU/dE_a = \infty. \quad (4.5)$$

В справедливости последнего выражения легко убедиться, рассмотрев диаграмму (рис. 4.5), из которой очевидно $U = (E_a - Q_x/E_a)/\cos\delta$. Следовательно, при $\delta \rightarrow 90^\circ$, т. е. у предела устойчивости, $dU/dE_a = 1/\cos^2\delta \rightarrow \infty$ или $dE_a/dU \rightarrow 0$.

Этот критерий иногда называют *критерием устойчивости нагрузки*, название, очевидно из следующих соображений. Предположим, что обе станции одинаковы и, следовательно, могут быть замещены одной станцией с мощностями P_r и Q_r .

При этом

$$P_1 = P_2 = P; \quad Q_1 = Q_2 = Q; \quad \Delta\delta_1 = \Delta\delta_2 = \Delta\delta; \quad P_1 + P_2 = P_r;$$

$$Q_{1H} + Q_{2H} = Q_r; \quad Q_{r.э} = Q_r + \Delta Q; \quad \Delta P_1 = \Delta P_2 = 0; \quad \Delta P_H = 0.$$

$$\Delta\omega = 0.$$

Тогда в соответствии с (4.1) имеем

$$(\partial P_r / \partial \delta) \Delta\delta + (\partial P_r / \partial U) \Delta U = 0; \quad (\partial Q_r / \partial \delta) \Delta\delta + [\partial(Q_r - Q_H) / \partial U] \Delta U = \Delta Q_H.$$

Из двух последних уравнений находим

$$\Delta U = \Delta Q_H \left[\frac{\partial(Q_H - Q_r)}{\partial U} - \frac{(\partial P_r / \partial U) (\partial Q_r / \partial \delta)}{\partial P_r / \partial \delta} \right].$$

Допустим, что характеристики нагрузки таковы, что генераторы работают в режиме, когда $\delta < 90^\circ$, и поэтому $\partial P_r / \partial \delta \neq 0$. Кроме того, предположим, что $\partial P_r / \partial U = 0$. В этих условиях появление малейшего изменения реактивной мощности нагрузки ΔQ_H может привести к соотношению $\partial(Q_H - Q_r) / \partial U = 0$, а это при конечном значении $\Delta Q = Q_H - Q_r$ будет указывать на неограниченное изменение напряжений узловой точки ΔU . В этом неустойчивость системы проявляется как неустойчивость нагрузки. Если предположить далее, что эквивалентная нагрузка H питается от шин независимого напряжения (E или U), которое не зависит от режима, и единственной переменной может быть изменение угловой скорости двигателей нагрузки, то практическим критерием двигателей нагрузки будет $dP/d\omega = 0$ или в случае асинхронных двигателей ($\omega = d\delta/dt = s$)

$$dP/ds = 0. \quad (4.6)$$

В табл. 4.1 представлены полученные выше практические критерии устойчивости в определенной форме и указаны типичные случаи их применения.

Однако можно получить другие формы их, варьируя виды записи системы уравнений нормального режима, принимая другие допущения и ограничения. Так, например, если нагрузку в схеме (см. рис. 4.3) представить постоянным сопротивлением, то мощность, выдаваемая каждым (1, 2) генератором, будет зависеть от их взаимного угла $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ и частотных характеристик $P_{i=1,2} = \varphi(\delta_{12}, \omega_1, \omega_2)$. Тогда вместо (4.1) запишем три уравнения:

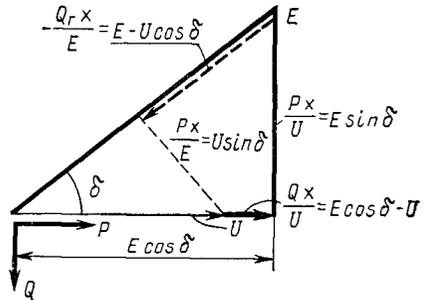


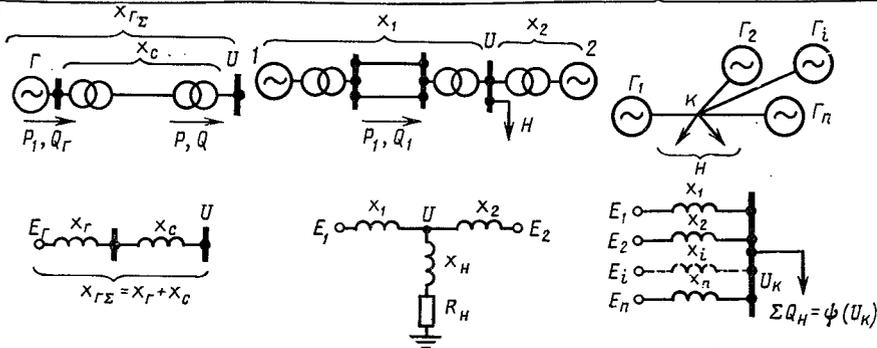
Рис. 4.5. Векторная диаграмма простейшей электрической системы

Простейшая электрическая система (генератор—шины)

Две станции (два эквивалентных генератора), соизмеряемые по мощности и работающие на общую нагрузку

Многостанционная система, имеющая узловую точку

I. Типичная схема и схема замещения



II. Способ задания нагрузки

Генератор отдает мощность в систему неизмеримо большей мощности

$$Z_H = R_H \pm jX_H$$

Статические характеристики комплексной нагрузки: $(U); Q_H = \varphi(U)$

III. Критерий предельного режима

$$\frac{dP}{d\delta} = 0$$

$$\frac{dP}{d\delta_{12}} = 0$$

$$\frac{d\Delta Q_{Г,Н}}{dU_H} = 0$$

IV. Условие подхода к пределу по параметру

$$E_G, U = \text{const}, P = \text{var}$$

$$E_1, E_2 = \text{const}, U = \text{var}$$

$$P = \text{const}, E = \text{const},$$

δ

δ_{12}

U_H (узла)

V. Основные расчетные выражения

$$= \sqrt{\left(U + \frac{Q_{Г\Sigma}}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_{Г\Sigma}}{U} \right)^2}$$

$$P = \frac{E_G U}{x_{Г\Sigma}} \sin \delta;$$

$$P_m = \frac{E_G U}{x_{Г\Sigma}};$$

$$K_{3P} = \frac{P_m - P_0}{P_0} \times 100\%$$

$$P_1 = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12} \sin \times (\delta_{12} - \alpha_{12});$$

$$P_m = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12};$$

$$K_{3P} = \frac{P_m - P_0}{P_0} 100\%$$

$$Q_{Гi} = \frac{E_i U_k}{x_i} \cos \delta_i - \frac{U_k^2}{x_i};$$

$$- \frac{U_k^2}{x_i};$$

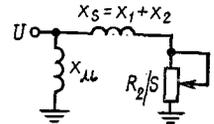
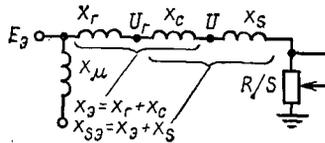
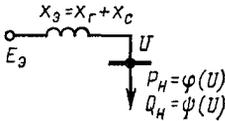
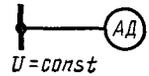
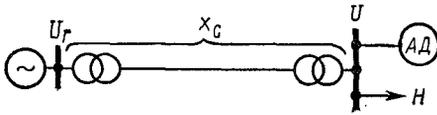
$$\Sigma Q_{Гi} = \sum_{i=1}^n Q_{Гi};$$

$$\Delta Q_{Г} = \Sigma Q_i - \Sigma Q_H;$$

$$K_{3U} = \frac{U_{k0} - U_{k \text{ КР}}}{U_{k0}} 100\%$$

Станция (эквивалентный генератор), питающая через ЛЭП нагрузку соизмеримой мощности

Асинхронный двигатель (эквивалентный), питающийся от мощной системы



Статические характеристики комплексной нагрузки:
 $P_H = \varphi(U)$; $Q_H = \psi(U)$

Эквивалентный асинхронный двигатель

Эквивалентный асинхронный двигатель

$$\frac{dE_g}{dU} = 0; \frac{dQ}{dE_g} = -\infty$$

$$\frac{dE_g}{dU} = 0; \frac{dP}{ds} = 0; \frac{dQ}{dE} = -\infty$$

$$\frac{dP}{ds} = 0$$

$$U = var, P_H = var, Q_H = var$$

$$E_g = const, P = var \text{ (для } dP/ds),$$

$$U = const, P = var$$

$$P = const \text{ (для } \frac{dE}{dU} \text{ и } \frac{dQ}{dU})$$

U

U, s

s

$$E_g = \sqrt{\left(U + \frac{Q_H X_g}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_H X_g}{U}\right)^2};$$

$$E_g = \sqrt{\left(U + \frac{Q X_g}{U}\right)^2 + \left(\frac{P X_g}{U}\right)^2};$$

$$P = \frac{U^2 R_2 S}{R_2^2 + (x_{s2})^2};$$

$$Q_H = Q_H + \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U^2} x_g; K_{SE} =$$

$$P = \frac{E_g^2 R_s}{R^2 + (x_{s2})^2}; \quad Q =$$

$$Q = \frac{U^2 x_{s2}^2}{R_2^2 + (x_{s2})^2};$$

$$= \frac{E_g - E_{кр}}{E_g} 100\%;$$

$$= \frac{E_g^2 x_{s2}^2}{R^2 + (x_{s2})^2}; \quad s_{кр} = \frac{R}{x_{s2}};$$

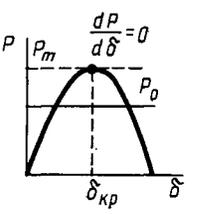
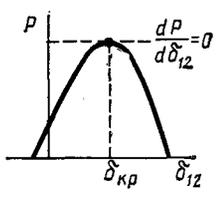
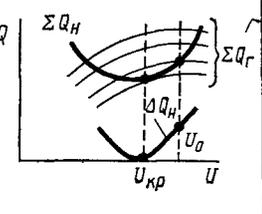
$$P_m = \frac{U^2}{2x_s}; \quad s_{кр} = \frac{R_2}{x_s};$$

$$K_{3U} = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100\%$$

$$P_m = \frac{E_g^2}{2x_{s2}}$$

$$K_{3P} = \frac{P_m - P_0}{P_0} 100\%;$$

$$K_{3U} = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100\%$$

<p>VI. Представление критерия и предела устойчивости</p>	<p>Простейшая электрическая система (генератор—шины)</p> 	<p>Две станции (два эквивалентных генератора), соизмеряемые по мощности и работающие, на общую нагрузку</p> 	<p>Многомашинальная система, имеющая узловую точку</p> 
--	--	---	---

$$\begin{aligned}
 & (\partial \Delta \omega / \partial \delta_{12}) \Delta \delta_{12} - \Delta \omega_1 + \Delta \omega_2 = 0; \\
 & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial P_1}{\partial \omega_1} \Delta \omega_1 + \frac{\partial P_1}{\partial \omega_2} \Delta \omega_2 = \Delta P_1; \\
 & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial P_2}{\partial \omega_1} \Delta \omega_1 + \frac{\partial P_2}{\partial \omega_2} \Delta \omega_2 = \Delta P_2.
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Полагая в (4.7), что расхождение скоростей $\Delta \omega = \Delta \omega_1 - \Delta \omega_2$ очень мало (иначе необходимо было бы учитывать несинусоидальность), приближенно примем в (4.7) $\Delta \omega \approx 0$. Тогда определитель D системы (4.7) будет

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial P_1}{\partial \omega_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \omega_2} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial P_2}{\partial \omega_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \omega_2} \end{vmatrix}. \quad (4.8)$$

Условием наступления критического режима двух станций при $D = 0$ будет соотношение*

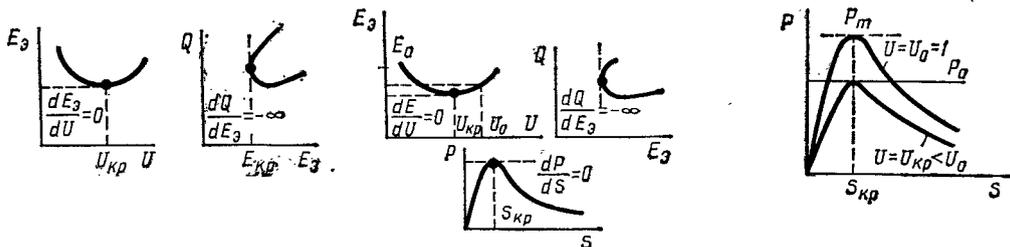
$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \omega_2} + \frac{\partial P_2}{\partial \omega_1} \right) - \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial P_1}{\partial \omega_1} + \frac{\partial P_1}{\partial \omega_2} \right) = 0. \quad (4.8a)$$

Если в системе единая частота $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, то можно считать, что появле-

* В гл. 8 будет показано, что условия (4.8) или (4.9) полностью соответствуют условиям аperiodического нарушения устойчивости при малых колебаниях. Таким образом, проверка устойчивости исходного режима (см. § 4.2) является частным случаем определения устойчивости методом малых колебаний.

Станция (эквивалентный генератор), питающая через ЛЭП нагрузку соизмеримой мощности

Асинхронный двигатель (эквивалентный), питающийся от мощной системы



ние критического режима произойдет, когда так называемый *определятель избыточных моментов* [1]

$$D_{и.м} = \begin{vmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial P_1}{\partial \omega} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial P_2}{\partial \omega} \end{vmatrix} = 0. \quad (4.86)$$

§ 4.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТРАКТОВКА ПРАКТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ

Устойчивость или неустойчивость, как бы они ни рассматривались, неизбежно связаны с энергетическими соотношениями; исследуемая система, получив возмущение, или стремится восстановить исходный (близкий к нему) режим, или уходит от исходного состояния. В первом случае она оценивается как *устойчивая*, во втором — *неустойчивая*.

В установившемся режиме энергия W_r , поступающая в систему извне, расходуется в нагрузке W_n и идет на покрытие потери ΔW в сети:

$$W_r = W, \quad \text{где } W = W_n + \Delta W.$$

Предположим, что энергии, как это и было сделано при определении практических критериев W_r и W , зависят только от одного параметра режима Π , называемого далее *определяющим параметром* $W_r = \varphi_1(\Pi)$, $W = \varphi_2(\Pi)$. Если свойства системы таковы, что расход энергии после возмущения (отклонения $\Delta \Pi$) будет происходить более интенсивно, чем увеличение («генерация») энергии, которую может дать после возмущения внешний источник ΔW_r , то новый (возмущенный) режим не может быть обеспечен энергией и в системе должен восстанавливаться прежний установившийся режим (или режим, близкий к нему). Такая система будет оценена как *устойчивая* (рис. 4.6, а).

Здесь при изменении $\Delta \Pi$ появляется изменение расхода энергии ΔW , кото-

рое будет фактором, задерживающим изменение режима, стимулированное появлением дополнительной «энергии генерации» ΔW_r . Математически сформулированным условием сохранения устойчивости при отклонении определяющего параметра на $\Delta \Pi$ будет, очевидно, условие

$$\Delta W / \Delta \Pi > \Delta W_r / \Delta \Pi,$$

или в дифференциальной форме

$$d(W - W_r) / d\Pi > 0. \quad (4.9)$$

Случай неустойчивости, когда $d(W - W_r) / d\Pi < 0$, показан* на рис. 4.6, б. Отсюда следует общее правило:

устойчивыми будут режимы, при возмущении которых факторы, стремящиеся нарушить их, изменяются менее интенсивно, чем факторы, противодействующие этому нарушению.

Геометрическая интерпретация этого положения, представленная на рис. 4.7, а, сводится к утверждению, что в устойчивых режимах характеристика

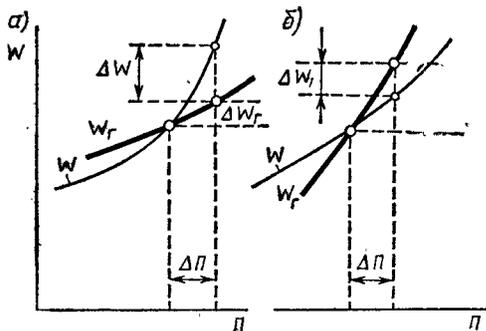


Рис. 4.6. Зависимости энергий в устойчивом и неустойчивом режимах:

а — соотношение энергии, поступающей в систему (W_r) и расходуемой (W) в нагрузке в устойчивом режиме; б — то же, но в неустойчивом режиме; ΔW — расхождение между поступающей в систему энергией и энергией, расходуемой в системе

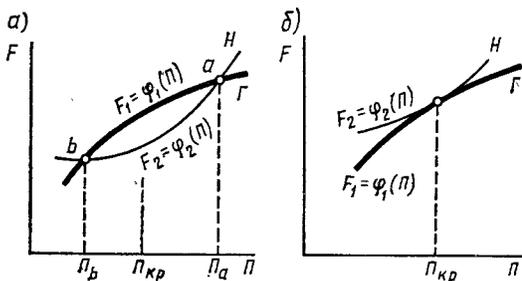


Рис. 4.7. Интенсивность изменения факторов, стремящихся нарушить режим [$F_1 = \varphi_1(\Pi)$], и факторов противодействующих [$F_2 = \varphi_2(\Pi)$]: а — устойчивый (точка а) и неустойчивый (точка б) режимы; б — критический режим

$F_1 = \varphi_1(\Pi)$ фактора, стремящегося нарушить режим, идет более полого, чем характеристика $F_2 = \varphi_2(\Pi)$ фактора, восстанавливающего режим (на рисунке точка а — устойчивый режим, точка б — неустойчивый).

* Подчеркнем, что при использовании критериев типа (4.9) в технических задачах суждение об устойчивости получают, оперируя, как это было сделано ранее, не с полной энергией системы, а с некоторыми зависящими от нее величинами, выявляемыми (из практических соображений) для каждой конкретной задачи. Отсюда и появляются *практические критерии устойчивости*.

В критических режимах характеристики, графически представляющие изменение фактора, стремящегося нарушить режим, и фактора, восстанавливающего режим, не пересекаются, а только касаются друг друга (рис. 4.7, б).

Оценка устойчивости системы исходя из соотношения характеристик типа (4.9), показывающих интенсивность внешнего воздействия на систему и изменение ее свойств под влиянием этого воздействия, применяется во многих случаях. Так, в статистической физике аналогичная оценка осуществляется на основе известного принципа Ле Шателье*; в теории коле-

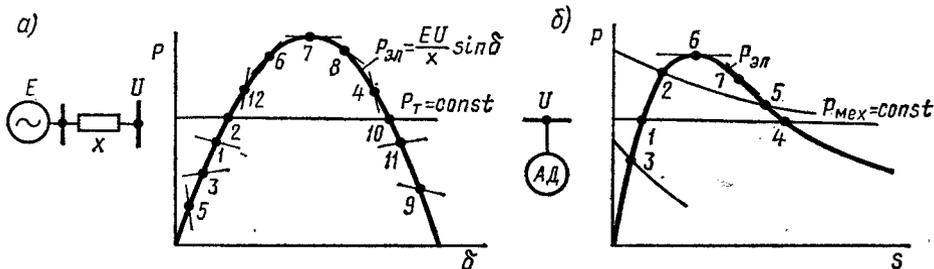


Рис. 4.8. Примеры устойчивых и неустойчивых режимов:]

а — для генератора, работающего на шины неизменного напряжения; б — для асинхронного двигателя
Тонкими линиями изображены характеристики мощности турбины $P_T = f(\delta)$ и характеристики $P_{\text{мех}} = f(s)$. Жирными линиями изображены характеристики электромагнитной мощности $P_{\text{эл}} = f(\delta)$ и $P_{\text{эл}} = f(s)$

баний применяется энергетический принцип определения устойчивости режима**, указывающий условия возможного ухода системы из положения равновесия. В сопротивлении материалов полагают, что состояние деформируемой системы будет устойчиво, если энергия ее деформации окажется больше работы внешних нагрузок. Если внешние силы являются консервативными, т. е. работа, обусловленная только начальным и конечным положениями, не зависит от траекторий перемещения, то устойчивость оценивается по приращению полной энергии системы при изменении ее состояния***. В экономических, биологических и других задачах существуют критерии устойчивости, аналогичные (4.9), которые учитывают интенсивность изменения факторов, изменяющих или задерживающих режим системы.

Энергетические соотношения в основных практических критериях устойчивости. Простейшая электрическая система. Рассмотрим характеристику системы, показанной, на рис. 4.8, а, состоящую из синхронного генератора, работающего через реактивное сопротивление x на шины неизменного напряжения. Предполагаем, что в этой системе параметром Π , от которого зависит изменение режима и по которому должна проверяться устойчивость, будет угол δ расхождения векторов э. д. с. E и напряжения U . От выражения энергии в (4.9) легко перейти к выражению мощности, продифференцировав по времени обе части его. Тогда запишем

$$d(P - P_T)/d\Pi > 0, \quad (4.10)$$

* См.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. — М.: Наука, 1964, с. 84.

** См.: Харкевич А. А. Автоколебания. — М.: ГИТТЛ, 1953, с. 9—11.

*** См.: Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967, с. 33,

где P — электромагнитная мощность генератора, тормозящая турбину; P_T — мощность, развиваемая турбиной, стремящаяся увеличить параметр $\Pi = \delta$.

Если мощность турбины, как это обычно полагают, не зависит от изменений угла, то практический критерий устойчивости простейшей (рис. 4.8, а) системы имеет вид

$$\boxed{dP/d\delta > 0.} \quad (4.11)$$

Если $dP_T/d\delta \neq 0$, то теоретически возможны показанные на рис. 4.8, а состояния, когда система будет устойчива в режимах 1, 2, 3, 4, 5 и неустойчива в режимах 9, 10, 11, 12. Критическими будут режимы 6, 7, 8, при которых характеристика $P_T = f(\delta)$ окажется касательной к характеристике $P_{эл} = f(\delta)$. Критерию $dP/d\delta > 0$ можно дать простую физическую трактовку. В устойчивых режимах (например, режим 2) при случайном малом увеличении угла δ на величину $\Delta\delta$ (возмущении режима) появляются избытки электромеханического (тормозящего) момента над механическим (вращающим): $\Delta M_T = \Delta P/\omega_0$ — и отклонившийся на $\Delta\delta$ ротор возвращается в исходное (устойчивое) состояние.

Асинхронный двигатель. На рис. 4.8, б показаны характеристики асинхронного двигателя, подключенного к узловой точке системы, имеющей неизменное напряжение U . В этом случае устойчивость проверяется по параметру $\Pi = s$ (скольжение двигателя) и соотношениям его механической (увеличивающей s) $P_{мех}$ и электрической (вращающей) P мощности. Критерий (4.9) принимает здесь вид

$$\boxed{d(P_{эл} - P_{мех})/ds > 0.}$$

Этот критерий указывает, что на рис. 4.8, б режимы 1, 2, 3 — устойчивые, режимы 4, 5 — неустойчивые, 6, 7 — критические. Физическая трактовка заключается в рассмотрении изменения соотношений моментов ускоряющего (электромагнитного) и тормозящего (механического) при возмущении режима. Отличие от случая, показанного на рис. 4.8, а, состоит в том, что возмущением (B) является изменение скольжения на Δs и электрический момент ускоряет ротор (уменьшает скольжение), а не тормозит (не уменьшает скорость).

При $P_{мех} = P_0 = \text{const}$ критерий устойчивости имеет вид

$$dP/ds > 0. \quad (4.12)$$

Узловая точка системы. Узел, в котором обеспечен баланс активной мощности (имеется регулирующая станция), но может нарушаться баланс реактивной мощности, требует для сохранения устойчивости выполнения условия

$$\boxed{d\Delta Q/dU > 0} \quad , \quad \text{где } \Delta Q = \Sigma Q_H - \Sigma Q_T.$$

При этом справедливы те же энергетические соотношения, выявляемые как функции напряжения, зависящего от получения (Q_T) и потребления (Q_H) реактивной мощности.

§ 4.4. ПРИМЕНЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Задача применения практических критериев статической устойчивости сводится к анализу поведения системы при случайном относительно малом текущем изменении параметров режима системы. При этом необходимо прежде всего найти ответ на вопрос: не приведут ли малые возмущения режима, неизбежно существующие в нормальной работе системы, к медленному уходу (сползанию) режима от начального и переходу от синхронного к асинхронному режиму? Простейший анализ, дающий грубый ответ на этот вопрос, приводится с помощью практических критериев статической устойчивости. Однако эти методы исследования не дают ответа на вопрос: не вызовут ли возмущения режима в дальнейшем таких колебаний, которые длительное время не будут затухать или даже, напротив, будут нарастать (самораскачивание)? Исследование характера колебаний, требующее учета инерционных постоянных элементов системы, обычно проводится без определения изменений параметров режима во времени и позволяет ответить только на вопрос: не получит ли система установившихся или нарастающих колебаний после малых толчков? Метод исследования основывается на известной из механики теории малых колебаний (согласно этой теории, нелинейная исследуемая система линеаризуется), в аппарат которой вносится ряд специфических дополнений.

Так как зависимости $P_1 = \varphi(P_2)$ рассматриваются как статические, т. е. характеризующие нормальный режим и его свойства при очень медленных изменениях параметра (тенденции к изменению P), то всегда можно в приведенных критериях заменить P на ωM , где M — вращающий момент, и, следовательно, во все критерии типа (4.9) ввести M вместо P .

Запас статической устойчивости. Из всякого существующего устойчивого режима можно получить неустойчивый последующим его утяжелением, например увеличением нагрузки. Сопоставляя параметры существующего устойчивого режима P_a с параметрами нового режима, полученного в результате утяжеления и лежащего на границе между устойчивым и неустойчивым режимами, т. е. критического режима $P_{кр}$, находим (см. рис. 4.7, а, б)

$$K_{з.ст.} = [(P_{кр} - P_a)/P_a] \cdot 100\%.$$

Например, для синхронного генератора и двигателя соответственно (рис. 4.8, а, б)

$$K_{з.ст.} = [(P_7 - P_2)/P_2] \cdot 100\%;$$

$$K_{з.ст.} = [(P_6 - P_1)/P_1] \cdot 100\%.$$

Запас устойчивости (по напряжению) для узловой точки системы будет

$$K_{з.ст.} = [(U_0 - U_{кр})/U_0] \cdot 100\%.$$

§ 4.5. СОВМЕЩЕНИЕ РАСЧЕТОВ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА И ОЦЕНКИ ЕГО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Если в процессе расчета нормального режима системы, обычно проводимого итеративно на каждом его этапе, вычислять определитель (4.2), то прохождение его через нуль будет сразу же указывать на физическую неустойчивость данного режима, проявляющегося в виде сползания или текучести. Математически $D = 0$ должно означать нарушение сходимости (устойчивости) математического решения. Связь между сходимостью (математической ус-

тойчивостью) и физической устойчивостью заключается в том, что при подходе к предельному режиму ухудшается обусловленность матрицы, что, в свою очередь, ухудшает сходимость. Однако такой подход к оценке устойчивости встречает трудности. В принятой практике расчетов нормального режима эти расчеты связаны с итеративными решениями системы нелинейных уравнений, имеющих в векторной записи вид:

$$W(x, y) = 0,$$

где W — вектор-функция небалансов мощностей в узлах системы; x, y — векторы зависимых и независимых переменных.

Итеративные решения (например, по методу Ньютона) не всегда обладают вычислительной устойчивостью — сходимость в физически устойчивом, установившемся режиме — и, наоборот, могут быть вычислительно устойчивыми в режиме физически неустойчивом. Поэтому для выявления устойчивости итеративные расчеты установившихся режимов выполняются при дополнительных условиях*, которые рассматриваются в дисциплине «Алгоритмы энергетики».

§ 4.6. ПРОСТЕЙШАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ОДНОГО РЕЖИМА К ДРУГОМУ [ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ]

Выше были рассмотрены условия устойчивости системы, которая подвергалась в установившемся режиме случайным, очень малым возмущениям (отклонениям режима), т. е. условия статической устойчивости**. Для их определения применялись практические критерии, основанные на совместном рассмотрении статических характеристик электрических и механических мощностей (вращающих и тормозящих моментов). Статические характеристики, полученные при очень медленных изменениях режима, отражают установившееся его состояние. Они не зависят от скоростей изменения параметров режима и характеризующих эти скорости параметров системы (постоянные инерции, постоянные времена контуров ротора вращающихся машин).

При появлении в системе больших возмущений (резких изменений режима), таких как короткие замыкания, отключения или включения нагрузок, генераторов, трансформаторов, линий передач и других элементов системы, вместо статической задачи (статической устойчивости) приходится рассматривать задачу динамическую (динамическую устойчивость). При этом необходимо учитывать нелинейности основных характеристик [$P = \phi(\delta)$, $Q = \psi(\delta)$ и т. д.] и, рассматривая движение системы, учитывать ее инерционные параметры, определяющие скорости изменения параметров режима.

* См.: Идельчик В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. — М.: Энергия, 1977; Оценка статической устойчивости электрических систем на основе решения уравнений установившегося режима/Веников В. А., Стров В. А., Идельчик В. И., Тарасов В. И. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1971, № 5; Марковиц И. М., Баринов В. А. О критерии статической устойчивости, базирующемся на сходимости итерационного процесса установления исследуемого режима. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1970, № 5; Баринов В. А. К исследованию аperiodической устойчивости сложных электроэнергетических систем. — Электричество, 1976, № 7.

** Определеение понятий «статическая устойчивость» и «динамическая устойчивость» было дано в § 1.1 и 4.1.

При больших возмущениях, связанных с резкими изменениями режима, э. д. с. генераторов не будут неизменными, как это с достаточным основанием принималось при рассмотрении малых возмущений (статической устойчивости). Однако учет изменения э. д. с. во времени [$E = f(t)$] сильно осложняет расчеты и в первом приближении их можно упрощенно проводить, учитывая генераторы квазипереходными (квазидинамическими) характеристиками мощности, т. е. при $E = E' = \text{const}$.

Тогда для простой системы (рис. 4.9, а) запишем

$$P = E^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + EU y_{12} \sin (\delta - \alpha_{12}). \quad (4.13a)$$

Если активное сопротивление не учитывается, то

$$P = EU y_{12} \sin \delta \quad \text{или} \quad P = \frac{EU}{x_{12}} \sin \delta, \quad (4.13б)$$

где $y_{12} = 1/x_{12}$. В простейшем случае $x_{12} = x_2$ — суммарное сопротивление цепи от точки приложения э. д. с. E до шин U (рис. 4.9, б).

Электромагнитный момент, действующий на валу генератора и определяющий характер его движения, находится как $M = P/\omega$, однако в тех электромеханических процессах, которые будут рассматриваться в этом параграфе, можно без большой погрешности принять $\omega = \omega_0 + \Delta\omega \approx \omega_0$. Основанием для этого является то, что скорость в начале процесса $\Delta\omega$ вследствие большой инерционности ротора изменяется медленно (100—200 град/с) и составляет, следовательно, не более 1—2% по отношению к синхронной скорости ($\omega_0 = 360 \cdot 50 = 18\,000$ град/с). В условиях таких малых изменений скорости для приближенных расчетов устойчивости обычно принимают, что при записи в относительных единицах (при $\omega_0 = 1$) изменения момента* численно равны изменениям мощности:

$$\Delta M = \Delta P / (\omega_0 + \Delta\omega) = \Delta P / \omega_0 \quad \text{или} \quad \Delta M_* = \Delta P_*,$$

соответственно $M_* = P_*$. Заметим, что далее на рисунках и в формулах звездочка будет опускаться.

Рассмотрим резкое изменение режима в системе (рис. 4.9, а, б), вызванное отключением одной из параллельных цепей электропередачи. Предположим сначала, что активное сопротивление не учитывается, и построим согласно (4.13б) характеристики режима (рис. 4.10, а).

Из рассмотрения этих характеристик следует, что резкое изменение параметров системы приводит к переходу ее из режима *I*, соответствующего схеме *I* (рис. 4.9), в режим *II*, отвечающий схеме *II*. Это вызывает изменение электромагнитного момента на валу каждого генератора системы от $M_0^I = M_T$ до $M_0^{II} \neq M_T$ (рис. 4.10, а). Появившийся небаланс между ускоряющим моментом турбины ΔM_0 и тормозящим электромагнитным моментом генератора ($\Delta M_0 = M_T - M^{II}$) приводит к тому, что генератор начинает изменять скорость. Если $M^{II} < M_T$, то скорость будет увеличиваться сверх синхронной на величину $\Delta\omega$ (рис. 4.10, б). Избыточный момент ΔM при этом будет уравновешиваться не только электромагнитным моментом, соответствующим отдаваемой генератором в

* Разумеется, соотношение $M = P/\omega$ справедливо при значении ω , соизмеримом с ω_0 . Бессмысленно применять это соотношение при $\omega = 0$ и т. д.

сеть электроэнергетики, но и моментом, отвечающим накапливаемой ротором кинетической энергии, определяемой как $\int \Delta M d\delta = A$. Уравнение движения генератора в простейшем случае (без учета демпфирования и действия регулирующих устройств) запишется следующим образом*:

$$\Delta M = M_T - M^{II} = T_J d\Delta\omega/dt.$$

Здесь T_J — некоторый коэффициент, характеризующий инерцию ротора генератора; $\Delta\omega$ — изменение угловой скорости по отношению к синхронной ω_0 ; $d\Delta\omega/dt = d^2\delta/dt^2 = \alpha$ — ускорение; δ — угол сдвига э. д. с. генератора по отношению к оси, вращающейся с угловой скоростью ω_0 . Числовое значение и размерность коэффициента T_J зависят также от способа записи уравнения и размерности остальных его членов**. В общем случае момент M является функцией скорости и изменяется при изменении режима системы:

$$M^{II} = \varphi(\delta, \Delta\omega).$$

В простейшем случае предполагается, что $M^{II} = M_m^{II} \sin \delta$. Тогда запишем $T_J d^2\delta/dt^2 = M_0 - M_m^{II} \times \sin \delta$, или, полагая $M = P$,

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0 - P_m^{II} \sin \delta. \quad (4.14)$$

Любые начальные изменения режима получают отражение в изменении угла δ_0 , значениях мощности P_0 , амплитуды характеристики P_m .

Интегрируя (4.14), можно определить изменение скорости $\Delta\omega = f(t)$. По характеру изменений скорости

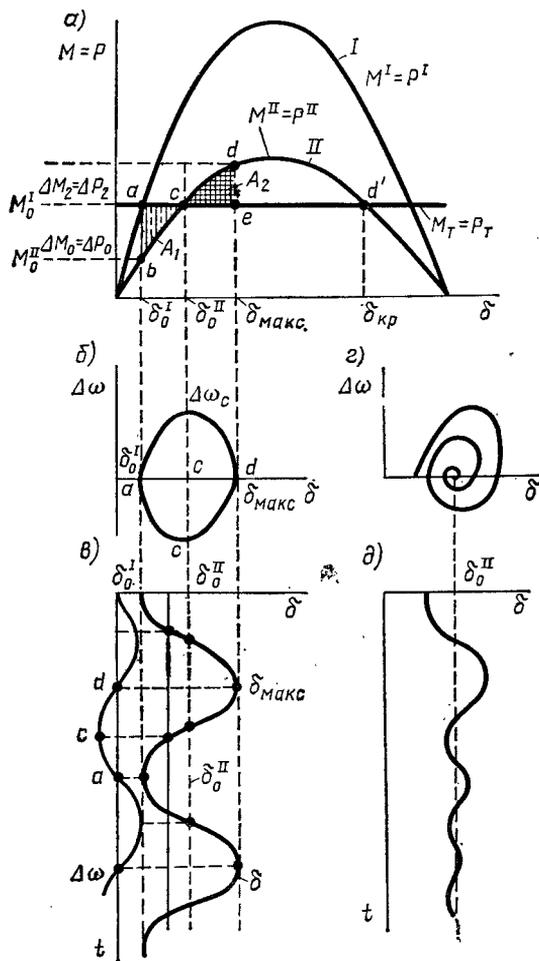


Рис. 4.10. Характеристики динамического перехода: схема I — $P^I = (EU/0,5x)\sin\delta$; схема II — $P^{II} = (EU/x)\sin\delta$:

a — характеристики режима $P=f(\delta)$ для схем I и II; б — зависимость изменений скорости $\Delta\omega = \omega - \omega_0 = f(\delta)$ (на фазовой плоскости), здесь ω — текущее значение скорости, ω_0 — синхронная скорость; в — изменение $\delta = f(t)$, $\Delta\omega = \varphi(t)$, обозначения те же, что и на рис. б; г — изменение скорости $\Delta\omega = \varphi(t)$ при диссипативной системе; д — изменение угла $\delta = f(t)$ при диссипативной системе

* См.: Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. — М.: Энергия, 1980, с. 601.

** См. ПЗ. Здесь и далее, если не будет сделано специальных оговорок, уравнения записаны в относительных единицах.

$\Delta\omega(t)$ и угла $\delta(t)$, можно судить о том, сохранит ли система синхронную работу (будет ли динамически устойчива) после резкого возмущения и последующего перехода от одного режима к другому (рис. 4.10, в, г). Однако, к сожалению, даже в таком простейшем виде интеграл уравнения (4.14), т. е. зависимость $\delta = f(t)$, не выражается через конечную комбинацию известных трансцендентных величин. Здесь не удастся воспользоваться и известными (заранее вычисленными и сведенными в таблицы) функциями. Только при приближенном решении или в частном случае величину δ можно выразить через эллиптические функции. Приближенное решение такого рода довольно громоздко, а случай, когда $P_0 = 0$, соответствующий отсутствию вращающего момента у первичного двигателя, не представляет практического интереса, поэтому здесь не будет рассматриваться. Таким образом, интегрирование уравнения движения (4.14) или аналогичного ему представляет значительные трудности. В большинстве случаев его удастся провести только применяя приближенные методы. Иногда динамическую устойчивость системы можно проверить (грубо) без выявления характера движения по времени из соотношения возможных изменений энергии в разных фазах движения — с помощью так называемого *способа площадей*. Чтобы пояснить этот способ, рассмотрим рис. 4.10.

Изменение характеристик электрической мощности $P = f(\delta)$ с I на II , связанное с изменением схемы (см. рис. 4.9), приводит к появлению небаланса момента ΔM . Под действием его происходит относительное перемещение ротора генератора*. Величина ΔM в общем случае зависит от положения ротора в пространстве, т. е. от значения угла δ .

Будем считать, что движение ротора происходит только под действием сил (вращающих моментов), зависящих от положения ротора в пространстве (позиционная система), хотя в действительности на его движение влияют другие факторы, в частности изменение скорости, которое далее будет приближенно учтено.

Из теоретической механики известно, что при движении со скоростью v материальной точки x массой m под действием силы F , зависящей от положения этой точки, происходит работа, определяемая как приращение кинетической энергии на пройденном пути. Так, при движении от b_1 до b_2 с начальной скоростью, равной нулю, можно записать

$$\frac{mv^2}{2} = \int_{b_1}^{b_2} F dx = A. \quad (4.15)$$

Величина A на графике $F = \varphi(x)$ представляется площадью, пропорциональной кинетической энергии, запасенной движущимся телом при изменении скорости (см. ПЗ).

Переходя к соотношениям, отвечающим электрической системе (см. рис. 4.9), и рассматривая изменения скорости по отношению к неизменной синхронной скорости ω_0 , можно по аналогии с (4.15) записать (рис. 4.10, а)

* При этом предполагается, что в случае несимметричных режимов движение ротора определяется только составляющей момента прямой последовательности.

$$A_1 = \int_{\delta_0^I}^{\delta_0^{II}} \Delta P d\delta = \frac{T_J \Delta \omega^2}{2}. \quad (4.16)$$

При сделанных допущениях, считая $M = P$, можно определить кинетическую энергию при перемещении ротора от угла δ_0^I до угла δ_0^{II} :

$$A_1 = \int_{\delta_0^I}^{\delta_0^{II}} (P_0 - P_m^II \sin \delta) d\delta = P_0 (\delta_0^{II} - \delta_0^I) + P_m^II (\cos \delta_0^I - \cos \delta_0^{II}).$$

На рис. 4.10, а величина A_1 определяется площадкой $abca$.

Определение размаха колебаний и проверка устойчивости при внезапном изменении электрической нагрузки генератора. Изменение режима генератора (отраженное в изменении или сопротивления связи генератора и шин нагрузки, или напряжения на шинах нагрузки, или его э. д. с.) приводит к перемещению точки, определяющей режим системы, с характеристики I на характеристику II при $\delta = \delta_0^I$. Возникающий небаланс ΔP_0 между электрической и механической мощностями (моментами) приводит к появлению ускорения $\alpha = \Delta P/T_J$ и относительному перемещению ротора (рис. 4.10, а, б, в) со скоростью $\Delta \omega$, определяемой, согласно (4.16), выражением

$$\Delta \omega = \sqrt{\frac{2}{T_J} \int \Delta P d\delta}. \quad (4.17)$$

Изменение $\Delta \omega = f(\delta)$ показано на рис. 4.10, б, изменение угла $\delta = f(t)$ и скорости $\Delta \omega = \varphi(t)$ — на рис. 4.10, в.

Во время движения ротора (рис. 4.10, а—в) при $\delta = \delta_0^{II}$ электрическая и механическая мощности оказываются равными. Однако наличие кинетической энергии A_1 , запасенной ротором в процессе его ускорения и пропорциональной площадке $abca$, приводит к тому, что ротор движется далее, проходя точку c и увеличивая угол δ . При движении от точки c к точке d ротор испытывает торможение под действием электрической мощности, которая при этом становится больше механической. Кинетическая энергия, запасенная при ускорении, иногда называется *энергией ускорения*. При графической интерпретации энергия $A_1 = A_{\text{уск}}$ равная площадке $abca$, «расходуется» (переходит в потенциальную) во время движения ротора от точки c к точке d . В точке d вся кинетическая энергия, полученная при ускорении, оказывается «израсходованной», при этом скорость $\Delta \omega$ становится равной нулю. Однако движение не может прекратиться, так как потенциальная энергия достигла максимума и на ротор действует избыточный электрический момент $\Delta M_2 = \Delta P_2$. Под действием его ротор снова подходит к точке c со скоростью $\Delta \omega_c = \Delta \omega_{\text{макс}}$ и кинетической энергией $A_2 = A_{\text{торм}}$ (полученной при торможении на участке cd). Эта энергия пропорциональна площади $cdec$. В точке b скорость $\Delta \omega$ и кинетическая энергия равны нулю и процесс начинается сначала (под действием $\Delta P_0 = \Delta M_0$; см. рис. 4.10, б).

Итак, энергия, запасенная ротором в процессе ускорения, математически выражается как интеграл $\int_{\delta_0^I}^{\delta_0^{II}} \Delta P d\delta$ и представляется графически в виде пло-

щадки $abca$. Энергия торможения математически выражается как интеграл $\int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} \Delta P d\delta$ и представляется графически в виде площадки $cdec$. Эти площадки, соответствующие энергии, запасенной при торможении и ускорении, в дальнейшем будем называть соответственно площадками ускорения и торможения.

Этап движения	Генератор Диаграммы:		Аналогии качаний генератора			Энергия	
	угловая	векторная	Маятник	Масса с пружиной	Цепь LC	К	П
1						—	■
2						■	■
3						■	—
4						■	■
5						—	■
6						■	■
7						■	—
8						■	■

Рис. 4.11. Движение консервативных систем (генератора, маятника, массы с пружиной, цепи LC) и изменение их кинетической и потенциальной энергий на различных стадиях движения

Правило площадей в общем виде формулируется так:

$$A_{\text{уск}} = A_{\text{торм}} \text{ или } \int_{\delta} \Delta P d\delta = 0. \quad (4.18)$$

Соотношение (4.18) является простейшим *практическим критерием динамической устойчивости*.

При всех относительных перемещениях ротора сумма кинетической [K] и потенциальной [П] энергии остается неизменной:

$$K + \Pi = \text{const}, \text{ где } K \equiv A_{\text{уск}}.$$

Отдельные этапы процесса движения ротора генератора (качаний генератора) наглядно изображены на рис. 4.11, где одновременно показаны изменения кинетической и потенциальной энергий как при качаниях генератора, так и при трех аналогичных этим качаниям процессах. Все системы, изображенные на рис. 4.11, являются *консервативными*; предполагается, что в них нет потерь, зависящих от скорости (не учитываются мощность демпфирования, потери на трение и т. д.).

*Способ площадей, следовательно, основан на предположении, что рассеяние энергии не происходит, т. е. что рассматриваемая система консервативна**.

При учете активного сопротивления и использовании соответственно выражения мощности (момента) в виде (4.13а) система также рассматривается как консервативная, поскольку предполагается, что потери в ней I^2R не зависят от изменения угловой скорости ротора $\Delta\omega$. Поэтому здесь с теми же основаниями применяется способ площадей.

Критический случай. Возможен случай, когда энергия, израсходованная при торможении, точно уравнивается энергией, полученной при ускорении, в

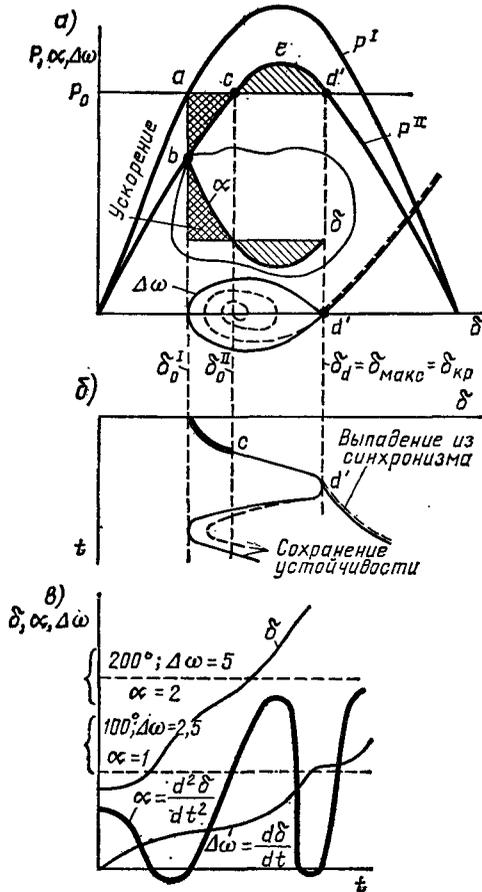


Рис. 4.12. Предельный случай при нарушении режима системы:

α — угловые характеристики мощности $P=f(\delta)$; характеристика ускорения $\alpha=f(\delta)$ и скорости $\Delta\omega=f(\delta)$; б — возможные изменения δ во времени; в — возможный характер изменения параметров режима δ , α , $\Delta\omega$ во времени

* Для качественного анализа способ площадей может применяться и в тех случаях, когда система не консервативна, т. е. когда при относительном движении системы происходит изменения ее полной энергии за счет потерь, зависящих от скорости движения ротора (см. гл. 7).

точке d' при $\Delta P = 0$. Эту точку можно назвать критической, так как при малейшем увеличении угла δ сверх значения $\delta_a = \delta_{кр}$ на ротор будут действовать ускоряющие силы. На рис. 4.12 представлен такой случай: площадки ускорения и торможения уравнились как раз тогда, когда ротор дошел до точки d' . В точке d' кинетическая энергия и скорость $\Delta\omega$ стали равны нулю; силы, действующие на ротор (ускорение α), также равны нулю. Теоретически это положение пред-

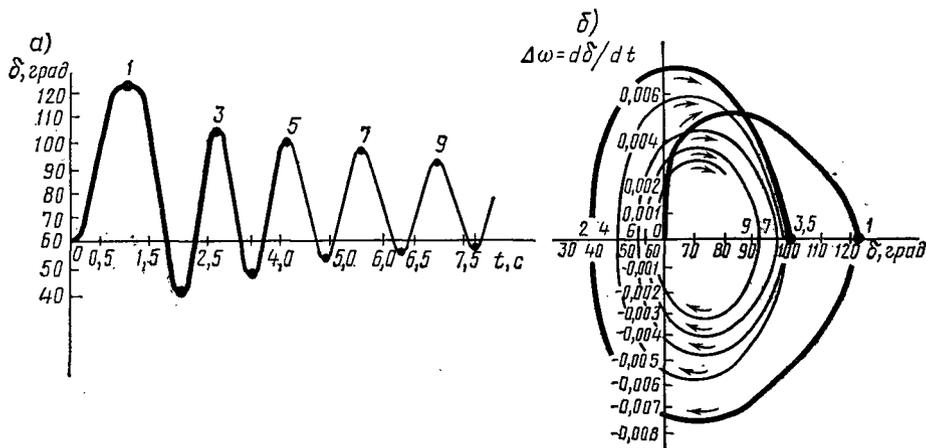


Рис. 4.13. Переходный процесс в устойчивой системе:
 а — изменение $\delta=f(t)$; б — изменение $\Delta\omega=\Psi(\delta)$

ставляет собой положение равновесия. Однако оно неустойчиво, так как малейшее отклонение ротора приводит к появлению тормозящего или ускоряющего момента. Начинается либо торможение ротора с последующим возвращением его к устойчивой точке равновесия c , либо прогрессирующее нарастание угла и выпадение из синхронизма. Выпадение из синхронизма при достижении критической точки d' характеризуется постепенным нарастанием угла. Такой вид нарушения устойчивости иногда называют *апериодическим нарушением устойчивости*. В консервативных системах нарушение устойчивости всегда происходит как апериодическое. Случаи колебательного нарушения устойчивости, или самораскачивания, которые также возможны в электрических системах, будут рассмотрены далее.

Случай, когда система находится на границе устойчивости (точка d'), — критический, в котором равновероятно как сохранение устойчивости при переходе от режима I к режиму II , так и ее нарушение.

Большинство иллюстраций в этой главе, показывающих характер переходных процессов, относится к консервативным системам. Как меняется характер этих процессов при учете потерь, зависящих от скорости (диссипативная система), видно из рис. 4.10, z , d , 4.13.

Запас устойчивости. Уверенность в устойчивости перехода будет, очевидно, в случаях, когда при колебаниях ротор не достигнет критического положения (точка d'), в котором может начаться прогрессирующее увеличение угла. Такой заведомо устойчивый переход был показан на рис. 4.10. Вся энергия, полученная при ускорении ротора (площадка $A_{уск} = abca$), уравновешивалась энергией

торможения (площадка $A_{\text{торм}} = cdec$) до подхода к критической точке d' . Площадь возможного торможения $A_{\text{возм.торм}} = cdd'ec$ здесь больше, чем площадь ускорения, на $\Delta A = A_{\text{возм.торм}} - A_{\text{уск}}$. По знаку ΔA можно определить, устойчив или нет данный переход.

Величина ΔA служит количественным показателем запаса устойчивости:

$$K = A_{\text{возм.торм}}/A_{\text{уск}} = (A_{\text{уск}} + \Delta A)/A_{\text{уск}} = 1 + \Delta A/A_{\text{уск}}$$

Таким образом, при $K > 1$ переход устойчив; при $K = 1$ имеет место критический случай; при $K < 1$ переход неустойчив.

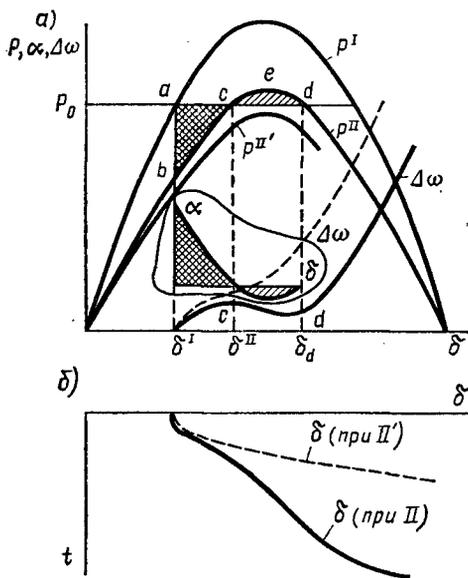
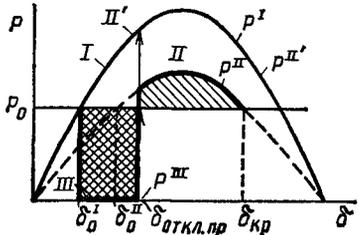
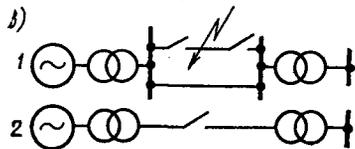
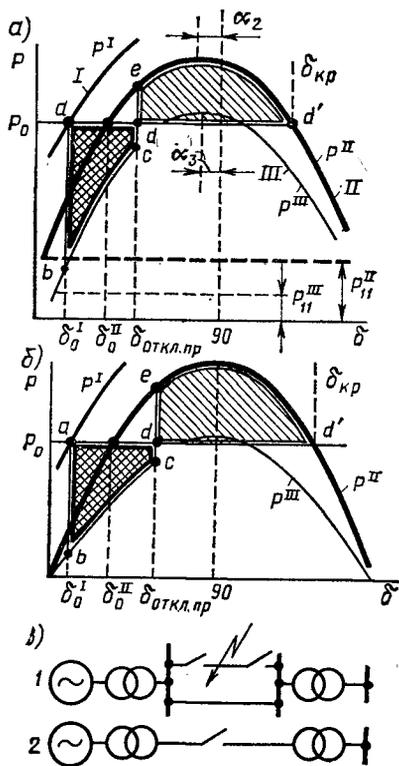


Рис. 4.14. Характеристики системы при изменении режима, приводящем к неустойчивости:

a — угловые характеристики мощности $P=f(\delta)$, характеристики ускорения $\alpha=f(\delta)$ и скорости $\Delta\omega=f(\delta)$ (штриховой линией показан характер изменения $\Delta\omega$ при $P_{\text{т}}^{II'} < P_0$); b — изменение угла во времени (штриховой линией показан характер изменения угла для кривой II')

Рис. 4.15. Определение предельного угла отключения к. з. $\delta_{\text{откл.пр}}$:

a — угловые характеристики мощности $P=f(\delta)$ для системы, имеющей активное сопротивление; $abcd$ — площадка ускорения ($A_{\text{уск}}$); $ded'd$ — площадка торможения $A_{\text{торм}}$; o — то же, при отсутствии активного сопротивления. В случаях a и b значения $A_{\text{уск}}=A_{\text{торм}}$; e — характеристики $P=f(\delta)$ при трехфазном к. з. в начале передачи (схема 1) и при полном разрыве передачи (схема 2); III — трехфазное к. з. у шши станции для схемы или разрыв однофазной передачи; II — послеаварийный режим (для схемы a) после к. з. при отключенной цепи; II' — послеаварийный режим (для схемы b) после обратного включения (послеаварийный режим совпадает с исходным), площадка торможения в этом случае не показана; I — нормальный режим



Установленные соотношения нетрудно выразить математически. Согласно рис. 4.10, имеем

$$\Delta A = A_{\text{возм. торм}} - A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0^I}^{\delta_{\text{кр}}} P_m^{\text{II}} \sin \delta d\delta - \int_{\delta_0^I}^{\delta_{\text{кр}}} P_0 d\delta;$$

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \delta_0^{\text{II}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_m^{\text{II}}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_m^{\text{I}} \sin \delta_0'}{P_m^{\text{II}}}.$$

Очевидно, что

$$P_m^{\text{II}}/P_m^{\text{I}} = (P_0 - \Delta P_0)/P_0 = 1 - \beta_0,$$

где $\beta_0 = \Delta P_0/P_0$ показывает изменение мощности в долях нагрузки, имеющей место в исходном режиме.

С учетом последнего соотношения величина $\delta_{\text{кр}}$ запишется так:

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin [\sin \delta_0' / (1 - \beta_0)].$$

На рис. 4.14 представлено изменение электрических характеристик системы, приводящее к выпадению из синхронизма, т. е. к нарушению динамической устойчивости. Площадь торможения *cedc* слишком мала, и, хотя рост скорости на участке *cd* приостанавливается, угол продолжает увеличиваться. Если бы амплитуда характеристики *II* была меньше, чем P_0 (кривая *II'*), то рост скорости происходил бы непрерывно, как это показано на рис. 4.14, *a* штриховой линией. Изменение угла в этом случае показано на рис. 4.14, *б* также штриховой линией. На рис. 4.14, *a* изменение ускорения $\alpha = f(\delta)$ выделено отдельной характеристикой.

Определение предельного угла отключения короткого замыкания. На рис. 4.15, *a* представлены три характеристики режимов: нормального *I*, аварийного *III*, в котором сопротивление связи Z_{12}^{II} изменено с учетом условий аварии, послеаварийного *II*, т. е. режима, в котором участок системы, потерпевший аварию, отключен.

Все характеристики построены с учетом активного сопротивления цепи статора, т. е. по формуле (4.13а).

За счет наличия активных сопротивлений синусоидальные характеристики (рис. 4.15, *a*) приподнимаются на $P_{11} = E^2 y_{11}^{\text{II}} \sin \alpha_{11}$ и соответственно на $P_{11}^{\text{III}} = E^2 y_{11}^{\text{III}} \sin \alpha_{11}$ и сдвигаются влево на α_3 и α_2 . Система при этом остается консервативной, поскольку предполагается, что активные сопротивления не зависят от частоты.

Приравняв записанные согласно рис. 4.15, *a* выражения для площадок ускорения (во время аварии) и торможения (в послеаварийном режиме), получим соотношение

$$\int_{\delta_0^I}^{\delta_{\text{откл. пр}}} [P_0 - [P_{11}^{\text{III}} + P_m^{\text{III}} \sin(\delta - \alpha_3)]] d\delta = \int_{\delta_{\text{откл. пр}}}^{\delta_{\text{кр}}} [P_0 - [P_{11}^{\text{II}} + P_m^{\text{II}} \sin(\delta - \alpha_2)]] d\delta.$$

После интегрирования и решения полученного уравнения найдем

$$\cos [\delta_{\text{откл. пр}} - 0,5(\alpha_2 + \alpha_3)] \approx$$

$$\approx \frac{(P_0 - P_{II}^{II}) \delta_{\text{кр}} - (P_0 - P_{II}^{III}) \delta_0^I + P_m^{II} \cos(\delta_{\text{кр}} - \alpha_2) - P_m^{III} \cos(\delta_0^I - \alpha_3) + (P_{II}^{II} - P_{II}^{III}) \left(\frac{\delta_0^I + \delta_{\text{кр}}}{2} \right)}{P_m^{II} - P_m^{III}} \quad (4.19a)$$

Здесь

$$\delta_{\text{кр}} = \pi - \arcsin \frac{P_0 - P_{II}^{II}}{P_m^{II}} - \alpha_2.$$

Пренебрегая активным сопротивлением и, следовательно, полагая $P_{II}^{II} = 0$, $P_{II}^{III} = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, получим соотношения, показанные графически на рис. 4.15, б. Формула (4.19a) примет вид

$$\cos \delta_{\text{откл. пр}} = \frac{P_0 (\delta_{\text{кр}} - \delta_0^I) + P_m^{II} \cos \delta_{\text{кр}} - P_m^{III} \cos \delta_0^I}{P_m^{II} - P_m^{III}} \quad (4.19б)$$

При трехфазном коротком замыкании или полном разрыве передачи характеристики примут вид, показанный на рис. 4.15, в. В формуле (4.19б) при определении предельного угла следует принять $P_m^{III} = 0$.

Проверка устойчивости при наличии трехфазного или пофазного автоматического повторного включения (АПВ) линий электропередачи. Значительная

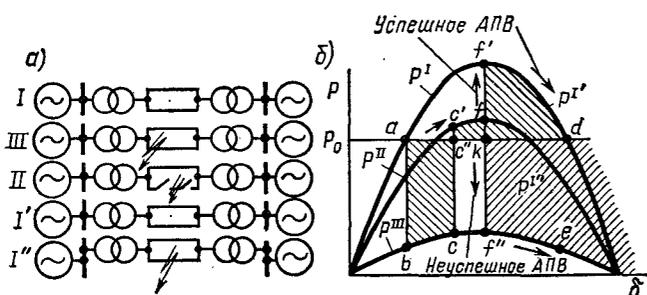


Рис. 4.16. Схемы (а) и режимы (б) при АПВ на двухфазной линии или пофазном АПВ:

I — нормальный (исходный) режим; *II* — режим отключения аварийного участка (параллельной линии или фазы); площадка торможения до повторного включения *c'c''fkc''*; *III* — режим к. з.; $A_{\text{усп. пр}} = \text{пл.}(abcc''a)$; *I'* — режим после включения участка в случае успешного АПВ; $A_{\text{торм-пл.}}(f'c'akf + c''c'fkc'')$; *I''* — режим после повторного включения участка в случае неуспешного АПВ (к. з. осталось); площадка ускорения не ограничена, в угол непрерывно увеличивается согласно характеристике *f'e*

часть однофазных коротких замыканий, появляющихся на линиях электропередачи, может исчезнуть, если отключить поврежденный участок от источника напряжения. Таковы, например, аварии, связанные с появлением дуги на изоляторах одного из проводов, или, сокращенно, «на одной из фаз» высоковольтной линии; при отключении фазы дуга может погаснуть и фаза, на которой была авария, может быть снова включена в нормальную работу.

Автоматическое повторное включение может быть трехфазным, если при аварии на линии отключаются и вновь включаются три провода или три фазы линии; либо пофазным, если отключается только поврежденная фаза или соответственно две фазы. АПВ считается успешным, если за время отключения

линии (фазы) короткое замыкание ликвидируется, и после ее включения сможет восстановиться нормальная работа; АПВ считается неуспешным, если повторное включение производится на сохранившееся короткое замыкание. Применение АПВ ограничивается возможным появлением неустойчивости системы. При трехфазном АПВ на одноцепной линии характеристика аварийного режима

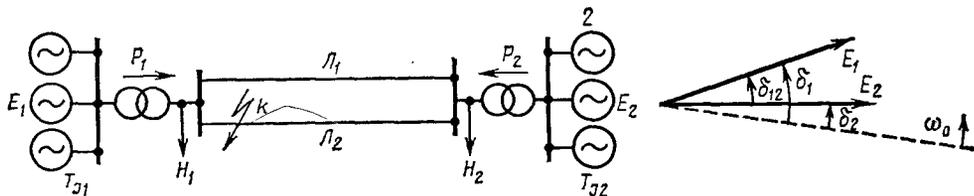


Рис. 4.17. Схема исследуемой системы из двух станций и нагрузок

имеет такой же вид, как и при трехфазном коротком замыкании (при разрыве передачи $P_m^{III} = 0$), а послеаварийный режим (после повторного включения) характеризуется той же зависимостью $P = f(\delta)$, что и исходный.

Примерные характеристики при коротком замыкании и последующем пофазном АПВ или АПВ на двухцепной линии представлены на рис. 4.16.

Способ площадей при исследовании устойчивости двух станций. Систему, состоящую из двух станций и промежуточных нагрузок, путем несложных преобразований можно свести к простейшей системе* «станция — шины неизменного напряжения». Покажем, как это сделать, на примере системы, представленной на рис. 4.17. Пусть в этой схеме происходят изменения каких-либо нагрузок, числа работающих генераторов или включенных в работу линий. Изменения электрической мощности, отдаваемой генераторами станций, или их механической мощности приводят к несбалансу активной мощности (возмущению) на каждой из станций, т. е. на станциях 1 и 2 соответственно:

$$\Delta P = P_{\text{мех}1} - E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} - E_1 E_2 y_{12} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12});$$

$$\Delta P_2 = P_{\text{мех}2} - E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + E_1 E_2 y_{12} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}).$$

Приведенные здесь величины соответствуют изменившемуся режиму.

Возмущения ΔP_1 и ΔP_2 вызовут перемещения роторов станций, создав ускорения

$$\alpha_1 = \Delta P_1 / T_{J1} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \Delta P_2 / T_{J2},$$

или
$$d^2 \delta_1 / dt^2 = \Delta P_1 / T_{J1} \quad \text{и} \quad d^2 \delta_2 / dt^2 = \Delta P_2 / T_{J2}.$$

Вычитая почленно второе равенство из первого, получим

$$d^2 (\delta_1 - \delta_2) / dt^2 = \alpha_1 - \alpha_2 = \Delta P_1 / T_{J1} - \Delta P_2 / T_{J2} = \alpha, \quad (4.20)$$

где $\delta_1 - \delta_2 = \delta_{12}$ — взаимный угол; α — относительное ускорение, создающее перемещение станции 1 относительно станции 2.

* При большем числе станций способ площадей неприменим как основной, но может применяться как вспомогательный (см. ниже).

Уравнение (4.20) можно переписать в виде

$$T_{J_3} d^2 \delta_{12} / dt^2 = (\Delta P_1 T_{J_2} - \Delta P_2 T_{J_1}) / (T_{J_1} + T_{J_2}) = T_{J_3} \alpha,$$

где $T_{J_3} = T_{J_1} T_{J_2} / (T_{J_1} + T_{J_2})$.

Далее его можно представить следующим образом:

$$T_{J_3} d^2 \delta_{12} / dt^2 = P_{\text{мех.э}} - P_{\text{эл.э}}, \quad (4.21)$$

где

$$P_{\text{мех.э}} = (T_{J_2} P_{\text{мех}1} - T_{J_1} P_{\text{мех}2}) / (T_{J_1} + T_{J_2});$$

$$P_{\text{эл.э}} = \frac{(T_{J_2} P_{11} - T_{J_1} P_{22})}{T_{J_1} + T_{J_2}} + \frac{P_{\text{тэ}} [T_{J_2} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + T_{J_1} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12})]}{T_{J_1} + T_{J_2}} + \dots,$$

причем

$$P_{\text{тэ}} = E_1 E_2 y_{12}; \quad P_{11} = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11}; \quad P_{22} = E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22}.$$

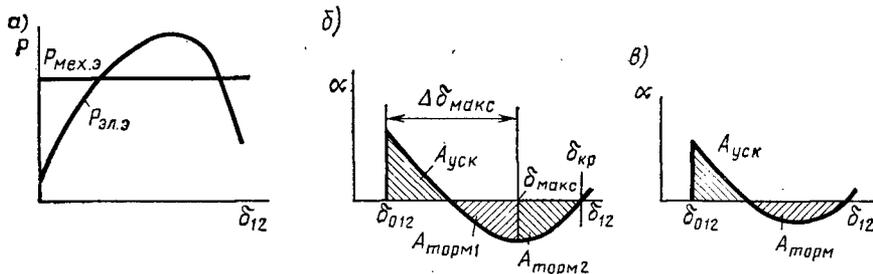


Рис. 4.18. Характеристики системы, состоящей из двух станций, и эквивалентной системы «станция — шины»:

a — угловые характеристики мощностей; *б* — изменение относительного ускорения α при устойчивом переходе от одного режима к другому: $A_{\text{торм}} > A_{\text{уск}}$; $A_{\text{торм}} = A_{\text{торм}1} + A_{\text{торм}2}$; $A_{\text{уск}} = A_{\text{торм}1}$; коэффициент запаса $k = A_{\text{торм}} / A_{\text{уск}} - 1 + A_{\text{торм}2} / A_{\text{уск}}$; *в* — изменение относительного ускорения α при неустойчивом переходе

Применительно к уравнению (4.21) могут быть построены характеристика мощности $P = \varphi(\delta_{12})$ (рис. 4.18, *a*) и соответствующая характеристика относительного ускорения $\alpha = f(\delta_{12})$ (рис. 4.18, *б*), аналогичная характеристике системы «станция — шины неизменного напряжения».

Для определения характера перехода (т. е. установления того, будет ли он устойчивым), запаса устойчивости и размаха колебаний достаточно построить характеристику относительного ускорения $\alpha = f(\delta_{12})$, пользуясь выражениями (4.20) и (4.21). Характеристики $\alpha = f(\delta_{12})$, показанные на рис. 4.18, *б*, *в*, относятся к устойчивой и неустойчивой системам. Отношение $A_{\text{торм}}$ к $A_{\text{уск}}$ характеризует запас устойчивости.

При определении предельного угла отключения короткого замыкания значения ΔP_1 и ΔP_2 вычисляются дважды: для режима короткого замыкания и режима, наступающего после отключения короткого замыкания. Соответственно два раза строятся характеристики $\alpha = f(\delta_{12})$. На рис. 4.19 показаны такие характеристики и проведено определение предельного угла отключения $\delta_{\text{откл. пр ана}}$

Рис. 4.19. Определение предельного угла отклонения к. з. (рассматривается к. з. в точке k на рис. 4.17):

I — характеристика $\alpha_{12}^{III} = f(\delta_{12})$ при к. з., вычисленная согласно выражению

$$\alpha_{12}^{III} = \Delta P_1^{III} / T_{J1} - \Delta P_2^{III} / T_{J2},$$

где

$$\Delta P_1^{III} = P_{\text{мех } 1} - E_1^2 y_{11}^{III} \sin \alpha_{11}^{III} - E_1 E_2 y_{12}^{III} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}^{III});$$

$$\Delta P_2^{III} = P_{\text{мех } 2} - E_2^2 y_{22}^{III} \sin \alpha_{22}^{III} + E_1 E_2 y_{12}^{III} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}^{III});$$

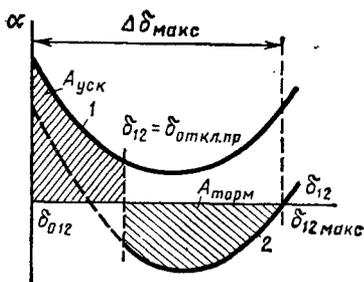
2 — характеристика $\alpha_{12}^{II} = \varphi(\delta_{12})$ после отклонения к. з., вычисленная согласно выражению

$$\alpha_{12}^{II} = \Delta P_1^{II} / T_{J1} - \Delta P_2^{II} / T_{J2},$$

где

$$\Delta P_1^{II} = P_{\text{мех } 1} - E_1^2 y_{11}^{II} \sin \alpha_{11}^{II} - E_1 E_2 y_{12}^{II} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}^{II});$$

$$\Delta P_2^{II} = P_{\text{мех } 2} - E_2^2 y_{22}^{II} \sin \alpha_{22}^{II} + E_1 E_2 y_{12}^{II} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}^{II})$$



логично тому, как это было сделано для одной станции, работающей на шины неизменного напряжения.

Представление процесса на фазовой плоскости. Изображение скорости $\Delta\omega$ в зависимости от угла δ оказывается полезным для качественного, а иногда и количественного анализа. Для устойчивой консервативной системы характеристика скорости $\Delta\omega = f(\delta)$ должна была бы иметь вид замкнутой кривой (см. рис. 4.10, б). Процесс во времени характеризовался бы при этом кривой, показанной на рис. 4.10, в. Характеристики, построенные без учета рассеяния энергии, отличаются от действительных (диссипативных), где качания с каждым циклом становятся все меньше по амплитуде. Характеристика скорости $\Delta\omega = f(\delta)$ представляется при этом в виде спирали, колебания угла $\delta = f(t)$ также постепенно затухают и угол стремится к установившемуся значению δ_0^{II} (см. рис. 4.10, г, д). Следует обратить внимание на то обстоятельство, что учет постоянных активных сопротивлений ($P_{11} \neq 0$) не меняет характера движения $\delta = f(t)$ — оно остается незатухающим. *Затухание вызывают только потери, зависящие от скорости.*

Пусть переходный процесс, как и раньше, описывается уравнением (4.14). Преобразуем его к виду

$$d^2\delta/d\tau^2 = P_* - \sin \delta, \quad (4.22)$$

где $\tau = t \sqrt{P_m^{II}/T_J}$; $P_* = M_* = M_T/M_m^{II}$,
причем в относительных единицах

$$M_T = P_0; \quad M_m^{II} = P_m^{II}.$$

Обозначим $P_* - \sin \delta$ через $\varphi(\delta)$. Представим движение ротора генератора во время этого процесса на фазовой плоскости $(\Delta\omega, \delta)$, где скорость изменяется относительно синхронной как $\Delta\omega = d\delta/d\tau$, тогда

$$\varphi(\delta) = d(\omega)/d\tau = [d(\omega)/d\delta] [d\delta/d\tau] = [d(\omega)/d\delta] \omega.$$

При этом исходное уравнение примет вид

$$d(\omega)/d\delta = \varphi(\delta)/\omega, \text{ или } \omega d(\omega) = \varphi(\delta) d\delta.$$

Решая его, запишем

$$\int_0^{\Delta\omega} \omega d(\omega) = \int_{\delta_1}^{\delta} (P_* - \sin \delta) d\delta,$$

где при $t = 0$ значение $\delta_1 = \delta_0^1$ (см. рис. 4.20).

Интегрируя, получим

$$\Delta\omega = \psi(\delta) = \sqrt{2P_* (\delta - \delta_1) + 2(\cos \delta - \cos \delta_1)} \quad (4.23)$$

$(d\delta/dt)_{t=0} = 0$. Это решение представляет собой так называемое *семейство фазовых траекторий*, каждая из которых соответствует определенному значению начального угла δ_1 .

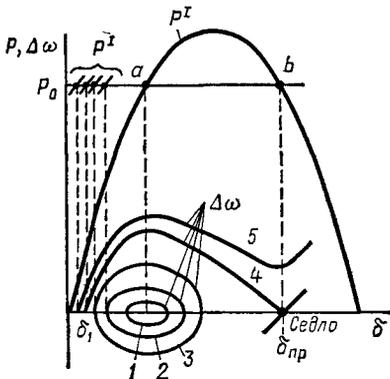


Рис. 4.20. Характеристика мощности и зависимости $\Delta\omega = \psi(\delta)$ при различных отклонениях от установившегося режима δ_{\max}

Согласно теории колебаний, для суждения об устойчивости режима необходимо рассмотреть особые точки исследуемого уравнения, т. е. точки, в которых величина $d(\Delta\omega)/d\delta$ неопределенна (через эти точки либо проходит несколько фазовых траекторий, либо не проходит ни одной). Эти точки соответствуют условиям $\varphi(\delta) = 0$ и $\Delta\omega = 0$, т. е. состояниям равновесия системы (точки a и b на рис. 4.20).

В рассматриваемой консервативной системе особые точки могут быть двух типов:

центр, в котором система устойчива и малое отклонение от состояния равновесия приводит к малым колебаниям вблизи начальной точки; такова точка a на рис. 4.20;

седло, в котором система неустойчива и малое отклонение от состояния равновесия приводит к уходу от начальной точки; такова точка b на рис. 4.20.

Особой точке типа «центр» соответствует минимум потенциальной энергии системы, для нее $d\varphi/d\delta < 0$. Для особой точки типа «седло» $d\varphi/d\delta > 0$. Так как $\varphi(\delta) = P_* - \sin \delta$, то $d\varphi/d\delta = -\cos \delta$.

Из рис. 4.20, видно, что фазовые траектории $\Delta\omega = \psi(\delta)$, представленные кривыми 1, 2 и 3, соответствуют устойчивому режиму, кривая 4 — предельному, 5 — неустойчивому.

Нахождение максимального угла отклонения и проверка устойчивости. Не прибегая к способу площадей, по рис. 4.20 можно выяснить, будет ли данная система устойчива. Если да, то она в своем движении раньше, чем достигнет седла, пройдет точку максимального отклонения δ_{\max} , в которой $d\delta/dt = \Delta\omega = 0$ (рис. 4.20). Такой точке, согласно (4.23), отвечает условие $\cos \delta_{\max} + P_* \delta_{\max} = P_* \delta_1 + \cos \delta_1$. Обозначив правую часть с известными величинами через A , получим

$$\cos \delta_{\max} = A - P_* \delta_{\max} \quad (4.24)$$

Графическое решение (4.24) для случая, когда $\delta = \delta_{\max}$, показано на рис. 4.21.

Представление процесса во времени. Предельное время отключения.

а) **Численное интегрирование.** Определив с помощью способа площадей, согласно (4.19), предельный угол отключения $\delta_{откл.пр.}$, следует далее для практических применений найти соответствующее этому углу время $t_{откл.пр.}$, решив уравнение (4.14) или (4.22) и получив зависимость $\delta = f(t)$ или $\delta = \varphi(\tau)$. Однако это уравнение не имеет непосредственного решения (не интегрируется в квадратурах). Наиболее простое приближенное решение получается численно-графичес-

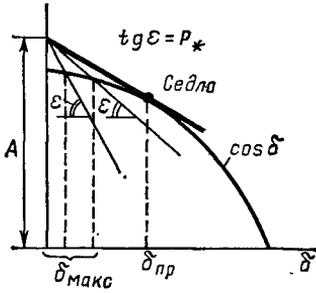


Рис. 4.21. Графическое нахождение угла максимального отклонения

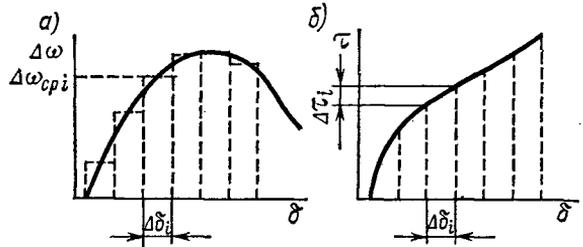


Рис. 4.22. Построение кривой $\tau = f(\delta)$ по заданной кривой $\Delta\omega = \psi(\delta)$

ким интегрированием выражения (4.22). Для этого соответствующая кривая $\Delta\omega = \psi(\delta)$ (рис. 4.22, а) разбивается по оси δ на интервалы. На каждом интервале участок кривой заменяется горизонтальным отрезком с ординатой, равной среднему значению $\Delta\omega$ на этом интервале — $\Delta\omega_{ср i}$. Для i -го интервала

$$\Delta\omega_{ср i} = (\Delta\omega_i + \Delta\omega_{i+1})/2 = \Delta\delta_i/\Delta\tau_i,$$

откуда

$$\Delta\tau_i = \Delta\delta_i/\Delta\omega_{ср i}.$$

Проводя такие вычисления по всем интервалам, получим искомую зависимость $\tau = f(\delta)$, представленную на рис. 4.22, б, от которой можно перейти к зависимости $t = \tau \sqrt{T_J / P_m} = f_1(\delta)$, согласно которой находится $t_{откл.пр.}$. Построение ее будет тем точнее, чем меньше принят* интервал $\Delta\delta$.

б) **Аппроксимация синусоиды.** Другая возможность аналитического определения $t_{откл.пр.}$ — это представление синусоидальной зависимости $P = f(\delta)$ отрезком прямой (1-2 на рис. 4.23). Согласно этому рисунку, где приведены характеристики I, II, III режима и показаны площадки ускорения и торможения, получим вместо (4.14)

$$T_J d^2\delta/dt^2 = \Delta P. \tag{4.24a}$$

Согласно рис. 4.23, а, при любом δ значение $\Delta P = P_0 - P_m^{III} \sin \delta_0^I - d$, где $d = f(\delta)$ или $d = c(\delta - \delta_0^I)$, $c = d/b = tg \varepsilon = \frac{P_m^{III} (\sin \delta_{откл}^I - \sin \delta_0^I)}{\delta_{откл}^I - \delta_0^I}$.

Тогда $\Delta P = B - c\delta$, где $B = P_0 - P_m^{III} \sin \delta_0^I + c\delta_0^I$.

* О величине расчетного интервала см. П2.

С учетом этих соотношений уравнение (4.24) примет вид

$$T_J d^2\delta/dt^2 + c\delta - B = 0.$$

Решение этого уравнения (линейного 2-го порядка) хорошо известно. При начальных условиях $\delta_{t=0} = \delta_0^I$, $d\delta/dt_{t=0} = 0$ оно определяется выражением

$$\delta = f(t) = (\delta_0^I - B/c) \cos \sqrt{c/T_J} t + B/c,$$

откуда время отключения, отвечающее $\delta_{\text{откл.}}$, будет

$$t_{\text{откл.}} = \sqrt{\frac{T_J (\delta_{\text{откл.}} - \delta_0^I)}{P_m^{III} (\sin \delta_{\text{откл.}} - \sin \delta_0^I)}} \arccos \left(\frac{P_0/P_m^{III} - \sin \delta_{\text{откл.}}}{P_0/P_m^{III} - \sin \delta_0^I} \right). \quad (4.25)$$

Погрешность Δt (рис. 4.23, б) при таком определении $t_{\text{откл.}}$ будет тем меньше, чем ближе $\delta_{\text{откл. пр}}$ к δ_0^I .

в) **Полный сброс мощности.** В некоторых случаях (трехфазное короткое замыкание на шинах передающей станции или в любой точке одноцепной линии,

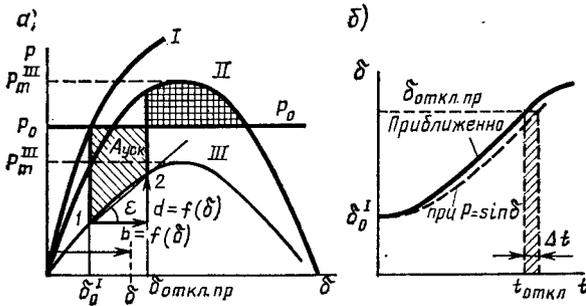


Рис. 4.23. Определение угла отключения по равенству площадок (пл. $abcd$ = пл. $cc'ec$) и соответствующего времени отключения по спрямленной ($I-2$) угловой характеристике мощности $P = \varphi(\delta)$: a — характеристика нормального I , послеаварийного II , аварийного III режимов; b — изменение угла $\delta = \varphi(t)$ в аварийном режиме: 1 — при синусоидальной характеристике; 2 — при аппроксимации синусоиды прямой 1-2

разрыв передачи электрической мощности) мощность $P = EUy_{12}$ становится равной нулю, так как $y_{12} = 0$ или $x_{12} = \infty$. Движение ротора генератора происходит только под действием механического момента турбины без отдачи генератором мощности в сеть. При этом прекращается связь генератора с нагрузкой и вся мощность турбины ($P_{\text{мех}} = P_0$) идет на ускорение ротора генератора. Это, следовательно, наиболее опасные случаи в смысле разгона генератора и нарушения устойчивости.

Дифференциальное уравнение (4.14) (предполагается отсутствие потерь) принимает вид

$$T_J d^2\delta/dt^2 = P_0. \quad (4.26)$$

Уравнение (4.26) интегрируется весьма просто. В самом деле, движение происходит при постоянном ускорении α , причем $\alpha = d\omega/dt = P_0/T_J$. Интеграл этого уравнения хорошо известен:

$$\omega = \alpha t;$$

соответственно

$$\delta - \delta_0 = [P_0/(2T_J)] t^2. \quad (4.27)$$

Рост скорости происходит линейно, а угла — по квадратичной параболе; время t , отвечающее какому-либо значению δ , находится* из (4.27):

$$t = \sqrt{2T_J (\delta - \delta_0) / P_0} . \quad (4.28)$$

Если бы в начальный момент ($t = 0$) ротор имел некоторую скорость $\Delta\omega_0 \neq 0$, то решение имело бы вид

$$\delta - \delta_0 = \Delta\omega_0 t + P_0 t^2 / (2T_J) .$$

Пример 4.1. Система, показанная на рис. 4.24, имеет схему замещения (рис. 4.25), где станции 1 и 2 представлены в виде неизменных э. д. с., приложенных за некоторыми (оп-

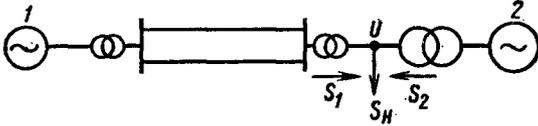


Рис. 4.24. Схема системы к примеру 4.1

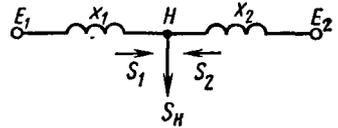


Рис. 4.25. Схема замещения

ределенными видами регулирования) сопротивлениями. Параметры схемы замещения и исходного режима (в относительных единицах) следующие: $x_1 = 0,735$; $x_2 = 0,0606$; $\dot{S}_1 = 1 + j0,485$; $\dot{S}_2 = 4,5 + j2,93$; $\dot{E}_1 = 1,54 < 28,5^\circ$; $\dot{E}_2 = 1,21 < 13,1^\circ$; $\dot{S}_H = 5,5 + j3,415$; $\cos\varphi_H = 0,85$; $\sin\varphi_H = 0,527$.

О п р е д е л и т ь:

- минимальные значения $E_{\text{мин}}$, $U_{\text{мин}}$, при которых сохраняется устойчивая работа передающей станции с мощностью $P_1 = 1$;
- максимальное значение передаваемой мощности P_m ;
- запасы устойчивости системы при различных допущениях.

Решение. 1. Приближенно приняв, что в точке H имеются шины неизменного напряжения $U = 1 = \text{const}$ ($f = \text{const}$), разделим систему на две независимые части:

- будем считать, что $P_{T1} = \text{const}$, тогда

$$d\Delta P / d\delta_1 = dP_1 / d\delta_1 = (E_1 U / x_1) \cos \delta .$$

Следовательно, предельному по устойчивости режиму соответствует $\delta = 90^\circ$. Минимально допустимые значения при $P_1 = P_{10} = 1$

$$U_{\text{мин}} = P_{10} x_1 / E_1 = 1 \cdot 0,735 / 1,54 = 0,477;$$

$$E_{\text{мин}} = P_{10} x_1 / U = 1 \cdot 0,735 / 1 = 0,735;$$

- при $E = \text{const}$, $U = \text{const}$ находим

$$P_m = 1,54 \cdot 1 / 0,735 = 2,1 .$$

Коэффициенты запаса статической устойчивости:

$$K_{sE} = \frac{E_1 - E_{1\text{мин}}}{E_1} 100 = \frac{1,54 - 0,735}{1,54} 100 = 52,3\%;$$

$$K_{sU} = \frac{U_1 - U_{\text{мин}}}{U_1} 100 = \frac{1 - 0,477}{1} 100 = 52,3\%;$$

* В относительных единицах (см. ПЗ.).

$$K_{sp} = \frac{2,1 - 1}{1} 100 = 110\%.$$

2. Определение предельного по устойчивости режима могло быть проведено и по другим критериям, при других допущениях. Например, возможны критерии $dE_1/d\delta_1 \leq 0$; $d\delta/dU = \infty$; $dU/d\delta = 0$ и др., связь которых с основным критерием следует из рис. 4.26.

Найдем предельный по устойчивости режим с помощью критерия $d\Delta Q/dU \leq 0$. В этом случае для некоторой (произвольно выбранной) промежуточной точки электропередачи k

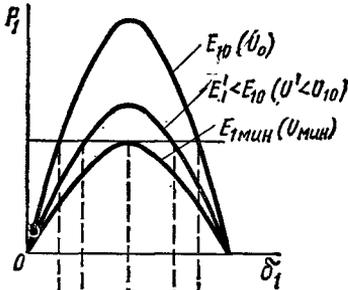


Рис. 4.26. Определение E_{\min} и U_{\min}

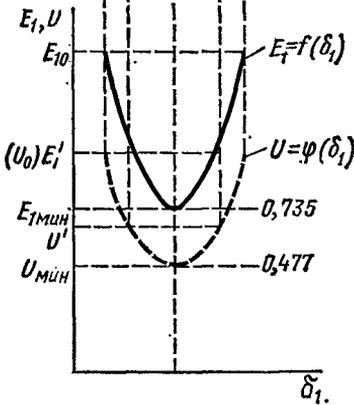
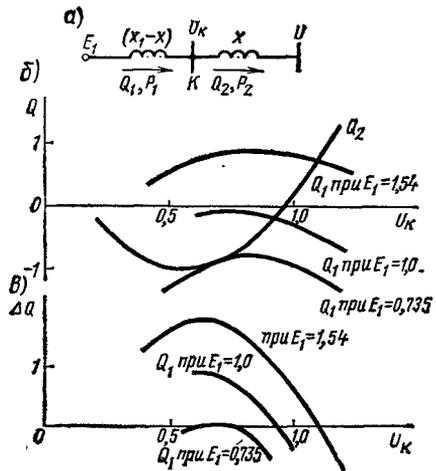


Рис. 4.27. Применение критерия $d\Delta Q/dU < 0$



(рис. 4.27, а) необходимо построить зависимости $Q_1 = f_1(U_k)$ и $Q_2 = f_2(U_k)$ при $E_1 = \text{const}$. $U = \text{const}$ и $P = P_1 = P_2 = \text{const}$. Точка пересечения этих характеристик соответствует установившемуся режиму системы, а характер изменения $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ в окрестности этой точки позволяет судить об устойчивости системы.

Для определения предельного режима необходимо построить серию характеристик $Q_1 = f_1(U_k)$ при различных значениях E_1 и методом подбора определить такое значение E_1 , при котором $Q_1 = f_1(U_k)$ будет касаться характеристики $Q_2 = f_2(U_k)$. Полученное таким образом E_1 будет равно $E_{1\min}$.

Для расчета $Q_1 = f_1(U_k)$ и $Q_2 = f_2(U_k)$ воспользуемся формулами

$$E_1 = \sqrt{[U_k + Q_1(x_1 - x)/U_k]^2 + [P(x_1 - x)/U_k]^2};$$

$$U = \sqrt{(U_k - Q_2x/U_k)^2 + (Px/U_k)^2},$$

откуда

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{E_1 U_k}{x_1 - x}\right)^2 - P^2} - \frac{U_k^2}{x_1 - x}; \quad Q_2 = \frac{U_k^2}{x} - \sqrt{\left(\frac{U U_k}{x}\right)^2 - P^2}.$$

Выберем точку k таким образом, чтобы $x = 0,2$. Тогда с учетом того, что $P = 1$ и $U = 1$, получим:

$$x_1 - x = 0,735 - 0,2 = 0,535; \quad Q_1 = \sqrt{(E_1 U_k / 0,535)^2 - 1} = U_k^2 / 0,535;$$

$$Q_2 = 5U_k^2 - \sqrt{(5U_k)^2 - 1}.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 4.27, б и сведены в таблицу:

Q_1	U_k						
	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
Q_1 при $E_1 = 1,54$	0,62	0,74	0,83	0,875	0,88	0,835	0,74
Q_1 при $E_1 = 1,0$	-0,69	-0,46	-0,285	-0,16	-0,08	-0,073	-0,163
Q_1 при $E_1 = 0,735$	-1,38	-1,13	-0,928	-0,785	-0,74	$\approx -0,9$	$\approx -1,05$
Q_2	1,29	0,65	-0,1	-0,34	-0,67	-0,9	-1,03

На рис. 4.27, в показано изменение ΔQ . Очевидно, что критическое значение э. д. с. $E_1 = 0,735$.

3. Определим предельный по устойчивости режим системы, предполагая, что в точке 2 имеются шины неизменной э. д. с. ($E_2 = \text{const}$), а напряжение в точке H изменяется, причем нагрузка представлена постоянным сопротивлением $Z_H = \text{const}$. Частота в системе предполагается постоянной. В этом случае, так же как и в предыдущем, целесообразно применить критерий $dP/d\delta > 0$ или $dP/d\delta_{12} > 0$, где $\delta_{12} = \text{угол между } \dot{E}_1 \text{ и } \dot{E}_2$.

Мощность, выдаваемая от станций в систему,

$$P_1 = E_1^2 g_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 g_{12} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}).$$

Определим сопротивление нагрузки в схеме замещения и рассчитаем собственные и взаимные проводимости:

$$Z_H = \frac{U^2}{S_H} (\cos \varphi_H + j \sin \varphi_H) = \frac{1}{6,46} (0,85 + j 0,527) = 0,1315 + j 0,0815 = 0,1545 \angle 31^\circ 8';$$

$$Z_{11} = j 0,735 + \frac{0,0606 < 90^\circ \cdot 0,1545 < 31^\circ 8'}{0,1315 + j 0,0815 + j 0,0606} = 0,782 \angle 89^\circ;$$

$$y_{11} = 1,28; \quad \alpha_{11} = 1^\circ;$$

$$Z_{12} = j 0,735 + j 0,0606 - \frac{0,735 \cdot 0,0606}{0,1545 < 31^\circ 8'} = 0,98 \angle 104^\circ 5'; \quad y_{12} = 1,02; \quad \alpha_{12} = -14^\circ 5'.$$

С учетом проведенных расчетов

$$P_1 = 0,0224 E_1^2 + 1,235 E_1 \sin (\delta_{12} + 14^\circ 5').$$

Предельный по устойчивости режим соответствует условию

$$dP_1/d\delta_{12} = 1,235 E_1 \cos (\delta_{12} + 14^\circ 5') = 0,$$

т. е. наступает при $\delta_{12} = 75,5^\circ$. Тогда минимально допустимое значение E_1 определится из выражения для P_1 при $P_{10} = 1$:

$$E_{1\text{мин}} = 0,8;$$

коэффициент запаса устойчивости

$$K_{sE} = [(1,54 - 0,8)/1,54] 100 = 48\%.$$

Меньшее значение K_{sE} (чем при $U = \text{const}$) подтверждает то обстоятельство, что с уменьшением E_1 напряжение на нагрузке U снижается.

4. Определим запас устойчивости в случае, когда передающая станция и эквивалентный генератор приемной системы соизмеримы по мощности (шин неизменного напряжения нет, но частота в системе принимается неизменной: $f = \text{const}$).

Параметры схемы замещения и исходного режима системы для этого случая будут следующие: $U = 1$; $x_1 = 0,735$; $x_2 = 0,694$; $\dot{S}_1 = 1 + j0,485$; $\dot{S}_2 = 1,3 + j0,615$; $S_H = 2,3 + j1,1$; $\dot{E}_1 = 1,54 \angle 28^\circ 5'$; $E_2 = 1,69 \angle 32^\circ 15'$.

Пусть активная мощность, потребляемая нагрузкой, не зависит от напряжения, а зависимость от напряжения реактивной мощности характеризуется следующей таблицей:

U	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,775
Q_H	1	0,94	0,895	0,86	0,865	0,90

Применительно к рассматриваемой схеме задача состоит в том, чтобы определить минимальное напряжение на нагрузке $U_{\text{мин}}$, при котором система сохраняет устойчивость. Для этого целесообразно использовать критерий $dE/dU > 0$ или критерий $d\Delta Q/dU < 0$.

Так как применение критерия $d\Delta Q/dU < 0$ было рассмотрено, воспользуемся критерием $dE/dU > 0$, найдя с его помощью предельный по устойчивости режим исследуемой системы. Критерий $dE/dU > 0$ с равным успехом может применяться в одной из трех форм: $dE_1/dU > 0$; $dE_2/dU > 0$ или $dE_0/dU > 0$, где E_0 — эквивалентная э. д. с. станции, замещающей станции 1 и 2.

Рассмотрим ход расчета при использовании критерия $dE_1/dU > 0$:

- зададимся рядом значений U ;
- для каждого значения U рассчитаем

$$Q_2 = \sqrt{(E_2 U / x_2)^2 - P_1^2} - U^2 / x_2,$$

где значения P_2 и E_2 соответствуют исходному режиму;

в) по характеристике $Q_H = f(U)$ определим $Q_1 = Q_H - Q_2$;

$$E_1 = \sqrt{(U + Q_1 x_1 / U)^2 + (P_1 x_1 / U)^2},$$

где P_1 соответствует исходному режиму.

При использовании критерия $dE_2/dU > 0$ расчеты проводятся аналогично, но обычно предварительно проводится эквивалентирование, для чего применяются известные соотношения:

$$\dot{E}_0 = \frac{x_2 \dot{E}_1 + x_1 \dot{E}_2}{x_1 + x_2} = \frac{0,694 \cdot 1,54 \angle 28^\circ 5' + 0,735 \cdot 1,69 \angle 32^\circ 15'}{0,735 + 0,694} = 1,615 \angle 30^\circ 15';$$

$$x_0 = x_1 x_2 / (x_1 + x_2) = 0,735 \cdot 0,694 / (0,735 + 0,694) = 0,356.$$

Зависимость $E_0 = f(U)$ рассчитаем по формуле

$$E_0 = \sqrt{(U + Q_H x_0 / U)^2 + (P_H x_0 / U)^2}.$$

Результаты расчетов графически представим на рис. 4.28 и сведем в таблицу:

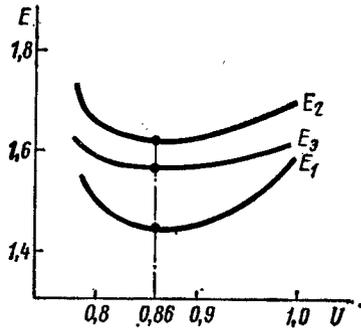


Рис. 4.28. Применение критерия $dE/dU = 0$

г) рассчитаем

Критерии	U	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80	0,775
	Q_H	1,1	1,035	0,984	0,945	0,95	0,989
$\frac{dE_1}{dU} > 0$	Q_2	0,615	0,610	0,595	0,570	0,532	0,505
	Q_1	0,485	0,425	0,389	0,375	0,418	0,484
	E_1	1,54	1,495	1,44	1,45	1,50	1,56
$\frac{dE_2}{dU} > 0$	Q_1	0,485	0,49	0,50	0,497	0,48	0,463
	Q_2	0,615	0,545	0,484	0,448	0,47	0,526
	E_2	1,69	1,65	1,62	1,615	1,65	1,735
$\frac{dE_3}{dU} > 0$	E_3	1,615	1,58	1,57	1,565	1,585	1,61

В результате расчетов по различным критериям получаем одинаковый результат $U_{\min} = 0,86$.

Коэффициент запаса по напряжению

$$K_{\Delta U} = [(U_0 - U_{\min})/U_0] 100\% = [(1 - 0,86)/1] 100\% = 14\%.$$

Пример 4.2. В системе, схема которой изображена на рис. 4.29, а, включается нагрузка P_H . Параметры системы в относительных единицах представлены на схеме замещения

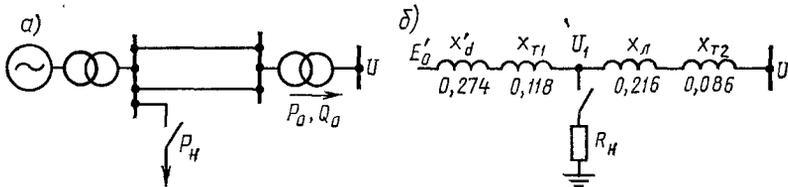


Рис. 4.29. Исследуемая система:

а — схема; б — схема замещения

(рис. 4.29, б). Исходный режим характеризуется следующими параметрами: $U = 1$; $P_0 = 1$; $Q_0 = 0,485$; $E'_0 = 1,50$; $\delta'_0 = 27,5^\circ$, где δ' — угол э. д. с. E' .

Определить максимальный размах качаний угла генератора после включения нагрузки, принимая коэффициент мощности ее равным единице.

Решение. Для определения искомого размаха качаний угла генератора воспользуемся методом площадей, представив в схеме замещения нагрузку постоянным сопротивлением R_H . Напряжение U_1 в начале линии, где включается нагрузка, в исходном режиме

$$U_{10} = \sqrt{(1 + 0,485 \cdot 0,302)^2 + (0,302)^2} = 1,18.$$

Сопротивление нагрузки

$$R_H = U_{10}^2 / P_H = 1,18^2 / P_H.$$

В исходном режиме угловая характеристика мощности l , показанная на рис. 4.30, определится выражением

$$P = (1,5 \cdot 1/0,694) \sin \delta' = 2,16 \sin \delta'.$$

Угловая характеристика мощности 2 показана для частного случая, когда

$$P = 0,51 + 2,16 \sin(\delta' + 1,2^\circ).$$

В первый момент после включения нагрузки на валу генератора будет действовать избыточная мощность тормозящего характера, что приведет к уменьшению скорости и угла δ' . Угол будет изменяться от $\delta' = -3,7^\circ$ до $\delta' = 27,5^\circ$ в соответствии с равенством площадей торможения и ускорения (рис. 4.30), если не учитывать затухание этих колебаний.

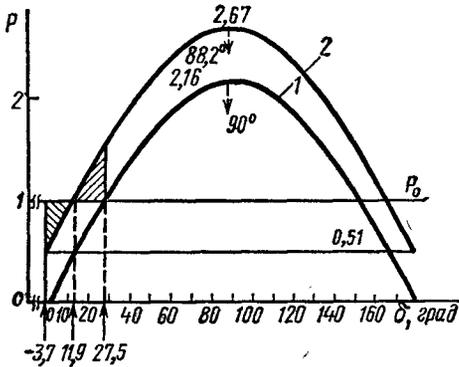


Рис. 4.30. Характеристики системы при подключении нагрузки

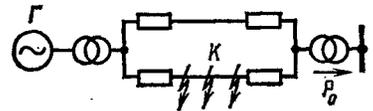


Рис. 4.31. Три случая трехфазных коротких замыканий (к. з.) на линии передачи

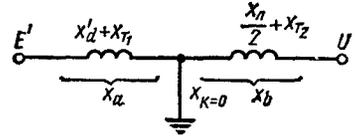


Рис. 4.32. Схема замещения при к. з. в начале линии

После затухания колебаний установившийся режим при включенной нагрузке определится углом $\delta' \cong 11,9^\circ$.

Пример 4.3. Для системы, показанной на рис. 4.31, определить, в каком месте линии (начале, середине или конце) неблагоприятнее всего трехфазное короткое замыкание, отключаемое через Δt , с точки зрения возможности сохранения динамической устойчивости.

Решение. 1. При трехфазном коротком замыкании в начале линии (рис. 4.32) взаимное сопротивление между точками приложения э. д. с. E' и напряжения U

$$x_{12} = x_a + x_b + x_a x_b / x_k = \infty, \text{ где } x_k = 0; \quad y_{12} = 0,$$

следовательно,

$$P_{m1} = E' U y_{12} = 0.$$

2. При трехфазном коротком замыкании в конце линии (рис. 4.33)

$$x_{12} = x_a + x_b + x_a x_b / x_k = \infty, \quad P_{m2} = E' U y_{12} = 0.$$

3. При трехфазном коротком замыкании в середине линии сопротивление

$$x_{12} \neq \infty.$$

Сопротивления отдельных участков линии на схеме (рис. 4.34) образовали треугольник. Преобразуя (как это показано штриховой линией) треугольник в звезду (рис. 4.35), получим схему замещения, согласно которой находят сопротивление y_{12} и мощность в аварийном режиме:

$$P_{m1}^{III} = E' U y_{12} \neq 0.$$

Характеристики мощности рассматриваемых режимов, площади ускорения и торможения показаны на рис. 4.36.

Из сравнения площадок ускорения и торможения можно заключить, что наиболее неблагоприятными короткими замыканиями будут те, которые происходят в начале и конце линии и сопровождаются полным сбросом мощности генератора.

Пример 4.4. Построить площадки ускорения и торможения для случая двухфазного к. з. на землю в начале линии (см. рис. 4.32), которое через некоторое время переходит в трехфазное, а затем отключается. При этом система остается устойчивой.

Решение. Построив для нормального I, послеаварийного II и аварийного III режимов (при двухфазном коротком замыкании на землю) характеристики $P = \varphi(\delta)$, найдем площадки ускорения и торможения, показанные на рис. 4.37.

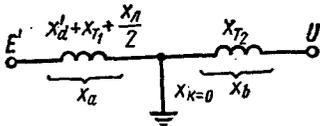


Рис. 4.33. Схема замещения при к. з. в конце линии

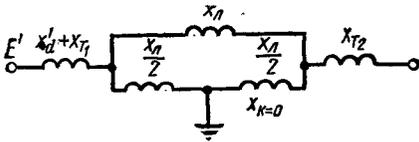


Рис. 4.34. Схема замещения при к. з. в середине линии

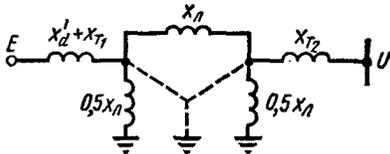


Рис. 4.35. Преобразование схемы рис. 4.34.

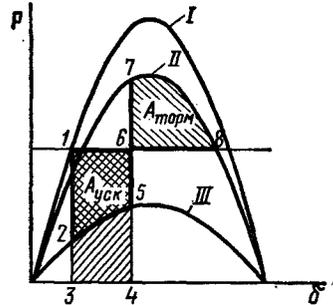


Рис. 4.36. Площадка ускорения при к. з. в начале линии (1-3-4-6-1), середине (1-2-5-6-1) и площадка торможения (6-7-8-6)

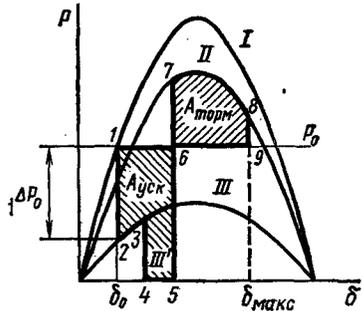


Рис. 4.37. Применение способа площадей: 1-2-3 — процесс при двухфазном к. з. на землю; 3-4-5 — то же, при переходе его в трехфазное к. з.; 5-7 — отключение; 6-7-8-9-6 — площадка торможения

Пример 4.5. Для увеличения пропускной способности электропередачи, показанной на рис. 4.38, в послеаварийном режиме включается последовательная компенсация. Возможны три варианта включения:

- 1) последовательная компенсация (УПК) включается одновременно с отключением поврежденного участка;
- 2) УПК включается в момент короткого замыкания;
- 3) УПК включается до короткого замыкания в нормальном режиме.

Решение. Построив характеристики нормального I, послеаварийного II и аварийного III режимов, найдем соответствующие площадки ускорения и торможения, показанные на рис. 4.39, а, б.

Пример 4.6. В схеме, показанной на рис. 4.40, внезапно отключаются и затем вновь включаются обе линии, связывающие генераторную станцию с шинами неизменного напряжения.

Параметры схемы и режима приведены на рисунке.

Определить наибольшее допустимое время перерыва в подаче энергии, при котором динамическая устойчивость системы не нарушается.

Решение. Максимальная мощность в нормальном режиме, определенная приближенно по $E' = 1,55$,

$$P_m^I = P_m^{II} = E'U/x_{12} = 1,55 \cdot 1/1,15 = 1,35.$$

При отключении линий

$$P_m^{III} = 0.$$

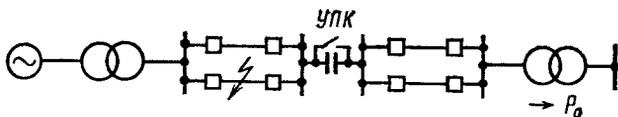


Рис. 4.38. Схема исследуемой системы

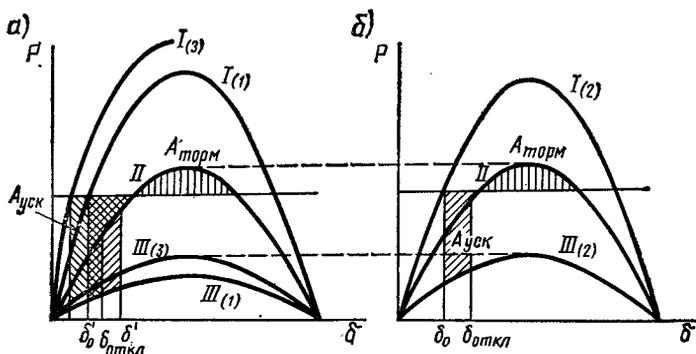


Рис. 4.39. Процессы при включении УПК:

а — случай 1 и 3; б — случай 2. Кривые I, II, III имеют индексы, относящиеся к соответствующим случаям

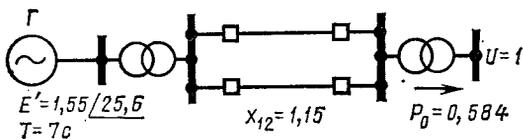


Рис. 4.40. Схема системы

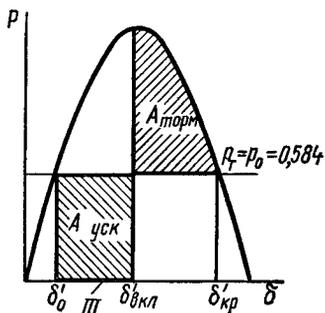


Рис. 4.41. Характеристики мощности и площади ускорения $A_{уск}$ и торможения ($A_{торм}$)

Применяя правило площадей, найдем согласно рис. 4.41 предельный угол включения электропередачи:

$$\begin{aligned} \cos \delta'_{\text{вкл}} &= \frac{P_0 (\delta'_{\text{кр}} - \delta'_0) \pi/180 + P_m^{II} \cos \delta'_{\text{кр}}}{P_m^{II}} = \\ &= \frac{0,584 (154,4 - 25,6) \pi/180 + 1,35 \cos 154,4^\circ}{1,35} = 0,0665; \delta'_{\text{вкл}} = 86,2^\circ, \end{aligned}$$

где $\delta'_{\text{кр}} = 180 - \arcsin(P_0/P_m^{II}) = 180 - \arcsin(0,584/1,35) = 154,4^\circ$.

Определим предельное время включения с помощью выражения (4.28):

$$t_{\text{вкл}} = \sqrt{7(86,2 - 25,6)/(0,584 \cdot 180 \cdot 50)} = 0,284 \text{ с.}$$

Пример 4.7. В электропередаче, показанной на рис. 4.42, происходит внезапное отключение одной из двух параллельных линий. Параметры элементов электропередачи и параметры режима до отключения линии указаны на схеме.

О п р е д е л и т ь (приближенно) характер изменения угла во времени.

Решение. Расчет произведем упрощенно, заменив восходящую ветвь характеристики мощности II послеаварийного режима (рис. 4.43) отрезком прямой линии, проходящей через начало координат и точку пересечения характеристики II с прямой $P_T = P_0$. Дифференциальное уравнение движения ротора в этом случае будет иметь вид

$$T_J d^2\delta'/dt^2 = P_0 - a\delta',$$

где

$$a = \tan \alpha.$$

Решение этого уравнения можно представить в виде

$$\delta' = P_0/a - \Delta\delta' \cos \sqrt{a/T_J} t.$$

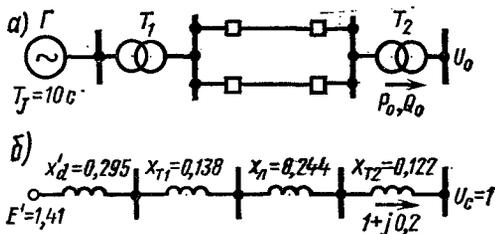


Рис. 4.42. Схема (а) и ее схема замещения (б)

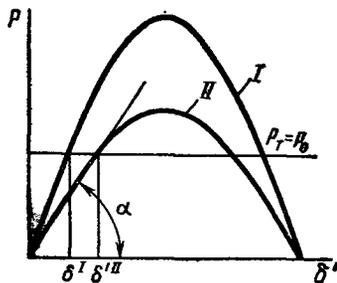
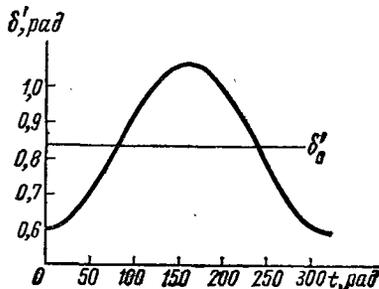


Рис. 4.43. Характеристики мощности

Рис. 4.44. Изменение угла $\delta' = f(t)$



Чтобы определить $\Delta\delta'$ и a , входящие в последнее выражение, найдем амплитуды характеристик мощности I и II :

$$P_m^I = E'U_c / x_{\Sigma} = 1,41 \cdot 1 / (0,295 + 0,138 + 0,244 + 0,122) = 1,765;$$

$$P_m^{II} = 1,41 \cdot 1 / (0,295 + 0,138 + 0,488 + 0,122) = 1,35.$$

Тогда

$$\sin \delta'^I = P_0 / P_m^I = 1 / 1,765 = 0,567; \quad \delta'^I = 34,53^\circ = 0,602 \text{ рад};$$

$$\sin \delta'^{II} = 1 / 1,35 = 0,741; \quad \delta'^{II} = 47,85^\circ = 0,835 \text{ рад};$$

$$\Delta\delta' = \delta'^{II} - \delta'^I = 0,835 - 0,602 = 0,233 \text{ рад}; \quad a = \operatorname{tg} \alpha = P_0 / \delta'^{II} = 1 / 0,835 = 1,2.$$

Изменение угла показано на рис. 4.44:

$$\delta' = 1 / 1,2 - 0,233 \cos \sqrt{1,2 / (314 \cdot 10)} t = 0,835 - 0,233 \cos 0,0195t.$$

Контрольные вопросы

- 4.1. Назовите особенности статической и динамической устойчивости.
- 4.2. Что такое статические характеристики?
- 4.3. Почему появился термин «практические критерии устойчивости»?
- 4.4. Перечислите основные практические критерии устойчивости.
- 4.5. В чем состоит основное условие устойчивости простейшей электрической системы (синхронный генератор, работающий на шины неизменного напряжения)?
- 4.6. Как с помощью основного практического критерия выявляются устойчивость простейшей системы, критический режим и условия устойчивости?
- 4.7. Каковы признаки самопроизвольного изменения режима, проявляющегося в виде сползания, или текучести, параметров нормального режима?
- 4.8. Какие допущения, принимаемые при анализе системы, позволяют оценивать ее устойчивость по практическим критериям?
- 4.9. В чем особенности различных практических критериев и каковы наиболее целесообразные условия использования того или иного критерия на практике?
- 4.10. Укажите общее основное свойство любых устойчивых режимов, запасы статической устойчивости, определенные по разным параметрам.
- 4.11. Что такое возмущающие воздействия и большие возмущения? Приведите примеры.
- 4.12. Как записывается уравнение относительного движения для простейшего случая? Какие при этом сделаны допущения?
- 4.13. В чем заключается способ площадей? Какие допущения положены в его основу?
- 4.14. Как в общем виде формулируется правило площадей?
- 4.15. Как определяется предельный угол отключения короткого замыкания?
- 4.16. Определите запас динамической устойчивости.
- 4.17. Как проверяется устойчивость при АПВ на линиях передачи?
- 4.18. Как применяется способ площадей при проверке устойчивости системы «две станции — нагрузка»?
- 4.19. Как представить процесс изменения угла δ во времени, в чем трудности и как они разрешаются?
- 4.20. Как проводится численное интегрирование уравнения $\Delta\omega = \varphi(\delta)$?
- 4.21. Как интегрируется уравнение при полном сбросе мощности?

Темы рефератов

1. Запасы статической устойчивости.
2. Совмещение расчетов нормального режима и его статической устойчивости.
3. Различные способы численного интегрирования.
4. АПВ различного вида и его анализ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПРИНИМАЕМЫЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ
ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 5.1. ЗАДАЧИ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Переходный режим электрической системы, как это указывалось в гл. 1, состоит из большого числа переходных процессов различной физической природы (см. рис. 1.6). Из них в настоящей дисциплине для исследования выбрана группа электромеханических переходных процессов, выделенных на рис. 1.6 жирной штриховой линией. В результате исследования должно быть получено аналитическое или графическое описание изменения во времени параметров $\Pi_{\text{п.р}}$ процесса, где $\Pi_{\text{п.р}} = I, U, P, \delta, \dots$. Параметры $\Pi_{\text{п.р}}$ должны быть определены от момента появления возмущения (приложения воздействия) до перехода к установившемуся режиму.

Параметры процесса состоят из вынужденных составляющих и свободных составляющих, которые в устойчивой системе с течением времени стремятся к нулю. Однако в линейной системе этот процесс длится бесконечно долго. Поэтому вводится условное время его окончания t_{∞} , после которого $t > t_{\infty}$ значения параметров процесса отличаются от установившегося не более чем на некоторую малую (выбранную из практических соображений) величину. Обычно можно принять $t_{\infty} = 5T$, где T — наименьшая постоянная времени затухания наиболее существенного для данного исследования параметра переходного процесса (рис. 5.1). Эти значения, близкие к установившемуся, иногда называют *квазиустановившимися*.

Для получения зависимостей $\Pi_j = \varphi(t)$ могут быть использованы методы трех групп.

1. Экспериментальные методы, т. е. непосредственные опыты, проводимые:

а) в системе, подлежащей изучению (если она уже существует), или в другой системе, в том или ином отношении подобной и являющейся натурной моделью;

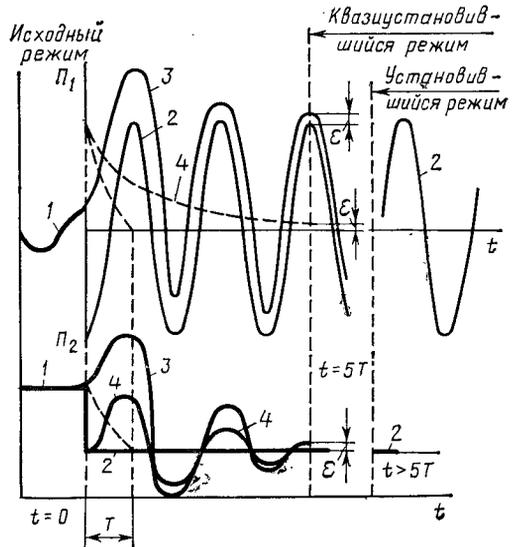


Рис. 5.1. Изменение параметров Π_1 и Π_2 во время переходного процесса:

1 — начальный режим (исходный); 2 — установившийся режим; 3 — полное значение параметра во время переходного процесса; 4 — свободная составляющая параметра, T — постоянная времени

б) на физической или динамической модели, изображающей изучаемую систему с той или иной степенью подобия.

2. Математические методы и модели:

а) чисто аналитические, сводящиеся к прямому интегрированию составленных уравнений и получению расчетных формул;

б) численные, реализуемые обычно с помощью ЦВМ, иначе называемые *цифровым математическим моделированием*;

в) аналоговые, реализуемые с помощью аналоговых устройств, иначе называемые *аналоговым математическим моделированием*.

3. Интуитивные методы или методы экспертных оценок.

Все эти средства исследования требуют применения того или иного математического аппарата.

§ 5.2. МАТЕМАТИКА В ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

В инженерных задачах вообще и в электроэнергетических в частности роль математического аппарата за последние десятилетия резко возросла. Бесспорно, огромная роль математики в решении технических задач все же не должна искажаться, как это иногда делается. Здесь преувеличения, ведущие к потере правильной ориентировки инженера, очень опасны. В самом деле, ЦВМ непрерывно совершенствуются. Если 30—35 лет тому назад на выполнение одной вычислительной операции тратилось в среднем 30 с, то теперь с помощью ЦВМ за секунду выполняются миллионы операций. Наряду с увеличением быстродействия происходит увеличение и их памяти. Однако остается в силе положение о том, что каждая вычислительная машина, как и вообще методы прикладной математики, перерабатывает лишь то, что в них заложено. В связи с этим остается также в силе и соображение о том, что при колоссальной скорости вычислений современные и тем более будущие ЦВМ могут сделать не только такое количество вычислений, какое делают миллионы вычислителей, но могут сделать, а иногда уже и делают, много ошибок. Поэтому не случайно, что наряду с работами и выступлениями, в которых инженера призывают к переходу ко все более сложным и громоздким вычислениям, учитывающим максимально возможное число влияющих факторов, независимо от их практической роли в изучаемом явлении (это якобы повышает «строгость» подхода) в научной литературе появляются и работы другого характера. Среди них можно упомянуть статьи, где подчеркивается: излишняя вера в математические формулировки и описания приводит к тому, что «любая нелепость, облеченная в этот математический — импозантный мундир, выглядит очень научно»*. Математическими соотношениями, в частности дифференциальными уравнениями, можно описать все что угодно, если только принять определенные постулаты. Можно при этом получать соответствующим расчетом математически абсолютно строгие результаты, не имеющие в то же время никакого реального смысла для инженера. Это перекликается со словами Эйнштейна о том, что понятия, которые оказались полезными в упорядочении вещей, легко приобретают над нами такую власть, что мы забываем об их человеческом происхождении. С этими соображениями связано следующее положение: прежде чем ма-

* См., например: *Шварц Д.* Логика, методология и философия науки. Пагубное влияние математики на науку. — США, Стенфорд, 1960.

тематический аппарат может быть использован для изучения реального и во всех его проявлениях бесконечно сложного явления, необходимо это явление подвергнуть предварительному анализу, выделив ту его «главную часть», которая представляет интерес в данной задаче. Это и будет его математическое описание или основная его модель. Создание таких моделей, отвечающих экспериментально проверенным условиям целей исследования, всегда останется центральной задачей математики и математики. Отступления от этой идеи «основной модели», отсутствие проверки ее опытом могут приводить инженера к ошибкам, а теоретика — к нелепым выводам и обобщениям, якобы «строгим»*.

Однако требование критерия практики нельзя понимать буквально как необходимость немедленной проверки любой формулы, любого вывода прямым экспериментом. Полученные результаты должны согласовываться с предшествующим опытом, должны отвечать требованиям практики, помогая достигнуть поставленной цели. Необходимо при этом помнить, что математическое описание реального объекта — это только его упрощенное отражение. Гармонически сочетая анализ и эксперимент (практику), можно установить пределы действия этого описания. Это подчеркивает недопустимость фетишизации математики и математических формул. Любой формулой, любым математическим соотношением надо пользоваться с учетом тех физических явлений, на основе которых они получены. Образно говоря, инженер должен приучаться смотреть на формулы сверху вниз, а не снизу вверх, со слепой верой. Инженер должен уметь перейти от реальной сложной ситуации к разумно упрощенной основной (или общей) модели, которая может не содержать математического описания, появляющегося после ряда допущений, а затем уже к модели математической, дающей описание явления в функциональных связях и формулах. Инженер «не имеет права забывать о границах применимости модели, определяемых характером сделанных допущений. До всего этого математике нет дела. Сила и слабость математики заключается в том, что любой вопрос она понимает буквально»***. Инженер, используя всю мощь современной вычислительной техники, должен уметь прикинуть «на пальцах» и представить мысленно происходящие процессы, трезво оценить результаты, выданные ЦВМ. Поэтому изложение дисциплины и входящих в нее аналитических методов будет проходить под влиянием двух*** положений:

«Цель расчетов — понимание, а не числа».

«Прежде чем начинать решать задачу, подумай, как лучше ее решать и что делать далее с полученным решением».

§ 5.3. МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Переходные процессы в отдельных элементах электрических систем (генераторах, линиях передач и т. д.) уже изучались ранее в курсах ТОЭ, электрических машин и т. д. Цель настоящей дисциплины — *изучение* переходных процессов не в одном элементе, а в совокупности элементов, находящихся в отношениях и связях

* См.: Электрические системы: Математические задачи электроэнергетики/Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1981, с. 288.

** Фабрикант В. А. Новое в инженерном образовании: Физика и ее роль. — Современная школа, 1974, № 1 (5), с. 109.

*** См.: Хэмминг Р. В. Численные методы. — М.: Наука, 1968, с. 398.

между собой и образующих таким образом определенную целостность, единство, т. е. систему*. Электроэнергетическая система состоит из большого числа элементов, например в ЕЭС СССР входит примерно 2000 крупных станций, около миллиона подстанций и трансформаторных пунктов, множество линий электропередачи, составляющих в общей сложности более миллиона километров, и т. д. Если принять, что каждый элемент n , входящий в электрическую систему, может находиться только в двух состояниях — в нормальном (включенном) или в аварийном (короткое замыкание или отключение), то в системе может существовать 2^n состояний и, следовательно, появляться огромное число процессов, обусловленных переходом от одного состояния к другому. *Энергетика вообще и электроэнергетика в частности, являясь большой системой кибернетического типа, обладает той особенностью, что процессы в ее элементах (теоретически во всех) взаимно связаны.*

Разумеется, переход от одного состояния к другому не может происходить сразу у всех элементов, входящих в систему. Процессы в этих элементах, теоретически взаимосвязанные, будут практически сколько-нибудь существенно проявляться только в части элементов. Однако эта часть может быть настолько велика, что система в условиях данного исследования может потерять **наблюдаемость**.**

Системный подход к исследованиям, требующий учета всех прямых и обратных связей между элементами системы, нуждается здесь в корректировке — *сложная большая система кибернетического типа должна разбиваться на подсистемы*, но так, чтобы при этом сохранялись основные для данного исследования свойства большой системы. При исследованиях приходится оперировать именно с этими подсистемами, которые грубо отражают свойства системы. Кроме укрупнения системы «по элементам» необходимо заглубить ее изучение и по числу рассматриваемых процессов. Из бесконечной гаммы процессов, составляющих любой переходный режим, следует выбрать именно тот процесс (или процессы), изучение которого необходимо для решения поставленной в данном исследовании задачи. Отбор наиболее значимых процессов, которыми можно отразить «суть явления», не усложняя его изучение излишними деталями, и есть *искусство создателя модели*. Это специально подчеркивается, так как некоторые инженеры рассматривают возрастание мощности вычислительных машин как возможность «не думая» программировать «все подряд» на ЦВМ, учитывая тысячи элементов и тысячи факторов, и якобы «сверхточно» решать задачи, а в действительности получать от ЦВМ излишне громоздкий ответ, который, будучи формально правильным, может оказаться «ненаблюдаемым», «необозримым» и даже бесполезным при практическом его освоении. Необходимость ограничений в постановке научных исследований давно была остроумно сформулирована Дж. Д. Вильямсом: «Любой дурак сможет в любой заданной ситуации перечислить больше факторов, чем сам бог сможет разобрать. Например, Ньютон должен был бы принять во внимание тот факт, что планеты несколько сплюснены у

* Подробное определение системы см.: Философский словарь. — М.: Изд-во полит. литературы, 1981, с. 329.

** Под *наблюдаемостью* понимается свойство системы давать в любой момент времени информацию о режиме, сообщая наблюдателю (человеку или автоматическому устройству) достаточно быстро существенные (в условиях данного исследования) параметры процессов. Подробнее см. § 3.5, а также: *Воронов А. А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость.* — М.: Наука, 1979.

полюсов, что на них есть горы, что по крайней мере одна из них покрыта деревьями и что на ней имеются термиты и прочие неприятные вещи. Требуется здравый смысл, чтобы решить, в каком месте прервать перечисление этих факторов. На практике Вы должны прервать перечисление, как только здравый смысл

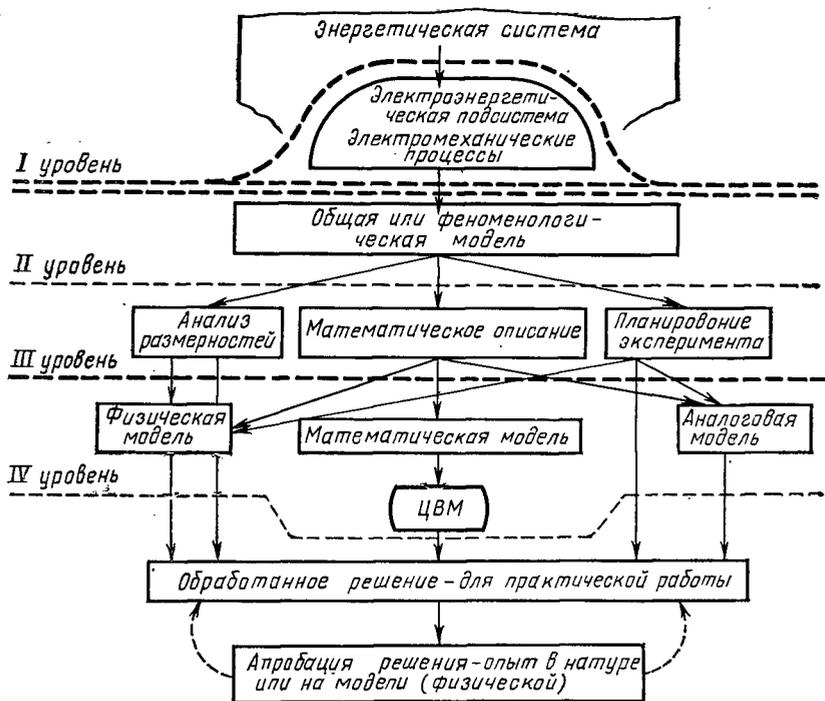


Рис. 5.2. Описания, модели и уровни допущений при исследовании переходных процессов

подскажет Вам, что в модель введено достаточно факторов, чтобы Вы могли с ее помощью что-нибудь узнать об интересующей Вас проблеме»*.

Моделирование переходных процессов в электрических системах. Во время переходных процессов в системе происходят изменения э. д. с., токов, напряжений, угловых скоростей роторов и механических моментов вращающихся машин. Одновременно изменяются уровни энергии, запасенной во всех электрических и механических элементах системы. Для проведения исследований этих процессов, которые протекают *в натуре*, и необходимо создать *модели*.

Модель — это некоторый мысленный (описательный) или физический (материальный) вспомогательный объект, заменяющий при определенных допущениях исследуемый оригинал**. Построение моделей (рис. 5.2) какого-либо про-

* Цитировано по кн.: Федоренко Н. П. Экономика и математика. — М.: Знание, 1967, с. 85.

** См.: Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1984, с. 439.

песса (или группы процессов) начинается с общей модели процесса, создающейся в результате прямого наблюдения этого процесса и его осмысливания. Такие модели, иногда называемые *феноменологическими*, могут при определенных допущениях (I уровень допущений) давать какое-либо словесное или подкрепленное количественными соотношениями описание процессов, отобранных для изучения. Затем на основе этой общей модели составляется математическое описание*, причем делаются допущения, отвечающие II уровню. Если это почему-либо затруднительно или даже невозможно, применяется экспериментальное изучение, использующее методы планирования опытов или анализа размерности. Далее создаются конкретные модели: физические, аналоговые или математические (III уровень допущений). *Математическая модель представляется системой дифференциальных уравнений, обычно упрощенных по сравнению с теми, которые входили или должны были бы входить в общую модель.* Математическая модель содержит алгоритмы и программы для решения, а также набор начальных и граничных условий. На основе ее получается решение в квадратурах или числовое решение на ЦВМ либо воспроизводится протекание процесса, отвечающего полученной модели на АВМ. При этом любая организация процедуры изучения сопровождается допущениями. Так, при числовом решении ускорение может приниматься постоянным на протяжении расчетного интервала, распределенный параметр — сосредоточенным, вращающий момент — численно равным мощности и т. д. Все эти допущения относятся к III уровню; они могут быть различными в зависимости от конкретных условий проведения исследования, например от того, реализуется ли решение уравнений непосредственно (в квадратурах), составляется ли программа для решения на ЦВМ или АВМ либо изучается на физической модели. Далее при любом исследовании необходима проверка полученных результатов, предусматривающая апробацию их с помощью опытов (в натуре или на физических моделях, в свою очередь корректируемых натурными экспериментами).

При обработке данных модели, трактовке полученных решений, их обобщении и интерпретации также делаются допущения (IV уровень), которые должны обеспечить наблюдаемость и обозримость сопоставляемых результатов. Полученные данные должны быть обработаны и представлены в форме, удобной для сопоставления и выводов. Обычно это *критериальная форма, представляющая процессы в виде зависимостей между безразмерными комбинациями физических величин, участвующих в процессе.*

§ 5.4. ТОЧНОСТЬ И СТРОГОСТЬ В ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Для правильной постановки инженерных исследований необходимо определение *строгости* и *точности* их исходя из постановки конкретной инженерной задачи и соответствия полученных результатов реально существующему изучаемому объекту.

В инженерных задачах понятие точности часто смешивается с понятием строгости, причем вносится дополнительная путаница тем, что точность результатов оценивается только по точности решения уравнений иногда исходя из числа знаков, получаемых в результате расчета. Между тем строгость и точность опи-

* Такое описание в виде системы уравнений иногда называют математической моделью, что неправильно, так как ее создание — это последующий этап исследований.

сания явления, точность и строгость расчетов результатов должны оцениваться по их *соответствию реальной физической природе исследуемых явлений, рассматриваемых в разрезе данной конкретной технической задачи.*

Как правило, при изучении технических задач и физических явлений точные (в смысле процедуры решения) результаты, полученные от какого-либо расчетного устройства, не гарантируют совпадения с действительными. Инженер-исследователь должен сопоставить результаты аналитического исследования с результатами опыта. Однако и здесь при современных сложных, имеющих много влияющих факторов системах прямое сопоставление единичного расчета с единичным опытом зачастую может дать совершенно не характерные результаты. Необходимо учесть, что в технической системе, как правило, подверженной влиянию многих факторов, интенсивно влияющих на характер поведения системы, в зависимости от сочетаний этих факторов и других случайных условий могут получаться существенно различные результаты. Поэтому несовпадение результатов единичного расчета и единичного опыта только в отдельных случаях может с уверенностью характеризовать неправильность теории или ошибочность расчетов. Соответственно, конечно, не дает уверенности и единичное совпадение. Являющееся практическим критерием реальной строгости технического исследования сопоставление расчета и опыта для любой сложной, искусственной или естественной (т. е. созданной человеком или природой), системы должно производиться с учетом возможных случайных вариаций в параметрах, тем более заметных, чем ближе к какому-либо экстремальному состоянию, например к пределу устойчивости, находится система. Такое сопоставление должно проводиться по специально разработанной методике, учитывающей вариацию параметров в опытах с реальной системой или вариацию соответствующих параметров при расчетах, причем результаты как расчетов, так и опытов должны представляться и сопоставляться в критериальной форме, полученной в соответствии с теорией подобия*.

Понятия инженерной строгости постановки задачи и точности расчета — это не одно и то же.

Понятие строгости в любом случае вытекает из поставленных при исследовании целей и только этой постановкой задачи и необходимостью получения после ее решения нужных для практики результатов и определяется.

Абсолютное, безотносительное к этой постановке задачи понятие строгости даже в «чистой» математике, как отвлеченной науке, не имеет смысла. В самом деле, что значит строгость в математике? Строгость в математических посылах Евклида, строгость в построениях Лобачевского, строгость математических идей Вейерштрасса и, наконец, строгость современной математики — это, очевидно, разные понятия, определяющиеся в конечном счете только *принятыми постулатами*, которые, в свою очередь, *обязательно зависят от поставленной задачи.*

Строгость в инженерно-технических задачах тем более не может и не должна определяться вне опыта, вне данной практической проблемы сформулированными постулатами. Не может она определяться и характером дифференциальных уравнений, которые, как иногда кажется некоторым инженерам, тем более строги, чем большее число возможных факторов они учитывают независимо от реальной

* См.: Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1984, с. 439.

роли их. В ряде случаев оказывается, что более полное дифференциальное уравнение дает худшие результаты в условиях неточности задания исходных данных. *Более полное уравнение может быть более чувствительно к вариациям погрешностей исходных данных*, которые в конечном счете исказят решение более полного уравнения сильнее, чем менее полного. Таким образом, адекватность решения той действительности, для описания которой создано уравнение, неоднозначно связана с его полнотой.

Точность определяется реальной степенью совпадения расчетного и действительного процесса. Нельзя также считать, что точность полученного результата тем выше, чем «точнее», т. е. с большим числом знаков, проведен расчет того или иного явления.

Нельзя говорить о строгости и точности в инженерной задаче только на основании уравнений, отражающих процесс, и математического аппарата, обеспечивающего определенную точность вычислений, которая вовсе не тождественна точности результата исследования. Вопрос о точности следует рассматривать, поставив задачу, выявив существенные в этой конкретной задаче процессы и факторы, отбросив несущественные. При этом вновь следует рассматривать уровни допущений, в свою очередь определяющиеся поставленной задачей. На рис. 5.2 была показана иерархия этих уровней допущений, устанавливаемых при рассмотрении изучаемого явления как совокупности огромного числа процессов ($\Pi \rightarrow \infty$). В самом деле, явления в любом инженерном сооружении содержат именно такое множество процессов. Например, работа линии передачи связана со многими процессами: распространением электромагнитных волн вдоль проводов, их нагревом, излучением энергии в пространство, интерференцией с волнами радио- и телевизионных устройств, излучением теплоты и света, ионизацией воздуха около проводов, процессами экологических, в том числе биологических, влияний и т. д. Строгая постановка исследования прежде всего означает *отбор тех и только тех* процессов и факторов, которые представляют интерес для данной задачи, в данной конкретной ее постановке. Строгий подход требует отбросить те процессы, влияние которых второстепенно*. Этот отбор подлежащих изучению процессов и вместе с этим отбор необходимых для учета влияющих факторов происходит уже при установлении допущений I уровня (рис. 5.2).

Далее, когда в соответствии с полученным математическим описанием, представляющим отобранные процессы, уточняется постановка задачи и выбирается способ исследования, вводят допущения, которые связаны с поставленной задачей, определяют строгость решения системы дифференциальных уравнений и устанавливают технику их последующего решения. Возможно, однако, проводить исследования и без полного математического описания и без составления математической модели, применяя анализ размерностей величин, участвующих в процессах, или планирование экспериментов. На этой стадии исследования вновь вводят допущения (II уровня), касающиеся уже способов отображения процессов при формулировке задачи, т. е. решается вопрос о строгости последующего исследования. Например, в процессе записи и преобразований уравнений может отбрасываться часть членов ряда разложения, приниматься постоянными заведомо мало меняющиеся величины и т. п.

* Например, далее будет показано, что в большинстве случаев правомерен отказ от учета периодической слагающей тока ротора и соответственно аperiodической слагающей тока статора при определении вращающего момента генератора.

§ 5.5. ПРОСТРАНСТВО И УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ (РЕЖИМА). ДОПУЩЕНИЯ И УПРОЩЕНИЯ

Очень заманчиво математически представить все многообразие режимов электроэнергетической системы в некотором многомерном пространстве. Каждой точке такого пространства однозначно соответствовало бы определенное состояние системы* — *пространство состояний*, которое отображало бы и переходные процессы, так как каждое изменение режима имело бы однозначно определенную траекторию движения изображающей точки в пространстве и отражалось бы соответствующими уравнениями состояния. Однако такие всеобъемлющие математические представления или математические универсальные модели, теоретически мыслимые, слишком сложны, а поэтому практически невозможны, даже для сравнительно простых систем и не очень сложных ситуаций. Для того чтобы модель была работоспособна, *необходимо упростить ее, не теряя при этом существенных черт реальной системы* (оригинала). Но для такого упрощения приходится делить сложную систему на подсистемы и, выделяя из больших комплексных задач подзадачи, применительно к ним проводить исследования. При этом целесообразно принять некоторые положения, которых необходимо далее придерживаться при преобразованиях и упрощениях.

1. **Выделение подпроцессов.** Для упрощения решения единый процесс целесообразно разбить на подпроцессы, считая, что они не действуют непрерывно внутри основного процесса, а появляются только в некотором диапазоне изменения параметров. Так, например, действие асинхронных моментов учитывается только после достижения некоторой скорости, до условного значения которой ими пренебрегают. Хотя введение такого рода границ и условно, оно весьма облегчает анализ.

К важным допущениям, принимаемым при анализе электромеханических процессов, относится учет изменений угловой скорости роторов синхронных машин, реакции якоря в них и электромагнитных процессов в асинхронных машинах. Не менее существенное значение имеют различные допущения, учитывающие влияние регуляторов возбуждения и регуляторов скорости первичных двигателей.

Длительность переходных электромеханических процессов, как правило, значительно превосходит время распространения в пространстве изменяющихся физических величин (напряжения, тока и т. д.), характеризующих эти процессы. Следовательно, их в подавляющем большинстве случаев можно рассматривать как процессы в цепях с сосредоточенными постоянными.

2. **Учет нелинейности.** Электрические системы, режимы которых изучаются в настоящей дисциплине, нелинейны. Нелинейность их в основном определяется двумя причинами: а) зависимостью параметров системы (активных и реактивных сопротивлений, коэффициентов намагничивания, коэффициентов усиления регуляторов и т. д.) от параметров режима; б) нелинейностью связи параметров режима между собой.

Нелинейность параметров системы обычно не учитывается, исключения особо оговариваются. **Нелинейности связей параметров режима**, как правило, учитываются. Случаи, когда от такого

* В электроэнергетике понятия «состояния» и «режим» тождественны.

учета отказываются, специально подчеркиваются; система при этом называется *линеаризованной*.

При исследованиях линеаризованных систем можно применять метод наложения (суперпозиции), при котором сложный процесс, вызываемый двумя или несколькими независимыми воздействиями, рассматривается как сумма отдельных процессов, каждый из которых вызван своим воздействием.

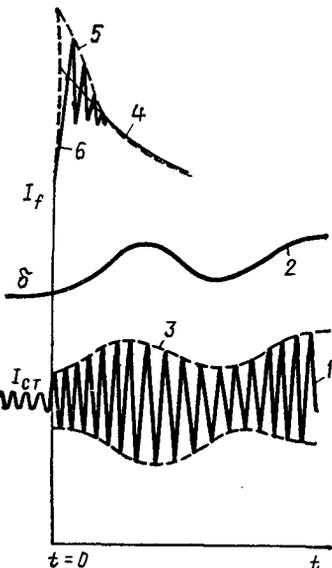


Рис. 5.3. Быстрые (мгновенные значения) изменения параметров и их огибающие:

1 — быстрые мгновенные значения тока статора $i_{ст}$; 2 — «медленные» изменения угла сдвига ротора δ генератора; 3 — огибающая изменений тока статора $i_{ст}$; 4 — средние значения изменения тока возбуждения $i_{в}$; 5 — огибающая этого тока; 6 — его мгновенные значения

По нелинейным уравнениям проводятся исследования динамической и результирующей устойчивости и переходных процессов после больших возмущений.

При исследованиях статической устойчивости рассматриваются свободные переходные процессы, вызванные малыми возмущениями режима. При этом причины и место появления малых возмущений не выявляются. Предполагается, что возмущающее воздействие, вызвавшее возмущение, снято до начала изучаемого переходного процесса.

При исследованиях динамической устойчивости рассматриваются переходные процессы при приложении к системе больших возмущающих воздействий, заданных определенным образом (либо во времени и пространстве, либо в функции некоторых режимных параметров). В этом одно из принципиальных отличий в подходе к исследованию статической и динамической устойчивости.

3. О г б а ю щ и е. У процессов, связанных с синусоидальными изменениями параметров режима основной рабочей частоты (50 Гц), обычно рассматриваются не мгновенные значения, а их огибающие (рис. 5.3), хотя в электрических системах переменного тока электрическая энергия вырабатывается, передается и распределяется с помощью синусоидально изменяющихся токов и напряжений. Рассматривая переходный процесс, можно оперировать с мгновенными (через каждую сотую секунды при частоте 50 Гц изменяющими свое направление) значениями тока и напряжения и составлять применительно к ним уравнения. При изучении быстрых электромагнитных процессов, происходящих со скоростью, соизмеримой с синусоидальными изменениями тока и напряжения, или с большей скоростью, такое рассмотрение мгновенных токов и напряжений является обязательным.

Однако изучение медленно протекающих электромеханических процессов часто можно упростить, отказавшись от рассмотрения изменений мгновенных значений параметров режима и учитывая только изменения их огибающих (рис. 5.3). Такое упрощение оказывается возможным, так как электромеханические процессы в электрических системах, связанные с изменениями угловых скоростей роторов генераторов и количества электромагнитной энергии, запасенной в элементах системы, протекают значительно медленнее электромагнитных.

Анализ, проводимый без указанного упрощения, называется или *анализом*

по полным уравнениям с учетом влияния изменения мгновенных значений, или анализом в мгновенных значениях, или анализом по уравнениям Парка—Горева. Существенно, что при расчете по огибающим изменения электрической мощности принимаются происходящими мгновенно, хотя в действительности мощность не может меняться скачком.

4. Выделение главного. Все упрощения анализа переходных процессов заключаются в выделении главного, практически существенного для решения поставленных задач. Здесь, как и в других инженерных задачах, из сложных явлений для рассмотрения выделяют отдельные процессы, характеризуемые возможно меньшим числом параметров и более простыми соотношениями. При таком подходе не отражаются детали, но дается достаточно надежная для инженерных задач характеристика явления.

Упрощения при рассмотрении поставленных в данной дисциплине задач необходимы и для того, чтобы сделать все расчеты и представления о работе систем наиболее наглядными и достаточно легко проверяемыми. Инженеру очень важно понимать физическую сущность исследуемого явления и уметь наглядно представлять полученные результаты, пользуясь упрощенными схемами замещения и моделями.

5. Расчет на основе схем замещения. Широкое использование вычислительной техники при анализе режимов вовсе не указывает на необходимость отказа от простых расчетов, проводимых на основе схем замещения. Являясь математическими моделями, схемы замещения упрощенно отражают сложный процесс и приближенно формируют его характеристики (подробнее см. гл. 6). б) свойства, которые являются главнейшими при решении поставленной задачи.

6. Позиционная идеализация. Под *позиционной системой* понимается система, параметры режима которой зависят только от данного состояния системы, взаимного положения ее элементов (например, роторов генераторов) независимо от того, как было достигнуто это состояние, как система пришла к данному положению и как она движется дальше. В позиционной системе не учитываются факторы, зависящие от скорости, в частности демпферные моменты синхронных машин.

7. Построение статических и динамических характеристик. Под *статическими характеристиками* понимаются графически или аналитически представленные зависимости параметров режима от каких-либо других его параметров и параметров системы [например, $Q = f(U)$ при разных x_c]. Эти зависимости выявляются в условиях настолько медленных изменений режима, что можно считать их не зависящими от времени (квазиустановившийся режим) и вычислять отдельные точки этих характеристик согласно соотношениям установившегося режима.

Под *динамическими характеристиками* понимаются взаимосвязи параметров, полученные в условиях, когда указанные параметры или часть их зависят от времени, т. е. скорости изменения параметров. Динамические характеристики могут учитывать не только первые производные параметров, но и их высшие производные.

Таким образом, статическая характеристика представлена зависимостью $\Pi = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_n)$, а динамическая — зависимостью $\Pi = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_n, \dot{y}_1, \dot{y}_2, \dots, \dot{y}_n/dt) \dots$.

Статические характеристики достаточно полно описывают позиционную систему, динамические характеристики — динамическую систему.

Промежуточной между этими двумя характеристиками будет квазидинамическая характеристика, где изменение параметров во время переходного процесса учтено частично (рис. 5.4). Примеры этих характеристик показаны на рис. 5.5.

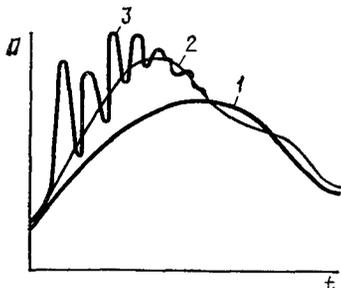


Рис. 5.4. Три вида характеристик параметра $\Pi = \varphi(t)$:

1 — статическая; 2 — квазидинамическая; 3 — динамическая

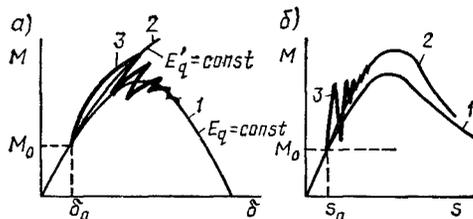


Рис. 5.5. Примерный вид характеристик $\Pi_1 = \varphi(\Pi_2)$:

а — $M=f(\delta)$ синхронного генератора; б — $M=\varphi(s)$ асинхронного двигателя; 1 — статическая; 2 — квазидинамическая; 3 — динамическая

Разница между ними обусловлена тем, что в статических характеристиках не учтены быстрые электромагнитные процессы и их влияние на вращающий момент, в динамических они учтены полностью [например, $E_q = f(t)$, $E'_q = \varphi(t)$], а в квазидинамических характеристиках — частично [$E'_q \approx E' = \text{const}$].

Применительно к задачам электромеханических переходных процессов динамические характеристики отражаются при расчетах по *полным уравнениям*, иначе называемых *уравнениями Парка—Горева* (см. гл. 6). Квазидинамические характеристики получаются при расчетах по *упрощенным уравнениям*, образуемых из полных при отбрасывании в них части членов. Чаще всего квазидинамическая характеристика при исследовании процессов в синхронных машинах и сетях строится при $E'_q = \text{const}$, в простейшем случае при $E' = \text{const}$ (рис. 5.6).

В ряде случаев вместо динамической характеристики 4 для приближенных расчетов может успешно применяться квазидинамическая (5, 6) и даже квазистатическая характеристика ($E'_{q0} = \text{const}$).

8. Учет распределенности параметров. Быстрые и медленные процессы. Диапазон изменения длительности и скорости протекания переходных электромеханических процессов очень велик (см. гл. 1, рис. 1.6). В любом из процессов можно выделить такие, которые по отношению к основному (изучаемому) процессу или переходному режиму в целом можно считать *быстрыми*. Электромагнитные переходные процессы в генераторах и трансформаторах, равно как и изменения (мгновенные значения) с частотой 50 Гц тока и напряжения, будут быстрыми по сравнению с электромеханическими процессами (1—3 Гц). Эти процессы будут, в свою очередь, быстрыми по отношению к процессам, учитывающим влияние турбин и котлов. Разделение на быстрые и медленные процессы иногда используется при исследовании систем, имеющих дифференциальные уравнения, содержащие коэффициенты при произ-

водных («постоянные времени»), порядок которых различен. В этих случаях быстрые и медленные движения могут исследоваться раздельно согласно специальной процедуре*), описание которой выходит за рамки данной дисциплины. Заметим, что хотя малость постоянных времени обычно указывает на малое влияние соответствующих параметров и уравнений на исследуемые процессы, все же нельзя всегда пренебречь ими без специальной проверки влияния так называемого м а л о г о п а р а м е т р а .

Метод малого параметра предусматривает приближенное нахождение решений систем нелинейных дифференциальных уравнений. Основу метода составляет предположение о том, что в правых частях этих уравнений появляются некоторые малые члены, не оказывающие решающего влияния на поведение исследуемой системы. Решение производится сначала для упрощенной (с отброшенными «малыми») системы, затем уточняется в соответствии с рекомендациями, вытекающими из существа метода**.

Выше было указано, что, как правило, электромеханические переходные процессы могут исследоваться при введении в схему замещения исследуемой системы всех электрических элементов сосредоточенными параметрами. В некоторых случаях, например при использовании быстродействующих устройств (регуляторов возбуждения, действующих в зависимости от изменения первой и второй производных регулируемых величин) в протяженных передачах (более 1000 км), может появиться необходимость в одновременном рассмотрении электромеханических и волновых процессов. Применение быстрого регулирования гидротурбин может привести к необходимости учета волновых процессов в трубопроводах одновременно с рассмотрением переходных электромеханических процессов. Однако практической необходимости в таких точных решениях, учитывающих электрические и механические распределенные параметры и волновые процессы, не возникало. При расчете сверхдальних электропередач или новых способов регулирования должны специально выявляться случаи, когда учет распределенности параметров подлежит дополнительному рассмотрению.

9. Простые и сложные системы. Переходные электромеханические процессы можно также различать в зависимости от сложности системы, в которой они происходят. В системе любой сложности может быть учтено действие регуляторов возбуждения или скорости, что делает расчеты, проводимые для простой системы, более громоздкими, чем расчеты, проводимые для сложной систе-

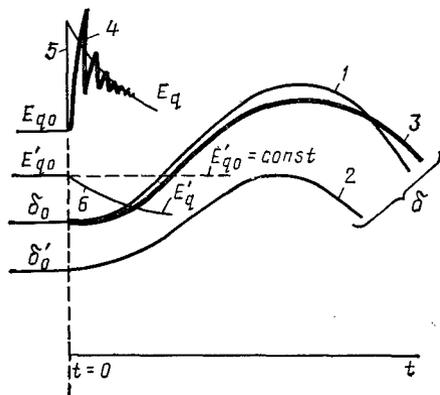


Рис. 5.6. Характеристики переходного процесса:

1 — изменение $\delta=f(t)$ при задании э. д. с. E_{q0} , E'_{q0} квазидинамическими характеристиками (5 или 6); 2 — то же, при задании квазистатической характеристикой, при $E'_{q0}=\text{const}$; 3 — то же, при задании динамической характеристикой, при изменении э. д. с. согласно 4

* См.: Картелишвили Н. А., Галактионов Ю. И. Идеализация сложных динамических систем. — М.: Наука, 1976, с. 268; Вазов В. Асимптотические разложения обыкновенных дифференциальных уравнений. — М.: Мир, 1968, с. 220.

** См.: Мееров М. В. Синтез структур автоматического регулирования высокой точности. — М.: Физматгиз, 1959, с. 284; Булгаков Б. В. Колебания. — М.: Физматгиз, 1954, с. 240.

мы. Особые вопросы возникают при учете длинных линий как цепей с распределенными постоянными. Сложность расчета зависит также и от того, проводится он с учетом мгновенных изменений параметров режима или ведется по их огибающим. Таким образом, само по себе разделение систем на простые и сложные является в известной мере условным, не характеризующим в полной мере сложность проведения расчетов. Обычно систему, содержащую одну станцию, работающую через линию с нагрузками на шины бесконечной мощности, считают *простейшей системой*. Две станции конечной мощности, питающие общую нагрузку или нагрузки, при условии, что э. д. с. этих станций постоянны, оценивают как *простую систему*. Система, где число станций больше двух, оценивается как *сложная система*. Деление это условно, так как в зависимости от способа учета переходных процессов в генераторах, регулирующих устройствах и нагрузках простейшая система может иметь громоздкое математическое описание, содержащее дифференциальные уравнения высоких порядков, и таким образом, несмотря на топологическую простоту, превратиться в сложную.

10. Погрешности линеаризации. Под линеаризацией понимается *приближенный анализ нелинейных систем*, при котором их нелинейные свойства учитываются с тем или иным приближением. При изучении электроэнергетических систем приходится учитывать два вида нелинейностей.

Нелинейность параметров системы P_c , т. е. их зависимость от параметров режима: $P_c = \psi(P_r)$, например $x = f(I)$, $C = \varphi(U)$ и т. д.

Нелинейность параметров режима P_r , например $\Delta P = \varphi(I^2)$, $P = EU \sin \delta$ и т. д.

Нелинейности параметров системы P_c обычно не учитываются в исследованиях переходных процессов или учитываются приближенно введением в схему замещения значений P_c , различных для разных интервалов процесса. Для некоторых случаев разработаны специальные способы учета некоторых нелинейностей, например связанных с влиянием насыщения магнитных цепей синхронных машин и изменением реактивностей (x_d, x_d' и т. д.) и э. д. с. (E_q, E_q').

От нелинейностей параметров режима чаще всего стремятся избавиться, заменив сложную зависимость разложением в ряд Тейлора и представив $f(x_0 + x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots$. Разложение считается удовлетворительным, если ряд сходится в некоторой окрестности точки x_0 , что, разумеется, зависит от существенного для данного исследования диапазона. Например, для синусоидальной функции даже при большом числе членов приближенное представление очень хорошо вблизи начала координат и плохо вдали от него (рис. 5.7). Часто при изучении переходных процессов после разложения в ряд Тейлора нелинейной зависимости учитывают только линейные члены ряда. Все нелинейные члены ряда, пропорциональные производным, квадратам и высшим степеням отклонений, не учитывают вследствие малости их отклонений. Получаемая после преобразований система уравнений называется *линеаризованной по первому приближению*. Коэффициент линеаризации соответствует первому члену ряда Тейлора и представляет собой частную производную нелинейной функции по режимному параметру, вычисленную в исходном режиме. Зависимость коэффициента линеаризации от исходного режима отличает линеаризованную систему от линейной и является характерным свойством нелинейной системы.

В линеаризованной системе в отличие от линейной независимость характера переходных процессов от их интенсивности сохраняется только до некоторых малых отклонений параметров режима от установившихся значений, или, как час-

то говорят, в пределах справедливости линеаризации по первому приближению.

Проиллюстрируем простейшим примером линеаризацию нелинейной зависимости электромагнитной мощности от угла: $P = P_m \sin \delta$. Дадим малое приращение углу $\Delta \delta$ от установившегося значения δ_0 и разложим эту нелинейную

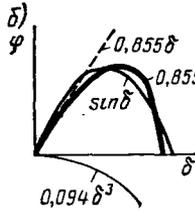
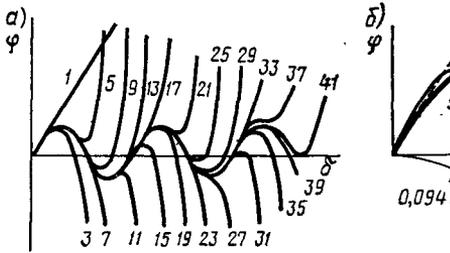


Рис. 5.7. Аппроксимация синусоидальной зависимости:
 а — представление $\varphi(\delta)$ рядом с разным числом членов разложения (от 1 до 41); б — представление $\varphi(\delta)$ в пределах от 0 до π сочетанием прямолинейной и параболических зависимостей

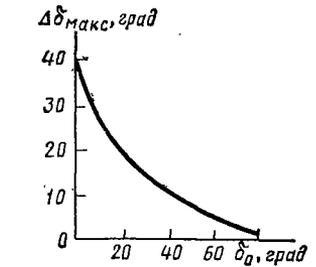


Рис. 5.8. Зависимость $\Delta \delta_{\text{макс}} = f(\delta_0)$ при линеаризации по первому приближению с заданной погрешностью $\epsilon = 10\%$

функцию в ряд Тейлора, но в отличие от предыдущего случая в малом диапазоне — в окрестности δ_0 :

$$\sin(\delta_0 + \Delta \delta) - \sin \delta_0 = \Delta \delta \cos \delta_0 - \frac{\Delta \delta^2}{2} \sin \delta_0 - \frac{\Delta \delta^3}{3!} \cos \delta_0 + \dots$$

Отбрасывая члены, пропорциональные $\Delta \delta^2$, $\Delta \delta^3$ и т. д., вносим погрешность, которую можно оценить как отношение отбрасываемых членов к первому (оставляемому) члену ряда:

$$\epsilon = \frac{1}{\Delta \delta \cos \delta_0} \left(\frac{1}{2} \Delta \delta^2 \sin \delta_0 + \frac{1}{3!} \Delta \delta^3 \cos \delta_0 \right) = \frac{\Delta \delta}{2} \operatorname{tg} \delta_0 + \frac{\Delta \delta^2}{6}$$

Задаваясь допустимой погрешностью, можно построить зависимость $\Delta \delta_{\text{макс}} = f(\delta_0)$ (рис. 5.8). Она показывает, что максимальное отклонение $\Delta \delta_{\text{макс}}$ угла после возмущения, при котором погрешность от линеаризации по первому приближению рассматриваемой нелинейности не превышает 10%, зависит от исходного угла δ_0 . При малых исходных углах (режимах малых нагрузок синхронной машины) линеаризация по первому приближению справедлива при достаточно больших возмущениях; при больших углах δ_0 заданная погрешность сохраняется только при малых возмущениях. В общем случае значения возмущения, при которых исследование переходных процессов по линеаризованным уравнениям не вносит недопустимой погрешности, зависят от вида нелинейностей и исходного режима. При исследованиях статической устойчивости значение возмущений может быть принято сколь угодно малым. Как показал Ляпунов, условия статической устойчивости линеаризованной системы и исходной нелинейной системы при определенных, практически удовлетворяющихся условиях совпадают. Суждение о переходных процессах, развиваемых после нарушения статической устойчивости, возможно только в пределах отклонений, при которых с заданной погрешностью справедливы линеаризованные уравнения. При больших отклонениях

следует учитывать отброшенные члены ряда Тейлора или решать исходную нелинейную систему дифференциальных уравнений.

Таким образом, выявляются две существенно различные по постановкам и исходным допущениям задачи: исследование переходных процессов в линеаризованных системах и исследование переходных процессов с учетом нелинейностей. По линеаризованным уравнениям проводятся как исследования статической устойчивости, так и исследования, связанные с оценкой показателей качества переходного процесса, синтезом устройств автоматического регулирования. В последнем случае иногда рассматриваются линеаризованные системы под действием возмущающих воздействий, заданных во времени.

11. Задачи анализа и синтеза. При изучении любых переходных процессов возникают задачи анализа; они сводятся к определению изменений параметров режима P_p при заданных начальных условиях и возмущениях (отклонениях параметров системы P_c или параметров режима от нормальных), при заданных схемах и характеристиках оборудования, в том числе регулирующих устройств. В результате анализа могут быть получены: качественные (устойчиво, неустойчиво) либо количественные данные об изменениях параметров режима во времени $P_p = f(t)$, или данные о связи параметров режима и параметров системы $P_p = \Phi(P_c)$, или сведения об изменении одного параметра режима в зависимости от изменений другого, или данные о скорости изменения $P_{pi} = \xi(dP_{pi}/dt)$.

Задачи синтеза* сводятся к отысканию схем, характеристик оборудования, в том числе и регулирующих устройств, нахождению тех начальных условий, при которых изменения параметров режима при переходном режиме будут иметь желательный (заданный заранее) характер. В результате синтеза выявляются схемы и параметры систем в их силовой части, структуры регулирующих устройств, а в некоторых случаях и их настройки. Между задачами анализа и синтеза не существует резко выраженной границы: так, перебором различных вариантов при анализе решаются задачи, относящиеся к синтезу, и т. д. Большое значение имеет управление переходными процессами в действующих электрических системах. При решении задач управления — в отличие от задач анализа — параметры режима системы рассматриваются не как заданные, а как изменяющиеся под действием регулирующих устройств, которые при необходимости могут менять структуру и настройку.

Представленные задачи требуют математического аппарата, обеспечивающего решения уравнений движения системы. Число этих уравнений, как известно, равно числу степеней свободы. В зависимости от сделанных допущений, продиктованных, в свою очередь, постановкой задачи, приходится оперировать с линейными или нелинейными уравнениями. При больших возмущениях исследование поведения системы (ее динамической устойчивости) требует решения систем нелинейных дифференциальных уравнений, число которых на каждый генерирующий агрегат может составлять от 2 до 40. В зависимости от сделанных допущений эти уравнения объединяются с системой алгебраических уравнений, описывающих сеть (два уравнения на узел). Для практических расчетов процессов, определяющих переходный режим сложной системы (500—800 генераторов, 1000—

* Под синтезом, дословно означающим «соединение, сочетание», здесь понимается создание (проектирование) структур и алгоритмов управления, обеспечивающих оптимальность переходных процессов в автоматически регулируемых электрических системах.

3000 узлов), приходится оперировать с громоздкими системами уравнений, что не только вызывает трудности, связанные со сложностью решения, но и ставит проблему обзримости результатов, так как большое число функциональных связей, выявленных в результате расчетов, требует для их практического использования систематизации и упрощений. Упрощения обычно целесообразно провести до начала расчетов, осуществляя так называемое эквивалентирование: замену групп одинаковых генераторов или таких, поведение которых во время переходного процесса можно считать одинаковым, одним эквивалентным генератором (см. П2). Таким образом, решение группы задач, относящихся к изучению динамических процессов (динамическая устойчивость), требует применения методов, дающих количественные зависимости $P_p = f(t)$. Зависимости эти, как правило, получаются в результате решения систем дифференциальных уравнений.

Нелинейные уравнения, характеризующие процессы при анализе больших возмущений, справедливы и при малых возмущениях. Однако при малых возмущениях удобнее пользоваться линеаризованными уравнениями, позволяющими судить о процессах по виду корней характеристического уравнения, устанавливая, каков будет вид малых отклонений параметров ΔP_p (апериодические или периодические, затухающие или нарастающие).

Возможно применение практических критериев устойчивости, которые дают качественную оценку процесса — устойчиво, неустойчиво. Задачи синтеза могут решаться как общие исходя из получения желательных динамических и статических свойств системы или же только как частные.

Задача управления переходными процессами математически формулируется в виде уравнения

$$dP_{pi}/dt = f(P_{pi} Y_{vi}) + \Psi(t),$$

где $P_{pi} = 1, 2, \dots, n$ — параметры режима системы; $Y_{vi} = 1, 2, \dots, k$ — управляющие воздействия; Ψ — возмущения режима.

В установившемся послеаварийном режиме возмущения и управляющие воздействия принимаются равными нулю, и тогда этот режим описывается уравнениями

$$f(P_{pi}(0)) = 0.$$

Начиная с момента $t = 0$ на систему действуют возмущения $\Psi(t)$. Задача отыскания метода управления состоит в том, чтобы найти такое значение Y_{vi} , при котором система из режима, характеризуемого параметрами $P_{pi}(0)$, перешла бы в новый режим (P_{pi}), допустимый по условиям эксплуатации, причем переход этот (переходный процесс) должен быть оптимальным. Понятие оптимальности переходного процесса (и тем более режима, т. е. группы процессов) имеет смысл только по отношению к конкретным условиям.

Методы и способы управления переходными процессами, следовательно, также должны отрабатываться применительно к конкретным условиям исходя из ряда показателей (критериев) оптимальности. При отыскании способов оптимального управления инженеру также приходится решать задачи, аналогичные анализу и синтезу, но в несколько измененной постановке. При этом стремятся получить не столько структуры регулирующих устройств или расчетные зависимости $P_p = f(t)$ (при заданных начальных, граничных условиях и неизменных параметрах системы: $P_c = \text{const}$), сколько такие воздействия, при

которых в переходных процессах изменения параметров режима происходили в области заранее определенных (допустимых) отклонений от значений, найденных для данных конкретных условий как оптимальные.

Таким образом, при управлении переходными процессами на первое место выдвигается не математическая строгость и арифметическая точность расчета и даже не физическая (техническая) точность, оцениваемая возможным совпадением его результатов с действительным (натура) протеканием процесса, а вероятность отклонения параметров управляемого режима от тех, которые признаны оптимальными. Задачи управления переходными процессами должны, следовательно, решаться как вероятностные (стохастические).

Контрольные вопросы

- 5.1. В чем разница между режимом и процессами? Назовите три группы методов исследования процессов в электрических системах.
- 5.2. Определите понятия «строгость» и «точность» в технических задачах.
- 5.3. Что понимается под системой вообще и электрической системой в частности?
- 5.4. Определите наблюдаемость как системное свойство.
- 5.5. Что такое модели — феноменологическая, физическая, математическая — и схемы замещения?
- 5.6. Назовите четыре уровня допущений при составлении моделей (объяснить, пользуясь рис. 5.2).
- 5.7. Определите пространство состояний, уравнения состояния и математические описания режимов и процессов.
- 5.8. Сформулируйте особенности учета нелинейностей параметров системы (материальных) и параметров режима или процесса (текущих). Погрешности линеаризации.
- 5.9. Что такое позиционная идеализация и позиционная система?
- 5.10. Сравните между собой статические и динамические характеристики.

Темы рефератов

1. Методика построения моделей и схем замещения, применяемых при решении технических задач.
2. Особенности решения нелинейных задач.
3. Строгость в математике как науке и ее приложениях в технических задачах.

**МОДЕЛИ, УРАВНЕНИЯ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

§ 6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При рассмотрении переходных процессов, как и любых других, сначала составляется феноменологическая модель, дающая общее описание явлений. С ее помощью далее производится математическое описание, на основе которого после ряда упрощений, отработки методов решения и установления масштабных соотношений создается модель — математическая или физическая (см. гл. 5). Разновидность математической модели — схемы замещения, позволяющие свести сложные явления к простым и облегчить получение представлений об изучаемых процессах. Схема замещения сложной системы составляется из схем замещения отдельных ее элементов: индуктивности, емкости, активного сопротивления. Элементы схемы замещения могут быть как линейными, так и нелинейными. Иногда элемент системы представляется активным либо пассивным двухполюсником или четырехполюсником. В простейших, часто встречающихся случаях схема замещения элемента сводится к полному или реактивному сопротивлению, к которому подключается та или иная э. д. с.

Разумеется, происходящие в схеме замещения процессы или установившийся в ней режим могут соответствовать только какой-либо одной стороне сложного явления в природе, или, как будем называть в дальнейшем, в оригинале. При этом схема замещения может быть справедлива или для любого момента времени (например, цепочечная схема замещения электропередачи при исследовании установившегося или квазиустановившегося режима), или может отражать связь между параметрами системы и параметрами режима только в какой-либо один характерный момент времени исследуемого процесса (например, замещение генератора сопротивлением x_d''). Задачей настоящей главы является составление полных описаний изучаемых явлений, получения на их базе упрощенных расчетных уравнений и схем замещения.

Выше схемы замещения использовались без специальных обоснований. Исходя из полных уравнений такие обоснования могут быть получены. К упрощению изучаемой схемы, так же как и к составлению схем замещения, необходимо подходить весьма осторожно. Неудачный выбор схем замещения может привести к неточным или даже ошибочным результатам.

§ 6.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОПИСАНИЯ И МОДЕЛИ

Для математического описания электромеханических переходных процессов нужно иметь:

- описание движения ротора генератора, работающего в системе;

— описание электромагнитных процессов, происходящих во время этого движения.

Уравнение движения (см. гл. 4) будем считать известным и рассмотрим описание электромагнитных процессов, получив из него выражения для токов, потокоцеплений, вращающих моментов.

Общее математическое описание электромагнитных явлений, происходящих в электрической системе, могло бы быть составлено на основе феноменологической модели Фарадея—Максвелла, с использованием вектора Пойнтинга — Умова, потоком которого энергия передается через воздушные зазоры электрических машин и по электропередачам направляется в пространство вдоль проводов. Однако такое общее и физически точное описание не может быть использовано непосредственно в инженерных задачах. Упрощая это описание и приспособлявая его к конкретным условиям (например, в ряде задач пренебрегая токами смещения, процессами распространения энергии в пространстве и т. д.), можно прийти к практическим — и н ж е н е р н ы м — методам. Электрическая система в упрощенном виде (если идти от общетеоретических концепций), но достаточном для поставленных здесь инженерных задач была показана на рис. 2.1 и 2.2. Она состоит из основных элементов: вращающихся машин (генераторов и двигателей), статических нагрузок (представленных обычно сопротивлениями Z_H), элементов связи (трансформаторов, линий передач).

Если все эти элементы электрической системы, статические нагрузки и стартовые цепи электрических машин — трехфазные, то наиболее естественным с физической точки зрения было бы составление уравнений переходных процессов для этих элементов, а следовательно, и системы для каждой из фаз, т. е. запись

уравнений в так называемой неподвижной трехфазной системе координат*. Это был бы весьма наглядный и физически ясный подход, но он приводит, однако, к громоздким уравнениям, неудобным для практических расчетов. Действительно, токи и напряжения в фазах элементов электрической системы будут синусоидальными функциями времени, а в переходных процессах синусоиды будут искажаться свободными составляющими, определяемыми динамическими свойствами системы. Особенно важным, осложняющим анализ фактором является взаимосвязь между уравнениями фаз элементов системы. Эта взаимосвязь обусловлена взаимоиндукцией фазных проводов ЛЭП, обмоток машин и трансформаторов, междуфазной емкостью про-

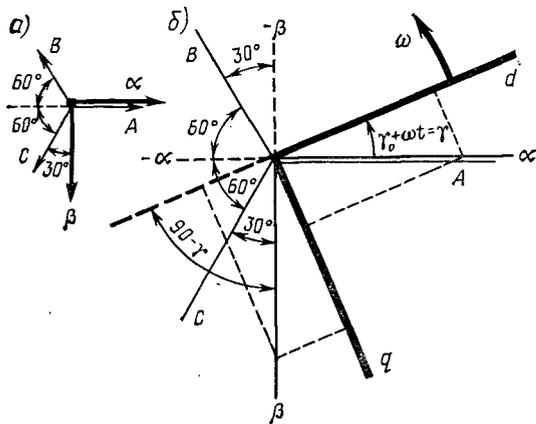


Рис. 6.1. Соотношение между координатами трехфазной неподвижной (A, B, C) системы, двухфазной неподвижной системы α, β и вращающимися со скоростью ротора координатами d, q : a — соотношение между токами i_A, i_B, i_C и токами i_α, i_β ; b — общие соотношения между координатами

* Термин «система координат» здесь не вполне удачен. Лучше было бы «система осей отсчета» или просто «осей». Но употребление первого термина стало более принятым.

водов и т. д. Коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции обмоток фаз статора синхронных машин (индуктивности) являются при этом периодическими функциями времени. Так, уравнения потокоцеплений Ψ для трехфазных обмоток (A, B, C), обмотки возбуждения (f), продольной (D) и поперечной (Q) записываются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} & L_{AD} & L_{AQ} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} & L_{BD} & L_{BQ} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} & L_{CD} & L_{CQ} \\ \hline L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

Здесь индуктивности L_{jk} с разными индексами зависят от времени, являясь функцией γ , т. е. угла поворота ротора (рис. 6.1). Исключение составляют только взаимные индуктивности обмоток ротора:

$$L_{fD} = L_{Df} = \text{const}; \quad L_{fQ} = L_{Qf} = 0; \quad L_{QD} = L_{DQ} = 0.$$

Уравнения электромагнитных переходных процессов в обмотках статора синхронной машины, записанные в матричной форме через фазные переменные, имеют вид

$$- \frac{d}{dt} \psi = u + ri \quad (6.2)$$

$$-p \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix};$$

$$\Psi = Li + M_{af}i_f, \quad (6.3)$$

где Ψ , u , i — вектор-столбцы соответствующих фазных переменных; r — диагональная матрица активных сопротивлений обмоток фаз статора; L — квадратная матрица третьего порядка собственных и взаимных индуктивностей обмоток фаз статора; M_{af} — вектор-столбец взаимных индуктивностей обмоток фаз (симметричных) статора и обмотки возбуждения; i_f — ток в обмотке возбуждения (для упрощения полагаем отсутствие демпферных контуров).

При обычно принимаемых допущениях, в частности в предположении, что фазные обмотки статора одинаковы, получим следующие выражения для входящих в уравнения (6.2) и (6.3) матриц параметров:

$$r = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{AB} & L_B & M_{BC} \\ M_{AC} & M_{BC} & L_C \end{bmatrix}; \quad M_{af} = \begin{bmatrix} M_{Af} \\ M_{Bf} \\ M_{Cf} \end{bmatrix}. \quad (6.4)$$

где

$$L_A = L + L' \cos 2\gamma; \quad L_B = L + L' \cos 2 \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \quad L_C = L + L' \cos 2 \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$M_{AB} = -M + L' \cos 2 \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right); \quad M_{AC} = -M + L' \cos 2 \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$M_{BC} = -M + L' \cos 2\gamma;$$

$$M_{Af} = M_f \cos \gamma; \quad M_{Bf} = M_f \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \quad M_{Cf} = M_f \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right).$$

Как видно, собственные и взаимные индуктивности, входящие в (6.4), являются функциями $\gamma = \omega t$, т. е. представляют собой переменные во времени коэффициенты уравнений.

Все эти осложняющие обстоятельства привели к широкому использованию в расчетах установившихся режимов, особенно электромагнитных и электромеханических переходных процессов различных систем, специально вводимых «обобщенных параметров режима» или «обобщенных координат», которые позволяют избавиться от указанных сложностей математического описания* и, в частности, оперировать с постоянными индуктивностями.

§ 6.3. ОБОБЩЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ

Трехфазную электрическую машину с тремя обмотками на статоре и соответственно тремя токами, потокосцеплениями, напряжениями можно представить машиной с двумя обмотками. При этом результирующие поля, создаваемые двумя токами в этих двух обмотках, должны быть эквивалентны полям трехфазной машины. Это означает что должно быть соблюдено соотношение, вытекающее из рис. 6.1. Так, от системы трех токов (A, B, C), протекающих в трех одноименных обмотках, можно перейти к системе двух токов (α, β). Переход к токам i_α, i_β осуществляется с помощью преобразования, выполненного с учетом того, что $\cos 60^\circ = 1/2$ и $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$ (рис. 6.1, а):

$$i_\alpha = i_A - \frac{1}{2} i_B - \frac{1}{2} i_C; \quad i_\beta = -\frac{\sqrt{3}}{2} i_B + \frac{\sqrt{3}}{2} i_C. \quad (6.5a)$$

Такие же соотношения могут быть записаны для напряжений и для потоко-сцеплений. Применяя систему относительных единиц при базисном значении тока $i_G = 3/2 I$, записанные выше уравнения можно представить в следующем виде:

$$i_\alpha = \frac{2}{3} i_A - \frac{1}{3} i_B - \frac{1}{3} i_C; \quad i_\beta = -\frac{1}{\sqrt{3}} i_B + \frac{1}{\sqrt{3}} i_C. \quad (6.5b)$$

Эти уравнения определяют переход от трехфазной системы A, B, C , называемой системой координат, жестко связанной с неподвижным статором, к двухфазной системе α, β , также неподвижной и также связанной со статором. Система координат α, β применяется в особых случаях, и на ней останавливаться не бу-

* Возможно, однако, что вычислительные трудности, связанные с необходимостью решения уравнений, содержащих периодические функции, будут сняты совершенствованием вычислительных машин и упрощением программирования. Тогда, вероятно, будет разумным возвращение к естественной системе трехфазных координат.

дем. Гораздо большее применение имеет система координат d, q , жестко связанная с ротором и вращающаяся относительно статора с той же угловой скоростью ω , с какой вращается ротор. Переход к этой системе от трехфазной системы удобно осуществить, используя уже введенную двухфазную систему координат. В каждый данный момент времени ось d вращающейся двухфазной системы координат образует с осью α неподвижной двухфазной системы угол $\gamma = \gamma_0 + \omega t$; такой же угол образуется и с осью A (рис. 6.1, б). Следовательно, $I_d = i_\alpha \cos \gamma - i_\beta \cos (90^\circ - \gamma)$. Записывая величины i_α и i_β через токи i_A, i_B, i_C , получим

$$I_d = \frac{2}{3} i_A \cos \gamma - \frac{1}{3} i_B \cos \gamma - \frac{1}{3} i_C \cos \gamma + \frac{1}{\sqrt{3}} i_B \sin \gamma - \frac{1}{\sqrt{3}} i_C \sin \gamma,$$

или после некоторых преобразований

$$I_d = \frac{2}{3} \left[i_A \cos \gamma + i_B \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \right]. \quad (6.6)$$

Совершенно таким же путем получается выражение* для тока I_q . Из рис. 6.1, б имеем

$$I_q = i_\alpha \sin \gamma + i_\beta \cos \gamma,$$

или, выражая i_α и i_β через i_A, i_B, i_C ,

$$I_q = \frac{2}{3} \left[i_A \sin \gamma + i_B \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \right]. \quad (6.7)$$

Если нулевая точка системы заземлена и сумма токов i_A, i_B, i_C не равна нулю, то необходимо учесть дополнительные соотношения, известные из теории симметричных составляющих, указывающие на возникновение тока нулевой последовательности:

$$I_0 = (i_A + i_B + i_C)/3. \quad (6.8)$$

Соотношение (6.8) справедливо как для системы координат, жестко связанной со статором (неподвижной), так и для системы, жестко связанной с ротором (подвижной). Следовательно, окончательно переход от системы координат A, B, C к системе $d, q, 0$ определяется для токов системой уравнений (6.6), (6.7), (6.8).

Матричные преобразования. Уравнения режима и уравнения преобразования удобно записывать в матричной форме, так как в матричной модели определенным образом отражаются физические и математические связи, присущие рассматриваемому явлению. Преимущества матриц заключаются в том, что в системе линейных дифференциальных уравнений все переменные одного и того же типа могут быть представлены одним символом. То же самое относится и ко всем параметрам уравнений. Поэтому система уравнений может быть представлена одним уравнением. Решение может быть выражено в тех же символах, а матричная алгебра позволяет удобными способами найти решение. Если задача усложняется, то трудности уменьшаются рядом приемов, которыми удобно пользоваться в матричной форме. Поэтому линейные преобразования и разбиение на подматрицы являются необходимыми в работе. Умножение матриц может быть проведено с помощью простых правил вручную или на вычислительных машинах. Все это дает идеальный инструмент для проведения линейных преобразований, а также для нахождения любых эффективных преобразований. Для представления данных счетным машинам цифрового или аналогового типа удобна не только матричная форма записи, но и сами матричные преобразования, так как в машинах они могут быть представлены в действительном виде для набора моделей.

* Иногда вместо $(\gamma - 4\pi/3)$ записывают $(\gamma + 2\pi/3)$, что одно и то же (см. рис. 6.1, б).

Записанные выше уравнения (6.5а) и (6.5б) в координатах α, β могут быть в матричной форме представлены следующим образом:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}.$$

Обратное соотношение будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}.$$

Токи, записанные в координатах $d, q, 0$, определяются выражением

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}.$$

Обратное соотношение имеет вид

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix}.$$

В матричной форме система уравнений (6.6), (6.7), (6.8) будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \sin \gamma & \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \Pi \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}.$$

Здесь матрица

$$\Pi = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \sin \gamma & \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}.$$

Обратное соотношение для токов в фазах может быть получено преобразованием записанной выше матрицы, определявшей значения токов. Она будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 1 \\ \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \Pi^{-1} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix},$$

где

$$\Pi^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 1 \\ \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) & \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}.$$

Используя матрицу преобразования Π , можно в сжатом виде записать выражения для токов, напряжений и потокосцеплений:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \Pi \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = \Pi \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} = \Pi \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}.$$

Общее уравнение связи между параметрами в осях A, B, C и осях $d, q, 0$, записанное через обобщенную символическую переменную ξ , будет

$$\xi_{d, q, 0} = \Pi \xi_{A, B, C}.$$

Уравнение (6.2) в такой записи для напряжений примет вид

$$U_{d, q, 0} = \Pi \xi_{A, B, C} = -\Pi \frac{d\Psi_{A, B, C}}{dt} - R\Pi i_{A, B, C}.$$

Представив Ψ_{ABC} и i_{ABC} в осях $d, q, 0$, получим

$$U_{d, q, 0} = -\Pi \Pi^{-1} \frac{d\Psi_{d, q, 0}}{dt} - \Pi \left(\frac{d\Pi^{-1}}{dt} \right) \Psi_{d, q, 0} - R\Pi \Pi^{-1} i_{d, q, 0},$$

где сопротивление фазы статора $r_A = r_B = r_C = R$.

В соответствии с теорией матриц

$$\Pi \Pi^{-1} = 1; \quad \Pi \left(\frac{d\Pi^{-1}}{dt} \right) = \frac{d\gamma}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

При этих соотношениях, учитывая, что $d\gamma/dt = \omega$, получим из предыдущих соотношений уравнение Парка—Горева, записанное в матричной форме:

$$U_{d, q, 0} = -1 \frac{d\Psi_{d, q, 0}}{dt} - \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Psi_{d, q, 0} - 1Ri_{d, q, 0}. \quad (6.9a)$$

При этом

$$\Psi_{d, q, 0} = L_{d, q, 0} i_{d, q, 0} + M_{d, q, 0} i^f,$$

где $\Psi_{d,q,0}$, $U_{d,q,0}$, $I_{d,q,0}$ — вектор-столбцы переменных величин в системе координат $d, q, 0$. Здесь значения индуктивности и взаимной индуктивности будут определяться следующими выражениями:

$$L_{d,q,0} = \begin{bmatrix} \left(L + M + \frac{3}{2} L'\right) & 0 & 0 \\ 0 & \left(L + M - \frac{3}{2} L'\right) & 0 \\ 0 & 0 & (L - 2M) \end{bmatrix}; \quad M_{d,q,0} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} M_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, переход к параметрам процессов в системе координат $d, q, 0$ приводит к уравнениям с постоянными коэффициентами. При этом матрицы выражений индуктивности и взаимной индуктивности значительно упрощаются. Из рассмотрения записанных уравнений следует, что при равенстве параметров фазных обмоток в симметричных процессах параметры нулевой последовательности можно исключить, перейдя к уравнениям в координатах d, q и записав основные уравнения переходных процессов следующим образом:

$$-\frac{d}{dt} \Psi - \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \Psi - R I = U, \quad (6.96)$$

где $\Psi = L I + M i_f$,
или

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}; \quad I = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} M_{ad} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$L_d = L + M + \frac{3}{2} L'; \quad L_q = L + M - \frac{3}{2} L'; \quad M_{ad} = \sqrt{\frac{3}{2}} M_f.$$

Аналогично преобразуются уравнения переходных процессов в статических симметричных элементах электрической сети. Так, например, для схемы замещения ЛЭП в виде активно-индуктивного сопротивления, включенного между узлами 1 и 2 сети, уравнения в фазных переменных имеют вид

$$-\begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{2A} \\ u_{2B} \\ u_{2C} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{1A} \\ u_{1B} \\ u_{1C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix},$$

а в обобщенных переменных d, q

$$-\begin{bmatrix} (L-M) & 0 \\ 0 & (L-M) \end{bmatrix} \left(\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} U_{2d} \\ U_{2q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{1d} \\ U_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}.$$

Матричные записи и преобразования особое значение имеют при построении программ для ЦВМ и составлении схем. Однако при выводе уравнений возможен другой физически очевидный путь их получения. Он заключается в следующем. Напряжение, появляющееся на выводах генератора при наличии потокоцепления ψ и протекании по обмотке статора тока i^* , определяется соотношением

$$-d\psi/dt = u + ir.$$

Например, для фазы A можно записать

$$u_A = -d\psi_A/dt - i_A r$$

* Ниже токи и другие параметры приводятся в относительных единицах.

или

$$u_A + i_A r + d\psi_A / dt = 0.$$

Подставляя в последнее выражение значения токов, напряжений и потоко-сцеплений, выраженных согласно (6.6), (6.7), (6.8) в системе координат $d, q, 0$, получим

$$U_0 + U_d \cos \gamma + U_q \sin \gamma + rI_0 + rI_d \cos \gamma + rI_q \sin \gamma + \frac{d}{dt} (\Psi_0 + \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma) = 0,$$

или после преобразований

$$U_0 + \Psi'_0 + rI_0 + (U_d + \Psi'_d + \gamma' \Psi_q + rI_d) \cos \gamma + (U_q + \Psi'_q - \gamma' \Psi_d + rI_q) \sin \gamma = 0, \quad (6.10a)$$

где через Ψ' , γ' обозначены производные d/dt . Выражение (6.10a) представляет собой уравнение следующего вида:

$$A + B \cos \gamma + C \sin \gamma = 0.$$

Оно может удовлетворяться при условии, что $A = B = C = 0$. Тогда из (6.10a) получаются уравнения, аналогичные (6.9a) и (6.9б):

$$\boxed{\begin{aligned} u_d &= -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega - rI_d; \\ u_q &= -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \omega - rI_q; \\ u_0 &= -\frac{d\Psi_0}{dt} - rI_0, \end{aligned}} \quad (6.10б)$$

где $R = r_A = r_B = r_C$.

Эти уравнения называют *уравнениями Парка—Горева*.

Связь токов статора и ротора с параметрами цепи возбуждения можно получить, воспользовавшись выражениями (6.3), (6.4). Подставив в них значения токов i_A, i_B и i_C и перейдя к системе координат $d, q, 0$, нетрудно получить после преобразований

$$\Psi_f = \frac{3}{2} M I_d + L_f I_f = M^{(3)} I_d + L_f I_f, \quad (6.9 в)$$

где $M^{(3)} = \frac{3}{2} M$ — результирующая взаимная индуктивность между обмотками ротора и трех фаз статора.

Уравнение для обмотки возбуждения может быть выражено и в другой форме:

$$d\Psi_f / dt + I_f R_{fd} = U_{fd},$$

откуда с учетом (6.9в)

$$M^{(3)} p I_d + (R_{fd} + p L_f) I_f = U_{fd},$$

где $p = d/dt$.

Последнее уравнение может быть записано иначе:

$$U_{fd} = (R_{fd} + pL_f)I_f + Mp \left[i_A \cos \gamma + i_B \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \right].$$

Выражение для мощности запишем в виде $P = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C$.

Применяя преобразования Парка, получим

$$P = [i_A \ i_B \ i_C] \times \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \Pi^{-1} \Pi \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}.$$

Окончательно имеем

$$P = 3(I_d U_d + I_q U_q + 2I_0 U_0)/2.$$

Выражая в относительных единицах все параметры режима и принимая за базисную мощность $3/2 P$, получим*

$$P_* = U_{d*} I_{d*} + I_{q*} U_{q*} + 2I_{0*} U_{0*}.$$

Это выражение с учетом (6.106) можно переписать следующим образом:

$$P = U_d I_d + I_q U_q + 2I_0 U_0 = - \left(I_d \frac{d\Psi_d}{dt} + I_q \frac{d\Psi_q}{dt} + 2I_0 \frac{d\Psi_0}{dt} \right) + \\ + (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) \omega - R(I_d^2 + I_q^2 + 2I_0^2),$$

где $R = r_a = r_b = r_c$ — сопротивления фазных обмоток статора.

Вращающий момент, передаваемый с ротора на статор, $M = \pm P/\omega$. В установившемся или квазистационарном режиме

$$M = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d.$$

Сложная система. При составлении уравнений переходных процессов для системы, содержащей большое число синхронных машин и узлов нагрузки, связанных электрической сетью произвольной конфигурации, переход от фазных к обобщенным переменным требует применения нескольких различных систем координат. Действительно, уравнения переходных процессов в каждом из генераторов следует записывать в осях d, q , вращающихся с угловой скоростью ротора этого генератора, так как только в этом случае в уравнениях (6.3), (6.4) и т. п. не будет изменяющихся во времени коэффициентов. Уравнения переходных процессов в статических симметричных элементах электрической сети по форме будут одинаковы для системы координат, вращающейся со скоростью любой из машин или вращающейся с постоянной скоростью ω_0 , соответствующей частоте установившегося режима ЭЭС. Последнее обычно принимается для сложных, многомашинных схем ЭЭС.

Уравнения переходных процессов в трехфазных элементах ЭЭС, записанные в координатах d, q , объединяются в единую систему с использованием законов

* Далее звездочку будем опускать, полагая, что P, U, I выражены в относительных единицах.

Кирхгофа. Большое распространение получила узловая форма записи уравнений, при которой неизвестными являются напряжения узлов и токи ветвей схемы замещения ЭЭС. В этом случае уравнения ветвей дополняются уравнениями первого закона Кирхгофа: алгебраическая сумма токов ветвей для каждого узла схемы равна нулю.

Если в узле связано несколько ветвей сети, уравнения для которых записаны в одной системе координат d, q , вращающейся с угловой скоростью ω_0 , то уравнения первого закона Кирхгофа образуются непосредственным суммированием составляющих токов по осям d и q соответственно:

$$\sum_i I_{di} = 0; \quad \sum_i I_{qi} = 0.$$

Если же к узлу кроме элементов сети подключен синхронный генератор, уравнения для цепи статора которого записаны в системе координат d, q , вращающейся с угловой скоростью ротора ω , то для суммирования токов необходимо перейти к единой системе координат, например принятой для элементов сети. В этом случае токи генератора преобразуются по выражению

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}_{\omega_0} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}_{\omega},$$

где $\theta = (\omega_0 - \omega)t$.

Для получения полной системы уравнений электромеханических переходных процессов в ЭЭС уравнения переходных процессов в трехфазных элементах схемы замещения и уравнения законов Кирхгофа следует дополнить уравнениями электромагнитных переходных процессов в обмотках роторов электрических машин и уравнениями механического движения роторов машин, связывающими угловые скорости роторов с параметрами электрического режима ЭЭС. Порядок составления таких уравнений показан выше.

Таким образом, переход к обобщенным координатам d, q позволил значительно упростить уравнения переходных процессов в трехфазных элементах ЭЭС. Это позволяет составлять эффективные вычислительные алгоритмы для исследования переходных процессов и устойчивости. В то же время применение обобщенных переменных в некоторых случаях затруднено или даже невозможно. Это, например, будет для режимов ЭЭС, характеризующихся несимметрией статорных цепей электрических машин и несинусоидальностью, обусловленной статическими вентильными преобразователями (выпрямительная нагрузка, электропередачи постоянного тока). В тех случаях, когда пренебрежение несимметрией и несинусоидальностью может приводить к большим погрешностям, оперируют мгновенными фазными значениями переменных, решая более сложные уравнения с переменными коэффициентами.

§ 6.4. ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ УРАВНЕНИЙ В КООРДИНАТАХ d, q . МОДЕЛЬ ПАРКА—ГОРЕВА

Получим математическую модель Парка—Горева, исходя из соображений, согласованных с приведенными выше формальными выкладками. Запишем уравнения для системы (рис. 6.2), содержащей i ветвей с включенными в них элект-

рическими (синхронными) машинами и n узлов, в каждом из которых может быть нагрузка H , питаемая напряжением узла U_n^* . Для наглядности проведем запись применительно к выделенной на рис. 6.2 подсистеме.

Взаимное расположение осей фазовых обмоток и координат показано на рис. 6.3, а. Уравнения каждого синхронного генератора (СГ) соответственно

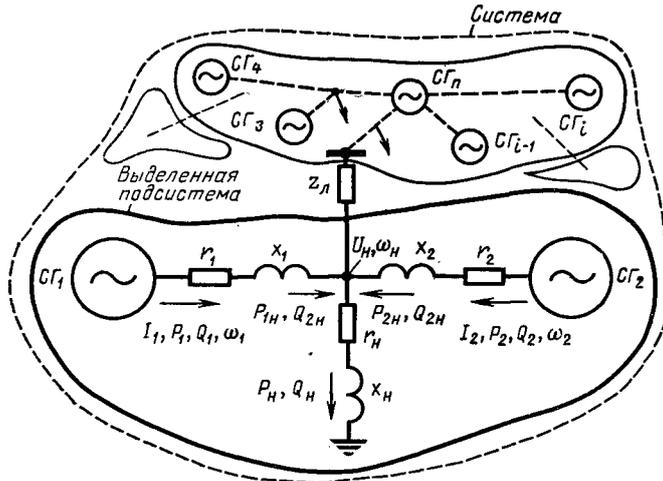


Рис. 6.2. Система и выделенная для исследования подсистема

отнесены к осям (связанным с его ротором), вращающимся с произвольной скоростью. Ветвь, присоединенная к каждому генератору, будет отнесена к осям, жестко прикрепленным к ротору этого генератора*. Ветвь нагрузки должна быть отнесена к системе координат какого-либо (в данном случае первого) синхронного генератора. Здесь учитываются переходные процессы в цепях ротора и статора синхронных машин и в цепях нагрузки. Асинхронные машины при том же подходе требуют некоторых видоизменений в записи уравнений. Переходные электромагнитные процессы в ЛЭП, как правило, не учитываются, так как известно, что при длине ЛЭП до 1000 км они не оказывают сколь-нибудь заметного влияния на электромеханический режим системы. Все обозначения здесь и далее общепринятые, причем p — символ дифференцирования. Система уравнений связывает параметры режима P_r и их производные по времени с параметрами электрической системы P_c , принимаемыми в пределах расчетного интервала времени постоянными.

Уравнения движения роторов:

* Уравнения Парка—Горева известны из дисциплин «Электрические машины», «Электрические системы», «Переходные электромагнитные процессы» и имеются в учебниках по этим дисциплинам [2, 4, 11].

* Токи в ветвях будем обозначать буквами I с соответствующими индексами $d, a, 1, n$ и т. д.

$$(T_{Ji}/\omega_0)(d\omega_i/dt) = M_{Ti} - M_i, \quad i = 1, 2; \quad (6.11)$$

$$M_i = \Psi_{d2i} I_{qi} - \Psi_{q2i} I_{di}; \quad \Psi_{d2i} = \Psi_{d1} + x_i I_{di}; \quad \Psi_{q2i} = \Psi_{q1} + x_i I_{qi}. \quad (6.12)$$

Уравнения статорных цепей (в предположении линеаризации):

$$\left. \begin{aligned} (p/\omega_0) \Psi_{d2i} + (\omega_i/\omega_0) \Psi_{q2i} + r_{\Sigma i} I_{di} &= -U_{di} \\ - (p/\omega_0) \Psi_{q2i} + (\omega_i/\omega_0) \Psi_{d2i} - r_{\Sigma i} I_{qi} &= U_{qi}. \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

При этом согласно рис. 6.3

$$U_{d2} = U_{d1} \cos \delta_{12} + U_{q1} \sin \delta_{12};$$

$$U_{q2} = U_{q1} \cos \delta_{12} - U_{d1} \sin \delta_{12},$$

где $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$.

Уравнения ветви нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} (p/\omega_0) I_{dH} x_H + (\omega_1/\omega_0) I_{qH} x_H + \\ + I_{dH} r_H &= U_{dH}; \\ - (\omega_1/\omega_0) I_{dH} x_H + (p/\omega_0) I_{qH} x_H + \\ + I_{qH} r_H &= U_{qH}, \end{aligned} \right\} \quad (6.14)$$

причем $U_{dH} = U_{d1}$; $U_{qH} = U_{q1}$.

Уравнения балансов токов:

$$\left. \begin{aligned} I_{q1} + I_{q2} \cos(\delta_1 - \delta_2) + \\ + I_{d2} \sin(\delta_1 - \delta_2) - I_{qH} &= 0; \\ I_{d1} + I_{d2} \cos(\delta_1 - \delta_2) - \\ - I_{q2} \sin(\delta_1 - \delta_2) - I_{dH} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

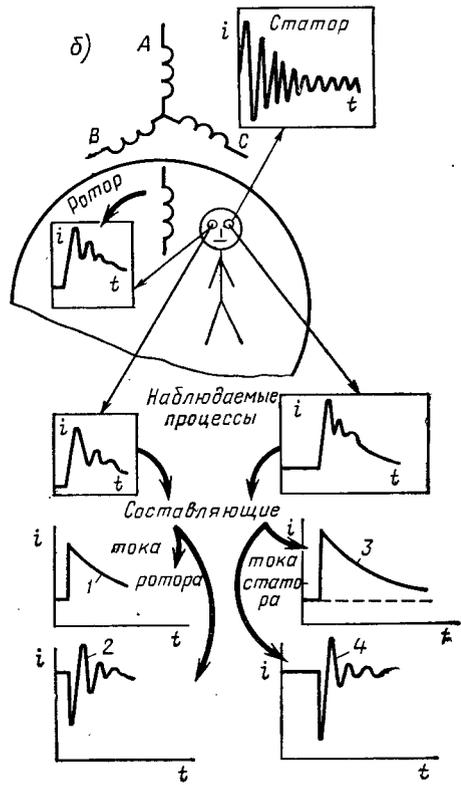
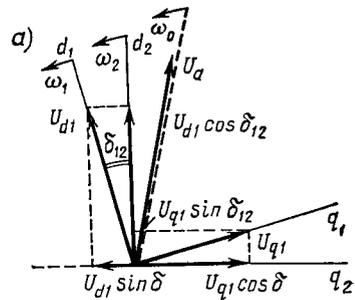


Рис. 6.3. Интерпретация изучаемых процессов: а — взаимное расположение и перемещение фазовых обмоток статора U_a , отдельных составляющих в координатах (d, q) , где ось d_i опережает ось q_i ; б — представление процессов воображаемым «наблюдателем», находящимся на вращающемся роторе; 1 — аperiodическая (постоянная) составляющая тока ротора, видимая «наблюдателем» как постоянная (соответствует i_d и $\omega\Psi$); 2 — периодическая составляющая тока ротора, видимая как периодическая (соответствует $p\Psi$); 3 — огибающая мгновенных синусоидальных значений тока статора, видимая как постоянная (соответствует $\omega\Psi$); 4 — аperiodическая (постоянная) составляющая тока статора, видимая как синусоидально изменяющаяся (соответствует $p\Psi$)

Уравнения переходных процессов в цепях роторов генераторов:

$$(p/\omega_0) \Psi_f + I_{fi} r_{fi} = U_{fi}, \quad (6.16a)$$

или

$$T_{doi} (p/\omega_0) [E_{qi} + I_{di} (x_{di} - x'_{di})] = E_{qei} - E_{qi}, \quad (6.16b)$$

где $E_{qei} = \varphi(U_{fi})$ и, в свою очередь, $U_{fi} = \psi(\Pi'_p)$ (Π'_p — параметры режима, на которые реагирует система автоматического регулирования возбуждения).

Связь между углами и скоростями представим как

$$\omega_i - \omega_H = p\delta_i; \quad \omega_1 - \omega_2 = p(\delta_1 - \delta_2) = s_{12}. \quad (6.17)$$

Полученные полные уравнения, описывающие поведение сложной системы, т. е. изменение всех параметров режима $\Pi_{iP} = f(t)$, могут быть решены путем численного интегрирования.

Алгоритм решения. Алгоритм, в результате реализации которого находятся параметры процесса $\Pi_{iP} = f(t)$, требует преобразования уравнений и разрешения их относительно производных от токов по времени с разделением на группы дифференциальных и алгебраических уравнений (балансы токов в статорных цепях). Решение, проводимое путем численного интегрирования, обычно требующее также и последовательных приближений, уже для системы из двух-трех станций и нагрузок получается весьма громоздким.

При исследовании динамической устойчивости по уравнениям Парка — Горева рекомендуется пользоваться операторной формой записи уравнений, посредством которой все преобразования переменных к осям d, q выполняются с помощью обобщенной матрицы. Расположения осей d, q относительно оси отсчета (фаза a статора или синхронно вращающаяся ось) могут быть различными. Удобнее записывать уравнения для каждого генератора отнесенными к вращающимся осям, связанным с ротором этого же генератора. Нагрузку удобнее относить к ротору наиболее близко расположенного (электрически) генератора [см. (6.14)]. Уравнения линии передачи, связывающей точки k, m сети, будут иметь вид

$$U_{kd} = U_{md} \cos \delta_{km} - U_{mq} \sin \delta_{km} - r_{\pi} I_{\pi d} - x_{\pi p} I_{\pi d} / \omega_0 + x_{\pi} I_{\pi q} \omega_k / \omega_0;$$

$$U_{kq} = U_{md} \sin \delta_{km} + U_{mq} \cos \delta_{km} - r_{\pi} I_{\pi q} - x_{\pi p} I_{\pi q} / \omega_0 - x_{\pi} I_{\pi d} \omega_k / \omega_0,$$

где $\omega_k = d\delta_k/dt + \omega_0$.

В этих уравнениях для статических элементов цепи (ЛЭП и нагрузки) появляются нелинейности типа произведений $U_d \cos \delta$, $U_q \sin \delta$ и члены типа $I_d d\delta/dt$, $I_q d\delta/dt$, обусловленные дополнительной э. д. с. вращения. Это объясняется тем, что с точки зрения наблюдателя, жестко связанного с ротором (рис. 6.3, б), все цепи статора и в том числе ЛЭП, реакторы и т. д., представляются элементарными вращающимися с угловой скоростью $\omega = \omega_0 + d\delta/dt$. Уравнения для напряжения генератора в матричной форме можно записать в виде (здесь знаки перед отдельными переменными отвечают положению осей — системе коор-

динат, принятой на рис. 6.1*)

$$\begin{bmatrix} -U_{1d} \\ U_{1q} \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1d} \\ -I_{1q} \\ I_f \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{1d} \\ -\Psi_{1q} \\ \Psi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{1q} \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_f \end{bmatrix} \frac{d\delta}{dt}.$$

Уравнения асинхронного двигателя аналогичны уравнениям генератора, но также различаются в зависимости от того, как выбраны направление осей и их угловая скорость. В табл. 6.1 сопоставляются три варианта записи уравнений асинхронного двигателя.

Напомним, что потокосцепления, входящие в уравнения генератора, имеют вид

$$\Psi_d = I_f x_{afd} + I_{1d} x_{a1d} + I_d x_d; \quad \Psi_{1d} = I_{1d} x_{1d} + x_{f1d} I_f + x_{a1d} I_d;$$

$$\Psi_q = I_{1q} x_{a1q} + I_q x_q; \quad \Psi_{1q} = I_{1q} x_{1q} + x_{a1q} I_q; \quad \Psi_f = I_f x_f + I_{1d} x_{f1d} + I_d x_{afd};$$

Здесь в отличие от рис. 6.3 приняты другие обозначения: d — для продольной оси, q — для поперечной, f — обмотки возбуждения, l — демпферной обмотки.

Уравнения потокосцепления для двигателя будут иметь вид

$$\Psi_{jd} = x I_{dj} + x_m I_{rd}; \quad \Psi_{jq} = x I_{qj} + x_m I_{rq}.$$

Здесь индекс r указывает на обмотку ротора, $j = 1$ или 2 в зависимости от принятого расположения осей (табл. 6.1). В этой таблице сведены уравнения генератора (A) и двигателя в различной записи. При этом принято $\omega_0 = \omega_{0*} = 1$.

Записанные уравнения предполагают ряд допущений, важнейшими из которых являются:

- 1) линейность всех параметров системы, т. е. отсутствие гистерезиса, насыщения, потерь в стали, вихревых токов;
- 2) синусоидальность всех параметров режима системы (цепей статора), т. е. пренебрежение всеми, кроме основной, гармониками;
- 3) симметрия фаз всех вращающихся машин;
- 4) приведение несимметричных режимов к симметричным (с помощью метода симметричных составляющих);
- 5) предполагается, что переходные процессы (свободные токи) возникают в результате мгновенного изменения состояния системы, например короткое замыкание представляется как мгновенное приложение напряжения, противоположное тому, которое было в данной точке до короткого замыкания.

Сделанные допущения позволяют применить для решения операторный метод, представив уравнения в виде

$$\Psi_d = G(p) U_f + x_d(p) I_d; \quad \Psi_q = x_q(p) I_q.$$

* Это обстоятельство специально подчеркивается, так как в литературе существует 128 вариантов записи уравнений, отвечающей разным комбинациям направлений d, q, ω, γ .

А. Синхронный генератор (СГ)

Б. Асинхронный двигатель (АД)

I. Исходные уравнения

I.1. Уравнения статора в фазных величинах

I.1, А

$$U_A = -d\Psi_A / dt - i_A r$$

$$U_B = -d\Psi_B / dt - i_B r$$

$$U_C = -d\Psi_C / dt - i_C r$$

I.1, Б

$$U_A = d\Psi_A / dt + i_A r_1$$

$$U_B = d\Psi_B / dt + i_B r_1$$

$$U_C = d\Psi_C / dt + i_C r_1$$

1.2. Уравнения контуров ротора

I.2, А — обмотка возбуждения и продольная, поперечная демпферная обмотка

$$U_f = d\Psi_f / dt + i_f r_f$$

$$0 = d\Psi_{1d} / dt + i_{1d} r_{1d}$$

$$0 = d\Psi_{1q} / dt + i_{1q} r_{1q}$$

I.2, Б — эквивалентные обмотки короткозамкнутого ротора в продольной и поперечной оси

$$0 = d\Psi'_{2d} / dt + i'_{2d} r'_2$$

$$0 = d\Psi'_{2q} / dt + i'_{2q} r'_2$$

II. Полные уравнения статора

II.1, А — в осях d, q , жестко связанных с ротором СГ

$$U_d = -d\Psi_d / dt - \omega_r \Psi_q - i_d r$$

$$U_q = \omega_r \Psi_d - d\Psi_q / dt - i_q r$$

II.1, Б — в осях d, q , жестко связанных с ротором АД

$$U_{1d} = d\Psi_{1d} / dt + \omega_d \Psi_{1q} i_{1d} r_1$$

$$U_{1q} = -\omega_d \Psi_{1d} + d\Psi_{1q} / dt + i_{1q} r_1$$

II.2, Б — в осях d, q , жестко связанных с ротором СГ, к выводам которого подключен АД

$$U_{1d} = d\Psi_{1d} / dt + \omega_r \Psi_{1q} + i_{1d} r_1$$

$$U_{1q} = -\omega_r \Psi_{1d} + d\Psi_{1q} / dt + i_{1q} r_1$$

II.3. Уравнения контуров ротора

То же, что I.2, А

II.3, Б — в осях d, q , жестко связанных с ротором СГ

$$0 = d\Psi'_{2d} / dt + (\omega_r - \omega_d) \Psi'_{2q} + i'_{2d} r'_2$$

$$0 = d\Psi'_{2q} / dt - (\omega_r - \omega_d) \Psi'_{2d} + i'_{2q} r'_2$$

III. Уравнения в осях d, q , жестко связанных с ротором СГ в частных случаях

III.1. Уравнения статора

III.1, А

а) $r \neq 0$:

$$U_d = -\Psi_q - i_d r; \quad U_q = \Psi_d - i_q r$$

б) $r = 0$:

$$U_d = -\Psi_q; \quad U_q = \Psi_d$$

III.1, Б

$$U_{1d} = \Psi_{1q} + i_{1d} r_1; \quad U_{1q} = -\Psi_{1d} + i_{1q} r_1$$

А. Синхронный генератор (СГ)

Б. Асинхронный двигатель (АД)

III.2. Уравнения контуров ротора

То же, что I.2, А

III.2, А — без демпферных контуров

$$U_f = d\Psi_f/dt + i_f r_f$$

или

$$T_{d0} dE'_q/dt = E_{qe} - E_q, \text{ где } T_{d0} = x_f/r_f,$$

$$E'_q = \Psi_f x_{afd}/x_f;$$

$$E_{qe} = (U_f/r_f) x_{afd}; \quad E_q = i_f x_{afd}$$

То же, что II.3, Б

III.2, Б — без учета переходных процессов в контурах ротора

$$0 = \Psi'_{2q} + i'_{2d} r'_2 / (\omega_r - \omega_d)$$

$$0 = -\Psi'_{2d} + i'_{2q} r'_2 / (\omega_r - \omega_d)$$

Значения операторной проводимости $G(p)$ и операторных сопротивлений $x_d(p)$, $x_q(p)$ зависят от типа рассматриваемой машины*. В простейшем случае для машины с одной обмоткой (возбуждения) на роторе

$$G(p) = \frac{1}{T_{d0}p + 1} \frac{x_{afd}}{r_f}; \quad x_d(p) = \frac{x'_d T_{d0}p + x_d}{T_{d0}p + 1}; \quad x_q(p) = x_q,$$

где $T_{d0} = x_f/r_f$; $x'_d = x_d - x'^2_{afd}/x_f$.

Искомые параметры режима $\Pi = \varphi(t)$ можно найти, составив операторное уравнение вида** $F(p) = M(p)/A(p)$, являющееся изображением функции $\Pi = \varphi(t)$.

Применяя известную теорему разложения, можно найти корни $A(p) = 0$ и выражение $\Pi = \varphi(t)$, в случае необходимости используя методы*** последовательных приближений.

§ 6.5. УПРОЩЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ

Практически для текущих инженерных исследований применяют упрощенные уравнения (см. ниже) или определяют характер переходного процесса (в том числе динамической устойчивости) сложной электрической системы с помощью прямого метода Ляпунова (без интегрирования полной системы уравнений), что также требует существенных упрощений****.

* Подробное рассмотрение различных типов синхронных и асинхронных машин см.: Венников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1970, с. 472, Страхов С. В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. — М.: Госэнергоиздат, 1960, с. 247; Веретенников Л. П. Теория и методы исследования процессов в судовых электроэнергетических системах. — Л.: Судостроение, 1975, с. 375.

** См. предыдущую сноску.

*** Эти методы применяют, так как часто приходится предварительно задаваться поведением какого-либо параметра режима, затем уточняя его действительное изменение.

**** Попытки применения этого метода успешно делаются, но пока в инженерную практику он еще не вошел.

Упрощенные уравнения получаются из полных уравнений (6.12) — (6.16), каждый член которых определенным образом связан с физикой процессов, происходящих в машине. Так, члены $\Psi_d(\omega/\omega_0)$ и $\Psi_q(\omega/\omega_0)$ характеризуют составляющие э. д. с., обусловленной перемещением в пространстве потокосцеплений Ψ_d и Ψ_q . Поэтому их иногда называют *составляющими э. д. с. вращения*.

Скорость $\omega = \omega_0 + d\delta/dt$ и соответственно э. д. с. вращения имеют две составляющие: основные $\omega_0\Psi_d$, $\omega_0\Psi_q$, обусловленные перемещением потокосцепления в пространстве с синхронной скоростью, и дополнительные $\Psi_d d\delta/dt$, $\Psi_q d\delta/dt$, проявляющиеся в переходном процессе, когда угол δ отклоняется от установившегося значения. Члены типа $p\Psi$ (т. е. $d\Psi_d/dt$ и $d\Psi_q/dt$) *отражают трансформаторную э. д. с.*, обусловленную пульсацией потокосцеплений Ψ_d и Ψ_q во время переходных процессов (рис. 6.4). Мощность на шинах машины

$$P = (\Psi_d i_q - i_d \Psi_q) \omega + dW_{ст}/dt - \Delta P_{ст} = -M\omega + dW_{ст}/dt - \Delta P_{ст}. \quad (6.18)$$

Здесь $\omega = \omega_0 + d\delta/dt$ — угловая скорость ротора; $M\omega = M\omega_0 + Md\delta/dt$ — электромагнитная мощность генератора, передаваемая с ротора на статор; $dW_{ст}/dt$ — дополнительная мощность, появляющаяся за счет изменения электромагнитной энергии, запасенной в индуктивности цепей статора; $\Delta P_{ст} = (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)r$ — потери в активном сопротивлении обмоток статора.

Вращающий момент, приложенный к валу генератора, должен уравновесить момент, связанный с электрической мощностью, отдаваемой в переходном процессе в сеть и расходуемой на покрытие потерь в статоре; появление мощности $dW_{ст}/dt$ может вызвать дополнительный вращающий момент, тормозящий или ускоряющий ротор. Например, при коротком замыкании взаимодействие аperiodической составляющей тока ротора приводит к торможению ротора, а при отключении короткого замыкания — к ускорению.

При этом уравнение относительного движения ротора, вызванное моментом $M_{мех} = M_T$, запишется следующим образом:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_J \frac{d\omega}{dt} = M_{мех} - \frac{P + \Delta P_{ст} - dW_{ст}/dt}{\omega_0 + d\delta/dt}, \quad (6.19)$$

где T_J — постоянная, характеризующая механическую инерцию машины.

Соотношения (6.18), (6.19) справедливы в *любых переходных электромеханических процессах*, в том числе и при асинхронном ходе синхронного генератора. Они справедливы и для рассмотрения режимов асинхронных машин при соответствующем учете изменений параметров, характеризующих машины.

Упрощения полных дифференциальных уравнений заключаются в отказе от учета* дополнительной угловой скорости ротора ($p\delta = d\delta/dt$) при определении э. д. с. и соответственно напряжений, в пренебрежении трансформаторными э. д. с. — пульсациями магнитного потока ($d\Psi_q/dt$, $d\Psi_d/dt$) и обычно потерями в статоре ($\Delta P_{ст}$):

$$d\delta/dt = 0; \quad d\Psi_k/dt = 0; \quad \Delta P_{ст} = 0,$$

где $k = d, q, 0$.

* Следует иметь в виду, что при упрощении нельзя отбрасывать только $p\Psi$, оставляя $p\delta$, поскольку их влияние противоположно. Необходимо или оперировать с полными уравнениями, или упрощать их, опуская как трансформаторные э. д. с. ($p\Psi$), так и дополнительную скорость ($p\delta$).

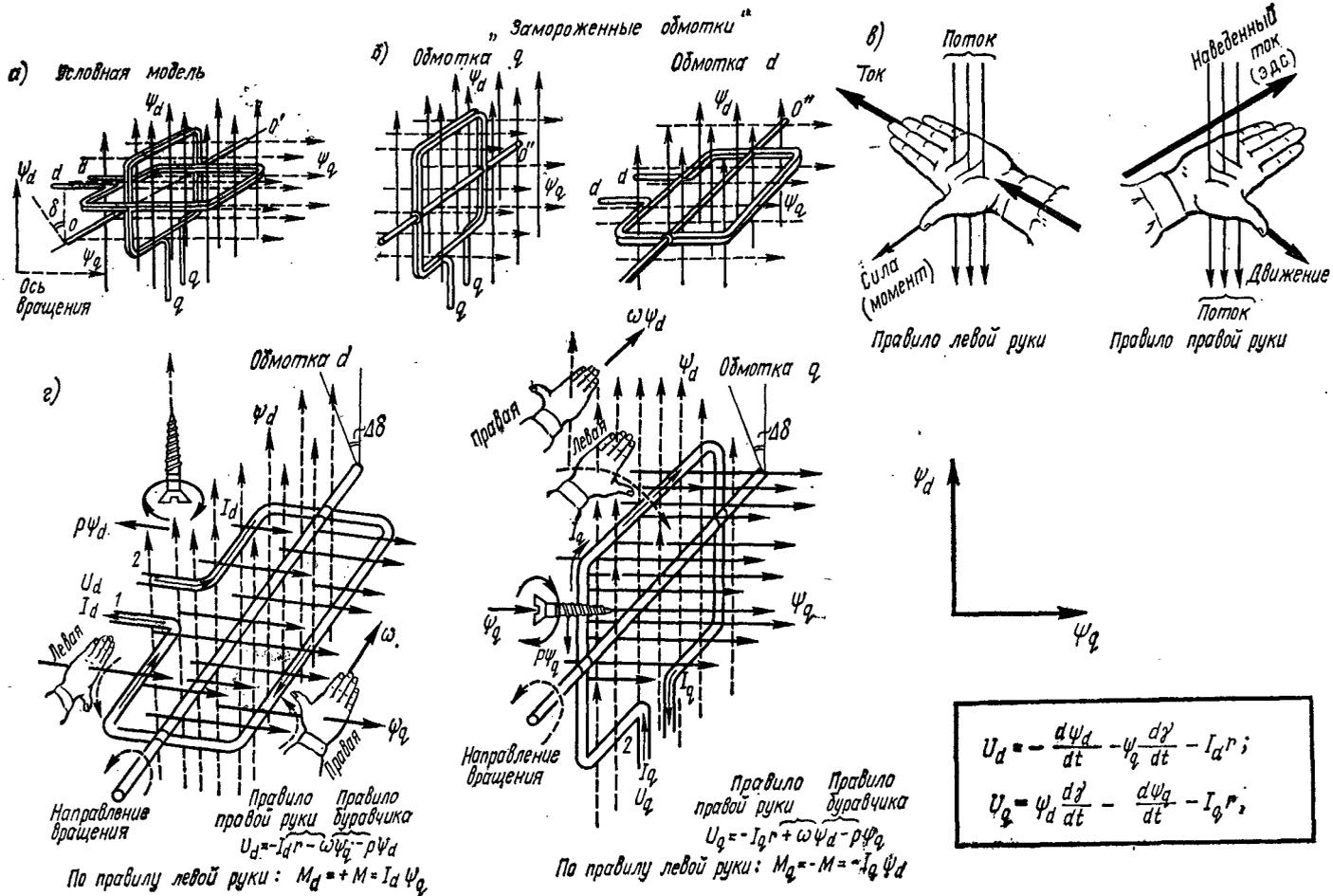


Рис. 6.4. Условная модель синхронной машины:

а — представление машины в виде двух d - q витков (обмоток) и двух составляющих потокоцепления Ψ_d , Ψ_q ; б — раздельное рассмотрение каждой из обмоток при «замороженном» вращении; в — применение правил левой и правой руки; г — э. д. с., вращающие моменты и их составляющие, определяемые в системе d - q составляющих

Применительно к рис. 6.3, б два первых допущения означают пренебрежение составляющими: 2 — в роторе и 4 — в статоре. В этом случае при выражении скорости в относительных единицах $\omega_* = \omega_{*0} = 1$ уравнения (6.13) принимают вид

$$\boxed{U_d = -\Psi_q; \quad U_q = \Psi_d.} \quad (6.20a)$$

Вращающий момент при симметричном режиме

$$\boxed{M = U_q I_q + U_d I_d = P.} \quad (6.20б)$$

При этом уравнение движения ротора

$$\boxed{T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{\text{мех}} - P_{\text{эл}},} \quad (6.20в)$$

где $P_{\text{мех}}$ — механическая мощность на валу турбины; $P_{\text{эл}}$ — электрическая мощность, отдаваемая в сеть, равная внутренней мощности генератора.

Основное дифференциальное уравнение переходного электромагнитного процесса в обмотке ротора запишется как

$$\boxed{dE'_q/dt = (E_{qe} - E_q)/T_{d0}.} \quad (6.20г)$$

Основанную на этих допущениях систему уравнений (6.20) обычно называют *упрощенными** уравнениями. Они применяются при проектных и эксплуатационных расчетах устойчивости. При расчетах переходных процессов упрощенные уравнения позволяют пользоваться соотношениями, вытекающими из векторной диаграммы, которая строится для отдельных значений (t_1, \dots, t_n) времени. Переходный процесс рассматривается как установившийся, «застывший» в моменты времени t_1, \dots, t_n . Расчеты по упрощенным уравнениям, как это показано далее в примерах, дают по сравнению с полными (Парка—Горева) некоторую погрешность. Она может быть значительной и даже недопустимой при расчетах динамической устойчивости таких систем, у которых на участке цепи «генератор — место короткого замыкания» оказывается большое значение r/x (больше $\approx 0,03$), а следовательно, и быстрое затухание аперiodической составляющей. При этом имеется зависящее от схемы системы влияние на погрешность продолжительности короткого замыкания и числа полупериодов пульсирующего момента (четное, нечетное). Однако практически влияние это сильно уменьшается неизбежным возникновением дуги при отключении аварийного участка системы. Сопоставляя расчеты по полным и упрощенным уравнениям, необходимо учесть и то обстоятельство, что решения полных уравнений, более чувствительные к погрешностям исходных данных и накапливанию ошибок, при числовом решении могут давать иногда более далекие от действительности результаты. Выбор метода

* В литературе иногда называют их уравнениями Лонглея, или уравнениями Лебедева, или Лебедева—Жданова. Это неправильно, так как их появление в научном обиходе не связано явно с приоритетными предложениями упомянутых авторов.

расчета, являющийся инженерным искусством, должен учесть все указанные обстоятельства.

Построение векторной диаграммы простейшей системы. На основе упрощенных уравнений легко выполнить это построение, рассмотрев установившийся режим. Связь между параметрами режима определяется в этом случае уравнениями

$$U_d = -\Psi_q - rI_d; \quad U_q = \Psi_d - rI_q. \quad (6.21)$$

Как известно [1, 2, 4],

$$\Psi_d = E_q + I_d x_d; \quad \Psi_q = I_q x_q. \quad (6.22)$$

Подставив (6.22) в (6.21), получим

$$U_d = -I_q x_q - rI_d; \quad U_q = E_q + I_d x_d - rI_q. \quad (6.23)$$

Введем фиктивную э. д. с. $E_Q = E_q + I_d(x_d - x_q)$, тогда систему уравнений (6.23) можно представить в виде

$$U_d = -I_q x_q - rI_d; \quad U_q = E_Q + I_d x_q - rI_q. \quad (6.24)$$

Запишем систему уравнений (6.24) в векторной форме, приняв ось q за действительную, а ось d — за мнимую. Для этого сложим уравнения системы (6.24) предварительно умножив первое уравнение на j :

$$U_q + jU_d = E_Q - (r + jx_q)(I_q + jI_d)$$

или

$$\dot{U} = E_Q - \dot{I}Z. \quad (6.25)$$

Соотношение (6.25) есть выражение обобщенного закона Ома для участка цепи, обладающего полным сопротивлением Z .

Следовательно, синхронную машину в установившемся режиме можно рассматривать как источник напряжения E_Q за сопротивлением Z . Графически это можно представить в виде векторной диаграммы (рис. 6.5). Заметим, что в случае неявнополюсной машины фиктивная э. д. с. E_Q равна э. д. с. холостого хода E_q при $x_d = x_q$.

Следовательно, векторная диаграмма, соответствующая упрощенным уравнениям Парка—Горева, может быть использована при анализе переходных режимов в той мере, в какой справедливы упрощенные уравнения. Из диаграммы следует, что при $E' = \text{const}$ генератор может быть представлен в схеме системы величиной x'_d , при $E_Q = \text{const}$ — величиной x_q , при $E_q = E_Q = \text{const}$ — величиной $x_q = x_d$. Этой величиной генератор может быть введен в схему системы.

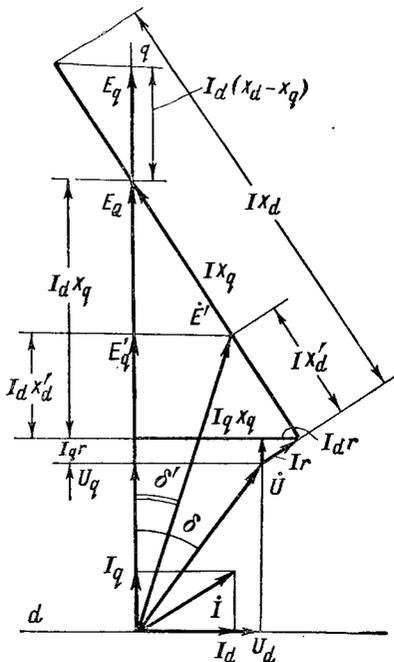
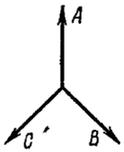
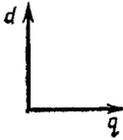
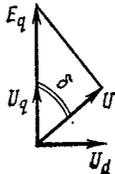
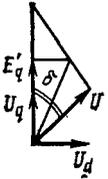
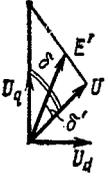


Рис. 6.5. Векторная диаграмма синхронной машины

Система	Соотношения U, Ψ, E	Мощность P	Мощность Q
Трехфазная A, B, C 	$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = -p \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} - r \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$ $u_j = -p\psi_j - ri_j \quad j = A, B, C$	$P_3 = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$	
Двухфазная $d, q, 0$ 	$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = -p \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} +$ $+ \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \end{bmatrix} \omega - r \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix}$ $U_d = -p\Psi_d - rI_d - \omega\Psi_q;$ $U_q = -p\Psi_q - rI_q - \omega\Psi_d$	$P_{d,q} = (\Psi_d I_q - I_d \Psi_q) \omega -$ $- \Delta P_{\text{ср}} + \frac{dW_{\text{ср}}}{dt}$	
Упрощенная 1 $d, q, 0$ 	$U_d = -\Psi_q - rI_d; \quad \Psi_q = I_q x_q;$ $U_q = \Psi_d - rI_q; \quad \Psi_d = E_q + I_d x_d;$ $U_q = E_q + I_d x_d - rI_q;$ $U_d = -I_q x_q - rI_d$	$P_{d,q} = (U_q I_q + U_d I_d) \omega - \Delta P_{\text{ср}}$ $P_{E,q} = \frac{E_q^2}{Z_{d\Sigma}} \sin \alpha + \frac{E_q U}{Z_{d\Sigma}} \sin (\delta - \alpha);$ $P_{E,q} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (\text{при } r = 0)$	$Q_{E,q} = \frac{E_q^2}{x_{d\Sigma}} - \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta;$ $Q_{E,q} = \frac{E_q^2}{Z_{d\Sigma}} \cos \alpha - \frac{E_q U}{Z_{d\Sigma}} \cos (\delta - \alpha);$

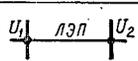
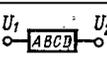
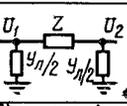
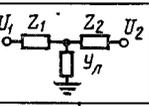
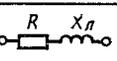
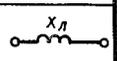
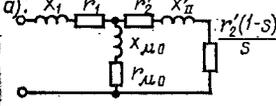
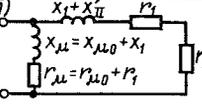
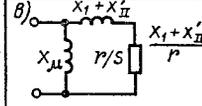
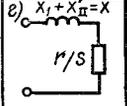
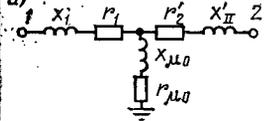
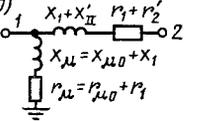
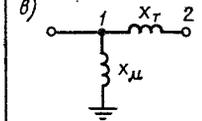
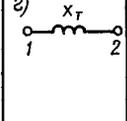
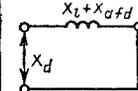
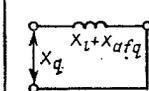
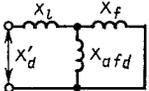
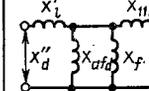
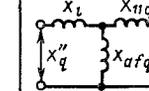
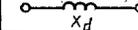
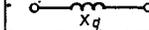
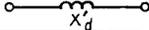
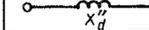
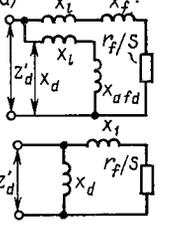
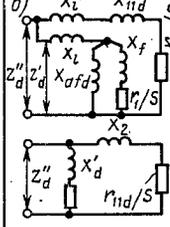
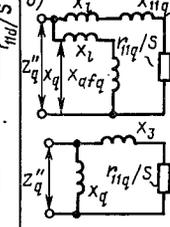
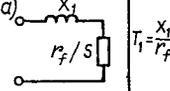
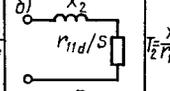
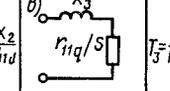
Система	Соотношения U, Ψ, E	Мощность P	Мощность Q
<p>Упрощенная 2 $d, q, 0$</p> 	$U_q = E'_q + I_d x'_d - r I_q$ $U_d = -I_q x_q - r I_d$ $E'_q \equiv \Psi_{\text{рез}}$	$P_{E'q} = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta -$ $- \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma} x'_{d\Sigma}} \sin 2\delta$	$Q_{E'q} = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta -$ $- \frac{U^2}{2} \frac{x_{q\Sigma} + x'_{d\Sigma}}{x_{q\Sigma} x'_{d\Sigma}} -$ $- \frac{U^2}{2} \frac{x_q - x'_d}{x_{q\Sigma} x'_{d\Sigma}} \cos 2\delta$
<p>Простейшая $d, q, 0$</p> 	$E' = \frac{E'_q}{\cos(\delta - \delta')}$ $\delta = \angle E_q U = \angle E'_q U; \quad \delta' = \angle E' U$	<p>То же, что и в п. 4, но при замене E'_q на $E' \cos(\delta - \delta')$, или то же, что и в п.3, но с заменой E_q на E', а x_d на x'_d</p>	

Различные варианты основных на этих соображениях математических моделей показаны в табл. 6.2.

§ 6.6. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ

Разумеется, что полученные на основе векторной диаграммы схемы замещения генераторов совпадают с теми схемами, которые известны из дисциплин «Электрические машины» и «Электромагнитные переходные процессы». Напомним схемы замещения основных элементов электрической системы (табл. 6.3).

Таблица 6.3

	Распределенные параметры	Четырехполюсник	Π-образная	T-образная	Упрощенная	Простейшая
1. Линии электропередачи						
2. Асинхронные двигатели						
3. Трансформаторы						
4. Синхронные машины	<i>Сопротивление</i>					
	синхронное	поперечное синхронное	переходное	сверхпереходное	поперечное сверхпереходное	
4.1 при синхронной работе						
4.2 упрощенно						
4.3 при скачке						
4.4 упрощенно						

Линии электропередачи. При исследовании переходных процессов линии электропередачи могут замещаться Т- или П-образными схемами замещения:

$$Z_{л} = r_{л} + jx_{л}; \quad r_{л} = r_0 l; \quad x_{л} = x_0 l; \quad y_{л} = b_0 l,$$

где l — длина линии, км; r_0 и x_0 — удельные активное и индуктивное сопротивление линии, Ом/км; b_0 — удельная емкостная проводимость линии, См/км [1/(Ом·км)].

При длинах линии более 300 км в указанные соотношения должны вводиться поправочные коэффициенты, принимаемые комплексными при длинах линии более 1000 км.

При упрощенном рассмотрении электромеханических переходных процессов воздушные линии могут заменяться полными $Z_{л}$ или чисто реактивными $x_{л}$ сопротивлениями. Основанием к этому могут быть или небольшая длина линии, или наличие компенсирующих устройств (шунтирующих реакторов), уничтожающих в схеме замещения составляющую емкостной проводимости.

Активное сопротивление в упрощенных расчетах часто может не учитываться, так как в мощных электропередачах, имеющих провода большого сечения, оно во много раз меньше реактивного. При изучении переходных процессов в системах, имеющих малую мощность или содержащих кабельные линии, активное сопротивление следует учитывать.

Асинхронные двигатели. Асинхронные двигатели при исследовании переходных процессов представляются (см. табл. 6.3) известной схемой 2, а, отображающей основные контуры машины с учетом потерь.

Для расчетов, выявляющих количественные соотношения, рекомендуется пользоваться более точными схемами замещения.

В практических расчетах часто применяют упрощенные в той или иной степени схемы замещения двигателя. Степень упрощения зависит от поставленных в каждом конкретном случае задач и точности расчета. Во многих случаях приемлемую точность обеспечивает Г-образная схема замещения 2, б. Для анализа общих соотношений и оценки влияния процессов, происходящих в двигателе, на систему можно воспользоваться грубо приближенной схемой 2, в, дающей завышение вращающего момента двигателя на 10—15%, или даже схемой 2, г.

Трансформаторы. При составлении схемы замещения для исследования переходных электромеханических процессов в системах трансформаторы можно представить Г-образными схемами 3, в, объединяя сопротивления x_1 и x_{11} обмоток, а также относя сопротивление ветви намагничивания $x_{л}$ к стороне высшего или низшего напряжения в зависимости от удобства преобразования схемы системы в дальнейших расчетах. В ряде случаев ветвь намагничивания опускается (схема 3, з).

Синхронные машины (генераторы). Комплексная схема замещения машины показана на рис. 6.6. Соответствующие частные схемы для определения реактивных сопротивлений, представляющих генератор в некоторых характерных режимах, приведены в графах 4.1—4.4 табл. 6.3. Эти схемы предполагают, что синхронно работающий генератор находится или в начальной стадии переходного процесса (x'_d, x''_d, x''_q), или в установившемся режиме (x_d, x_q). При асинхронном режиме (работа при скольжении $s \neq 0$) приближенные Г-образные частные схемы для определения сопротивлений Z'_d, Z''_d, Z''_q получаются на основе схем, изображенных на рис. 6.6. Они принимают вид схем, показанных в

графе 4.3 табл. 6.3. Эти схемы аналогичны упрощенной Г-образной схеме замещения 2, в асинхронного двигателя.

Дальнейшее упрощение заключается в отбрасывании ветви намагничивания аналогично тому, как это было сделано для асинхронного двигателя. После этого схемы приобретают вид схем 4.4, а, б, в табл. 6.3. Входящие в них сопротивления x_1 , x_2 , x_3 легко представить через основные каталожные параметры

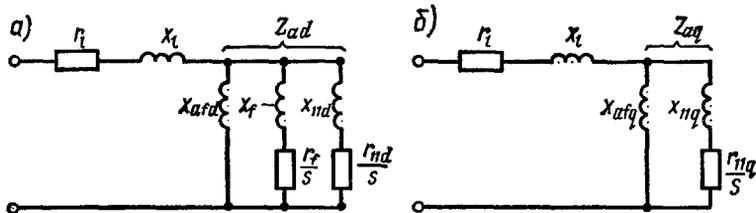


Рис. 6.6. Комплексная схема замещения явнополюсной синхронной машины с учетом демпферной обмотки:

а — по продольной оси; б — по поперечной оси; x_{afd} , x_{afq} — сопротивления взаимной индукции между контурами статора и ротора по осям d и q ; x_f , x_{11d} , x_{11q} — сопротивления обмотки возбуждения и успокоительной обмотки с учетом поверхностного эффекта; x_l — сопротивление обмотки статора; r_f , r_{11d} , r_{11q} — активные сопротивления обмотки возбуждения и успокоительной обмотки с учетом поверхностного эффекта

синхронного генератора. Так, рассматривая схему 4.3, а в предположении, что $r_f = 0$, а также учитывая, что $x_l + x_{afd} = x_d$ и $x_l + x_f = x_1$, получим

$$x'_d = x_d x_1 / (x_d + x_1),$$

откуда

$$x_1 = x_d x'_d / (x_d - x'_d).$$

Аналогично из схем рис. 4.3, б, в будем иметь соответственно

$$x_2 = x'_d x'_d / (x'_d - x''_d); \quad x_3 = x_q x''_q / (x_q - x''_q).$$

Заметим, что схемы замещения 4.4, а, б в основном только качественно отражают происходящие явления. В самом деле, схема 4.4, а предполагает, что на роторе машины действует только одна короткозамкнутая обмотка возбуждения. Схема 4.4, б соответствует такому же предположению относительно продольной демпферной обмотки, а схема 4.4, в — относительно поперечной. Однако, несмотря на грубость этих предположений, получаемые на их основе приближенные Г-образные схемы замещения часто могут быть полезны не только для оценки характера процесса, но и для выявления важных количественных соотношений.

§ 6.7. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В ряде случаев при изучении переходных процессов и устойчивости целесообразно представлять изучаемую электрическую систему в виде функциональной структурной схемы, на которой показаны основные физические элементы и связи между ними (рис. 6.7). Такая регулируемая система

включает как механические элементы — первичный двигатель, автоматический регулятор скорости и т. д., так и электрические элементы — генератор, его автоматический регулятор возбуждения и систему возбуждения, передающую систему, нагрузку и т. д.

Здесь основное внимание обращено на связи между элементами. Это прежде всего п р я м ы е связи между основными элементами, передающими рабочий

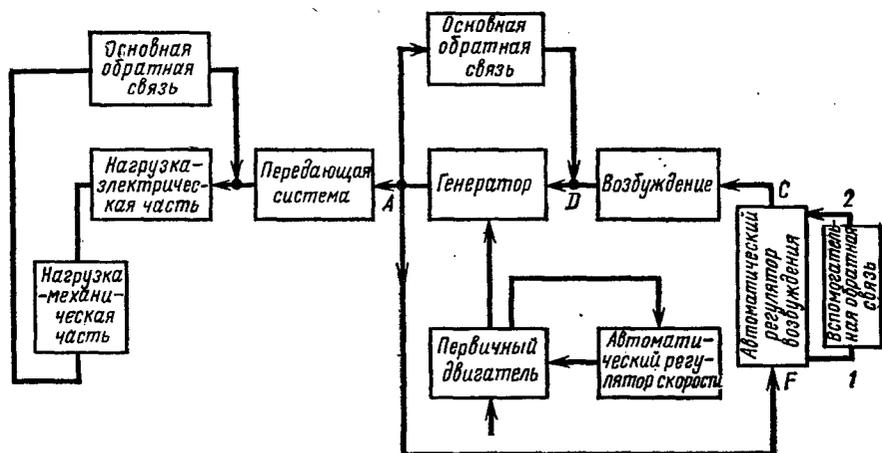


Рис. 6.7. Функциональная схема электрической системы

поток энергии системы, и о б р а т н ы е связи, дающие на входе элемента некоторую дополнительную энергию. Обратные связи подают сигнал с выхода охватываемых ими элементов на их вход. Различают гибкую и жесткую, отрицательную и положительную обратную связь. Обратная связь положительна, если ее действие увеличивает параметр режима на выходе охватываемых ею элементов. Обратная связь отрицательна, если ее действие уменьшает параметр режима на выходе охватываемых ею элементов. Жесткая обратная связь действует как в установившихся, так и в переходных режимах, гибкая — только в переходных режимах.

Заметим, что показанные на рис. 6.7 обратные связи имеют три разновидности.

Основная силовая обратная связь (цепь AD) проявляется в непосредственном влиянии нагрузки на элементы, генерирующие и потребляющие электроэнергию (реакция якоря в генераторах), во влиянии изменений скорости на вращающийся момент первичных двигателей (турбин и т. д.) и двигателей, потребляющих электрическую энергию.

Обратная связь (цепь AFC) осуществляется регулируемыми устройствами.

Вспомогательная обратная связь (цепь $1-2$) действует только внутри регулирующих устройств и служит для стабилизации их работы.

В каждом функциональном элементе фиксируются вход и выход, представляющие определенную физическую величину. Выходной параметр каждого предыдущего элемента в прямой связи является входным параметром последующего.

Обратная связь подает сигнал на вход охватываемого ею элемента. Эти обстоятельства отмечаются на структурной схеме соответствующими стрелками.

Если на вход функционального элемента подать сигнал, являющийся некоторой функцией времени $x_1(t)$, то на выходе будет получаться другая функция времени $x_2(t)$, зависящая от свойств этого элемента.

Если, используя операторный метод, перейти от оригинала к изображению, то для линейной системы при нулевых начальных условиях отношение изображения выходной величины к изображению входной величины называется *передаточной функцией звена*:

$$W(p) = X_2(p)/X_1(p).$$

Если за $X_1(p)$ принять, например, изображение напряжения $U(p)$, подаваемого в цепь, которая содержит активное сопротивление R и индуктивность L , а за $X_2(p)$ — изображение тока $I(p)$ в цепи, то можно записать уравнение переходного процесса в операторной форме

$$U(p) = RI(p) + LpI(p) = RI(p)(1 + pT),$$

откуда получим передаточную функцию элемента, отображающего цепь LR :

$$W(p) = I(p)/U(p) = k/(1 + pT).$$

Здесь $k = 1/R$ — коэффициент усиления инерционного звена, $T = L/R$ — его постоянная времени.

Коэффициент k иногда называют *статическим коэффициентом усиления*, подчеркивая этим, что он определяет соотношение между выходной и входной физическими величинами в установившемся режиме ($p = 0$). Он может быть как размерным, так и безразмерным в зависимости от физических величин на входе и на выходе звена.

Существуют правила получения передаточной функции системы, представленной структурной схемой, состоящей из различным образом соединенных элементов. Зная структурную схему и передаточную функцию каждого элемента, можно получить передаточную функцию всей системы. Все эти представления будут использоваться при получении передаточных функций систем регулирования.

§ 6.8. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ И УРАВНЕНИЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Агрегаты электрических систем, т. е. генераторы и вращающие их турбины, должны работать, обеспечивая определенное качество выдаваемой энергии. Это достигается с помощью регуляторов.

Регуляторы возбуждения (АРВ) воздействуют на ток возбуждения генераторов, обеспечивают качество напряжения, улучшают устойчивость и делают более благоприятным характер переходных процессов (уменьшают колебательность, ускоряют затухание и т. д.). Регуляторы реагируют на напряжение и частоту, ток и мощность, замеряемые обычно на данном генераторе или станции.

Регуляторы частоты вращения (АРЧВ) воздействуют на впуск в турбины энергоносителя (воды, пара, газа) и поддерживают частоту вра-

щения генераторов. Регуляторы стабилизируют частоту вращения, реагируя на ее отклонение*.

Регуляторы частоты (АРЧ) реагируют на общее изменение частоты в системе, поэтому их называют регуляторами общесистемного параметра в отличие от первых двух, реагирующих на локальные параметры. Регуляторы частоты действуют на первичный двигатель с помощью промежуточного воздействия на регулятор скорости (изменение его уставки). Любой регулятор, представленный в виде структурной схемы, состоит из четырех основных элементов, показанных на рис. 6.8, а.

Регуляторы возбуждения и частоты, применяемые в настоящее время, являются в основном регуляторами без зоны нечувствительности**, осуществляющими непрерывное регулирование.

При этом воздействие регулятора на исполнительный элемент $P_{вых}$ пропорционально отклонению подлежащего регулированию параметра $P_{вх}$, как это показано на рис. 6.8, б.

Разновидностью пропорционального АРВ являются два вида компаундирования синхронных генераторов:

— токовое компаундирование, осуществляющее с помощью специальных устройств непрерывную функциональную зависимость тока возбуждения генератора от тока нагрузки;

— фазовое компаундирование, осуществляющее непрерывную функциональную зависимость тока возбуждения от тока нагрузки и его фазового сдвига относительно напряжения генератора.

Регуляторы, применяемые для регулирования тока возбуждения (АРВ), разделяются на регуляторы с зоной нечувствительности, осуществляющие прерывистое регулирование, и регуляторы без зоны нечувствительности, осуществляющие непрерывное — пропорциональное — регулирование.

На крупных генераторах, работающих в энергосистемах, в настоящее время применяются регуляторы непрерывного регулирования. Они подразделяются на регуляторы: а) пропорционального действия (АРВ п. д. — пропорциональные), изменяющие ток возбуждения пропорционально отклонению какого-либо параметра режима (например, отклонению напряжения ΔU), б) сильного действия (АРВ с. д.). Эти регуляторы реагируют не только на отклонение параметров режима, но также на скорость и ускорение их изменений, причем в систе-

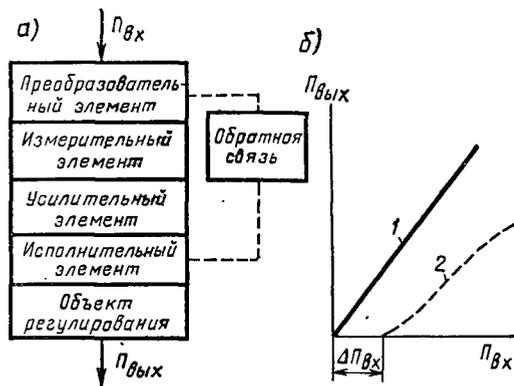


Рис. 6.8. Функциональная схема регулятора и его действие:

а — структура регулятора; б — изменение выходного параметра $P_{вых} = f(P_{вх})$ при пропорциональном регулировании без зоны нечувствительности (1) и с зоной нечувствительности $\Delta P_{вх}$ (2)

* Раньше они назывались регуляторами скорости — АРС.

** Напомним, что зоной нечувствительности называется тот интервал изменения параметра ($\Delta P_{вх}$), подлежащего регулированию, в котором регулятор не начинает действовать и не изменяет выходного параметра $P_{вых}$.

ме возбуждения, в которую как составляющая входит АРВ с. д., элементы должны обладать малой инерционностью, что позволяет получить быстро изменяющийся ток возбуждения.

Система возбуждения* синхронного генератора, как правило, состоит из возбудителя, подвозбудителя и регулирующих устройств (рис. 6.9). Различные

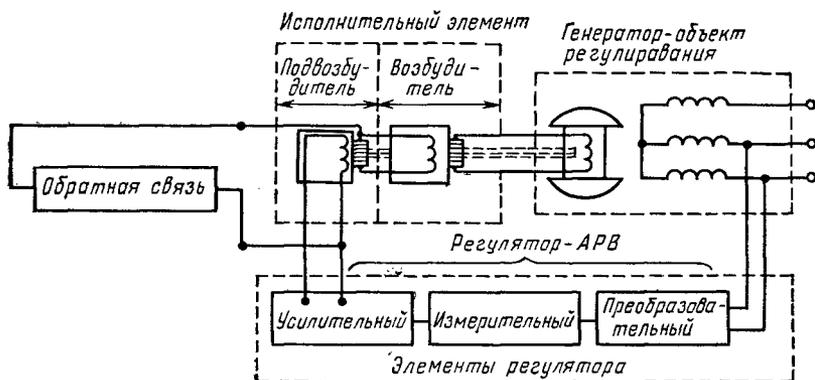


Рис. 6.9. Система возбуждения синхронного генератора

пропорциональные схемы систем возбуждения в основном разделяются по конструктивному исполнению (электромашинные и выпрямительные) и по виду возбудителя (с самовозбуждением или независимым возбуждением). Применяются бесщеточные системы возбуждения, в которых подвозбудителем служит машина переменного тока, питающая обмотку возбуждения через выпрямители (кремниевые вентили), расположенные на роторе генератора (рис. 6.10).

Упрощенная структурная схема системы регулирования возбуждения показана на рис. 6.11, а системы регулирования скорости — на рис. 6.12. При этом предполагается, что регулирование скорости можно приближенно свести к форме, одинаковой для всех типов турбин.

В поставленной задаче обращено внимание на зависимость вращающего мо-

* Под системами возбуждения и системами регулирования возбуждения понимают машины и аппараты для создания тока возбуждения и управления им с помощью регулирующих устройств. Иногда говорят о регулируемых системах возбуждения или просто о системах возбуждения, рассматривая устройства для создания тока возбуждения и управления им как единое целое.

Влияние систем возбуждения на характер переходных процессов в электрических системах может быть существенно. Поэтому важно рассмотреть свойства систем возбуждения и требования к ним в связи с анализом переходных процессов, не касаясь, однако, деталей выполнения, что является предметом дисциплины «Автоматика энергетических систем».

Мощность и стоимость систем возбуждения, включая автоматические регуляторы возбуждения, невелика: мощность составляет не более 0,2—0,8%, а стоимость — 5—12% от общей мощности и соответственно стоимости агрегата. Поэтому в ответственных случаях системы возбуждения крупных агрегатов конструируются индивидуально и могут сравнительно легко видоизменяться в связи с требованиями, вытекающими из анализа переходных процессов, условий эксплуатации и т. д.

мента от угловой скорости турбины и зависимость этого момента от количества поступающей в турбину воды или пара. В дальнейшем, не различая паровую и гидравлическую турбины, будем называть их просто *турбиной*, а воду или пар — *энергоносителем*. При сделанных допущениях обе системы имеют аналогию (рис. 6.13), позволяющую осуществлять одинаковую запись уравнений для АРВ и АРЧВ. При этом, однако, необходимо помнить, что в действии механических (рис. 6.13) и электрических элементов схемы (рис. 6.13, а) есть принципиальная

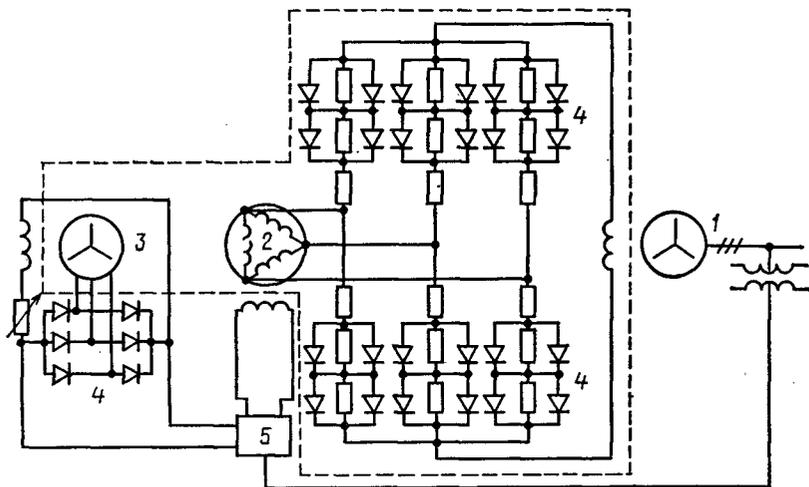


Рис. 6.10. Бесщеточная система возбуждения:

1 — турбогенератор; 2 — возбудитель; 3 — подвозбудитель; 4 — выпрямительные мосты; 5 — автоматический регулятор напряжения
Штриховой линией обведена часть схемы, элементы которой вращаются вместе с ротором

разница: все механические элементы обладают зоной нечувствительности, т. е. не реагируют на некоторые малые изменения воздействующего на них параметра режима. Электрические же элементы не имеют зоны нечувствительности.

В некоторых случаях (при определении устойчивости, анализе малых колебаний и т. д.) эта разница может быть существенна. Однако пока пренебрежем ею, делая далее в соответствующих случаях надлежащие оговорки. Тогда между одноименными элементами схем а и б и схемами в целом будет полная аналогия не только в смысле их функций, но и в смысле соотношений между параметрами режима на входе и выходе. Учитывая эту аналогию, представим обе изображенные на рис. 6.13, а, б схемы в виде одной упрощенной электрической схемы (рис. 6.13, в), в которой для простоты рассмотрения объединим преобразовательный, измерительный и усилительный элементы в один элемент с постоянной времени $T_1 = T_{пр} + T_{изм} + T_у$. Тогда при подаче импульса Δu_0 на зажимы α_1 — α_2 элемента 1 будем иметь

$$i = \Delta u_0 / [(1 + T_1 p) R_1].$$

Записывая далее последовательно выражения для напряжений и связанных

с ними токов в каждом элементе схемы замещения (рис. 6.13, в), найдем* напряжение:

$$\Delta u_3 = \frac{k_3 \Delta u_0}{R_2 (1 + T_1 \rho) (\beta + T_0 \rho)},$$

или:

$$\Delta u_3 = \frac{k'_3 \Delta u_0}{R_2 (1 + T_1 \rho) (1 + T'_3 \rho)},$$
(6.26)

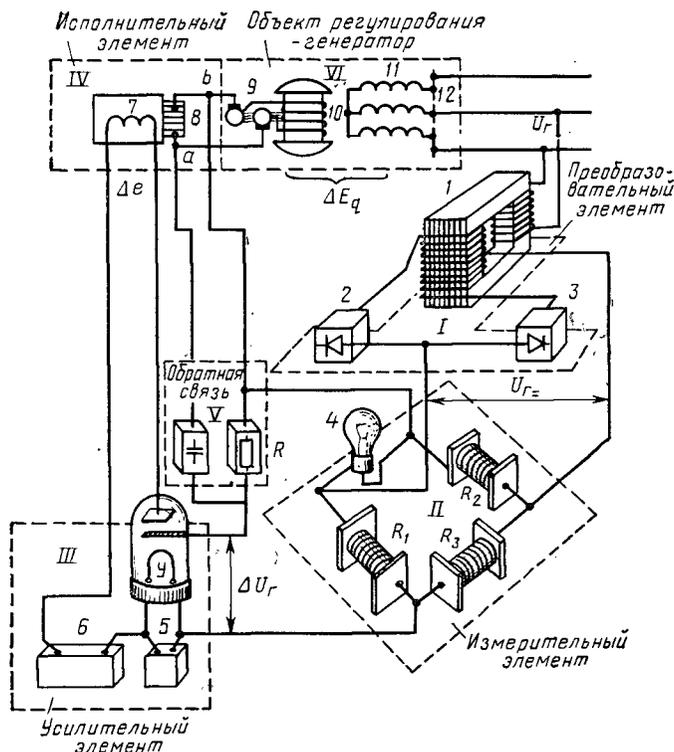


Рис. 6.11. Упрощенная наглядная схема АРВ пропорционального действия

Преобразовательный элемент: 1 — трансформатор напряжения; 2, 3 — выпрямляющие вентили. **Измерительный элемент:** R_1, R_2, R_3 — три одинаковых постоянных линейных сопротивлений; 4 — нелинейное сопротивление (лампа накаливания). **Усилительный элемент:** 5 — батарея накала; 6 — анодная батарея; U — усилительный триод. **Исполнительный элемент:** 7 — обмотка возбуждения возбудителя; 8 — коллектор возбудителя; a, b — точки подключения обратной связи. **Элемент обратной связи:** объект регулирования — генератор: 9 — кольца (выводы) обмотки возбуждения генератора; 10 — обмотка возбуждения; 11 — обмотка статора; 12 — шины генератора

* Подробные преобразования имеются в гл. 8, а также в кн.: Веников В. А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1970, с. 95—97.

где $k'_3 = k_3/\beta$, $T'_3 = T_3/\beta$ (β — коэффициент обратной связи*, T_3 — эквивалентная постоянная времени, k_3 — коэффициент усиления звена 3; причем

$$\beta = 1 \pm \frac{k_3}{R_2} k_{\text{ж.о.с.}}, \quad T_3 = T_2 \pm \frac{k_3}{R_2} T_{\text{г.о.с.}},$$

($k_{\text{ж.о.с.}}$ — коэффициент жесткой обратной связи; $T_{\text{г.о.с.}}$ — постоянная времени гибкой обратной связи).

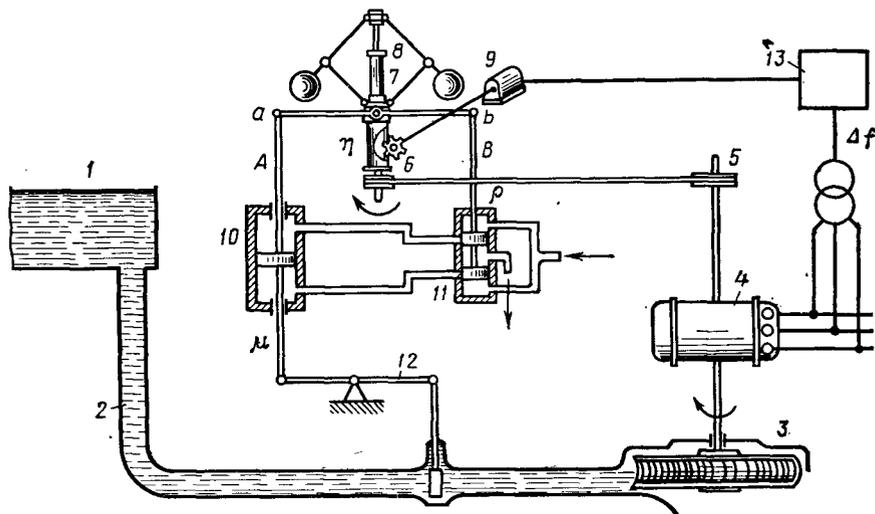


Рис. 6.12. Принципиальная схема регулирующего устройства гидро- и турбогенераторов:

1 — напорный резервуар (или паровой котел); 2 — трубопровод (или паропровод); 3 — турбина; 4 — генератор; 5 — передача скорости от вала турбины к маятнику регулятора; 6 — вал маятника; 7 — муфта регулятора; 8 — пружина муфты; 9 — двигатель для смещения муфты (задающее воздействие); 10 — серводвигатель; 11 — золотник; 12 — задвижка; 13 — автоматический регулятор частоты и обменной мощности; А — поршень серводвигателя; В — поршень золотника, μ — смещение поршня серводвигателя, ρ — смещение поршня золотника, η — смещение муфты регулятора

Таким образом, введение обратной связи (или «охват» звена 2 рассматриваемой системы возбуждения обратной связью) привело к изменению выражения для тока этого звена (рис. 6.13, а).

Охват инерционного (в данном случае содержащего L и R) звена жесткой обратной связью приводит к появлению коэффициента β или, что то же самое, замене T_3 на T'_3 и k_3 на k'_3 ; охват гибкой обратной связью — к изменению постоянной времени соответствующего звена на величину $\pm(k_3/R_2)T_{\text{гос}}$.

* Процессом обратной связи (о. с.), или обратной связью, называется воздействие выходной величины какой-либо системы на вход этой же системы, или в более широком смысле — воздействие результатов функционирования на характер функционирования. Отрицательная о. с. уменьшает отклонение системы от первоначального значения, положительная — увеличивает. Жесткая о. с. (ж. о. с.) осуществляется с помощью усилительного звена, гибкая (г. о. с.) — с помощью дифференцирующего (действует, следовательно, только при переходных процессах). В механических регуляторах скорости г. о. с. называют *изодромом*. Интенсивность действия о. с. характеризуется коэффициентами $k_{\text{ж.о.с.}}$, $k_{\text{г.о.с.}}$

Обмотка 3 обладает сопротивлением R_3 и индуктивностью L_3 , и, очевидно, что аналогично тому, как это было сделано выше, можно записать

$$i_3 = \Delta u_3 / [R_3(1 + T_3 p)], \quad \Delta u_4 = k_4 i_3 = k_4 \Delta u_3 / [R_3(1 + T_3 p)].$$

Заменяя Δu_3 согласно (6.26), имеем

$$\Delta u_4 = k_4 k_3' \Delta u_0 / [R_2 R_3 (1 + T_1 p) (1 + T_3 p) (1 + T_3' p)].$$

Вводя эквивалентный коэффициент усиления

$$k = k_4 k_3' / (R_2 R_3), \quad (6.27)$$

для Δu_4 получим

$$\Delta u_4 = k \Delta u_0 / [(1 + T_1 p) (1 + T_3 p) (1 + T_3' p)].$$

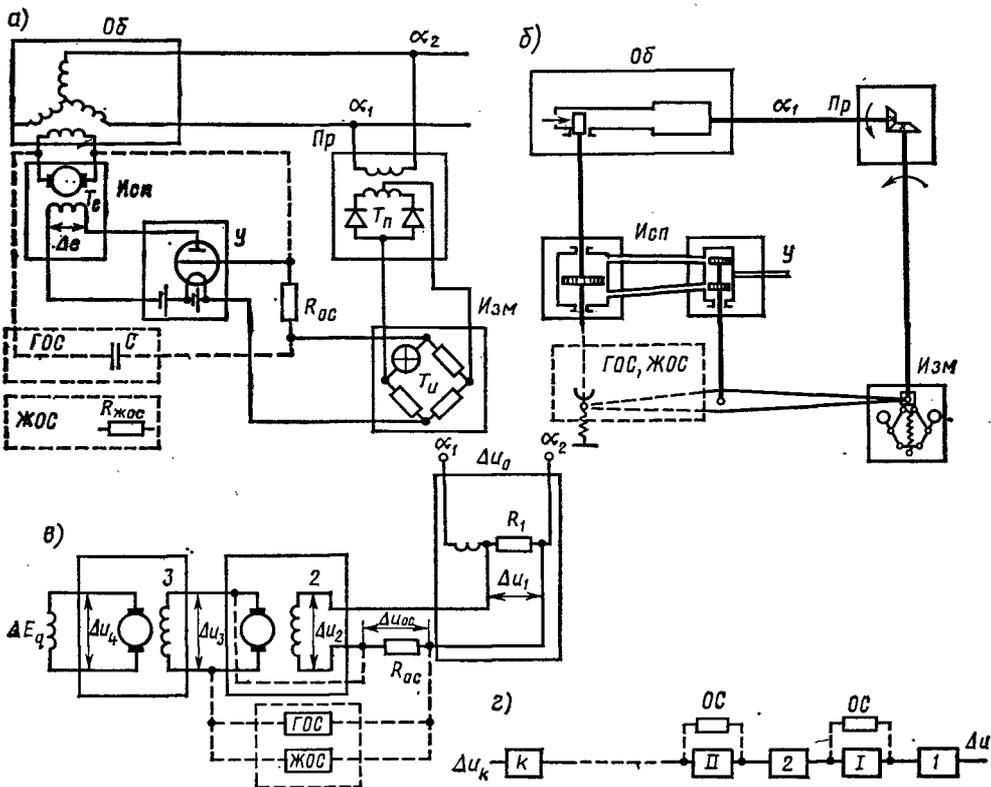


Рис. 6.13. Системы регулирования возбуждения и скорости и аналогия между ними: а — система регулирования возбуждения, приведенная на рис. 6.11; б — система регулирования скорости, приведенная на рис. 6.12; в — схема регулирования, условно отражающая все соотношения, имеющиеся в схемах а и б; з — структурная схема системы регулирования, состоящая из инерционных элементов (1, 2, ..., k); I, II, ... — элементы, охваченные обратной связью. Обозначения: Пр — преобразовательный элемент; Изм — измерительный элемент; У — усилительный элемент; Исп — исполнительный элемент; Об — объект регулирования (в схеме а — генератор, в схеме б — турбина); ГЭС, ЖЭС — гибкая и жесткая обратные связи

Разумеется, что аналогично (рис. 6.13, в, г) можно было учесть любое число чисто инерционных n или охваченных обратной связью N звеньев. На любом k -м звене схемы в этом случае будем иметь

$$\Delta u_k = \frac{k \Delta u_0}{(1+T_{1p})(1+T_{2p}) \dots (1+T_{np})(1+T'_{s1p})(1+T'_{s1p}) \dots (1+T'_{sNp})} \quad (6.28)$$

Предполагается, что в выражении (6.28) звенья 1, 2, ..., n не имеют обратной связи, а I, II, ..., N охвачены жесткой и гибкой обратными связями одновременно (рис. 6.13, г).

Рассмотрим вновь схему генератора с регулятором возбуждения (рис. 6.13, а). Найдём на основе полученного общего выражения (6.28) изменение э. д. с. E_{qe} в статоре генератора под действием регулятора возбуждения. Пусть регулятор получил на входе импульс Δu_0 . Предположим, что в регуляторе имеется только гибкая обратная связь, а постоянная времени настолько мала по сравнению с T_e , что можно принять $T_y \approx 0$, и, учитывая, что $T_{\pi} + T_n \ll T_{es}$, где T_{es} — эквивалентная постоянная времени обмотки возбуждения, определенная с учетом действия обратной связи, получим* для определения значения ΔE_q

$$\Delta E_q = K_{0U} \Delta u_0 / [(1 + T_{es}p)(1 + T_{d0}p)]. \quad (6.29)$$

Коэффициент K_{0U} характеризует изменения э. д. с. генератора в зависимости от изменения напряжения на его шинах, т. е. параметр, по которому производится регулирование. При холостом ходе генератора

$$K_{0U} \approx E_{q0} / u_0.$$

Для регулятора частоты вращения (АРЧВ) запишем по аналогии соотношение между изменением скорости $\Delta \omega_*$ (аналог Δu_0) и открытием впуска энергоносителя $\Delta \mu_*$ (аналог ΔE_q), т. е. смещением поршня серводвигателя (см. рис. 6.12):

$$\Delta \mu_* = \frac{K_{\omega} \Delta \omega_*}{(\beta + T_s p)(1 + T_y p)} \approx \frac{K_{\omega} \Delta \omega_*}{\beta + T_s p}, \quad (6.30)$$

где $K_{\omega} \approx M_0 / \omega_0$; T_s — постоянная времени, характеризующая время действия серводвигателя, регулирующего впуск энергоносителя в турбину (приблизительно часто принимают, что постоянная времени равна времени закрытия энергоносителя при полном сбросе мощности: $T_s = \Delta t_s$).

Предположим, что изменение открытия впуска энергоносителя под действием регулирования ($P_{рег}$) пропорционально изменению мощности турбины, выраженной в долях от номинальной ($P_{т.ном}$), т. е.

$$\Delta \mu_* = P_{рег} / P_{т.ном},$$

тогда вместо (6.30) запишем

$$\Delta P_{рег} = P_{рег} / P_{т.ном} = K_{\omega} \Delta \omega_* / (\beta + T_s p).$$

Учитывая, что $K_{\omega} = M_0 / \omega_0 = 1/\sigma$, где σ — коэффициент неравномерности,

* См. сноску на с. 147.

характеризующий наклон характеристики $M = f(\omega)$, или приближенно $dM/d\omega = dP/d\omega = \sigma$, и принимая $\beta = 1$, получим вместо (6.30)

$$P_{\text{пер}}(1 + T_s p) = \Delta \omega_* P_{\text{т.ном}} / \sigma$$

или

$$\rho P_{\text{пер}} = \frac{\Delta \omega_* P_{\text{т.ном}}}{\sigma T_s} - \frac{P_{\text{пер}}}{T_s} \quad (6.31)$$

Это же уравнение может быть приближенно переписано в виде

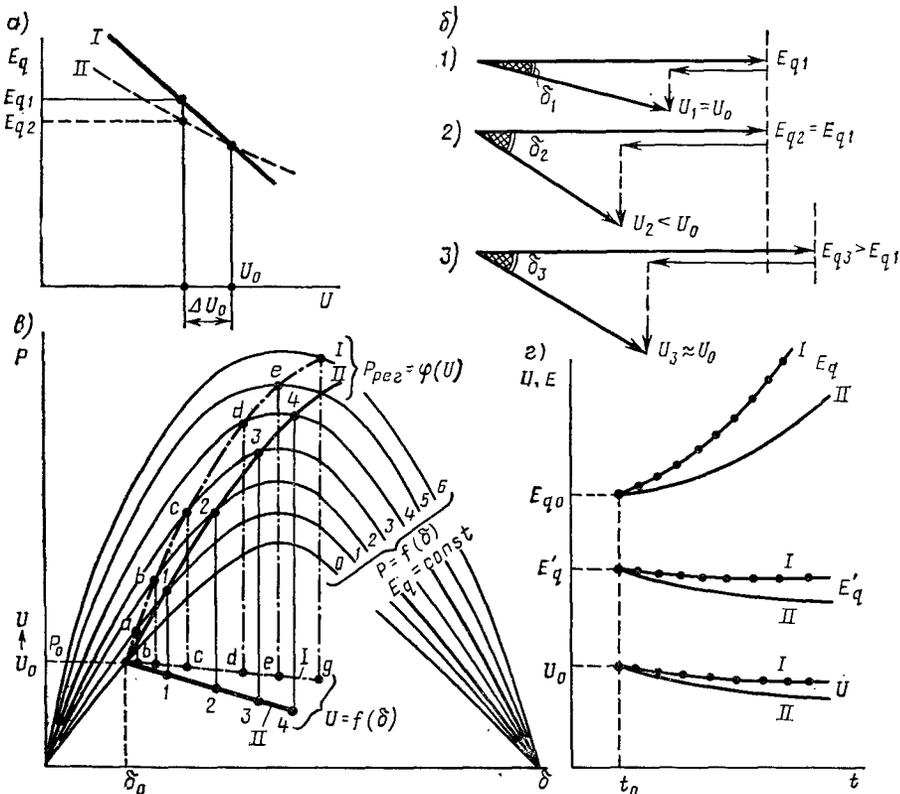


Рис. 6.14. Физические процессы при регулировании возбуждения

а — изменение э. д. с. E_q при изменении напряжения U : I — при K_{0U1} , II — при $K_{0U2} < K_{0U1}$; б — изменение напряжения при росте нагрузки: 1) $U = U_0$; $\delta = \delta_1$; 2) $U_2 < U_1$; $\delta_2 > \delta_1$; 3) $\delta_3 > \delta_1$; $U_3 \approx U_0$. Случаи 1) и 2) без регулирования, 3) — при регулировании; в — зависимости $P = \varphi(\delta)$ при различных значениях E_q ($E_q = \text{const}$) характеристики $P_{\text{пер}} = \varphi(U)$: I — при K_{0U1} ; II — при $K_{0U2} < K_{0U1}$; изменение напряжения $U = f(\delta)$ при росте нагрузки: I — при K_{0U1} ; II — при $K_{0U2} < K_{0U1}$; г — изменение U , E'_q и E_q во времени (аналогично изменениям в зависимости от угла δ , показанным на рис. 6.14, б)

$$\Delta P = \Delta \omega_* \frac{P_{\text{г.ном}}}{\sigma T_s} \Delta t - \frac{P_{\text{рег}}}{T_s} \Delta t. \quad (6.31a)$$

Заметим, что уравнениям (6.29), (6.30), (6.31) аналогичны дифференциальные уравнения в другой форме записи:

$$T_{e3} T_{a0} \frac{d^2 \Delta E_q}{dt^2} + (T_{e3} + T_{a0}) \frac{d \Delta E_q}{dt} + \Delta E_q = K_{0U} \Delta u_0; \quad (6.29a)$$

$$T_s T_y \frac{d^2 \Delta \mu}{dt^2} + (T_s + \beta T_y) \frac{d \Delta \mu}{dt} + \beta \Delta \mu = K_\omega \Delta \omega_*; \quad (6.30a)$$

$$T_s \frac{d \Delta \mu}{dt} + \Delta \mu = K_\omega \Delta \omega_*. \quad (6.31b)$$

Физическая трактовка полученных зависимостей для генератора с регулируемым возбуждением. В соответствии с (6.29) всякое изменение напряжения U на ΔU_0 на шинах генератора ведет к изменению э. д. с. E_q (рис. 6.14, а). При росте нагрузки P и увеличении угла δ , сопровождающемся снижением U (рис. 6.14, б, в), E_q будет увеличиваться (действие АРВ) и восстанавливать напряжение U (рис. 6.14, б). Следовательно, рабочая точка, характеризующая режим, будет перемещаться в плоскости $P-\delta$, переходя с характеристик, имеющих меньшие значения E_q , на характеристики с большими значениями E_q (рис. 6.14, в). При этом в зависимости от коэффициента усиления K_{0U} изменение E_q и вместе с тем степень поддержания U будут различны. Различна будет и степень изменения э. д. с. E'_q (рис. 6.14, з). Обычно по условиям устойчивости системы (см. гл. 8) у регуляторов пропорционального типа выбирают такой коэффициент усиления K_{0U} , что $E'_q \approx \text{const}$ (рис. 6.14, з). Поскольку при резких изменениях режима э. д. с. E'_q , как известно*, в начальный момент не изменяется, а далее меняется медленно, можно считать, что регулирование возбуждения дополнительно способствует постоянству E'_q и поэтому можно принять, что

у генераторов, имеющих пропорциональное регулирование возбуждения, электромеханический переходный процесс определяется согласно характеристике $P = \varphi(\delta)$ при $E'_q \approx E' = \text{const}$,

соответственно замещать генераторы э. д. с. E'_q или $\approx E'$ и в последнем случае вводить в схему замещения сопротивлением x_d .

Физическая трактовка полученных зависимостей для регулируемой турбины. В соответствии с (6.30) и (6.31) можно принять, что в практически существенном для рассматриваемой задачи диапазоне $dM/d\Omega = \text{const}$, т. е. что при любом постоянном открытии $\mu = \text{const}$ зависимость $M = f(\Omega)$ представляется прямой линией (рис. 6.15, а, в). На этом рисунке каждая линейная зависимость 1, 2, ..., 7 отвечая медленному изменению режима, показывает, как при этом будет меняться момент турбины в зависимости от скорости. Эти линейные зависимости пред-

* Дисциплины «Электрические машины», «Переходные электромагнитные процессы» [2, 4, 6].

ставляют собой *статические характеристики*. При быстром изменении режим процесс, происходящий в регулируемой турбине, будет определяться линейной характеристикой до тех пор, пока регуляторы скорости не придут в действие*. На характеристике 1 (рис. 6.15, а, в) это будет участок aa_1 . Запаздывание Δt_3 по времени, отвечающее этому участку, показано на характеристиках механиче

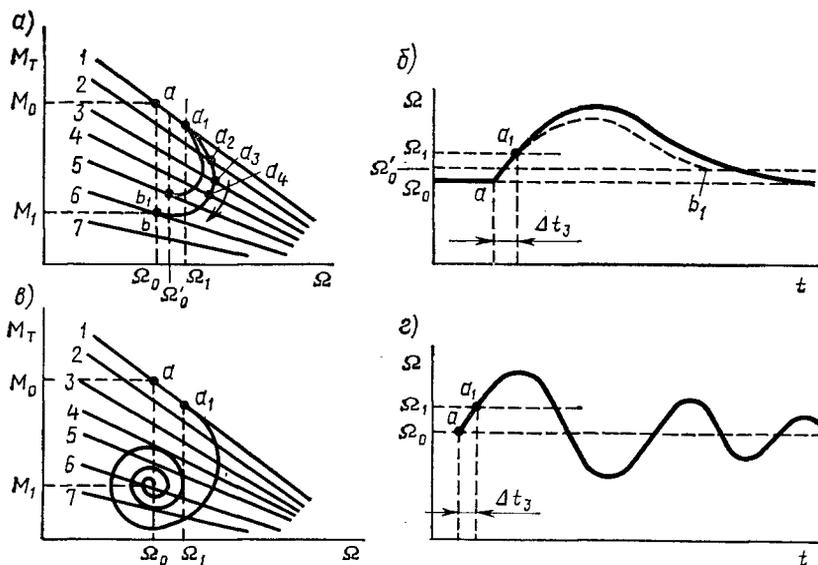


Рис. 6.15. Изменение вращающего момента и скорости в регулируемой (АРЧВ) турбине:

a — зависимость момента от скорости при аperiodическом процессе: $M_T = f(\Omega)$; b — тот же (что и a) процесс, представленный во времени: $\Omega = \varphi(t)$; $в$ — зависимость момента от скорости при колебательном процессе: $M_T = f(\Omega)$; $г$ — тот же (что и $в$) процесс, представленный во времени: $\Omega = \varphi(t)$

ской скорости $\Omega = f(t)$ на рис. 6.15, б, г. Оно зависит от нечувствительности регулятора и запаздывания серводвигателя. При этом скорость изменится на величину $\Delta\Omega$, т. е. от Ω_0 до Ω_1 . Далее наступит вторая стадия процесса, когда регулятор придет в действие и будет перемещать задвижку, что на характеристиках (рис. 6.15, а) будет отражено перемещением рабочей точки a из положения a_1 на характеристике 1 в a_2, a_3, a_4, \dots на характеристиках 2, 3, 4, ...

В результате действия регулятора в конце второй стадии процесса при уменьшившейся электрической нагрузке восстановится прежняя скорость Ω_0 или установится некоторая новая скорость Ω'_0 , обычно близкая к прежней Ω_0 .

Если после изменения нагрузки и окончания переходного процесса, проте-

* Напомним, что в отличие от регулятора возбуждения пропорционального действия обычный регулятор частоты вращения имеет зону нечувствительности и приходит в действие только по истечении времени Δt_3 . Появившиеся в последние годы АРЧВ специального типа и так называемые «приставки» позволяют осуществлять АРЧВ без зоны нечувствительности при $\Delta t_3 \approx 0$.

кавшего согласно характеристике ab (рис. 6.15, a), регулятор восстанавливает прежнюю скорость турбины, то регулирование называется *астатическим*. Если при изменении нагрузки и окончании переходного процесса устанавливается новая, отличная от прежней скорость Ω_0 , то такая система регулирования называется *статической*. Чем больше будет изменение скорости при изменении нагрузки, тем больше будет статизм регулятора, определяемый как

$$(\Omega_0 - \Omega'_0)/\Omega_0 = a.$$

Характер процесса во времени в случаях астатического (сплошная линия) и статического (штриховая линия) регулирования показан на рис. 6.15, b .

Если после изменения скорость плавно подходит к своему новому Ω'_0 или прежнему Ω_0 значению, то процесс называется *апериодическим* (или *апериодическим переходом*) (рис. 6.15, b). Возможны случаи колебательного перехода, изображенные на рис. 6.15, $в, г$.

Из приведенного рассмотрения следует вывод, что турбина может быть представлена:

— статическими характеристиками при отсутствии и регулирования, определяющими процесс во время Δt_3 , т. е. во время запаздывания действия регулятора (участок aa_1 на характеристике 1, рис. 6.15, a);

— статическими характеристиками регулируемой турбины, получаемыми как линии, соединяющие крайние точки зависимостей $M_T = \varphi(\Omega)$, например ab_1 (рис. 6.15, a);

— динамическими характеристиками регулируемой турбины, получаемыми как зависимости $aa_1a_2b_1$ (рис. 6.15, a) и $\Omega = f(t)$ (рис. 6.15, $в, г$).

Так как кратковременные переходные электромеханические процессы протекают за время, соизмеримое с Δt_3 , то, полагая, что момент турбины на этом интервале времени $M \equiv 1/\Omega$, получим, что мощность турбины $P_T = M\Omega = \text{const}$. Следовательно,

при рассмотрении кратковременных переходных электромеханических процессов в первом приближении можно принимать мощность турбины постоянной: $P_T = \text{const}$.

При более длительных переходных процессах, когда регуляторы скорости приходят в действие или когда специальным ускоренным воздействием достигается быстрое изменение момента турбины, допущение $P_T = \text{const}$ становится несправедливым и расчеты проводятся с учетом (6.30) или более приближенно (6.31).

Регулятор частоты. В первом приближении его действие можно принять аналогичным действию регулятора частоты вращения. Однако он будет отличаться тем, что воздействует на выпуск энергоносителя путем смещения муфты регулятора скорости 7 с помощью МЮ-механизма изменения оборотов 9 (см. рис. 6.12). Уравнение, представляющее действие регулятора частоты, будет аналогично (6.31), причем $\Delta\omega_*$ необходимо заменить на Δf_* . Изменения частоты будут происходить значительно медленнее, чем относительные движения отдельных генераторов (бóльшие значения T_* и бóльшая инерция системы), поэтому только при расчетах медленных переходных электромеханических процессов (обычно несколько

секунд) нельзя полагать $f = \text{const}$. Однако отклонения частоты от номинальной, имеющиеся в исходном — нормальном или послеаварийном — режиме, должны учитываться. Для подведения итога приведем, не рассматривая деталей, полную схему регулирования турбогенератора, работающего в системе (рис. 6.16). Здесь отражены почти все виды регулирования, включая регулирование, проводимое

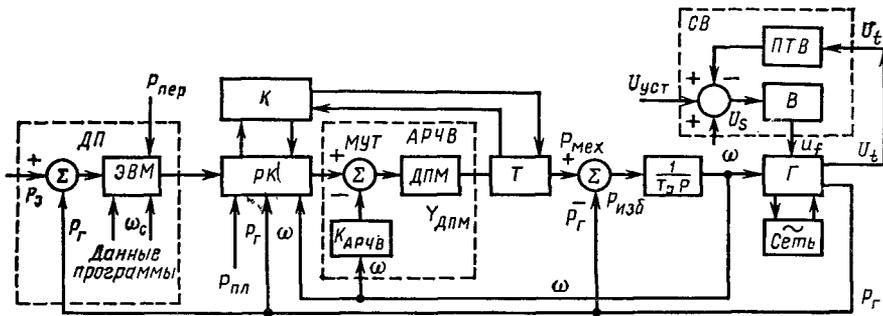


Рис. 6.16. Структурная схема системы регулирования турбоагрегата:

ДП — диспетчерский пункт; ЭВМ — электронно-вычислительная машина для экономичного распределения нагрузок; К — котел; РК — регулятор котла; МУТ — механизм управления турбиной; АРЧВ — автоматический регулятор частоты вращения; ДПМ — двигатель приводного механизма; Т — турбина; Г — генератор; СВ — система возбуждения; В — возбудитель; ПТВ — преобразующий трансформатор и выпрямитель; $P_{пер}$ — мощности перетоков по связям; $P_з$ — заданная мощность; $U_{уст}$ — заданное напряжение; $P_{пл}$ — плановая нагрузка; ω — частота системы; $P_{мех}$ — механическая мощность

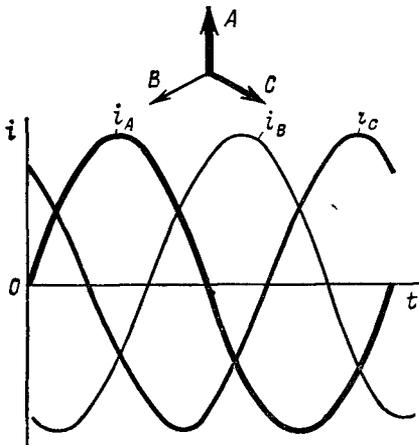


Рис. 6.17. Представление тока в трехфазной системе координат А, В, С

$$I_d = \frac{2}{3} \left[(i_A \cos \gamma) + i_B \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \right];$$

$$I_q = \frac{2}{3} \left[(i_A \sin \gamma) + i_B \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \right].$$

из условий экономичности работы систем, что требует специального распределения нагрузок между станциями и агрегатами. Вопрос этот выходит за рамки настоящей дисциплины, а поэтому о регулировании этого вида здесь только упоминается. На схеме не показано регулирование котла — так называемое регулирование «до себя», которое обеспечивает заданное значение давления пара на выходе из котла при различного рода переходных процессах (см. гл. 9).

Пример 6.1. По трехфазной обмотке статора проходит синусоидальный ток (рис. 6.17). Представить этот ток в осях d и q , жестко связанных с ротором.

Решение. Формулы перехода от фазных величин к двухфазной системе координат (d , q) имеют вид

Пусть мгновенные значения фазных токов i_A, i_B, i_C в установившемся режиме запишутся как

$$i_A = I_m \cos \omega t; \quad i_B = I_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad i_C = I_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Подставив значения фазных токов в предыдущие уравнения, будем иметь

$$I_d = \frac{2}{3} I_m \left[\cos \gamma \cos \omega t + \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right];$$

$$I_q = \frac{2}{3} I_m \left[\sin \gamma \cos \omega t + \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right].$$

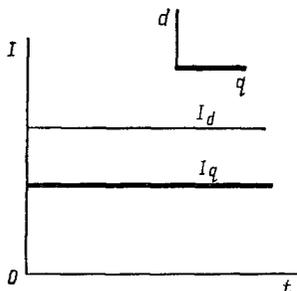


Рис. 6.19. Схема исследуемой системы

←

Рис. 6.18. Представление тока в координатах d и q

После ряда тригонометрических преобразований получим

$$I_d = I_m \cos (\omega t - \gamma); \quad I_q = I_m \sin (\omega t - \gamma).$$

Учитывая, что в синхронном режиме $\gamma = \omega t + \delta$, найдем

$$I_d = I_m \cos \delta; \quad I_q = I_m \sin \delta.$$

Таким образом, синусоидально изменяющиеся фазные токи i_A, i_B, i_C при переходе к координатным осям d и q становятся постоянными величинами (рис. 6.18).

Пример 6.2. Выяснить влияние относительного активного сопротивления гидрогенератора r/x_d на характер зависимости $\delta = f(t)$ в случае, когда применяются полные уравнения Парка—Горева и уравнения упрощенные. Схема электропередачи, в начале которой происходит трехфазное короткое замыкание продолжительностью 0,1 с, изображена на рис. 6.19.

Параметры исходного режима: $P_C = 0,91$; $Q_C = 0,273$; $U_C = 1$.

Параметры электропередачи в относительных единицах: $x_d = 0,639$; $x_q = 0,44$; $x'_d = 0,29$; $T_{d0} = 5,2$ с; $T_J = 13,8$ с; $x_{\pi} = 0,564$; $r_{\pi} = 0,04$; 1) $r = 0,0096$; 2) $r = 0,032$. Здесь $x_d = x_{d\Gamma} + x_{\pi}$; $x_q = x_{q\Gamma} + x_{\pi}$; $x'_d = x'_{d\Gamma} + x_{\pi}$; $r = r_{\Gamma} + r_{\pi}$.

Решение. Расчет установившегося режима определяются следующие параметры: $E_{q0}, E_{q0}', E_q', I_d, I_q, \Psi_d, \Psi_q, M_T, U_{\Gamma d}, U_{\Gamma q}, U_{Cd}, U_{Cq}, \delta, s$.

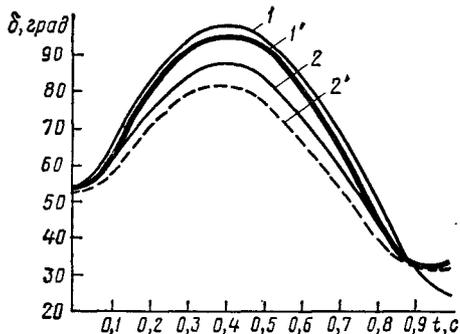
Расчет проводится для двух режимов при:

$$1) \quad r/x_d = 0,015; \quad 2) \quad r/x_d = 0,05.$$

При этом короткое замыкание задается условием $U_C = 0$ и $Z_{\pi} = 0$. Отключение короткого замыкания осуществляется восстановлением Z_{π} и U_C ($U_C = 1$).

1. Расчет по полным уравнениям Парка—Горева проводится решением уравнений, приведенных к виду, удобному для решения на ЦВМ:

$$\begin{aligned}
 p\Psi_d &= -\Psi_q(1+s) - I_d r - U_{rd}; & p\Psi_q &= \Psi_d(1+s) - I_q r - U_{rq}; \\
 T_{d0}p\Psi_d - T_{d0}x'_d pI_d &= E_{Q0} - \Psi_d + I_d x_q; & T_{d0}p\Psi_q - T_{d0}x_q pI_q &= -\Psi_q + I_q x_q; \\
 pI_{\pi d} &= \frac{U_{rd}}{x_{\pi}} - \frac{U_c \sin \delta}{x_{\pi}} - I_{\pi d} \frac{r_{\pi}}{x_{\pi}} - I_{\pi q}(1+s); \\
 pI_{\pi q} &= \frac{U_{rd}}{x_{\pi}} - \frac{U_c \cos \delta}{x_{\pi}} - I_{\pi q} \frac{r_{\pi}}{x_{\pi}} + I_{\pi d}(1+s); \\
 T_J ps &= M_T - (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d); & p\delta &= s.
 \end{aligned}$$



Третье и четвертое уравнения приведенной системы получаются заменой уравнений переходного процесса в обмотке возбуждения по продольной и поперечной осям на уравнения, записанные через э. д. с. с учетом (6.20) и (6.21) — (6.24). Подставив значения U_{rd} и U_{rq} из пятого и шестого уравнений в первое и второе уравнения системы, получим систему дифференциальных уравнений шестого порядка:

Рис. 6.20. Изменение угла генератора:

1 и 1' — расчет по упрощенным и полным уравнениям при $r/x_d = 0,015$; 2 и 2' — при $r/x_d = 0,05$

$$\begin{aligned}
 p\Psi_d + pI_d x_{\pi} &= -\Psi_q(1+s) - I_d r - U_c \sin \delta - I_{\pi d} r_{\pi} - I_{\pi q} x_{\pi}(1+s); \\
 p\Psi_q + pI_q x_{\pi} &= \Psi_d(1+s) - I_q r - U_c \cos \delta - I_{\pi q} r_{\pi} + I_{\pi d} x_{\pi}(1+s); \\
 T_{d0}p\Psi_d - T_{d0}x'_d pI_d &= E_{Q0} - \Psi_d + I_d x_q; & T_{d0}p\Psi_q - T_{d0}x_q pI_q &= -\Psi_q + I_q x_q; \\
 T_J ps &= M_T - (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d); & p\delta &= s.
 \end{aligned}$$

При этом в нормальном и послеаварийном режимах $I_{\pi d} = I_d$, $I_{\pi q} = I_q$. Решение данной системы дифференциальных уравнений численными методами требует нахождения приращения переменных Ψ_d , Ψ_q , I_d , и I_q в явном виде, т. е. решения системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & x_{\pi} & 0 \\
 0 & 1 & 0 & x_{\pi} \\
 T_{d0} & 0 & -T_{d0}x'_d & 0 \\
 0 & T_{d0} & 0 & -T_{d0}x_q
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 p\Psi_d \\
 p\Psi_q \\
 pI_d \\
 pI_q
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -\Psi_q(1+s) - I_d r - U_c \sin \delta - I_d r_{\pi} - I_q x_{\pi}(1+s) \\
 \Psi_d(1+s) - I_q r - U_c \cos \delta - I_q r_{\pi} + I_d x_{\pi}(1+s) \\
 E_{Q0} - \Psi_d + I_d x_q \\
 -\Psi_q + I_q x_q
 \end{bmatrix}.$$

Получив приращения всех переменных в явном виде, можно применить для расчета любой численный метод интегрирования и определить неизвестные Ψ_d , Ψ_q , I_d , I_q , δ , s . Проведя расчеты по шагам, получим изменение всех параметров во времени, а следовательно, зависимость $\delta = f(t)$ для обоих вариантов (рис. 6.20): 1) $r/x_d = 0,015$; 2) $r/x_d = 0,05$.

2. Для описания переходных процессов в генераторе по упрощенным уравнениям вве-

дем следующие упрощения: $p\Psi_d = p\Psi_q = 0$; $\rho\delta + 1 = 1$. Тогда с учетом того, что $I_{nd} = I_d$, $I_{nq} = I_q$, получим систему уравнений

$$T_{d0}pE'_q = E_{qe} - E_q; \quad T_{jps} = M_T - \Psi_d I_q + \Psi_q I_d; \quad \rho\delta = s.$$

Для нормального и послеаварийного режимов имеем:

$$I_d = - \frac{(E'_q - U_c \cos \delta)(x_q + x_n) - U_c \sin \delta (r + r_n)}{(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)};$$

$$I_q = \frac{U_c (x'_d + x_n) \sin \delta + (E'_q - U_c \cos \delta)(r + r_n)}{(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)};$$

$$E'_q - I_d x'_d = E_q - I_d x_d; \quad E_q = E'_q + I_d (x_d - x'_d); \quad \Psi_d = E_q + I_d x_d; \quad \Psi_q = I_q x_q.$$

Для аварийного режима (при трехфазном коротком замыкании на шинах станции) принимаем $U_c = 0$, $Z_n = 0$, тогда получим:

$$I_d = - \frac{E'_q x_q}{r^2 + x'_d x_q}; \quad I_q = \frac{E'_q r}{r^2 + x'_d x_q}; \quad E'_q + I_d x'_d = E_q + I_d x_d = 0;$$

$$E'_q x_d + I_d x'_d x_d = E_q x'_d + I_d x'_d x_d$$

или

$$E_q = E'_q x_d / x'_d; \quad \Psi_d = E_q + I_d x_d; \quad \Psi_q = I_q x_q.$$

Проведя расчет «шаг за шагом», получим изменение угла δ во времени (рис. 6.20) для $r/x_d = 0,015$ и $r/x_d = 0,05$, при применении упрощенных уравнений Парка—Горева.

Как видно из рис. 6.20, при $r/x_d = 0,015$ разница между расчетами по полным и упрощенным

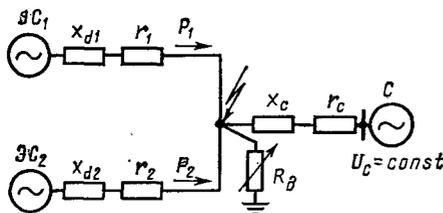


Рис. 6.21. Схема исследуемой энергосистемы с учетом горения дуги в выключателе

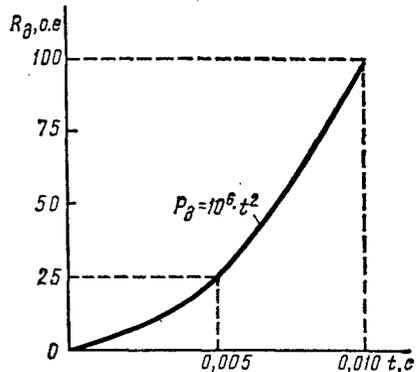


Рис. 6.22. Изменение сопротивления дуги R_{β}

уравнениями практически незаметна. При увеличении же относительного активного сопротивления $r/x_d = 0,05$ эта разница оказывается ощутимой. Большое число аналогичных расчетов приводит к выводу: при малом относительном активном сопротивлении ($r/x_d < 0,03$) нет необходимости в применении полных уравнений. Если же относительное активное сопротивление велико ($r/x \geq 0,03$), то для получения достоверных результатов необходимо пользоваться полными уравнениями.

Пример 6.3. Выявить влияние момента отключения короткого замыкания на максимальное значение угла генератора при учете и без учета горения дуги в выключателе, когда расчет ведется по полным уравнениям, и показать зависимости $\delta_{\max} = f(t_{\text{откл}})$ и $M = \varphi(t)$.

Исследуемая система состоит из двух станций, работающих на шины неизменного напряжения (рис. 6.21). При этом $r_1/x_{d1} \approx r_2/x_{d2} \approx 0,015$.

Даны параметры исходного режима P_{11}, P_2, U_c, U_r и параметры электропередачи в относительных единицах: $x_{d1}, x_{d2}, x_{q1}, x_{q2}, x_{d1}, x_{d2}, x_{ad1}, x_{ad2}, x_{aq1}, x_{aq2}, r_1, r_2, r_{f1}, r_{f2}, r_{1d1}, r_{1d2}, r_{1q1}, r_{1q2}, x_{afd} = x_{f1d} = x_{ad}, x_{a1q} = x_{aq}, T_{J1}, T_{J2}, T_{d01}, T_{d02}$.

Примем упрощенно, что сопротивление дуги R_D изменяется только как функция времени*, имея характер квадратичной зависимости (рис. 6.22).

Решение. Расчетom установившегося режима определяются следующие параметры: $E_{q01}, E_{q02}, E'_{q1}, E'_{q2}, I_{d1}, I_{d2}, I_{q1}, I_{q2}, \Psi_{d1}, \Psi_{d2}, \Psi_{q1}, \Psi_{q2}, M_{T1}, M_{T2}, U_{rd(1)}, U_{rd(2)}, U_{rq(1)}, U_{rq(2)}, I_{ld(1)}, I_{ld(2)}, I_{lq(1)}, I_{lq(2)}, \delta_1, \delta_2, I_{f1}, I_{f2}, I_{d1}, I_{d2}, I_{q1}, I_{q2}$. Здесь цифра в скобках показывает номер генератора, на оси которого проецируется данная величина.

Система уравнений, подготовленная для решения на ЦВМ исследуемого процесса, имеет вид

$$\begin{aligned} p\Psi_{d1} &= -\Psi_{q1}(1+s_1) - I_{d1}r_1 - U_{rd(1)}; & p\Psi_{q1} &= \Psi_{d1}(1+s_1) - I_{q1}r_1 - U_{rq(1)}; \\ p\Psi_{d2} &= -\Psi_{q2}(1+s_2) - I_{d2}r_2 - U_{rd(2)}; & p\Psi_{q2} &= \Psi_{d2}(1+s_2) - I_{q2}r_2 - U_{rq(2)}; \\ p\Psi_{f1} &= U_{f1} - I_{f1}r_{f1}; & p\Psi_{f2} &= U_{f2} - I_{f2}r_{f2}; & p\Psi_{1d1} &= -I_{d1}r_{1d1}; & p\Psi_{1q1} &= -I_{q1}r_{1q1}; \\ p\Psi_{1d2} &= -I_{d2}r_{1d2}; & p\Psi_{1q2} &= -I_{q2}r_{1q2}; & T_{J1}ps_1 &= M_{T1} - \Psi_{d1}I_{q1} + \Psi_{q1}I_{d1}; & p\delta_1 &= s_1; \\ & & T_{J2}ps_2 &= M_{T2} - \Psi_{d2}I_{q2} + \Psi_{q2}I_{d2}; & p\delta_2 &= s_2; \end{aligned}$$

$$pI_{ld(1)} = \frac{U_{rd(1)}}{x_{л1}} - \frac{U_c \sin \delta_1}{x_{л1}} - \frac{I_{ld(1)} r_{л1}}{x_{л1}} - I_{lq(1)}(1+s_1);$$

$$pI_{lq(1)} = \frac{U_{rq(1)}}{x_{л1}} - \frac{U_c \cos \delta_1}{x_{л1}} - \frac{I_{lq(1)} r_{л1}}{x_{л1}} + I_{ld(1)}(1+s_1);$$

$$pI_{ld(2)} = \frac{U_{rd(2)}}{x_{л2}} - \frac{U_c \sin \delta_2}{x_{л2}} - \frac{I_{ld(2)} r_{л2}}{x_{л2}} - I_{lq(2)}(1+s_2);$$

$$pI_{lq(2)} = \frac{U_{rq(2)}}{x_{л2}} - \frac{U_c \cos \delta_2}{x_{л2}} - \frac{I_{lq(2)} r_{л2}}{x_{л2}} + I_{ld(2)}(1+s_2).$$

Токи генераторов определяются из уравнений потокоцеплений цепей статора, обмоток возбуждения и демпферных обмоток:

$$\Psi_d = I_{fxafd} + I_{dxad1} + I_{dxad2}; \quad \Psi_q = I_{1qx_{a1q}} + I_{qxq}; \quad \Psi_f = I_{fxf} + I_{1dx_{f1d}} + I_{dx_{afd}};$$

$$\Psi_{1d} = I_{1dx_{1d1}} + I_{fx_{f1d}} + I_{dx_{ad1}}; \quad \Psi_{1q} = I_{1qx_{1q1}} + I_{qx_{a1q}}.$$

Для данного примера, учитывая, что $x_{afd} = x_{ad1} = x_{f1d} = x_{ad}$ и $x_{a1q} = x_{aq}$, будем иметь

$$I_{f1} = \frac{\Psi_{f1}x_{1d1} - \Psi_{1d1}x_{ad1} + I_{d1}(x_{ad1}^2 - x_{ad1}x_{1d1})}{x_{f1}x_{1d1} - x_{ad1}^2};$$

$$I_{f2} = \frac{\Psi_{f2}x_{1d2} - \Psi_{1d2}x_{ad2} + I_{d2}(x_{ad2}^2 - x_{ad2}x_{1d2})}{x_{f2}x_{1d2} - x_{ad2}^2};$$

* Такой учет дуги, отражая ее эффект в смысле влияния потерь мощности на электро-механические процессы, разумеется, не дает полного представления о физике происходящих процессов.

$$I_{d1} = \frac{\Psi_{1d1}x_{f1} - \Psi_{f1}x_{ad1} + I_{d1}(x_{ad1}^2 - x_{ad1}x_{f1})}{x_{f1}x_{1d1} - x_{ad1}^2};$$

$$I_{d2} = \frac{\Psi_{1d2}x_{f2} - \Psi_{f2}x_{ad2} + I_{d2}(x_{ad2}^2 - x_{ad2}x_{f2})}{x_{f2}x_{1d2} - x_{ad2}^2};$$

$$I_{1q1} = \frac{\Psi_{1q1} - I_{q1}x_{aq1}}{x_{1q1}}; \quad I_{1q2} = \frac{\Psi_{1q2} - I_{q2}x_{aq2}}{x_{1q2}};$$

$$I_{d1} = \frac{\Psi_{d1} - E_{q1}''}{x_{d1}}; \quad I_{d2} = \frac{\Psi_{d2} - E_{q2}''}{x_{d2}}; \quad I_{q1} = \frac{\Psi_{q1} + E_{d1}''}{x_{q1}}; \quad I_{q2} = \frac{\Psi_{q2} + E_{d2}''}{x_{q2}},$$

где

$$E_{q1}'' = \frac{\Psi_{f1}(x_{1d1}x_{ad1} - x_{ad1}^2) + \Psi_{1d1}(x_{f1}x_{ad1} - x_{ad1}^2)}{x_{f1}x_{1d1} - x_{ad1}^2};$$

$$E_{q2}'' = \frac{\Psi_{f2}(x_{1d2}x_{ad2} - x_{ad2}^2) + \Psi_{1d2}(x_{f2}x_{ad2} - x_{ad2}^2)}{x_{f2}x_{1d2} - x_{ad2}^2};$$

$$E_{d1}'' = -\Psi_{1d1}x_{aq1}/x_{1q1}; \quad E_{d2}'' = -\Psi_{1d2}x_{aq2}/x_{1q2}.$$

Напряжение на шинах генератора определяется по следующим выражениям:

$$U_{Гd(1)} = R_{\delta} [I_{d1} + I_{d2} \cos(\delta_2 - \delta_1) + I_{q2} \sin(\delta_2 - \delta_1) - I_{Ld(1)}]; \quad U_{Гq(1)} = R_{\delta} [I_{q1} + I_{q2} \cos(\delta_2 - \delta_1) + I_{d2} \sin(\delta_2 - \delta_1) - I_{Lq(1)}];$$

$$U_{Гd(2)} = R_{\delta} [I_{d2} + I_{d1} \cos(\delta_1 - \delta_2) + I_{q1} \sin(\delta_1 - \delta_2) - I_{Ld(2)}]; \quad U_{Гq(2)} = R_{\delta} [I_{q2} + I_{q1} \cos(\delta_1 - \delta_2) + I_{d1} \sin(\delta_1 - \delta_2) - I_{Lq(2)}],$$

где R_{δ} — активное сопротивление дуги.

Проведя таким образом ряд расчетов с учетом и без учета дуги, получим для разных $t_{откл}$ (0,1; 0,11; 0,12; 0,13; 0,14 с) значения угла $\delta_{макс}$ (рис. 6.23). Как видно из рисунка, при расчете по полным уравнениям Парка—Горева кривая $\delta_{макс} = f(t_{откл})$ имеет колебательный характер (1). При учете дуги зависимость $\delta_{макс} = f(t_{откл})$ приобретает монотонно нарастающий характер (4) и результат приближается к полученному расчетом по упрощенным уравнениям (2) и экспериментальным данным (3).

На рис. 6.24, а, б показано изменение электромагнитного момента первого генератора при отключении короткого замыкания в моменты $t_{откл} = 0,1$ с и $t_{откл} = 0,11$ с. Как видно из рис. 6.24, а, характер изменения среднего $M_{ср}$ электромагнитного момента генератора, рассчитанного по полным уравнениям ($M_{п}$), после отключения к. з. практически не отличается от характера изменения электромагнитного момента, рассчитанного по упрощенным уравнениям ($M_{у}$). Это объясняется тем, что при $t_{откл} = 0,1$ с число полупериодов в процессе к. з. оказывается чет-

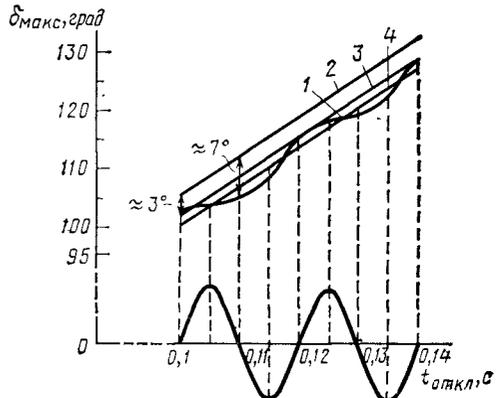


Рис. 6.23. Изменение максимальной величины угла генератора от момента отключения к. з.:

1 — расчет по полным уравнениям без учета горения дуги; 2 — расчет по упрощенным уравнениям; 3 — экспериментальная кривая; 4 — расчет по полным уравнениям с учетом горения дуги

ным, следовательно, число положительных и отрицательных импульсов момента при его колебаниях равно. Вследствие этого амплитуда колебаний после к. з. оказывается небольшой и влияние второго генератора на первый не ощущается. При этом после отключения к. з. скачки в положительную и отрицательную стороны оказываются практически одинаковыми, а изменение $M_{ср}$ соответствует изменению M_{γ} . Поэтому значения δ_{\max} , рассчитанные по полным и упрощенным уравнениям, практически равны, разница составляет примерно 3° (см. рис. 6.23). Если же $t_{\text{откл}} = 0,11$ с, то после отключения к. з.

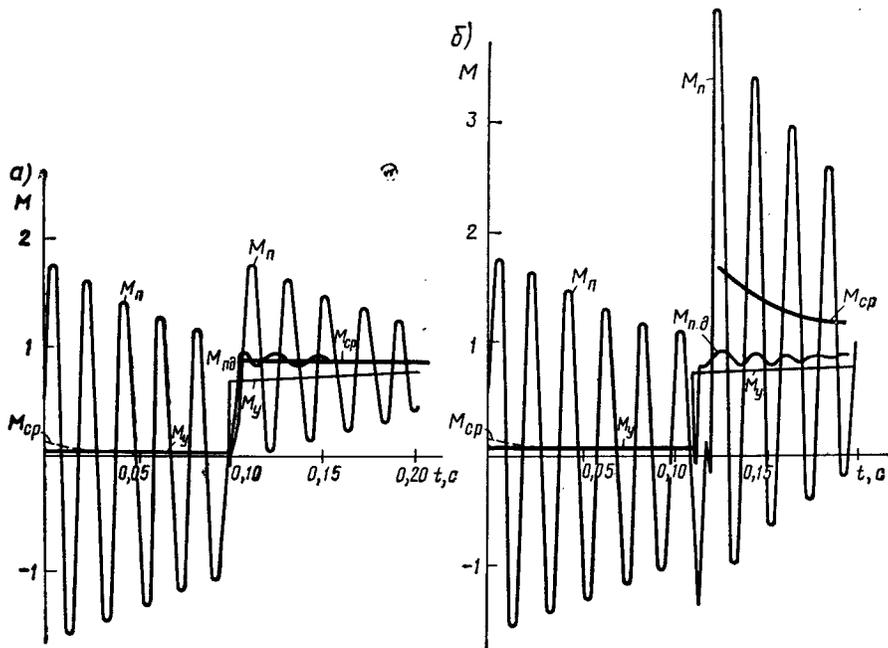


Рис. 6.24. Изменение электромагнитного момента:
 а — $t_{\text{откл}} = 0,1$ с; б — $t_{\text{откл}} = 0,11$ с

$M_{ср}$ имеет аперриодический характер и сильно отличается от M_γ . Вследствие этого максимальные значения вылетов угла, рассчитанного по полным и упрощенным уравнениям, заметно отличаются [примерно на 7° (см. рис. 6.23)]. Это объясняется тем, что число импульсов момента при его колебаниях согласно расчету по полным уравнениям в процессе к. з. нечетно и число положительных импульсов оказывается больше отрицательных. Это приводит к сильным колебаниям момента M_n после отключения к. з. В этом случае влияние второго генератора на первый может оказаться довольно сильным и привести к появлению дополнительного момента, который резко увеличивает значение $M_{ср}$. Таким образом, в моменты времени $t_{\text{откл}} = 0,1$; $0,12$; $0,14$ с значения максимального угла, рассчитанного по полным и упрощенным уравнениям, мало отличаются. Для моментов же отключения $t_{\text{откл}} = 0,11$ с и $t_{\text{откл}} = 0,13$ с эта разность резко увеличивается. Однако в действительности (эксперимент) колебаний δ_{\max} в зависимости от $t_{\text{откл}}$ не наблюдается, так как появление дуги при отключении сглаживает колебания электромагнитного момента $M_{пд}$ генератора после отключения к. з. (рис. 6.24). Это приводит к сглаживанию характеристики $\delta_{\max} = f(t_{\text{откл}})$. Таким образом, при расчете электромеханических переходных процессов, когда $r/x < 0,03$, необходимо либо учитывать горение дуги в выключателе, либо применять упрощенные уравнения, что является более целесообразным с точки зрения объема вычислений.

Контрольные вопросы

- 6.1. Каковы особенности математических описаний, моделей и схем замещения?
- 6.2. В чем особенность уравнений Парка—Горева по отношению к обычной системе уравнений магнитно-связанных цепей, перемещающихся относительно друг друга?
- 6.3. Какой смысл имеют члены вида $p\Psi$, $p\delta$ в уравнениях Парка—Горева?
- 6.4. Что понимается под упрощенными уравнениями Парка—Горева? Как они учитывают связь потока и напряжения, момента и мощности?
- 6.5. Какова разница в характере кривых переходного процесса $P = f(t)$, $E_q = f(t)$, $E'_q = f(t)$, $I_f = f(t)$, $I_{ст} = f(t)$, рассчитанных по полным и упрощенным уравнениям?
- 6.6. Как влияют случайные факторы на результаты анализа переходных процессов в электрической системе?
- 6.7. Как влияет насыщение магнитной цепи синхронной машины на амплитуду угла при качаниях и период качания?
- 6.8. В чем особенности записи уравнений электромагнитных процессов в контурах синхронной и асинхронной машины? Рассказать, пользуясь табл. 6.1.
- 6.9. Важнейшие допущения при составлении и решении полных и упрощенных уравнений, описывающих переходные процессы в электрической системе.
- 6.10. Как составляются и как применяются структурные схемы электрической системы и ее устройств регулирования?
- 6.11. В чем особенности регуляторов возбуждения (АРВ п. д.) пропорционального действия и сильного действия (АРВ с. д.)?
- 6.12. Что такое жесткая и гибкая обратные связи?
- 6.13. Как составляется передаточная функция, связывающая отклонение и регулирующее воздействие? Пояснить на примере уравнения (6.28).
- 6.14. На примере рис. 6.14 и 6.15 поясните действие АРВ и АРС.
- 6.15. Почему мощность турбины в некоторых случаях расчета (каких) можно принимать постоянной?

Темы рефератов

1. Уравнения Парка—Горева и их применение при расчетах несимметричных режимов
2. Современные регуляторы возбуждения и системы регулирования (АРВ).
3. Современные регуляторы частоты вращения турбин (АРЧВ).

§ 7.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для того чтобы уметь обеспечить способность системы восстанавливать исходный или близкий к исходному режим при большом его возмущении (сохранять динамическую устойчивость), инженеру необходимо иметь представление о физике происходящих процессов и уметь рассчитывать их. Для больших возмущений

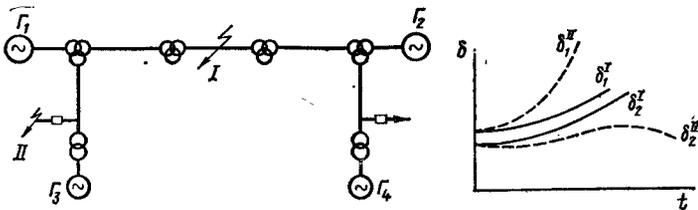


Рис. 7.1. Влияние места аварии на характер переходного процесса в системе

Короткое замыкание в точке K_1 — одинаковое ускорение левой и правой частей системы — система устойчива; короткое замыкание в точке K_2 — система неустойчива

(см. гл. 4) существенно резкое нарушение режима, сопровождающееся изменением конфигурации системы; характер процесса зависит от значения возмущений и места их возникновения (рис. 7.1, 7.2).

В гл. 4 и 6 указывалось, что исследование способом площадей не дает полного представления о происходящих процессах, поскольку остаются невыясненными зависимости угла $\delta = f(t)$ и электрической мощности $P = \varphi(t)$. Определение этих зависимостей существенно для уяснения физики явлений и решения задач управления и регулирования (определение времени срабатывания реле, времени действия отключающих устройств, скорости действия регулирующих устройств, скорости подъема возбуждения, настройки реле сброса мощности и т. д.). Для того чтобы найти соответствие между значениями угла и времени, прошедшего с начала процесса, необходимо решить (проинтегрировать) дифференциальное уравнение относительного движения ротора генератора.

В настоящей главе после некоторых общих соображений о динамической устойчивости будут рассматриваться способы решения уравнений, которые описывают группу явлений, наступающих при больших отклонениях параметров режима и резких изменениях мощности, отдаваемой генераторами в сеть. Для этих случаев особенно характерны такие короткие замыкания, при которых взаимное сопротивление между генератором и нагрузкой резко возрастает, что при-

водит к прогрессирующему изменению угла δ , изменению угловой скорости ротора $\Delta\omega = d\delta/dt$.

Причины и характер больших возмущений режима, появляющихся в электрической системе. Большие возмущения режима или, как их иногда называют в о з м у щ е н и я в б о л ь ш о м, появляющиеся в электрических системах, чаще всего вызываются отключениями мощных нагрузок или несущих нагрузку генераторов, трансформаторов, ЛЭП.

К еще более резким изменениям режима приводят короткие замыкания, при которых изменения мощности на отдельных участках системы могут быть соизмеримы с суммарной мощностью всей системы. Так, например, трехфазное короткое замыкание на одноцепной ЛЭП изменяет передаваемую по этой линии мощность на 100%, так как передача мощности в систему полностью прекращается. Короткие замыкания в зависимости от места (в котором они происходят) и их вида (трех- и двухфазные и т. д.) могут приводить к различным изменениям передаваемой мощности или сбросам мощности. Они, следовательно, различны по своей тяжести. Наиболее тяжелым является трехфазное короткое замыкание, полностью прерывающее передачу мощности через тот элемент, на котором произошла авария. Более легкими являются двухфазные короткие замыкания на землю, еще более легкими — двухфазные короткие замыкания без замыкания на землю и самыми легкими — однофазные короткие замыкания (рис. 7.2).

Место короткого замыкания в сильной степени влияет на тяжесть аварии в отношении как токов короткого замыкания, так и воздействия на устойчивость системы. Чем дальше короткое замыкание от источников энергии, тем, как правило, меньше токи короткого замыкания. Чем симметричнее место короткого замыкания по отношению к генераторам системы, тем легче авария в отношении влияния ее на устойчивость системы. Это объясняется тем, что при одинаковом сбросе мощности генераторы в равной мере (или примерно в равной мере) ускоряются и остаются устойчивыми относительно друг друга (см. рис. 7.1, точка I).

Статистика аварий, происходящих в электрических системах, показывает, что большинство аварий на ЛЭП высокого напряжения — это однофазные короткие замыкания (75—90%). Двухфазные короткие замыкания на землю и двухфазные короткие замыкания без соединения с землей составляют 5—15% от общего числа коротких замыканий.

Наиболее редкими являются трехфазные короткие замыкания, составляющие 5—10% от общего числа коротких замыканий.

В правильно спроектированной системе должны быть предусмотрены меро-

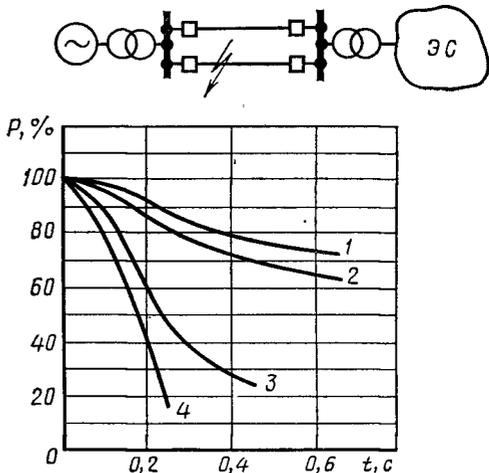


Рис. 7.2. Зависимость предельной мощности, передаваемой в систему по условиям динамической устойчивости, от времени отключения и вида короткого замыкания: 1 — однофазное; 2 — двухфазное; 3 — двухфазное на землю; 4 — трехфазное

приятия, позволяющие иметь наименьший ущерб от аварий с учетом вероятности их появления и тяжести. При расчетах коротких замыканий и динамической устойчивости, так же как и при расчетах других аварийных режимов, часто возникает вопрос, насколько правильно (точно) эти расчеты отражают то, что произойдет в действительности в электрической системе. В пояснение этой постановки вопроса заметим, что неоднократно бывали случаи, когда на основании расчетов коротких замыканий или устойчивости предполагались необходимые мероприятия по усилению системы.

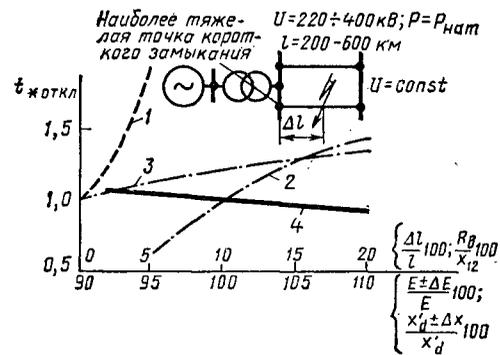


Рис. 7.3. Влияние случайных изменений исходных параметров режима и параметров системы на предельное время отключения короткого замыкания:

1 — сопротивления дуги в месте короткого замыкания $(R_{\theta}/x_{12}) \cdot 100$; 2 — начального возбуждения $[(E \pm \Delta E)/E] \cdot 100$; 3 — удаления короткого замыкания $(\Delta L/L) \cdot 100$; 4 — переходного реактивного сопротивления генератора $[(x'_d \pm \Delta x)/x'_d] \cdot 100$

Однако ряд специально поставленных исследований, в которых экспериментально определялись параметры системы, делались расчеты, а затем опыты, показал достаточно хорошее совпадение полученных результатов. Следовательно, дело здесь не в ошибочности расчетов или неточности принятых методов анализа. Результаты расчета и опыта могут совпасть, если расчет проводить при правильном учете в с е х и с х о д н ы х ф а к т о р о в, влияющих на результат опыта. Это всегда затруднительно, так как степень влияния того или иного фактора в каждом конкретном случае имеет случайный характер. Режим, принятый за расчетный, может при естественных (а не специальных, как в опыте) условиях не появиться за довольно длительный период эксплуатации.

Обычно при проверке устойчивости системы выявляют точку, в которой короткое замыкание наиболее опасно, и для нее проводят расчеты. Однако вероятность того, что короткое замыкание данного вида произойдет именно в этой точке, разумеется, значительно ниже, чем общая вероятность появления рассматриваемого вида короткого замыкания в системе. Если короткие замыкания будут происходить в некотором (даже не очень большом) отдалении от опасной точки, то они уже будут более легкими. Именно поэтому оценка устойчивости передачи или системы, проводимая для короткого замыкания в наиболее опасной точке, дает практически несколько завышенные (в пользу надежности) результаты. Весьма вероятно также, что при аварии будут появляться некоторые не учтенные в расчетах, обычно облегчающие аварию факторы (такие, например, как влияние дуги в месте короткого замыкания).

В качестве примера на рис. 7.3 показана схема системы, устойчивость которой определяется исходя из трехфазного короткого замыкания в наиболее тяжелой точке — на шинах высокого напряжения станции.

Для того чтобы при коротком замыкании сохранить устойчивую работу системы по возможности в большем числе случаев, нужно быстро отключить аварийный участок. Предположим, что расчет устойчивости, проведенный при некоторых исходных параметрах режима станции, требует, чтобы время отключения $t_{откл}$ было не более чем t_0 . Эту величину t_0 назовем *предельным временем отключения* и примем далее за единицу.

Рассмотрим влияние различных факторов на изменение предельного времени отключения. При нахождении предельного времени отключения $t_{откл}$ предполагалось, что короткое замыкание сразу же становится глухим («металлическим»). В действительности же оно в большинстве случаев или происходит через загорающуюся при замыкании фаз генератора дугу, или возникает как развитие однофазного короткого замыкания. В этих случаях условия устойчивости системы облегчаются и предельное время отключения растет. К увеличению предельного времени отключения приводят также удаление короткого замыкания от опасной точки и изменение режима генераторов, предшествовавшего аварии.

Существенным может быть отличие фактических параметров генератора от расчетных, которые обычно даются заводом только ориентировочно (расхождение до $\pm 15\%$).

Таким образом, определение поведения системы при больших аварийных возмущениях, так же как и при малых возмущениях, всегда имеет несколько условный, вероятностный характер.

Задача динамической устойчивости. В эту задачу входят анализ характера процесса и расчет всех или части параметров режима при переходе системы от одного режима к другому; собственно расчет динамического перехода от одного начального установившегося режима к другому — новому установившемуся режиму, наступающему при случайном отключении части элементов системы (отключении группы генераторов, линии передачи, нагрузки и т. д.) или отключении их после аварии (обычно короткого замыкания в каком-либо из этих элементов); определение изменений тока, частоты и других параметров режима. Расчеты во всех указанных случаях проводятся с учетом основных нелинейностей и существенных для данной задачи динамических характеристик. *Наиболее общим методом количественного исследования переходных процессов является метод численного интегрирования системы дифференциальных уравнений.* В зависимости от постановки задачи эти уравнения могут быть различными: полными (Парка—Горева), упрощенными, общими (второй метод Ляпунова). Уравнения и способ их решения должны быть выбраны так, чтобы с их помощью можно было рассчитать все существенные в данной задаче изменения параметров режима во времени и по их виду сделать заключение об устойчивости перехода системы от одного режима к другому или о динамической устойчивости системы.

Основные допущения. Предполагается, что если электромеханические переходные процессы, вызванные резкими изменениями режима электрических систем, протекают при изменениях скорости $\Delta\omega$, не превышающих 2—3% от синхронной, то вращающий момент в относительных единицах может быть принят равным мощности:

$$\omega_{*0} = 1; \quad \Delta\omega_* = 0,02; \quad M_* = \frac{P_*}{\omega_{*0} + \Delta\omega_*} = \frac{P_*}{1 + 0,02} \approx P_*$$

Кроме сделанных допущений относительно малости отклонений скорости от синхронной можно при решении поставленной задачи сделать и ряд дополнительных допущений, предполагая, что в рассматриваемом процессе не учитывается изменение во времени свободных токов, появляющихся в обмотках генератора, и принимается неизменным значение э. д. с. $E'_q \approx E'$. В большинстве случаев действие регуляторов скорости может не учитываться, а действие регуляторов возбуждения учитывается только введением условной неизменной э. д. с. Разумеется, что при стремлении к наиболее точному решению можно отказаться от упрощающих допущений и учитывать электромагнитные переходные процессы в генераторах и переходные процессы в системе возбуждения. При необходимости можно учесть переходные процессы в первичных двигателях и их регулирующих устройствах, переходные процессы в нагрузках электрических систем, волновые переходные процессы в дальних электропередачах. Однако с точки зрения инженера далеко не всегда более полное математически и учитывающее наибольшее количество факторов решение оказывается наилучшим. Для получения четких представлений оценки поведения системы при тех или иных явлениях часто целесообразно применять уравнения, более грубо описывающие процесс, но дающие наиболее быстрое и наглядное решение. Другими словами, математический аппарат (включая и точность решения) должен соответствовать поставленной технической задаче. Именно эта адекватность практических целей проводимого исследования, сделанных допущений и сложности описания явления при постановке задачи и рассмотрении ее решения определяет *техническую строгость задачи*.

Упрощенные уравнения при расчетах динамической устойчивости. Эти уравнения, как указывалось выше, целесообразно применять для ориентировочных эксплуатационных расчетов, для проектных расчетов и прогнозов развития систем. Преимуществом упрощенных уравнений будет не только большая легкость в вычислительных операциях, но и большая наглядность, облегчающая понимание происходящих явлений. Однако необходимо иметь в виду то обстоятельство, что при переходе от полных уравнений к упрощенным физика происходящих явлений отражается с определенными искажениями. Необходимо выбрать упрощения так, чтобы они не могли существенно повлиять на количественную и содержательную сторону получаемого результата. Так, основной причиной динамической неустойчивости являются резкие изменения режима или большие возмущения. Они означают существенные изменения состояния системы, т. е. такие изменения в ее схеме, числе работающих элементов или их режиме, которые приводят к быстрому и значительному изменению мощности, отдаваемой генераторами, получаемой потребителями или передаваемой по отдельным элементам системы.

Изменения мощности при всех процессах, происходящих в электрической системе, не могут совершаться мгновенно, так как они связаны с изменением запаса механической и электромагнитной энергии в отдельных элементах системы. Однако при рассмотрении электромеханических процессов с помощью упрощенных уравнений обычно принимают, что электромагнитные и тем более механические процессы, появляющиеся при изменении схемы системы, отключении какого-нибудь элемента, включении нагрузки или коротком замыкании, не препятствуют мгновенному изменению активной электрической мощности.

Допущение о мгновенном изменении электрической мощности означает отказ от учета так называемых аperiodических слагающих тока и напряжения во всех

элементах, в том числе в синхронных генераторах электрической системы. Это, в частности, означает переход от выражения (2) в табл. 6.2 для определения мощности синхронного генератора к выражению (3), а при определении токов в сетях, связывающих генераторы, — переход от дифференциальных уравнений к алгебраическим.

Таким образом, изменения мощности генератора, его тока статора, свободного

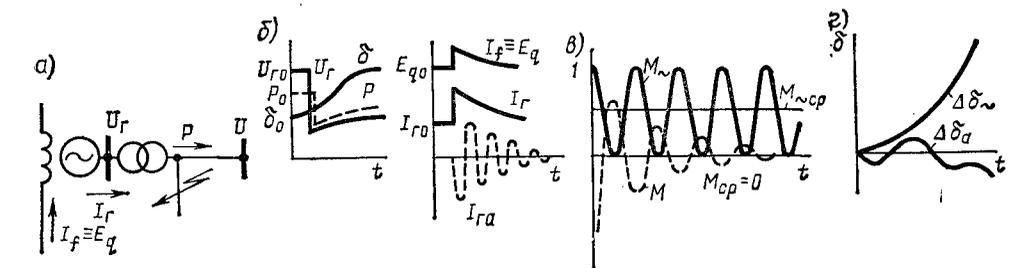


Рис. 7.4. Пример резкого изменения режима (при коротком замыкании):

a — схема системы; б — характер изменений мощности P , угла δ , напряжения U_r , тока возбуждения $I_f \equiv E_q$ и тока статора I_r (все величины отнесены к системе осей, связанных с ротором, поэтому гармонические величины представлены в виде монотонно изменяющихся отгибающих; напротив, монотонно изменяющаяся аperiodическая составляющая $I_{r.a}$, показанная штриховой линией, изображена в виде гармонической составляющей); в — изменения моментов вращения: M_{\sim} — момент, связанный с действием периодических составляющих тока статора, M — то же, но аperiodических; г — изменения угла $\Delta \delta_{\omega}$ и $\Delta \delta_{\alpha}$, вызванные независимым действием этих моментов

тока возбуждения рассматривают как происходящие мгновенно при резком возмущении (рис. 7.4).

Пренебрежение аperiodической слагающей тока статора (и соответственно периодической слагающей ротора) означает отказ от учета дополнительного пульсирующего вращающего момента, связанного с уменьшением электромагнитной энергии, запасенной ротором до короткого замыкания. Пульсирующий вращающий момент, обусловленный взаимодействием поля, связанного с аperiodической слагающей тока статора, и поля, вызванного током возбуждения, создает пульсации скольжения, влияющие на среднее скольжение ротора и, следовательно, на характер изменения угла во времени. При ускорении ротора пульсирующий момент несколько задерживает его движение (рис. 7.4).

Определенный эффект, также не отраженный в упрощенных уравнениях, дают дополнительные потери, появляющиеся в стали генератора при переходных процессах. Эти потери в схемах замещения приблизительно отражаются увеличением активных сопротивлений статора и ротора. Эквивалентное активное сопротивление статора из-за появления дополнительных потерь может увеличиваться на 15—20%, а в отдельных случаях и на 50—100%.

Пульсирующий момент, обусловленный влиянием аperiodической слагающей, и дополнительные потери качественно одинаково влияют на характер относительного движения ротора, замедляя изменение угла, оказывая некоторое тормозящее действие при сбросах нагрузки. При упрощенных расчетах, не учитывающих указанных факторов, изменение угла будет получаться более быстрым, чем в действительности.

На рис. 7.5 показан характер изменений угла, полученный при упрощенных расчетах без учета влияния аperiodической слагающей и дополнительных потерь. Приблизительно влияние этих факторов можно отразить, полагая, что на время происходящих вблизи генератора трехфазных коротких замыканий к ротору генератора прикладывается дополнительный тормозящий момент, равный 10—15% от номинального момента генератора. Иначе говоря, в процессе короткого замыкания принимается несколько уменьшенная мощность турбины.

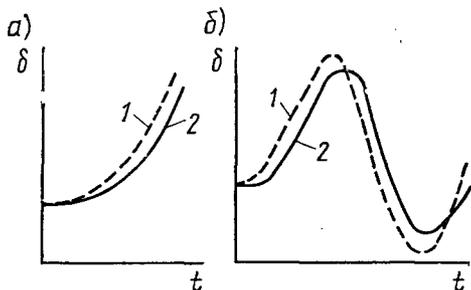


Рис. 7.5. Влияние момента, созданного дополнительными факторами (аperiodической слагающей тока статора и добавочными активными потерями в цепи статора и ротора), на характер изменения угла δ :

а — характер изменения угла $\delta = f(t)$ при выпадении генератора из синхронизма; б — то же, но в случае более удаленного к.з. (более легкой аварии); 1 и 2 — без учета и при учете дополнительных факторов соответственно

Влияние отмеченных факторов проявляется заметно только при коротких замыканиях. При изменениях нагрузки и других явлениях, не приводящих к резкому изменению тока, это влияние оказывается гораздо меньшим.

При рассмотрении переходных процессов можно не учитывать влияния указанных факторов, создавая этим дополнительный запас, компенсирующий возможные погрешности расчетов. Однако с наличием этого дополнительного запаса необходимо считаться при определении устойчивости системы и оценке ее режимов.

Резкие изменения режима, рассматриваемые в настоящей главе, могут быть весьма разнообразны, но все они при сделанных выше допущениях отражаются изменениями э. д. с., взаимных и собственных проводимостей между параллельно работающими станциями.

Например, при отключении линий электропередачи, включении (отключении) между параллельно работающими станциями нагрузок и т. д. изменяются взаимная проводимость ($Y_{12} = 1/Z_{12}$) и собственная проводимость ($Y_{11} = 1/Z_{11}$). При подключении генераторов (к ранее работавшим) меняются эквивалентная э. д. с. станции и сопротивление эквивалентного генератора.

При расчетах несимметричных режимов составляется комплексная схема замещения рассматриваемой системы (рис. 7.6, а), содержащая аварийный шунт* (x_{Δ}) (рис. 7.6, б). При различных коротких замыканиях в системе схема замещения приобретает вид, показанный на рис. 7.6, в. При этом предполагается, что на генератор действуют только вращающие моменты, обусловленные токами

* Напомним, что согласно этой схеме замещения несимметричное короткое замыкание рассматривается как симметричное, удаленное на некоторое дополнительное сопротивление x_{Δ} , называемое аварийным шунтом. Его значение при различных несимметриях равно:

— при однофазных коротких замыканиях $x_{\Delta} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$,

— при двухфазных коротких замыканиях $x_{\Delta} = x_{2\Sigma}$;

— при двухфазных коротких замыканиях на землю $x_{\Delta} = x_{2\Sigma} x_{0\Sigma} / (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})$, где $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ — результирующие сопротивления обратной и нулевой последовательностей относительно места короткого замыкания (см. рис. 7.6).

прямой последовательности, протекающими по статору генератора. Токи нулевой последовательности через генератор не протекают, замыкаясь в повышающем трансформаторе, имеющем заземленную нейтраль*.

Токи обратной последовательности создают вращающееся поле, направленное навстречу созданному вращающемуся ротором полю. Взаимодействие этих полей создает пульсирующий момент (рис. 7.7), изменяющий свой знак с частотой, в два раза большей нормальной частоты генератора. Обычно полагают, что значение этого момента равно нулю. Пульсирующий момент создает некоторое дополнительное скольжение ротора. Однако влияние этого скольжения невелико и им, как правило, пренебрегают.

Таким образом, при обычных инженерных исследованиях больших возмущений принимаются следующие общие положения:

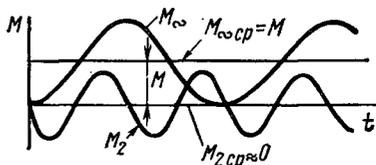
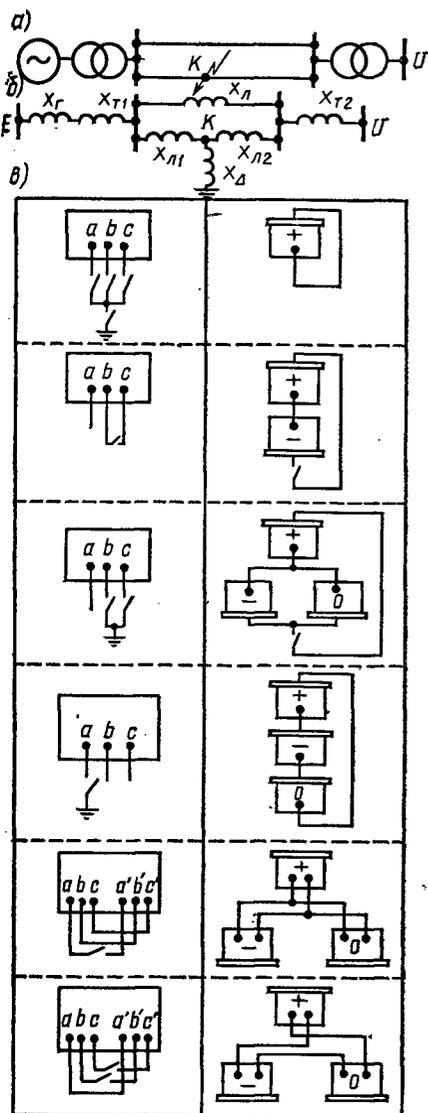


Рис. 7.7. Примерный характер изменений вращающего момента:

M — основной момент, $M_{ср} \approx 0$ — среднее значение момента, созданного токами обратной последовательности

← Рис. 7.6. Замещение системы при несимметричном коротком замыкании: $x_{л1}$, $x_{л2}$ — сопротивления участков до точки к. з.; x_{Δ} — сопротивление эквивалентного шунта, составленное из суммарных результирующих сопротивлений $x_{0\Sigma}$ и $x_{2\Sigma}$; а — исходная схема; б — схема замещения прямой последовательности; в — определены схем замещения при различных коротких замыканиях. Здесь обозначено: схема замещения прямой последовательности — «+», но обратной — «-», то же, нулевой — «0»

* Если бы токи нулевой последовательности протекали через генератор, то они все равно не создали бы вращающегося момента, так как они не образуют вращающегося поля, способного взаимодействовать с полем ротора.

1. Все изменения режима системы отражаются в изменении ее схемы, в которую вводятся новые значения собственных и взаимных сопротивлений, э. д. с. генераторов, а в некоторых случаях и их механических мощностей.

2. Электрические мощности, отдаваемые генераторами как в переходном, так и в установившемся режимах, определяются исходя из значений э. д. с. и сопротивлений; при этом приближенно принимается, что при изменении схемы системы или значений сопротивлений мгновенно изменяется электрическая мощность.

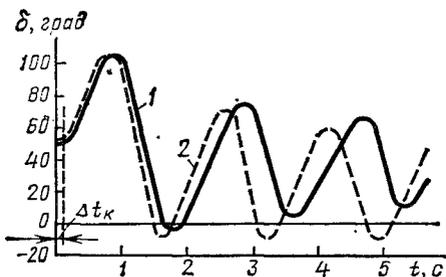


Рис. 7.8. Влияние насыщения на характер изменения угла при аварии (к. з. при длительной форсировке в послеаварийном режиме):

1 — действительное изменение; 2 — расчетное изменение без учета насыщения при приближенном учете влияния апериодической слагающей

3. Влияние апериодической составляющей тока статора на характер изменения угла δ учитывается только в некоторых случаях, каждый раз особо оговариваемых, например таких тяжелых авариях, как двух- и трехфазные короткие замыкания на землю. При этом учет дополнительного момента, обусловленного апериодической составляющей, осуществляется или приближенно уменьшением мощности турбины на 10—15%, или более точно расчетом по полным уравнениям (см. гл. 6).

4. Несимметричные режимы, в том числе короткие замыкания, при всех расчетах приводятся с помощью комплексной схемы замещения к симметричным. Предполагается, что изменения движения ротора вызваны моментами, создаваемыми только токами прямой последовательности. При этом, пренебрегая влияниями момента, обусловленного токами обратной последовательности, учитывают потери, связанные с протеканием этих токов, вводя в комплексную схему замещения активные сопротивления обратной и нулевой последовательностей.

5. Изменения сопротивлений генераторов и трансформаторов, обусловленные насыщением стали, в расчетах не учитываются или учитываются приближенно уменьшением замещающего сопротивления, и в этом смысле система предполагается ненасыщенной — линейной.

Исследования влияния насыщения в расчетах электромеханических переходных процессов показали, что учет насыщения, т. е. нелинейности характеристик холостого хода и непостоянства реактивных сопротивлений, в некоторых случаях может вызвать довольно заметные погрешности: токи и напряжения могут получиться несколько преувеличенными, а периоды качаний ротора — преуменьшенными. Значения угла, очень близкие к истинным в первых циклах колебаний, затем стремятся к несколько меньшему установившемуся значению. Кривые, изображенные на рис. 7.8, показывают изменение указанных величин в действительности и при упрощенном расчете, т. е. без учета насыщения, и при приближенном учете апериодической слагающей.

Из рассмотрения соотношения рис. 7.8 следует, что для выяснения изменений угла δ в первом цикле качаний нет надобности учитывать насыщение. Специальные исследования показали, что даже при значительной и продолжительной форсировке возбуждения генератора насыщение не оказывает заметного влияния на общий характер изменения угла, тока или напряжения. В тех случаях,

когда при значительной и продолжительной форсировке возбуждения рассматривается процесс, состоящий из нескольких циклов изменений угла δ , учет насыщения необходим. В приближенных расчетах учет насыщения можно отражать некоторым уменьшением реактивного сопротивления, замещающего генератор. Ориентировочно сопротивление $x'_{dнас}$, замещающее генератор, должно приниматься равным $(0,6 \div 0,8)x'_d$, если расчет ведется по постоянству э. д. с., приложенной за $x'_{dнас}$. При расчетах по постоянству продольной слагающей этой э. д. с. можно принять $x'_{днас} = (0,8 \div 0,9)x'_d$.

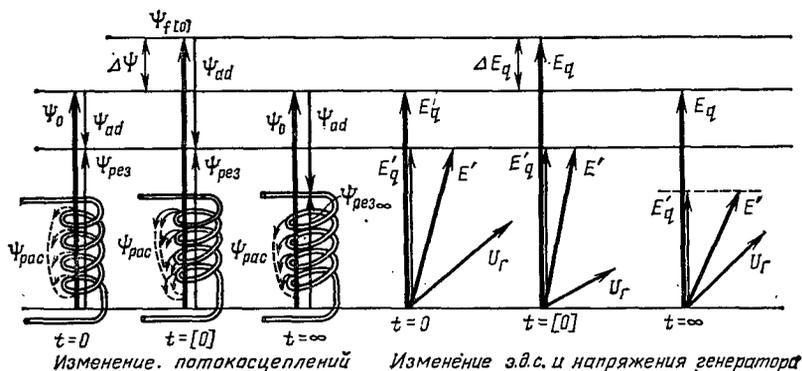


Рис. 7.9. Изменение потокоцеплений и соответствующее им изменение э. д. с. и напряжения генератора:

$t=0$ — нормальный режим; $t=[0]$ — момент коммутации; $t=\infty$ — установившийся режим; $\Psi_{f(t0)}$ — потокоцепление, отвечающее полному возбуждению; Ψ_{ad} — потокоцепление реакции якоря; $\Psi_{рез}$ — потокоцепление, результирующее по продольной оси; $\Psi_{рас}$ — потокоцепление рассеяния

Вопросы учета насыщения подробно в настоящей книге рассматриваться не будут. В тех случаях, когда из расчетов переходного процесса требуется определить ток в обмотке возбуждения, учет насыщения обязателен.

6. Пренебрежение аperiodическим током статора и периодическим током ротора позволяет принять, что при коммутации в цепи статора (например, при уменьшении напряжения U_r на рис. 7.9) мгновенно (при $t = [t_0]$) изменяются потокоцепления Ψ_{ad} и $\Psi = f[0]$ и соответственно э. д. с. $E_q[0]$. При этом в соответствии с известным законом инерционности потокоцепления короткозамкнутого контура в момент $t = [t_0]$ сохраняются неизменными потокоцепление $\Psi_{рез}$ и создаваемая им э. д. с. E'_q (рис. 7.9, 7.10). Далее эти э. д. с. изменяются, как это показано на рис. 7.10, 7.11.

7. Простейшие расчеты переходных процессов ведутся исходя из условия неизменности результирующего потокоцепления обмотки возбуждения в продольной оси во время всего процесса, т. е. исходя из постоянства э. д. с. E'_q . Основанием к этому допущению служит упомянутый выше закон электромагнитной инерции*, согласно которому $E'_q \equiv \Psi_{рез}$ остается в момент возмущения ($t =$

* Закон электромагнитной инерции и объяснение характера изменения э. д. с. E_q , E'_q приводились ранее [2].

$= [0]$ неизменным ($\Psi_{рез} = \text{const}$), а далее медленно изменяется, переходя к значению $\Psi_{рез\infty}$ при $t = \infty$ (см. рис. 7.9, 7.10).

Величина E'_q , пропорциональная результирующему потокосцеплению $\Psi_{рез}$ с обмоткой возбуждения, оставаясь неизменной в момент любой коммутации (например, короткого замыкания в сети), изменяется далее относительно медленно. Электродвижущая сила E_q пропорциональна полному току возбуждения, ко-

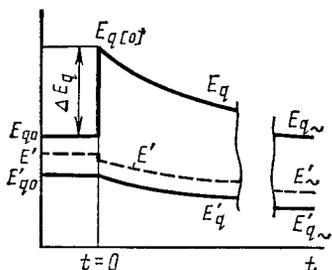


Рис. 7.10. Изменение э. д. с. (без регулирования возбуждения)

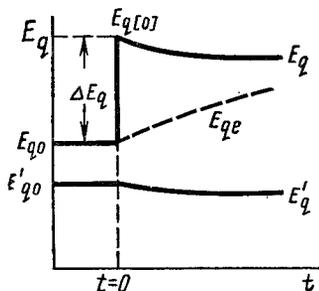


Рис. 7.11. Изменение э. д. с. (при регулировании возбуждения)

торый протекает по ротору. В полный ток входят вынужденные I_{fe} и свободные ΔI_f токи. Э. д. с. E_q меняется в момент коммутации скачком (рис. 7.11). Регу-

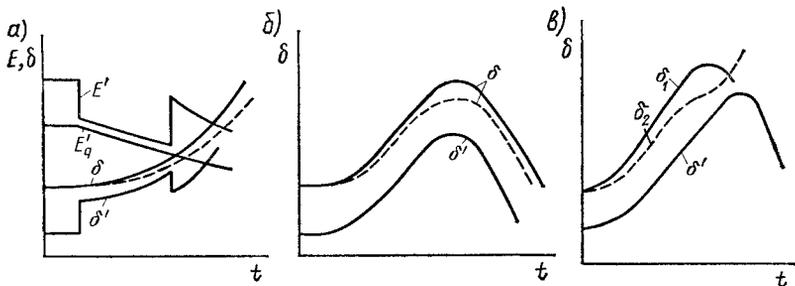


Рис. 7.12. Сопоставление результатов расчетов, проведенных при $E' = \text{const}$ и $E'_q = \text{const}$, с осциллограммами процесса:

а — тяжелая авария, сопровождающаяся непрерывным ростом угла — выпадением из синхронизма; б — качания; в — случай переходного процесса в системе, находящейся на пределе устойчивости; E' и E'_q — действительное изменение э. д. с.; δ — изменение угла, определенное расчетом при $E' = \text{const}$ (сплошная линия); δ — то же, при $E'_q = \text{const}$ (штриховой линией показано изменение угла δ , имеющее место в действительности, т. е. определенное из опыта)

лятор возбуждения после аварийного возмущения, обычно сопровождающегося понижением напряжения на шинах генератора U_r , увеличивает ток возбуждения I_{fe} , стремясь поддержать напряжение U_r неизменным. Это приводит к стабилизации E'_q на еще большем интервале времени (рис. 7.12). Так как все генераторы энергосистем, как правило, снабжены регуляторами возбуждения, то при

предварительном анализе характера больших возмущений и грубых расчетах динамической устойчивости с полным основанием можно считать $E'_q = \text{const}$.

8. Качественный анализ переходных процессов можно проводить при еще более грубом допущении, принимая изменяющуюся в момент коммутации (см. рис. 7.9 и 7.12, а) э. д. с. E' за постоянную величину: $E' \approx \text{const}$.

На рис. 7.12, б показаны типичные изменения угла при качаниях, приближающихся к пределу устойчивости. Изменение δ' дает при этом достаточное представление о поведении исследуемой системы. Однако вблизи предела устойчивости (рис. 7.12, в) расчет δ' исходя из условия $E' = \text{const}$ обычно дает качественно неверный результат (устойчивость вместо неустойчивости), впрочем в этом случае и более точные расчеты становятся не вполне определенными, давая различные результаты даже при небольшой вариации исходных параметров (кривые δ_1 и δ_2 на рис. 7.12, в).

При рассмотрении переходных процессов в большинстве случаев принимается допущение, что *мощность и вращающий момент, выраженные в относительных единицах, равны между собой*. Это означает предположение, что *изменение скорости на протяжении всего времени рассматриваемого процесса значительно меньше, чем синхронная скорость*, но оно в то же время настолько значительно, что генератор может выпасть из синхронизма. Разумеется, что это облегчающее анализ допущение не обязательно и расчет можно вести, определяя вращающий момент как $M = P/(\omega_0 + d\delta/dt)$. Так как $d\delta/dt$ заранее не известно, то необходимо применять последовательные приближения и вести расчет последовательными интервалами.

К рассматриваемой выше группе явлений:

— относятся процессы, связанные с большими качаниями генераторов или их выпадениями из синхронизма, но при этом составленные уравнения будут справедливы только для того времени, пока генератор явно не выпал из синхронизма и его относительная скорость $\Delta\omega$ не стала соизмеримой с синхронной скоростью;

— не относятся процессы, происходящие после выпадения из синхронизма (при асинхронном ходе), при разгоне генератора от неподвижного состояния до синхронной скорости, процессы в останавливающемся генераторе или выбегающем под действием избыточного вращающего момента. Они рассматриваются с помощью других методов, полагающих, что избытки мощности и вращающего момента численно не равны.

§ 7.2. ЧИСЛОВОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

В гл. 6 было указано, что общим методом решения любых задач, требующих выявления характера относительного движения ротора одного или нескольких генераторов, являются хорошо разработанные в математике методы численного интегрирования дифференциальных уравнений. В практике инженерных расчетов часто пользуются упрощенными их модификациями, например методом последовательных интервалов*. Этот метод, вполне удовлетворительный при обыч-

* Метод последовательных интервалов, применяемый в электроэнергетических задачах, дает для первых циклов качаний практически ту же точность вычислений, что и метод численного интегрирования по Рунге—Кутту (подробнее о точности численного интегрирования см. П2).

ных инженерных задачах, в которых можно ограничиться общей характеристикой процесса, имеет ряд недостатков, снимаемых при использовании современных вычислительных машин. Так, можно предусматривать контроль погрешности и автоматическое изменение шага интегрирования при понижении точности ниже заданной. Овладев простым методом, инженер может освоить и более совершенные методы расчета.

Элементарное обоснование метода последовательных интервалов. Этот метод применяется непосредственно для исследования простейшей электриче-



Рис. 7.13. Изменение параметров режима генератора после возмущения в системе (к. з.): а — зависимость моментов от угла и времени; 1 — характеристика электромагнитного момента генератора, полученная при изменяющейся во времени э. д. с. и выраженная поверхностью $M = \psi(\delta, t)$; 2 — характеристика механического момента $M_{\text{мех}} = \varphi(t)$; б — приращение мощности при изменении угла; в — изменение ускорения $\alpha = f(t)$; $\alpha_{(0)}$ — ускорение в начале первого интервала; $\alpha_{(1)}$ — то же, в конце первого и начале второго интервалов; $\alpha_{(2)}$ — то же, в конце второго и начале третьего интервалов; г — изменение угла $\delta = f(t)$; OAA' — изменение угла при $\alpha = \alpha_0 = \text{const}$; OA — то же, за первый интервал — приращение $\Delta\delta_{(1)}$

ской системы. Уравнение относительного движения синхронной машины при небалансе момента турбины и электромагнитного момента можно записать в следующем виде (гл. 4):

$$\alpha = 360 f_0 \Delta M / T_J = d^2 \delta / dt^2,$$

где $\Delta M = M_{\text{мех}} - M$.

При этом не делается каких-либо ограничений в отношении выражения моментов $M_{\text{мех}}$ и M , которые могут зависеть не только от изменений угла δ (рис. 7.13). Таким образом, имеется возможность распространения получаемых расчетных формул на любые сколь угодно сложные системы. Решение записанного выше дифференциального уравнения означает определение зависимости $\delta = f(t)$.

При расчетах относительного движения, протекшего со скоростью, много меньшей синхронной, упрощенно принимаем, что мощность численно равна моменту*:

$$\alpha = 360 f_0 \Delta P / T_J. \quad (7.1)$$

* В этом уравнении время и угол выражены в именованных единицах: $[t] = [T_J] = \text{с}$; $[\delta] = \text{град}$, тогда $[\alpha] = \text{град/с}^2$, $[f_0] = \text{Гц}$. Значение момента (или мощности) подставляется в это уравнение в относительных единицах.

Обычно такое допущение вызывает лишь незначительную погрешность. Однако если

$$\Delta\omega_* = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} 100 \geq 2,0 \div 3,0 \%,$$

то в некоторых случаях (при исследовании систем вблизи границы устойчивости, малых инерциях машин и т. д.), когда погрешность может оказаться существенной, вместо (7.1) надо решать уравнение

$$\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \left(360 f_0 \frac{\Delta P}{1 + \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{\omega_0}} \right) / T_J. \quad (7.2)$$

Обосновывая метод последовательных интервалов, предполагаем, что поставленная задача уже решена и подлежащие определению зависимости построены на рис. 7.13, б, в, г. Разобьем весь процесс на малые интервалы времени Δt и будем рассматривать его последовательно от интервала к интервалу. Выбирая одинаковые интервалы по времени (рис. 7.13, в), очевидно, будем иметь неодинаковые интервалы по углу (рис. 7.13, б). Каждый интервал может характеризоваться некоторыми начальными и конечными значениями угла, скорости, ускорения и средними значениями скорости и ускорения, действующими в данном интервале. Начальные значения этих величин в последующих интервалах будут равны конечным в предыдущих. Выберем интервал настолько малым, чтобы на протяжении его можно было ускорение считать неизменным. Практически при расчетах современных мощных систем выбирается интервал $\Delta t = 0,02 \div 0,05$ с. Наиболее точные результаты, разумеется, получаются при меньшем интервале (рис. 7.14), который должен выбираться тем меньше, чем меньше постоянные времени. При меньшем интервале погрешность расчета на каждом интервале будет меньше, но, так как число интервалов, необходимое для решения, возрастет, увеличится также длительность расчета и погрешность округления (см. П2).

В первом интервале начальная скорость равна нулю и при постоянном ускорении α_0 (см. рис. 7.13, в) изменение угла будет происходить по закону равномерного ускоренного движения. Приращение угла к концу интервала составит

$$\Delta\delta_{(1)} = 0,5 \alpha_{(0)} \Delta t^2 = 0,5 \cdot 360 f_0 (\Delta P_{(0)} / T_J) \Delta t^2. \quad (7.3)$$

Мощность и ее приращение ΔP изменяются при изменениях угла и времени. Зная, что время изменилось на Δt , а угол — на $\delta_{(1)}$, можно определить $\Delta P_{(1)}$, т. е. небаланс мощности в конце первого интервала, или, что одно и то же, в начале второго. По приращению мощности можно определить и ускорение:

$$\alpha_{(1)} = (\Delta P_{(1)} / T_J) 360 f_0.$$

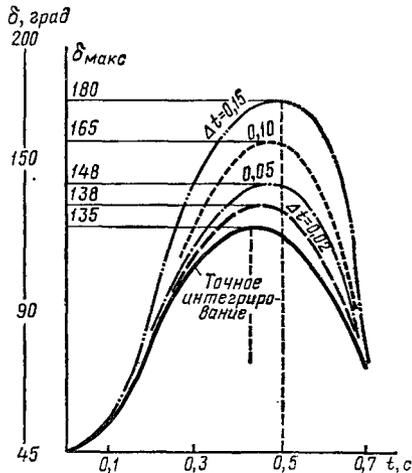


Рис. 7.14. Влияние расчетного интервала на максимальное значение угла δ в первом качении

Во втором интервале изменение угла зависит от угловой скорости $\Delta\omega_{(1)}$, которую получил ротор в первом интервале, и ускорения $\alpha_{(1)}$, действующего в начале второго интервала, обусловленного избыточной мощностью $\Delta P_{(1)}$. Приращение угла во втором интервале

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\omega_{(1)} \Delta t + 0,5 \alpha_{(1)} \Delta t^2. \quad (7.4)$$

Значение скорости на протяжении первого интервала не постоянно. Определим ее приращение по среднему ускорению:

$$\Delta\omega_{(1)} = 0,5 (\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}) \Delta t.$$

Подставив это значение в (7.4), будем иметь

$$\Delta\delta_{(2)} = 0,5 \alpha_{(0)} \Delta t^2 + \alpha_{(1)} \Delta t^2,$$

или с учетом (7.3)

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + \alpha_{(1)} \Delta t^2.$$

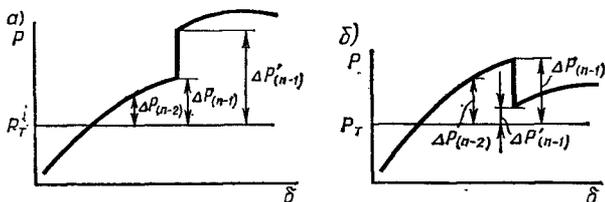


Рис. 7.15. Изменение режима системы скачком:
а, б — увеличение и уменьшение мощности соответственно

Аналогично можно получить выражение для приращения угла в третьем, четвертом и любом последующем интервале. Выражая ускорения через мощности и переходя к выражению времени (и постоянной инерции) в секундах, а угла в градусах, будем иметь

$$\left. \begin{aligned} \Delta\delta_{(1)} &= K 0,5 \Delta P_{(0)}; & \Delta\delta_{(2)} &= \Delta\delta_{(1)} + K \Delta P_{(1)}; \\ \Delta\delta_{(n)} &+ \Delta\delta_{(n-1)} + K \Delta P_{(n-1)}, \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

где $K = (360 f_0 / T_J) \Delta t^2$.

При дальнейшем изменении режима системы, например отключении части генераторов, повреждении линии и т. п., когда избыток мощности, составляющей ΔP_{n-1} , внезапно изменяется до значения $\Delta P'_{(n-1)}$ (рис. 7.15), приращение угла в n -м интервале

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + K 0,5 (\Delta P_{(n-1)} + \Delta P'_{(n-1)}). \quad (7.6)$$

Изменение интервала. В процессе расчета переходного процесса иногда удобно изменить расчетный интервал Δt . Например, на тех участках процесса, где происходят резкие изменения каких-либо параметров режима, целесообразно выбрать меньший интервал; там же, где изменение заведомо имеет монотонный характер, — перейти на больший интервал. Приращение угла на измененном интервале

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} K_{\Delta} + K [\Delta P_{(n-2)} (1 - K_{\Delta}) + \Delta P_{(n-1)} (1 + 3K_{\Delta})] / (4K_{\Delta}), \quad (7.7)$$

где $K_{\Delta} = \Delta t$ (новое) / Δt (старое).

В случае изменения расчетного интервала одновременно с изменением режима (что иногда целесообразно) формула (7.7) видоизменяется:

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} K_{\Delta} + K [\Delta P_{(n-2)} (1 - K_{\Delta}) + \Delta P_{(n-1)} (1 + K_{\Delta}) + 2\Delta P'_{(n-1)} K_{\Delta}] / (4K_{\Delta}). \quad (7.8)$$

Значения мощностей P и ΔP , фигурирующие в методе последовательных интервалов, определяются в соответствии со схемой замещения рассматриваемой системы и допущениями относительно протекания переходных электромагнитных процессов. При упрощенном подходе, когда ни электромагнитные переходные процессы, ни действие регуляторов возбуждения не учитываются, мощность определяется при $E'_q = \text{const}$.

При учете переходных электромагнитных процессов, возникающих из-за изменения параметров системы или действия устройств автоматического регулирования возбуждения генераторов, к дифференциальному уравнению электро-механического состояния каждой станции рассматриваемой системы добавляются дифференциальные уравнения ее электромагнитного состояния, дающие соотношения между переходной э. д. с. E'_q и э. д. с. E_q или E_Q и смещением векторов этих э. д. с. по отношению к э. д. с. других станций системы (углы $\delta_{12}, \dots, \delta_{1n}$).

Расчеты при учете переходных электромагнитных процессов. Пусть станция связана сетью с шинами неизменного напряжения. В отношении сложности сети, связывающей генератор и приемную систему, не будем делать ограничений, полагая, что в ней может быть любое число нагрузок, представленных постоянными полными сопротивлениями $Z_{н1}, \dots, Z_{нn}$, и любое число линий электропередачи и трансформаторов, представленных соответствующими схемами замещения.

Действие регуляторов возбуждения отразим упрощенно, полагая, что *изменение тока возбуждения, обусловленное действием регулятора, происходит по экспоненте и проявляется с некоторым запаздыванием во времени после короткого замыкания*. В расчетах изменения режима, связанные с возникновением короткого замыкания и его отключением, будут характеризоваться изменением собственных и взаимных сопротивлений, вызывающим изменения тока статора и э. д. с. E_q . Согласно сделанным ранее допущениям, эти величины изменяются скачком.

На основании векторной диаграммы для машины с гладким ротором (см. гл. 4) запишем:

$$E_q = E'_q + I_d(x_d - x'_d); \quad (7.9)$$

$$I_d = E_q y_{11} \cos \alpha_{11} - U y_{12} \cos (\delta - \alpha_{12}). \quad (7.10)$$

Подставив (7.10) в (7.9), получим

$$E_q = [E'_q - U y_{12} (x_d - x'_d) \cos (\delta - \alpha_{12})] / [1 - y_{11} (x_d - x'_d) \cos \alpha_{11}]. \quad (7.11)$$

Уравнение (7.11), связывающее э. д. с. E_q , E'_q и угол δ , справедливо в любой момент процесса. Дифференциальное уравнение*, связывающее изменения э. д. с. E'_q , E_q и E_{qe} , вызванную действием возбудителя (э. д. с. установившегося режима), записывается в виде

$$E_{qe} = E_q + T_{d0} dE'_q/dt. \quad (7.12)$$

Решенное в конечных разностях уравнение (7.12) позволяет найти изменение э. д. с. E'_q за интервал времени Δt при расчете методом последовательных интервалов:

$$\Delta E'_q = (E_{qe} - E_q) \Delta t / T_{d0}. \quad (7.13)$$

* Это дифференциальное уравнение известно [2, 4].

При этом значения E_{qe} берутся средними в заданном интервале времени и определяются по кривым, соответствующим заданному изменению напряжения возбудителя.

За рассматриваемый интервал времени Δt изменяются также э. д. с. E_q и угол δ . Изменения угла подсчитываются способом, описанным ранее.

Э. д. с. E_q в течение интервала Δt изменяется в связи с затуханием свободных токов, возникших в момент нарушения режима, и появлением токов, наведенных при изменении угла. Значение E_q в начале следующего интервала времени определяется согласно (7.11). При этом значения э. д. с. E'_q и угла δ , входящие в это уравнение, должны быть взяты соответствующими началу интервала.

Алгоритм расчета переходного процесса. Рассмотрим алгоритм расчета переходного процесса для неявнополюсной машины с простейшим учетом автоматического регулирования возбуждения. Расчет проводится в следующем порядке:

1. В исходном режиме определяются значения мощности P_0 , угла δ_0 , переходной э. д. с. E'_{q0} , э. д. с. E_{q0} и соответствующее ей напряжение возбудителя U_f .

2. Определяются собственные и взаимные проводимости для аварийного и послеаварийного режимов, причем для генераторов в схеме замещения берется синхронное сопротивление.

3. Согласно характеристикам регуляторов и возбудителей строятся зависимости изменения напряжения на зажимах возбудителя U_f и соответствующие значения э. д. с. E_{qe} (кривые различаются лишь масштабами). Эти кривые должны быть построены двух видов: для условий, когда напряжение на шинах генератора U_r (или в другой точке системы, в которой подключен регулятор возбуждения) меньше нормального (E_{qe} возрастает по экспоненте), и для условий, когда напряжение U_r равно или больше нормального (E_{qe} падает). Таким образом, для определения U_f и E_{qe} необходимо знать напряжение U_r , которое вычисляется в процессе расчета. Если интересуются только первым вылетом угла, проверяя наличие устойчивости системы, то часто не контролируют U_r , полагая, что все время при коротком замыкании и после его отключения происходит увеличение E_{qe} . Разумеется, такие расчеты имеют несколько условный характер.

4. Из уравнения (7.11) определяются значения э. д. с. E_q для первого момента нарушения режима работы. При этом значения E'_q и δ принимают теми же, что и в исходном (нормальном) режиме ($E'_q = E'_{q0}$; $\delta = \delta_0$), а значения собственных и взаимных проводимостей — соответствующими схеме аварийного режима:

$$E_{q(0)} = [E'_{q0} - Uy_{12}(x_d - x'_d) \cos(\delta_0 - \alpha_{12})] / [1 - y_{11}(x_d - x'_d) \cos \alpha_{11}].$$

5. Согласно (7.13) находится изменение переходной э. д. с. в течение первого расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(1)} = (E_{qe(1)} - E_{q(0)}) \Delta t / T_{d0},$$

где $E_{qe(1)}$ — среднее значение E_{qe} в данном интервале времени.

При отсутствии регулирования возбуждения для всех интервалов берется $E_{qe} = E_{q0}$.

6. Определяется значение E'_q в конце данного и начале следующего интервала:

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)}.$$

7. Определяется активная мощность генератора в начале данного интервала:

$$P_{(0)} = E_{q(0)}^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_{q(0)} U y_{12} \sin (\delta_0 - \alpha_{12}).$$

8. Находится небаланс между механической и электрической мощностями генератора $\Delta P_{(0)}$. При этом можно не учитывать действия регуляторов скорости, полагая, что при малых изменениях скорости действие их несущественно. Однако при заметном изменении скорости (больше 1,5—2%) и длительном переходном процессе необходимо учесть изменения мощности под действием регулятора скорости:

$$\Delta P_{p(n)} = \frac{P_{\text{т.ном}}}{\sigma T_s} \frac{\Delta \delta_{(n)}}{360 f_0} \left(1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_0} \right) - \frac{\Delta t \beta}{T_s} P_{p(n-1)} \frac{1 + \Delta \delta_{(n)} / (\Delta t \omega_0)}{1 + \Delta \delta_{(n-1)} / (\Delta t \omega_0)}. \quad (7.14)$$

Уравнение (7.14) определяет изменение (приращение) мощности турбины* в n -м интервале времени под действием системы регулирования в зависимости от мощности на предыдущем интервале**:

$$\frac{\Delta P_{p(n)}}{\Delta t [1 + \Delta \delta_{(n)} / (\Delta t \omega_0)]} = \frac{P_{\text{т.ном}} \Delta \delta_{(n)}}{\sigma T_s 360 f_0 \Delta t} - \frac{\beta P_{p(n \text{ ср})}}{T_s [1 + \Delta \delta_{(n \text{ ср})} / (\Delta t \omega_0)]}, \quad (7.15)$$

где

$$\frac{P_{p(n \text{ ср})}}{1 + \Delta \delta_{(n \text{ ср})} / (\Delta t \omega_0)} = \frac{P_{p(n-1)}}{1 + \Delta \delta_{(n-1)} / (\Delta t \omega_0)} + \frac{\Delta P_{p(n)}}{2 [1 + \Delta \delta_{(n)} / (\Delta t \omega_0)]}. \quad (7.16)$$

При достаточно малых значениях интервалов времени уточнения, вносимые при расчете по (7.16), невелики.

Отметим, что и при более полном учете механических процессов, отражении большего числа влияющих факторов, чем в приближенных формулах (7.14) и (7.16), метод расчета остается прежним.

9. Определяется приращение угла в данном интервале в соответствии с (7.5):

— для первого интервала

$$\Delta \delta_{(1)} = K \Delta P_0 / 2;$$

— для последующих интервалов

$$\Delta \delta_{(n)} = \Delta \delta_{(n-1)} + K \Delta P_{(n-1)},$$

где $K = 360 f_0 \Delta t^2 / T_J$;

— для интервала, в начале которого отключается авария, согласно (7.6),

$$\Delta \delta_{(n)} = \Delta \delta_{(n-1)} + K 0,5 (\Delta P_{(n-1)} + \Delta P'_{(n-1)}),$$

* При вычислении приращения мощности турбины можно учитывать не только изменение режима за предыдущий интервал, но также и среднее изменение мощности в рассматриваемом n -м интервале времени, уточнив этим расчет по уравнению (7.14).

** В уравнении (7.14) T_s — эквивалентная постоянная, отражающая эффект инерции энергоносителя (учет паровых объемов и т. д.), численно ее значения могут быть различными в зависимости от конструкции агрегата, регулятора, условий регулирования (от 0,5 до 5—8 с).

где $\Delta P_{(n-1)}$ — избыток мощности до отключения аварии; $\Delta P'_{(n-1)}$ — то же, после отключения аварии.

10. Находится угол в начале следующего интервала времени:

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}.$$

Таким образом, получают значения э. д. с. за переходным реактивным сопротивлением E'_q и угла δ в начале следующего интервала. По этим значениям можно вновь найти э. д. с. E_q (см. выше) и повторить расчет для нового интервала. Все формулы, за исключением формулы изменения угла, остаются неизменными, меняется лишь индекс интервала. Уравнения изменения угла в последующих интервалах (за исключением первого) несколько отличны от указанных. Вид остальных уравнений при отключении аварии остается неизменным, меняются лишь собственные и взаимные сопротивления.

Таблица 7.1

Номер операции	Расчетные выражения	Программа основных вычислений	Номер операции	Расчетные выражения	Программа основных вычислений
1	Номер интервала	1 пр + 1	10	E_{qe} по характеристике $\varphi(t)$ или по дополнительной программе	E_{qe}
2	t — время, с	2 пр + Δt			
3	δ — угол, град	3 пр + 19 пр	11	$E_{qe} - E_q$	«10» — «9»
4	E'_q	4 пр — 12 пр	12	$\Delta E'_q = K_t (E_{qe} - E_q)$	$K_t \times$ «11»
5	$\delta - \alpha_{12}$	«3» — α_{12}	13	$\sin(\delta - \alpha_{12})$	sin «5»
6	$\cos(\delta - \alpha_{12})$	cos «5»	14	$E_q C \sin(\delta - \alpha_{12})$	$C \times$ «9» \times «13»
7	$A \cos(\delta - \alpha_{12})$	$A \times$ «6»	15	$E_q^2 D$	[«9»] ² $\times D$
8	$E'_q - A \cos(\delta - \alpha_{12})$	«4» — «7»	16	$P_1 = E_q C \sin(\delta - \alpha_{12}) + E_q^2 D$	«14» + «15»
9	$E_q = [E'_q - A \cos(\delta - \alpha_{12})] B$	$B \times$ «8»	17	$\Delta P = P_T - P_1$	$P_T -$ «16»
			18	$K \Delta P$	$K \times$ «17»
			19	$\Delta \delta$	«19» пр + «18»

Примечания: 1. Коэффициенты имеют следующие выражения:

$$A = U(x_d - x'_d) y_{12}, \quad B = 1/[1 - y_{11}(x_d - x'_d) \cos \alpha_{11}];$$

$$K_t = \Delta t / T_{d0}; \quad C = U y_{12};$$

$$K = 18000 \Delta t^2 / T_j; \quad D = y_{11} \sin \alpha_{11};$$

$P_T = P_{10}$ по характеристике $\psi(d\delta/dt)$ или по дополнительной подпрограмме.

2. Явнополюсная машина с простейшим автоматическим регулированием возбуждения. При неодинаковых синхронных сопротивлениях в продольной и поперечной осях расчет усложняется. В данном случае машину нельзя представить эквивалентной схемой замещения. Обычно вместо действительной машины рассматривают фиктивную с одинаковыми в продольной и поперечной осях сопротивлениями, равными поперечному сопротивлению x_q . Э. д. с. такой фиктивной машины будет представлена вектором E_Q , который совпадает с направлением E_q . Тогда можно определить собственные и взаимные сопротивления и зависимости между токами и напряжениями так же, как это было сделано для неявнополюсной машины.

Расчеты по выявлению характера переходного процесса очень трудоемки и содержат большое число одинаковых операций. Поэтому для их типизации записанный выше словесный порядок расчета обычно излагается в виде алгоритма (программы), содержащего расчетные выражения и порядок операций, предусматривающих автоматизацию расчета (табл. 7.1). Так, в таблице указано, над числами каких строк должны быть проведены те или иные операции. Буквы «пр» указывают, что число должно быть взято из соответствующей строки предшествующего интервала. Коэффициенты, не изменяющиеся в расчете данного режима (например, аварийный, послеаварийный), подсчитываются по приведенным формулам в ходе расчета. Заметим, что таблица является исходной при составлении программы для ЦВМ.

Уточнение учета переходных процессов в регуляторах скорости и возбуждения. Постоянные времени отдельных элементов регулятора намного меньше постоянных времени основных элементов, участвующих в переходном процессе ($T_{до}$, T_s и др.). Малые значения постоянных времени регулирующих устройств требуют уменьшения расчетного интервала времени. Расчет переходных процессов в сложной системе, проводимый с учетом действия регуляторов, установленных на каждой станции, очень трудоемок. Чтобы упростить его, не допуская понижения точности и не переходя к слишком мелким интервалам, участки характеристик регулятора можно заменить линейными.

Система уравнения переходного процесса в регуляторе обычно может быть записана в виде

$$D(p)y = F(p)x,$$

где $D(p)$ и $F(p)$ — функции оператора p ; y , x — операторные величины на выходе и входе соответственно.

Считая $F(p)x = a$ постоянным в каждом расчетном интервале, представим правую часть (7.17) ступенчатой функцией так, как это показано на рис. 7.16. Тогда для временной функции $U(t)$ на выходе регулятора в каждом интервале будем иметь

$$U_n = U_0 + \Delta a_1 g(t)_{t=n\Delta t} + \Delta a_2 g(t)_{t=2\Delta t} + \dots + \Delta a_{n-1} g(t)_{t=(n-1)\Delta t} + \Delta a_n g(t)_{t=n\Delta t}.$$

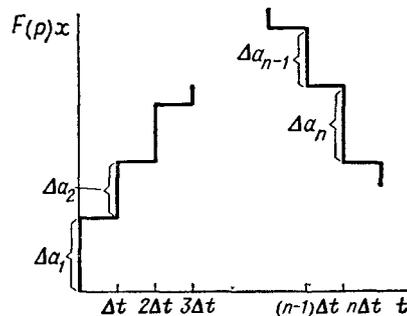


Рис. 7.16. Аппроксимация функции $F(p)x$ ступенчатой характеристикой

(7.17)

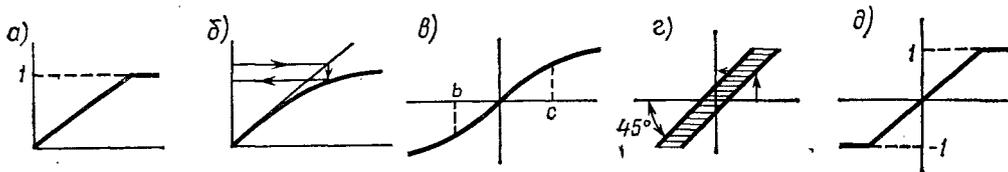


Рис. 7.17. Нелинейные характеристики:

а — линейная с ограничением; б — нелинейная типа насыщения; в — нелинейная с линейными (b, c) участком; г — логист; д — линейная с ограничениями

Здесь $g(t)$ отображает во времени операторное соотношение

$$D(p)y = 1. \quad (7.18)$$

Характеристика $g(t)$, вычисленная предварительно, позволяет далее определить координату y_n в каждом интервале.

При $D(p) = Tp + 1$ решение уравнения (7.18) имеет вид

$$g(t) = (1 - e^{-t/T}).$$

В этом случае для определения выходной величины регулятора вместо выражения (7.17) можно записать выражение

$$U_n = U_{n-1} + (a_n - U_{n-1})(1 - e^{-\Delta t/T}), \quad (7.19)$$

где
$$a_n = U_0 + \sum_{i=1}^n \Delta a_i.$$

Выражения типа (7.17) и (7.18) справедливы лишь для линейных участков характеристик элементов регуляторов. В системах регулирования могут быть различные нелинейности

(характеристики возбудителя, ограничения открытия окон золотника, люфты и т. д.). Некоторые из них показаны на рис. 7.17. Иногда, чтобы отразить нелинейность в управлении переходного процесса, вводят коэффициент усиления, определенный по линейной части характеристики. Однако получаемые на выходе величины корректируют с учетом нелинейности. В большинстве случаев для учета нелинейности приходится изменять уравнения переходного процесса.

Контроль расчета, проведенного последовательными интервалами, способом площадей. Применение способа площадей во многих практически важных случаях ограничено. Так, например, при расчетах простых систем («станция — шины»), проводимых с учетом изменения реакции якоря (E'_q — переменное) и действия регулирующих устройств или с учетом демпфирования, а также при расчетах сложных систем, состоящих более чем из двух станций, способ площадей как самостоятельный расчетный прием неприменим, так как э. д. с. или механические мощности непостоянны и изменения их заранее неизвестны. Однако способ площадей и в этих случаях может использоваться как вспомогательный для анализа или проверки произведенных расчетов.

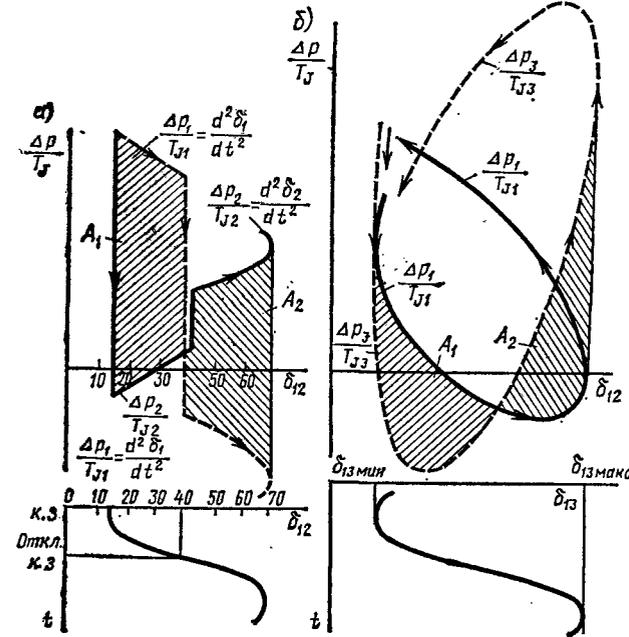


Рис. 7.18. Применение способа площадей для проверки расчетов, устанавливающих зависимость $\delta = f(t)$:

а — площадки ускорения и торможения в первом полупериоде колебаний при к.з. и его отключении; б — площадки ускорения и торможения, построенные для проверки правильности расчета относительного ускорения первой и третьей станций в сложной системе; представлен случай изменения угла от минимального до максимального значения

Применение способа площадей для контроля расчетов. В каждом полупериоде изменений относительного угла $\delta = f(t)$, т. е. в процессе изменения угла от минимума до максимума, если система рассматривается как консервативная, то

$$\int \Delta P d\delta = 0$$

или

$$\int \Delta P_{\text{уск}} d\delta = \int \Delta P_{\text{торм}} d\delta.$$

На рис. 7.18 представлены зависимости для двух случаев. Случай, изображенный на рис. 7.18, а, относится к системе, состоящей из двух станций, в которой произошло короткое замыкание. После отключения его, при $\delta_{12} = 40^\circ$, ускорение сменяется торможением. На рис. 7.18, б показаны аналогичные зависимости, построенные для полуцикла качаний ротора первой станции относительно ротора третьей станции в системе трех станций.

В обоих случаях проведенное построение является проверкой расчета, подтверждающей в случае равенства A_1 и A_2 его правильность. Разумеется, в случае диссипативной системы это равенство будет приближенным и значение A_2 будет несколько меньше A_1 .

§ 7.3. ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ НАИБОЛЕЕ ХАРАКТЕРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ (ИЗМЕНЕНИЙ РЕЖИМА)

Методика расчета переходного процесса, основанная на численном интегрировании уравнений относительного движения (см. § 7.2), с теми или иными модификациями практически применимая ко всем инженерным задачам динамики электрических систем, не обладает наглядностью. Поэтому далее некоторые типичные динамические переходы рассмотрены стилизованно, с тем чтобы, сохраняя общую картину явления, получить основные характеристики процессов, конкретизируя их при необходимости численным интегрированием.

Влияние демпфирования на переходные процессы. При возникновении относительного движения ротора генератора, скорость которого, оставаясь малой, становится отличной от синхронной ($\omega_0 \pm d\delta/dt$), в генераторе появляются дополнительные потери мощности, связанные с потерями на трение, гистерезис и вихревые токи. Скольжение поля ротора относительно поля статора приводит к появлению асинхронного момента. В первом приближении в начале процесса (первый цикл качаний) можно принять, что эти дополнительные потери пропорциональны скольжению и их можно определить как $P_{d1}s$. Коэффициент P_{d1} , отражающий эти потери, будет всегда положителен и мощность $P_{d1}s$ при $s > 0$, т. е. при *росте скорости ротора выше синхронной, будет положительна**. Эта мощность, дополнительно нагружая генератор, осуществляет положительное демпфирование, способствующее затуханию качаний (см. П4). Регуляторы возбуждения, частоты, реагирующие на изменение скорости, могут создавать как положительное ($+P_{d2}$), так и (при неправильной настройке) отрицательное ($-P_{d2}$) раскачивающее демпфирование. Наличие больших активных сопротивлений в цепи статора также приводит к отрицательному демпфированию ($-P_{d3}$). Это очень приближенно** можно пояснить уменьшением на ΔP_3 потребления мощности в системе при росте ω на $\Delta\omega = d\delta/dt$ и соответствующем росте реактивных сопротивлений. Это явление особенно заметно для гидрогенераторов, у которых значение P_{d3} при малых нагрузках может оказаться больше P_{d1} . Следовательно, результирующее демпфирование будет определяться коэффициентом $P_d = P_{d1} \pm P_{d2} - P_{d3}$. Он чаще всего положителен, так как P_{d2} обычно положительно, а $P_{d3} < P_{d1}$. Исходя из этих соображений, можно было бы дополнить методику расчета последовательными интервалами, добавляя в каждом из них к величине $\Delta P_{(n-1)}$ значение $P_d \Delta\delta_{n-1}/\Delta t$. При качественном анализе эффекта демпфирования воспользуемся упрощенной характеристикой мощности

$$P = P_{11} + (EU/x) \sin \delta + P_d s. \quad (7.20)$$

* В предшествующих изданиях книги (и в ряде других книг) скорость выше синхронной прививалась отрицательной.

** Более полное объяснение явления отрицательного демпфирования при большом активном сопротивлении цепи статора см. в гл. 14, а также в § 8.4.

Рассмотрим случай, когда $P_d s > 0$. Предположим, что движение ротора начинается в соответствии с характеристиками мощности, показанными на рис. 7.19, в точке a . Движение возникнет под действием избыточного момента ΔP_0 . Точка, характеризующая положение ротора, будет перемещаться не по штриховой кривой $akcef$, представляющей зависимость $P_1 = P_{11} + (EU/x)\sin \delta$, а по сплошной кривой $P_1 + P_d s$, т. е. по кривой abe . Эта кривая будет проходить

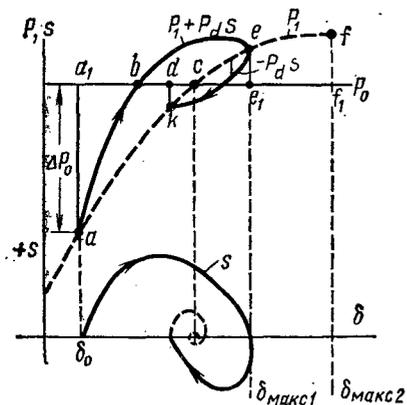


Рис. 7.19. Движение при положительном демпфировании

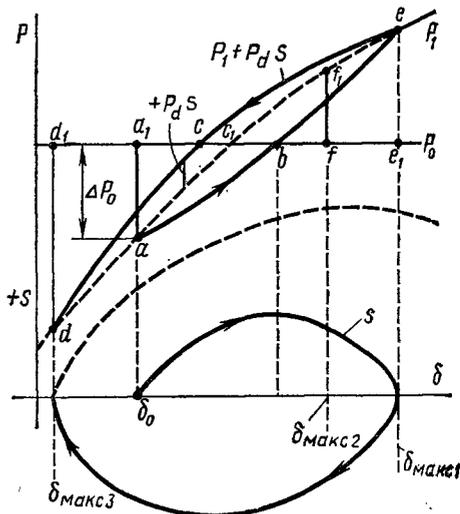


Рис. 7.20. Движение при отрицательном демпфировании

выше кривой P_1 при положительном (скорость больше синхронной) скольжении, т. е. при росте угла δ , и ниже — при отрицательном скольжении, т. е. уменьшении угла δ . Такое изменение движения под действием дополнительного момента, обусловленного скольжением, приведет к тому, что площадка ускорения уменьшится от значения aa_1ca до значения aa_1ba . Площадка торможения, ранее ограниченная кривой cef и прямой ce_1f_1 и уравнивавшая площадку ускорения aa_1ca только при больших углах $\delta_{\max 2}$, будет уравнивать площадку ускорения aa_1ba при угле $\delta_{\max 1}$ (причем $\delta_{\max 1} < \delta_{\max 2}$) за счет демпферного момента $P_d s$. Площадка ускорения, следовательно, уменьшилась на величину $abca$, что и привело к сокращению размаха колебаний до $\delta_{\max 1}$. Изображение движения на фазовой плоскости имеет вид спирали $s = \varphi(\delta)$, скручивающейся к точке c , т. е. к точке установившегося режима при $P_1 = P_0$.

Рассмотрим теперь случай, когда $P_d < 0$ (рис. 7.20). При положительном скольжении будет появляться момент, уменьшающий P_1 . Кривая $P_1 - P_d s$ (сплошная линия) будет располагаться ниже кривой P_1 (штриховая). Площадка ускорения увеличилась на величину ac_1ba и стала площадкой abc_1ca_1a . Это приводит к увеличению размаха колебаний угла до $\delta_{\max 1} > \delta_{\max 2}$. Площадку торможения cc_1bf_1ec , начинающую второй цикл качаний, должна уравновесить площадка ускорения ca_1d_1dc . Угол при этом достигнет значения $\delta_{\max 3}$. Таким образом, если в первом случае ($P_d > 0$, рис. 7.19) демпфирование уменьшило

размах колебаний и вызвало их затухание (рис. 7.21, а), то во втором случае ($P_d < 0$, рис. 7.21, б) происходит нарастание колебаний — самораскачивание.

Возможен частный случай так называемого предельного цикла (рис. 7.21, в), когда появляются незатухающие качания ротора. Физически это означает компенсацию эффекта демпфирования действием регулятора, реагирующего на значение скольжения. Желательно, чтобы действие регуляторов

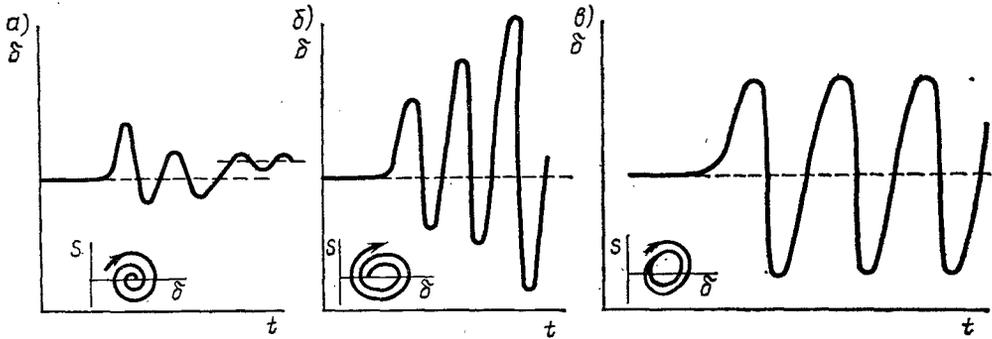


Рис. 7.21. Характер процесса во времени:

а — для случая, показанного на рис. 7.19; б — для случая, показанного на рис. 7.20; в — для предельного цикла (критический случай)

способствовало не поддержанию колебаний, а возможно более быстрому их затуханию, улучшая качество переходного процесса.

Влияние демпфирования и уменьшения момента турбины при полном сбросе мощности. Демпфирование, препятствующее движению и уменьшению вращающего момента турбины с ростом скорости (уменьшение «естественное», вызванное трением, потерями на гистерезис, действием регуляторов скорости), в этом случае заметно изменяет характер движения. При учете демпфирования основное уравнение для случаев, показанных на схеме (рис. 7.22, а), имеет вид

$$T_J (d^2\delta/dt^2) + P_d (d\delta/dt) = P_{\text{мех}}$$

Если $P_{\text{мех}} = \varphi(\omega, t)$, то в общем случае необходимо применять численное интегрирование.

Если же принять, что $P_{\text{мех}} = (1 - a\omega)P_0$, то

$$T_J (d\omega/dt) + K_d \omega = P_0, \quad (7.21)$$

где $K_d = P_d + P_0 a$.

Решение (7.21) получаем в виде*

$$d\delta/dt = \omega = P_0 (1 - e^{-tK_d/T_J}) / K_d. \quad (7.22)$$

Следовательно, скорость не возрастает непрерывно, а экспоненциально стремится к некоторому установившемуся значению:

* Интеграл уравнения (7.21) можно записать по аналогии с уравнением изменения тока при включении постоянного напряжения к цепи, содержащей RL .

$$P_0/K_d = \omega_\infty.$$

Из (7.22) можно найти изменение угла:

$$\delta = \delta_0 + \frac{P_0}{K_d} \left[t - \frac{T_J}{K_d} \left(1 - e^{-tK_d/T_J} \right) \right]. \quad (7.23)$$

Таким образом, демпфирование, пропорциональное скорости, и уменьшение мощности турбины при увеличении скорости задерживают рост угла при сбросе мощности (рис. 7.22, б).

Влияние автоматического регулирования на переходные процессы. Общее решение, устанавливающее это влияние, может быть получено численным ин-

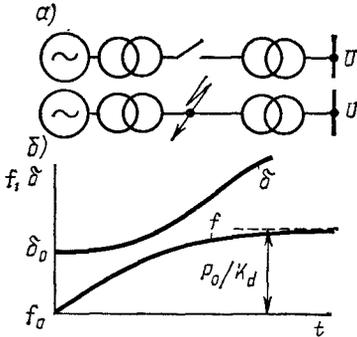


Рис. 7.22. Полный сброс мощности:
а — схемы системы; б — изменение угла и частоты

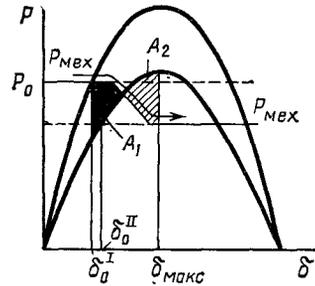


Рис. 7.23. Эффект снижения мощности первичного двигателя $P(\delta) \approx M(\omega, t)$ в отношении улучшения динамической устойчивости:

A_1 — уменьшенная площадка ускорения; A_2 — увеличенная площадка торможения

тегрированием (см. § 7.2), но полезные качественные соотношения выявляются на основе способа площадей.

Регулирование первичного двигателя, если оно осуществляется достаточно быстро, позволяет снизить механический вращающий момент $M_{мех}$ вслед за уменьшением электрического момента $M_{эл}$ (рис. 7.23). Если бы (что практически невозможно) можно было сделать так, чтобы $M_{мех} = \varphi(\omega, t) = M_{эл} = \varphi(\omega, t)$, то проблемы динамической устойчивости вообще не было бы. Однако увеличение глубины снижения механического момента и скорости его изменения может дать существенное улучшение динамической устойчивости.

Регулирование возбуждения генератора в смысле его эффекта на динамическую устойчивость можно также рассмотреть качественно. На рис. 7.24, а жирной линией показаны площадки в случае нарушения устойчивости при работе без регулирования возбуждения. Здесь при построении характеристик мощности принято, что $E' \approx E'_q = \text{const}$, причем э. д. с. E_q меняется скачком и далее затухает по экспоненте (рис. 7.24, б).

Рассмотрим эти характеристики. Если бы ток возбуждения оставался постоянным, равным начальному значению, то в случае короткого замыкания и его

отключения энергия при ускорении ротора определялась бы площадкой 1-2-3-3'-4-5-а-5'-1. Энергия при торможении ротора, определяющаяся площадкой abc , была бы намного меньше площадки ускорения, что означало бы неустойчивость системы.

Если после некоторого запаздывания, определяющегося участком 2-3, ток возбуждения начинает увеличиваться, как это показано на рис. 7.24, то пло-

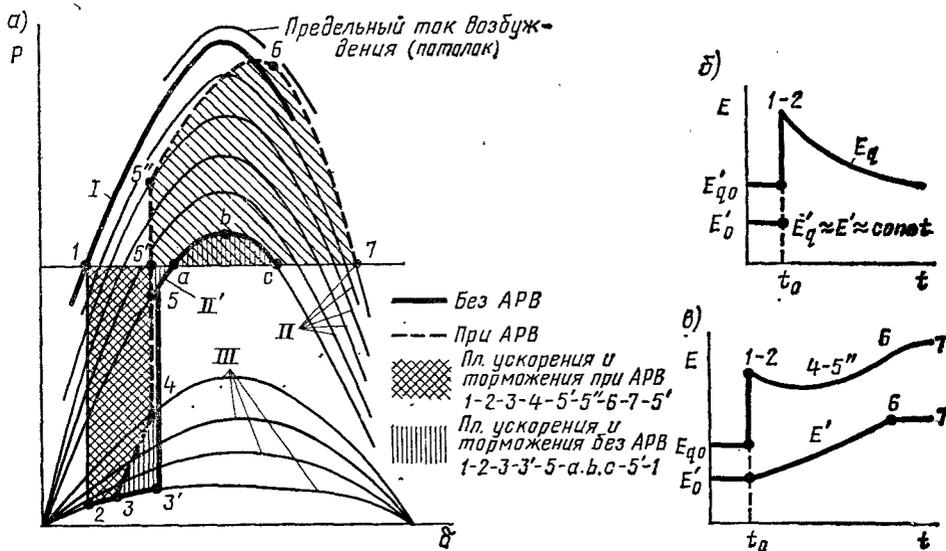


Рис. 7.24. Эффект форсирования возбуждения:

а — характеристика $P=i(\delta)$; I — характеристика нормального (исходного) режима; II — характеристика послеаварийного режима (без форсировки); III — группа характеристик послеаварийного режима, построенных для разных значений тока возбуждения; III' — характеристики режима к. з. (участок 2-3 — запаздывание форсирования; 2-4 — форсирование возбуждения во время к. з.; 5-5''-6 — форсирование возбуждения в послеаварийном режиме; 6-7 — процесс при постоянном значении тока возбуждения); б — изменение э. д. с. при отсутствии регулирования возбуждения; в — то же, при регулировании

щадка ускорения 1-2-3-4-5-5'-1 оказывается меньше, на величину 3-3'-4-3 и 5-а-5'-5. Площадка торможения, напротив, возрастает, приобретая значение 5'-5''-6-7-5'. Участок 5''-6 соответствует продолжающемуся форсированию тока возбуждения, достигшему потолочного (наибольшего допустимого) значения (точка б).

Из приведенных характеристик очевидно, что при сбросе нагрузки, вызванном коротким замыканием или другим нарушением режима, необходимо стремиться как можно скорее и значительно увеличить ток возбуждения генератора. Однако увеличение тока возбуждения полезно только пока возрастает угол. При этом увеличивающийся ток возбуждения создает дополнительный тормозящий момент, способствующий сохранению устойчивости. После того как угол достиг максимального значения и начал уменьшаться, уже нет необходимости продолжать увеличивать или поддерживать ток возбуждения. Напротив, при уменьшении угла его следует снижать. Если ток ротора не будет снижаться, то возникнут большие колебания угла и генератор может выпасть из синхронизма во втором цикле качаний.

Проиллюстрируем сказанное характеристиками, приведенными на рис. 7.25, а. Характеристика I отвечает нормальному режиму; характеристика III — короткому замыканию, причём ее участок 2-3 соответствует режиму, когда форсирование возбуждения еще не началось; на участке 3-4 действует форсировка возбуждения. Участок 5-6 соответствует режиму, наступающему после отключения короткого замыкания, но при увеличивающемся до потолочного зна-

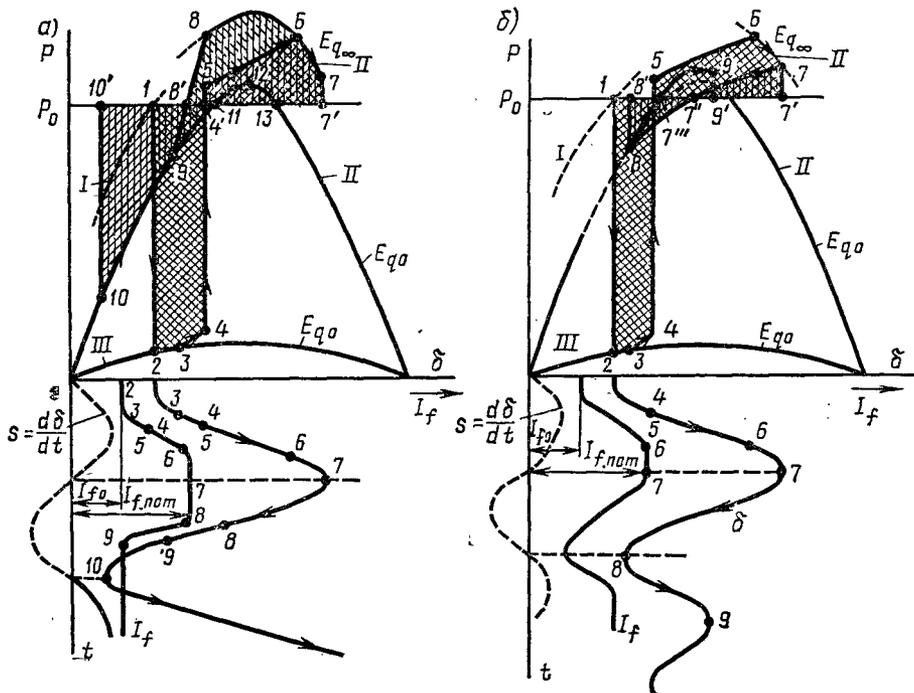


Рис. 7.25. Влияние управления током возбуждения на качания генератора: а — ошибочное управление — раскачивание во втором цикле; б — правильное управление — затухание качаний (кривая 7'-8' соответствует «расфорсировке» с уменьшением тока I_f до значений, меньших I_{f0})

чения (точка б) токе возбуждения. Участок 6-7 — это та же характеристика послеаварийного режима, но построенная при потолочном токе возбуждения, т. е. при постоянном значении $E_{q\infty} = E_{q \text{ пот.}}$. Ускорение при коротком замыкании определяется площадкой 1-2-3-4-4'-1, равной площадке торможения 4'-5-6-7-7'-4'.

Из построенных характеристик следует, что вследствие форсирования возбуждения устойчивость при первом вылете угла сохранилась. Изменения тока возбуждения, показанные на рис. 7.25, б, и, следовательно, зависимости мощности на угловых характеристиках одинаковы до точки 7, где скорость изменения угла проходит через нуль и угол начинает уменьшаться. Далее, в первом случае (рис. 7.25, а) предполагается, что ток возбуждения, достигший потолочного значения, сохранил его и остается неизменным до точки 8. Во втором случае

(рис. 7.25, б) предполагается, что немедленно по достижении точки 7 ток возбуждения начал уменьшаться.

Характер процесса в одном и другом случаях очевиден из приведенных характеристик. Действующая во втором цикле качаний площадка торможения 7-6-8'-8'-4'-7'-7' (рис. 7.25, а) оказывается весьма большой. На рис. 7.25, б соответствующая площадка торможения меньше, а следовательно, меньше и размах качаний. Если по достижении точки 8 при втором переходе через нуль скорости (рис. 7.25, б) вновь начинает увеличиваться ток возбуждения, то площадка ускорения 8-7'''-8'-8 вновь уменьшится и размах качаний угла во втором цикле определится точкой 9. Если ток возбуждения (рис. 7.25, а) уменьшавшийся в интервале от точки 8 до 9, останется неизменным, то площадка ускорения 10'-10-9-11-10' будет намного больше возможной площадки торможения 11-12-13-11 и генератор выпадет из синхронизма.

Из рассмотренного примера видно, как способ площадей позволяет выявить наиболее благоприятное управление током возбуждения, позволяющее увеличить устойчивость и уменьшить размах колебаний в последующих циклах качаний.

Анализ полученных зависимостей показывает, что форсирование э. д. с. от E_{q0} до $E_{q\infty}$ должно длиться до тех пор, пока угол δ не достигнет максимального значения и скольжение в первый раз не пройдет через нуль. Далее форсирование должно сниматься и все время, пока знак скольжения отрицательный, э. д. с. E_q должна уменьшаться. После новой перемены знака скольжения, т. е. с началом второго цикла увеличения угла, э. д. с. E_q (ток возбуждения) снова должна увеличиваться. При непрерывном регулировании возбуждения напряжение возбuditеля должно изменяться с некоторым опережением по отношению к скольжению $s = d\delta/dt$.

Колебания (качания) ротора синхронной машины, возникающие под действием гармонической внешней силы. В электрической системе возможны режимы, которые в некоторой идеализации можно представить как вынужденные колебания под действием гармонических, синусоидально изменяющихся внешних сил. Это, например, колебания синхронных двигателей с периодически меняющейся в процессе нормальной эксплуатации нагрузкой; приводов прокатных станов; компрессорных установок и др. Это могут быть также колебания синхронных машин при наличии длительного асинхронного хода в послеаварийном режиме электрической системы. Такие режимы характеризуются колебаниями напряжения, тока, вращающих моментов и роторов синхронных машин*.

Математически процесс может быть представлен уравнением

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} = P_0 - P_m \sin \delta + \varphi_B(t), \quad (7.24)$$

где $\varphi_B(t)$ — вынуждающая сила, имеющая периодический характер.

Если величина $\varphi_B(t)$ задана, то универсальным методом решения будет численное интегрирование. Однако, как и в предыдущих случаях, получаемые результаты не будут иметь общности, которая желательна для оценки происходящих физических процессов. Поэтому, имея в виду возможность решения численным интегрированием, проведем общий анализ явления. Заметим, что если внешние,

* Здесь предполагается, что рассматриваемый исходный режим статически устойчив, иначе вынужденные колебания не могут существовать.

вынуждающие силы $F_B(t)$ — периодические (негармонические), то их можно разложить в ряд Фурье и выделить основную гармонику, наиболее существенную с точки зрения возникновения вынужденных электромеханических колебаний роторов. Если значение внешней силы таково, что приводит к относительно малым (в пределах справедливости линеаризации $\sin \delta$ по первому приближению) колебаниям угла $\Delta\delta$, то вынужденные колебания можно изучать с помощью линеаризованного уравнения движения, записанного для синхронной машины в операторной форме:

$$T_J p^2 \Delta\delta + P_d p \Delta\delta + c_1 \Delta\delta = P_B \sin vt = F_B.$$

Здесь P_B — амплитуда; ν — частота вынуждающей силы F_B .

Разделив последнее уравнение на T_J и обозначив: $D = P_d/T_J$ — коэффициент демпфирования (затухания); $\gamma = \sqrt{c_1/T_J}$ — собственная частота свободных колебаний; $A_B = P_B/T_J$ — приведенная амплитуда внешней силы, запишем

$$p^2 \Delta\delta + D p \Delta\delta + \gamma^2 \Delta\delta = A_B \sin vt. \quad (7.25)$$

Переходный процесс, возникающий при приложении синусоидальной вынуждающей силы к валу синхронной машины [см. (7.25)], аналогичен процессу в электрической цепи RLC при подключении к ней синусоидального напряжения*. При нулевых начальных условиях, т. е. при условии, что в момент $t = 0$ значения $\Delta\delta = \Delta\delta_0 = 0$, $p \Delta\delta = 0$, будем иметь

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{св} + \Delta\delta_B.$$

На рис. 7.26 показано изменение вынуждающей силы F_B . Там же показана свободная составляющая изменений угла $\Delta\delta_{св}$ (кривая 2), определяющаяся выражением

$$\Delta\delta_{св} = \Delta\delta_{\sim} \left\{ e^{-\frac{Df}{2}} \left[\sin \xi \cos \omega_1 t + \left(\frac{D}{2\omega_1} \sin \xi - \frac{\nu}{\omega_1} \cos \xi \right) \sin \omega_1 t \right] \right\}, \quad (7.26)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\gamma^2 + 0,25 D^2}$ — собственная частота свободных колебаний синхронной машины с учетом демпфирования.

Вынужденная составляющая (рис. 7.26, кривая 3)

$$\Delta\delta_B = \Delta\delta_{\sim} \sin(\nu t - \xi). \quad (7.27)$$

Здесь $\Delta\delta_{\sim} = A_B / \sqrt{(\gamma^2 - \nu^2)^2 - D^2 \nu^2}$ — амплитуда вынужденных колебаний синхронной машины; $\xi = \arctg [D\nu/(\gamma^2 - \nu^2)]$ — сдвиг фаз вынужденных колебаний угла по отношению к фазе вынуждающей силы.

Заметим, что в большей части электрических систем соблюдается соотношение $0,25 D^2 \ll \gamma^2$, вследствие чего часто принимается $\omega_1 = \gamma$.

Процесс установления вынужденных колебаний зависит от соотношения между частотой ν внешней силы и собственной частотой γ колебаний синхронной машины, от начальных условий и коэффициента демпфирования D . На рис. 7.26

* См. любой учебник теоретической электротехники для вузов, например: Гинзбург С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. — М.: Высшая школа, 1967, с. 83.

показан процесс установления вынужденных колебаний (кривая 4) при $\nu > \gamma$ и относительно большом коэффициенте демпфирования. Здесь амплитуды в процессе установления колебаний больше, чем амплитуда установившихся вынужденных колебаний. Когда частота внешней силы близка к собственной частоте колебаний, то происходит более плавное нарастание амплитуды вынужденных колебаний.

Вынужденные колебания угла происходят со сдвигом фазы по отношению к фазе вынуждающей силы. Сдвиг фазы является функцией частоты и определяется уравнением

$$\xi = \arctg [D\nu/(\gamma^2 - \nu^2)].$$

Графическая зависимость $\xi(\nu)$ или $\xi(\nu/\gamma)$ называется *фазочастотной характеристикой* (рис. 7.27).

При увеличении частоты вынужденных колебаний фаза меняется от 0 до $-\pi$, переходя через $-\pi/2$ при $\nu = \gamma$.

Амплитуда установившихся вынужденных колебаний зависит от частоты и амплитуды внешней силы. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты при фиксированной амплитуде внешней силы называется *амплитудно-частотной характеристикой*. На рис. 7.27 приведена так называемая нормированная амплитудно-частотная характеристика вынужденных колебаний угла $\Delta\delta_*$. По оси абсцисс отложена безразмерная частота ν/γ , а по оси ординат — безразмерная амплитуда колебаний угла

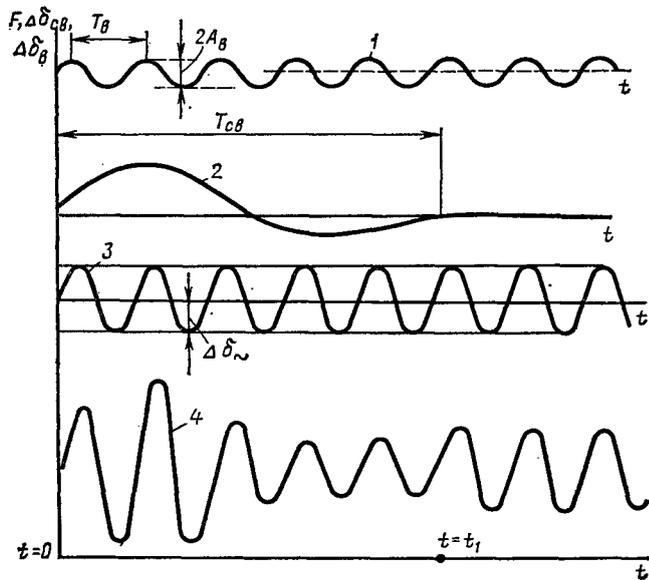


Рис. 7.26. Гармонические вынужденные колебания: 1 — вынуждающая сила $F_B = A_B \sin \nu t$, примененная к валу синхронной машины в момент $t=0$; 2 — свободные колебания $\Delta\delta_{св}$, возникшие в момент приложения возмущающей силы и затухающие за время T ; 3 — вынужденная составляющая гармонических колебаний $\Delta\delta_{в}$, имеющая амплитуду $\Delta\delta_*$; 4 — процесс установления вынужденных колебаний ($\Delta\delta = \Delta\delta_{св} + \Delta\delta_{в}$), заканчивающийся к моменту времени $t=t_1$

$$\Delta\delta_* = (\Delta\delta_{*}/A_B) \gamma^2 = 1 / \sqrt{[1 - (\nu/\gamma)^2]^2 + \sigma^2 / (\nu/\gamma)^2}. \quad (7.28)$$

Здесь значение относительного коэффициента затухания

$$\sigma = D/\gamma^2 = P_d/(T_J \gamma).$$

При $\nu = 0$ значение $\Delta\delta_* = 1$, т. е. независимо от коэффициента демпфирования и внешней силы все нормированные характеристики начинаются с единицы. На кривых нанесены значения относительного коэффициента затухания σ . С увеличением частоты внешней силы при постоянном и достаточно малом

коэффициенте затухания ($\sigma \ll 1$) амплитуда колебаний резко возрастает вблизи значения $\nu/\gamma = 1$. Это возрастание называется *электромеханическим резонансом*. При больших частотах амплитуда колебаний угла резко уменьшается и при $\nu/\gamma \rightarrow \infty$ величина $\Delta\delta_* \rightarrow 0$. Физически это означает, что массивный ротор синхронной машины не реагирует (иногда говорят — не пропускает) высоких

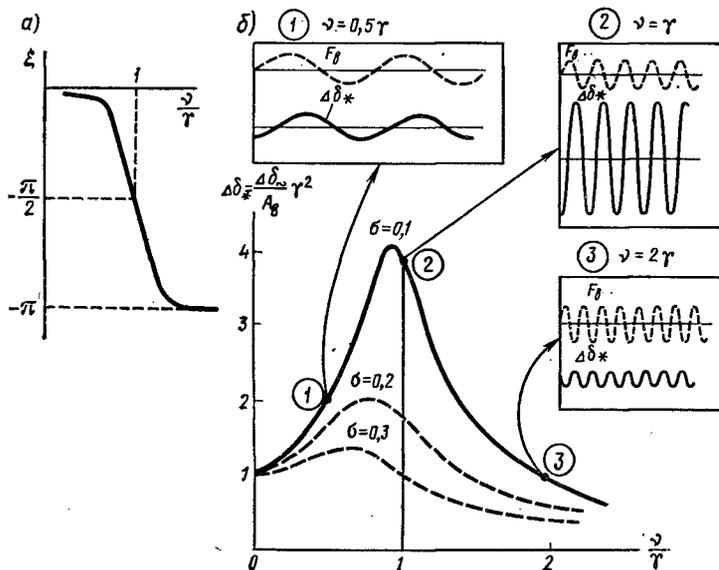


Рис. 7.27. Характер колебаний в зависимости от соотношения частоты вынуждающей силы и собственной частоты системы: а — фазочастотная характеристика; б — амплитуды колебаний

частот) на внешние силы, частота которых намного больше собственной частоты колебаний.

В системах с большим коэффициентом затухания максимум амплитудно-частотной характеристики перемещается в сторону меньших относительных частот. Максимум $\Delta\delta_{*max}$ определяется из условия

$$\frac{d\Delta\delta_*}{d(\nu/\gamma)^2} = \frac{d}{d(\nu/\gamma)^3} \left\{ \left[1 - \left(\frac{\nu}{\gamma} \right)^2 \right]^2 + \sigma^2 \left(\frac{\nu}{\gamma} \right)^2 \right\} = 0$$

и наступает при частоте

$$(\nu/\gamma)_{max} = \sqrt{1 - 2\sigma^2}.$$

Подставив это значение в выражение для $\Delta\delta_*$, получим

$$\Delta\delta_{*max} = 1 / \left(2\sigma \sqrt{1 - \sigma^2} \right),$$

откуда следует, что нормированная амплитудно-частотная характеристика име-

ет максимум больше единицы только при $\sigma < \sqrt{2}/2$, что для электрических систем, как правило, выполняется.

Существование больших резонансных пиков при малых относительных коэффициентах затухания указывает на то, что даже малые по значению возму-

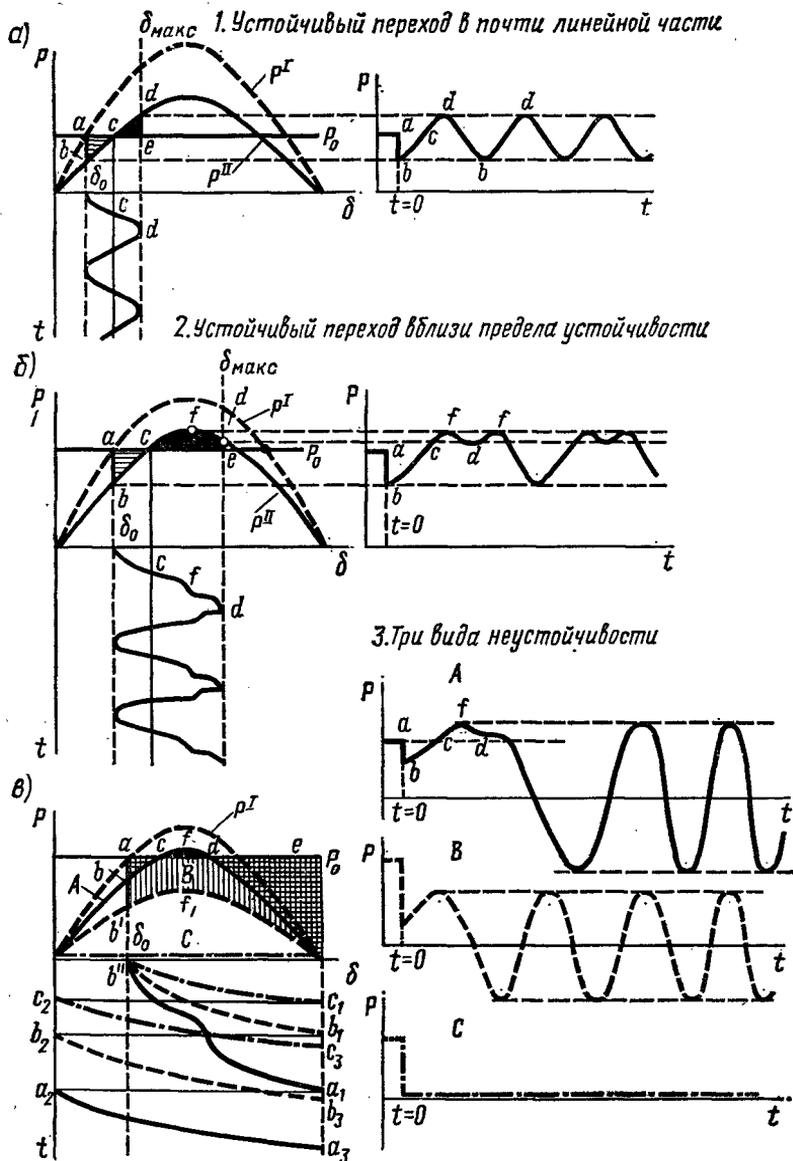


Рис. 7.28. Два характерных случая устойчивого перехода от одного режима к другому (а, б) и три вида (в) неустойчивости (А, В, С)

щающие силы при периодическом изменении их с частотой, близкой к собственной частоте системы, могут вызвать большие колебания роторов синхронных машин, а следовательно, напряжений, токов и всех других параметров режима, зависящих от углов и определяющих качество электрической энергии.

Собственная частота свободных колебаний реальной электрической системы зависит от ее параметров и режима работы, параметров синхронной машины, ее системы регулирования и настройки АРВ и обычно изменяется от 0,5 до 2 Гц.

Относительный коэффициент затухания зависит также от параметров элементов электрической системы и в значительной мере определяется типом АРВ. Так, если в случае нерегулируемого синхронного генератора $\sigma \approx 0,2/3 = 0,06$, то при АРВ п. д. значение $\sigma \approx 0,03$, а при АРВ с. д. $\sigma \approx 0,3$.

Расчет собственной частоты малых колебаний и коэффициентов затухания для нерегулируемой и регулируемой электрических систем достаточно точно проводится по аналитическим выражениям.

Большие вынужденные колебания. Эти колебания могут быть близки к синусоидальным, возникающим на почти линейных частях характеристик $P = \varphi(\delta)$, как это показано на рис. 7.28, а. В случае, когда колебания происходят на существенно нелинейной части характеристики $P = \varphi(\delta)$, они оказываются явно не синусоидальными (рис. 7.28, б). В первом же цикле колебаний система может стать неустойчивой (рис. 7.28, в). Кроме расчета численным интегрированием, позволяющего получить характеристики процесса для конкретных случаев, полезно провести качественный анализ и оценить условия возникновения и протекания интересующих инженера явлений. Рассмотрим сначала легкий случай нарушения режима в простейшей схеме «станция — шины», приняв $E' = \text{const}$ (рис. 7.28, а), когда изменение мощности при изменении угла δ происходит на части характеристики $P = \varphi(\delta)$, которую можно считать почти линейной. Процесс протекает при равенстве площадок ускорения $abca$ и торможения $cdec$. Колебания мощности и угла во времени почти синусоидальны, так же как при любых малых нарушениях режима, которые характеризуются линеаризованной зависимостью $P = \varphi(\delta)$.

На рис. 7.28, б представлено изменение режима, при котором система находится у предела устойчивости. При этом площадка ускорения $abca$ оказывается уравновешенной площадкой торможения $cfdec$, частично лежащей за максимумом характеристик $P = \varphi(\delta)$. Участок характеристики $P = \varphi(\delta)$, соответствующий рассмотренному процессу (рабочий участок), оказывается, таким образом, нелинейным. Изменения угла $\delta = f(t)$ несинусоидальны, так же как и изменения мощности. Характерный «двугорбый» вид кривой $P = \varphi(t)$ объясняется тем, что в каждом полуцикле колебаний вблизи максимального угла $\delta_{\text{макс}}$ ротор дважды проходит точку f , отвечающую наибольшему значению характеристики $P = \varphi(\delta)$.

На рис. 7.28, в показаны три вида неустойчивого процесса: А, В, С.

Процесс А происходит согласно характеристике bcd при площадке торможения $cfdc$, меньшей площадки ускорения, которая сначала имеет значение $abca$, а затем (после точки d) определяется площадкой, ограниченной линией P_0 и синусоидальной характеристикой $P = \varphi(\delta)$ (сплошная). Изменения угла $\delta = f(t)$ на участке $\delta_0 - 180^\circ$ имеют характерный перегиб, отвечающий участку efd кривой $P = \varphi(\delta)$, что соответствует перегибу на кривой $b'a_1$. Далее кривая $\delta = f(t)$ имеет монотонное изменение (кривая a_2a_3). В соответствии с этим кривая $P = \varphi(t)$ в первом полуцикле колебаний имеет перегиб fd , а затем, со второго цикла, приобретает синусоидальный характер с постепенно уменьшающимся периодом.

В процессе B зависимость $P = \varphi(\delta)$ уже со второго полуцикла приобретает синусоидальный характер, а изменение угла во времени происходит монотонно по кривым $b''b_1$ и b_2b_3 , приближающимся к параболическим.

В процессе C , т. е. при так называемом полном сбросе мощности (из-за разрыва передачи или трехфазного короткого замыкания), генераторы данной станции перестают отдавать мощность в систему. Под действием постоянного вращаю-

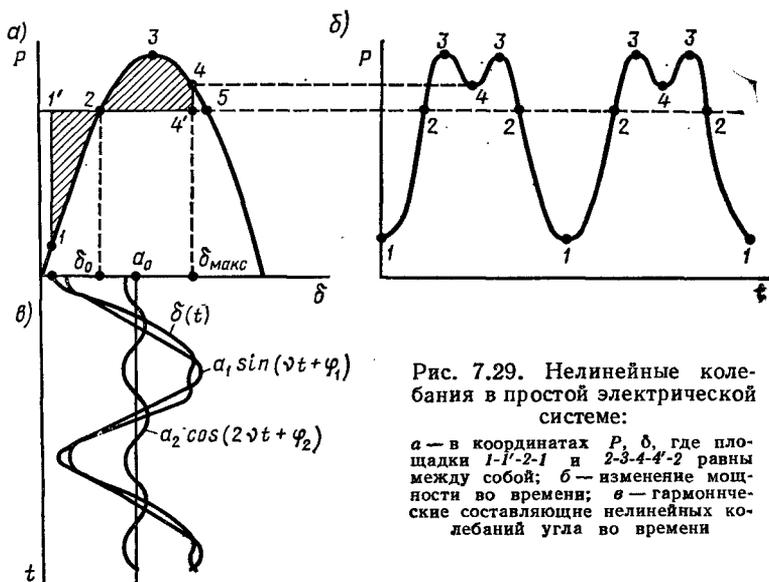


Рис. 7.29. Нелинейные колебания в простой электрической системе:

a — в координатах P, δ , где площади $1-1'-2-1$ и $2-3-4-4'-2$ равны между собой; b — изменение мощности во времени; θ — гармонические составляющие нелинейных колебаний угла во времени

щего механического момента (мощности), ускоряющего турбину (P_0), которому в этом случае не оказывает противодействия какой-либо электромагнитный момент, угол δ непрерывно возрастает. По аналогии с механическим движением, при постоянном ускорении можно ожидать, что это возрастание будет происходить при $\delta = f(t)$, являющейся квадратичной параболой, показанной на рис. 7.28, θ (кривые $b''c_1, c_2, c_3$).

Все указанные процессы рассматривались при $P_0 = \text{const}$, но возможен случай, когда в системе дополнительно действует вынуждающая сила, изменяющаяся во времени.

Если в случае, рассмотренном выше [см. (7.25)], амплитуда $A_{\text{в}}$ внешней силы велика, а демпфирование колебаний слабое, то в системе будут развиваться вынужденные колебания настолько большие, что могут привести к нарушению синхронной динамической устойчивости. Линеаризация по первому приближению соответствующие нелинейных зависимостей становится несправедливой и пользование линеаризованными уравнениями приводит к качественно неправильным результатам. В этом случае задачи определения параметров больших колебаний, максимально допустимых по условиям устойчивости в зависимости от амплитуды внешней гармонической силы, имеющей частоты,

близкие к резонансным, решаются успешно методом гармонического баланса. Суть метода заключается в следующем*.

При больших вынужденных колебаниях, когда максимальные отклонения угла приближаются к точке неустойчивого равновесия на моментно-угловой характеристике (точка 5 на рис. 7.29, а), но не доходят до нее на $5-10^\circ$, изменение угла во времени имеет вид периодической, но не гармонической функции (рис. 7.29, в). В этом случае периодическую функцию угла δ можно разложить в ряд Фурье:

$$\delta = a_0 + A_1 + A_2 + \dots = a_0 + a_1 \sin(\nu t + \varphi_1) + a_2 \cos(2\nu t + \varphi_2) + \dots,$$

где a_0, a_1, a_2 — амплитуды соответствующих гармоник.

При решении уравнения движения основная нелинейность представляется первыми членами ряда Фурье:

$$\sin \delta = \sin(a_0 + A_1).$$

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при δ_{\max} немного (примерно 10°) не доходящих до точки неустойчивого равновесия, вторая, третья и более высокие гармоники, как правило, имеют по сравнению с первой гармоникой очень малые амплитуды. Это послужило основанием для учета в больших колебаниях только нулевой и первой гармоник, т. е. позволило решать задачу в одночастотном приближении (или методом гармонической линеаризации).

В этом случае решение уравнения движения

$$T_J d^2\delta/dt^2 + P_d d\delta/dt = P_0 - P_m \sin \delta + P_B$$

отыскиваем в комплексной форме, представив

$$\sin \delta = \sum_{n=1}^{\infty} S_n e^{j\nu n t}.$$

Здесь S_n — коэффициенты первых членов ряда Фурье, имеющие следующие выражения:

$$S_0 = J_0(a_1) \sin a_0; \quad S_1 = -jJ_1(a_1) e^{j\varphi_1} \cos a_0; \quad S_{-1} = jJ_1(a_1) e^{-j\varphi_1} \cos a_0, \quad (7.29)$$

где $J_0(a_1), J_1(a_1)$ — функции Бесселя.

Коэффициенты S_0, S_1, S_{-1} получены следующим образом. Используя известные приемы разложения в ряд Фурье функций $\sin[a_1 \sin(\nu t + \varphi_1)]$ и $\cos[a_1 \sin(\nu t + \varphi_1)]$, можно записать

$$\begin{aligned} \sin(a_0 + A_1) = & \sin a_0 [J_0(a_1) + 2J_2(a_1) \cos 2(\nu t + \varphi_1) + 2J_4(a_1) \cos 4(\nu t + \varphi_1) + \dots] + \\ & + \cos a_0 [2J_1(a_1) \sin(\nu t + \varphi_1) + 2J_3(a_1) \sin 3(\nu t + \varphi_1) + \dots] \approx \sum_{n=1}^{\infty} S_n e^{j\nu n t}. \end{aligned}$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых гармониках, получаем уравнения (7.29).

Разделим уравнение движения на T_J , представив все переменные в комплексной форме (в том числе и периодическую внешнюю силу) и приравняв коэффициенты при нулевой и первой гармониках в левой и правой частях уравнений. Тогда

* См.: Литкенс И. В. Нелинейные колебания в регулируемых электрических системах. — М. МЭИ. 1974

$$S_0 = \sin \delta_0; (-v^2 + jDv) \frac{a_1}{2j} e^{j\varphi_1} + \gamma^2 S_1 = \frac{A_B}{2j}. \quad (7.30)$$

Уравнение (7.30) определяет среднюю точку a_0 колебаний угла δ в зависимости от амплитуды a_1 и исходного режима δ_0 :

$$\sin a_0 = \sin \delta_0 / J_0(a_1). \quad (7.31)$$

При $a_1 = 0$ уравнение (7.31) определяет положения равновесия на моментно-угловой характеристике: $a_0 = \delta_0$ — устойчивое, $a_0 = \pi - \delta_0$ — неустойчивое.

При увеличении a_1 средняя точка колебаний растет до значения $a_0 = \pi/2$. Амплитуда a_1 , соответствующая $a_0 = \pi/2$, называется критической амплитудой колебаний. При $a_1 > a_{1кр}$ действительного решения уравнения (7.30) не существует. Для электрической системы это означает, что периодические движения перестают существовать, что соответствует нарушению синхронной динамической устойчивости.

Так как величина $a_{0кр} = \pi/2$ не зависит от исходного режима, а в уравнение (7.30) не входит внешняя сила, то зависимость $a_{1кр}$ от исходного режима как для свободных, так и для вынужденных колебаний определяется из выражения

$$J_0(a_{1кр}) = \sin \delta_0.$$

Графически эта зависимость приведена на рис. 7.30, а. Она показывает, что чем ближе исходный режим к максимуму моментно-угловой характеристики, тем меньше критическая амплитуда колебаний. Неравенство $a_1 \leq a_{1кр}$ называется условием существования больших вынужденных колебаний. При несоблюдении его больших синхронных колебаний в системе быть не может, так как происходит нарушение синхронной работы машины.

Резонансные кривые. Уравнение (7.30) устанавливает связь между частотой и амплитудой первой гармоники. Подставив в его развернутое выражение значение S_1 из (7.29) и разделив обе части на $[a_1/(2j)]e^{j\varphi_1}$, получим

$$-v^2 + jDv + \gamma^2 \cos a_0 2J_1(a_1)/a_1 = (A_B/a_1) e^{-j\varphi_1}. \quad (7.32)$$

При отсутствии внешней гармонической силы ($A_B = 0$) большие свободные колебания могут устанавливаться лишь в консервативной системе ($D = 0$) после больших начальных отклонений.

Собственная частота. Полученные выше уравнения определяют зависимости (рис. 7.30, б) эквивалентной собственной частоты (здесь $v^2 = \gamma_s^2$) от амплитуды колебаний:

$$\gamma_s^2 = \gamma^2 \frac{2J_1(a_1)}{a_1} \cos a_0 = \gamma^2 \frac{2J_1(a_1)}{a_1} \sqrt{1 - \left[\frac{\sin \delta_0}{J_0(a_1)} \right]^2}. \quad (7.33)$$

Уменьшение эквивалентной собственной частоты γ_s^2 с увеличением амплитуды a_1 является характерной особенностью нелинейных колебаний синхронной машины в простой электрической системе.

Приравняв модуль левой и правой частей уравнения (7.30), запишем

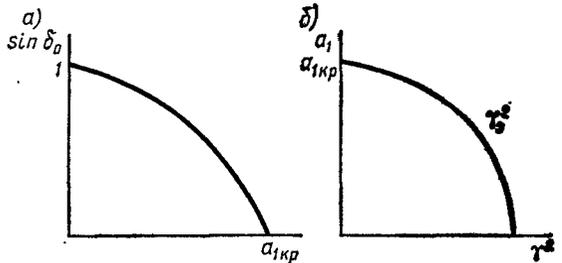


Рис. 7.30. Характеристики колебаний: а — зависимость критической амплитуды колебаний $a_{1кр}$ от исходного режима ($\sin \delta_0$); б — зависимость собственной частоты от амплитуды нелинейных колебаний угла γ

$$(\gamma_3^2 - \nu^2)^2 + (\nu D)^2 = (A_B/a_1)^2.$$

Решив его относительно ν^2 , получим *уравнение резонансной кривой*, устанавливающей зависимость амплитуды a_1 вынужденных колебаний от частоты внешней силы заданной амплитуды A_B :

$$\nu^2 = \nu_c^2(a_1) \pm \sqrt{(A_B/a_1)^2 - (\gamma_3 D)^2 + D^2/4}, \quad (7.34)$$

где $\nu_c^2(a_1) = \gamma_3^2 - 0,5D^2$ — функция, называемая *скелетной кривой*. Так как обычно $0,5D^2 \ll \gamma_3^2$, то она практически совпадает с γ_3^2 . Характер резонансной кривой зависит от амплитуды внешней силы (рис. 7.31, а).

При малых амплитудах она соответствует амплитудно-частотной характеристике (кривая 1). С увеличением A_B резонансная кривая деформируется и верхняя часть ее изгибается

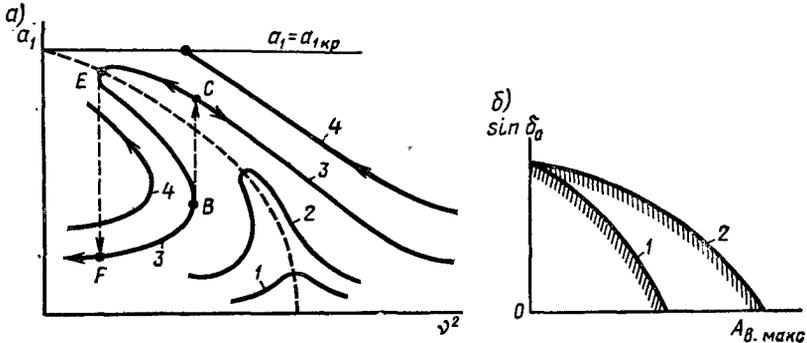


Рис. 7.31. Резонансные колебания:

а — деформация резонансной кривой (1—4) в зависимости от внешней силы $A_{B1} < A_{B2} < A_{B3} = A_{B, \text{макс}} < A_{B4} > A_{B, \text{макс}}$. Стрелками показано направление изменения частоты $FBCE$ — петля гистерезиса нелинейных вынужденных колебаний; б — границы областей устойчивости больших вынужденных колебаний в зависимости от регулирования возбуждения синхронного генератора: 1 — без APB; 2 — с APB с. д.

в сторону меньших частот (кривые 2, 3). При превышении некоторого значения $A_B > A_{B, \text{макс}}$ (условно называемого максимальным — кривая 3) резонансная кривая терпит разрыв (кривая 4) и ее правая ветвь кончается при $a_1 = a_{1, \text{кр}}$, что сопровождается нарушением синхронной устойчивости.

Нелинейные колебания. Для них характерно появление гистерезисных явлений, т. е. неоднозначность параметров колебаний при медленном увеличении и уменьшении частоты вынуждающей силы. Участок CE существует только при уменьшении частоты колебаний, а участок FB — только при увеличении ее. В точке E происходит срыв амплитуды, а в точке B — ее скачок.

При $A_B \leq A_{B, \text{макс}}$ вынужденные колебания могут существовать при всех частотах внешней силы. При $A_B > A_{B, \text{макс}}$ существует диапазон частот, при котором может произойти нарушение синхронной устойчивости. Величина $A_{B, \text{макс}}$ зависит от исходного режима и демпферного коэффициента D .

На рис. 7.31, б приведены характерные зависимости $\sin \delta_0$ (определяющий исходный режим) и $A_{B, \text{макс}}$, называемые *границей области устойчивости* больших вынужденных колебаний. Совокупность значений $A_{B, \text{макс}}$ и $\sin \delta_0$, лежащих внутри границы, образует область устойчивости больших вынужденных колебаний, в которой внешние гармонические силы любой частоты не приведут к нарушению синхронной устойчивости. Сопоставление кривых 2 и 1 показывает эффективность APB с. д. в повышении уровня устойчивости при наличии периодических возмущающих сил в электрической системе.

§ 7.4. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ ВХОДЯЩИХ В НЕГО ПАРАМЕТРОВ

При однозначно заданных параметрах и начальных условиях дифференциальное уравнение

$$T_J \, d^2\delta/dt^2 = P_0 - P_m \sin \delta \quad (7.35)$$

характеризует относительное движение ротора генератора. Часто возникает необходимость в определении переходного процесса при изменении исходных условий. Это происходит вследствие того, что во время работы электрической системы изменяются активные мощности генераторов и нагрузок, меняется схема системы, выводится в ремонт оборудование. Большие возмущения, при возникновении которых совершаются переходные процессы, также могут быть различными по значению, виду и могут происходить в различных точках электрической системы. Следовательно, начальные условия и параметры, входящие в уравнение движения, в общем случае могут быть представлены не в виде однозначных величин, а в виде множества возможных значений, которым соответствует множество характеристик переходных процессов. При этом приближенный простой пересчет характеристик переходных процессов для исходных условий выполняется при изображении множества переходных процессов в виде суммы опорного и центрированного процессов.

Под опорным понимается переходный процесс, протекающий при выбранных однозначных параметрах, также называемых опорными, обычно равным средним значениям ожидаемого диапазона изменений. Опорный процесс описывается нелинейными уравнениями движения.

Центрированным называется процесс, отклоняющийся от опорного в связи с отклонениями от опорных исходных параметров. Центрированные процессы описываются линейными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. Эти уравнения позволяют установить аналитические зависимости между исходными, варьируемыми параметрами и искомыми параметрами, определяющими протекание переходного процесса. По таким зависимостям быстро, без численного интегрирования, могут быть рассчитаны множества характеристик переходных процессов. Кроме того, аналитические зависимости дают возможность использовать методы функциональных преобразований случайных величин для определения вероятностных характеристик переходных процессов.

Рассмотрим составление и приближенное решение уравнений движения ротора генератора в простейшей системе при вариациях удаления короткого замыкания от начала ЛЭП. Предположим, что в простейшей электрической системе (рис. 7.32) на одной из ЛЭП произошло короткое замыкание, удаленное от начала линии на расстояние l . После возникновения короткого замыкания поврежденная линия отключается и затем вновь успешно включается в работу. Значения взаимных проводимостей в аварийном режиме обозначим через b''' , а в послеаварийном и исходном нормальном режимах — через b'' и b' соответственно.

Удаление короткого замыкания на линии, оцененное в относительных единицах: $l_* = l/L$, где L — длина линии, может изменяться от 0 до 1. При этом взаимная проводимость в аварийном режиме будет изменяться от b_1''' до b_2''' . Выберем такое расстояние l , которому соответствует среднее значение взаимной проводимости. Это расстояние назовем *опорным* и будем обозначать аналогичным

символом $\langle l \rangle$. В качестве опорного не обязательно выбирать среднее значение взаимной проводимости, можно выбрать любое другое из области возможных значений.

Уравнение движения ротора генератора при подстановке в него (в режиме короткого замыкания) опорной взаимной проводимости определит опорное относительное движение ротора генератора:

$$T_J d^2 \langle \delta \rangle / dt^2 = P_0 - EU \langle b \rangle \sin \langle \delta \rangle. \quad (7.36)$$

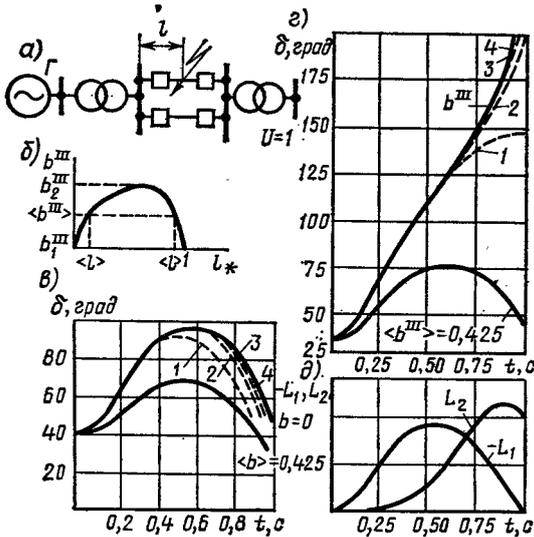


Рис. 7.32. К расчету процесса с помощью опорных значений:

a — схема системы; *b* — зависимость проводимости от удаления короткого замыкания; $\langle l \rangle$ — опорное удаление; $\langle b^m \rangle$ — опорная проводимость; *в* — характеристики переходных процессов при $P_T = 0.6$; — кривые, полученные методом последовательных интервалов; — кривые, полученные с помощью степенных рядов с переменными коэффициентами; 1, 2, 3, 4 — с учетом одного, двух, трех и четырех членов разложения соответственно; *г* — характеристики переходных процессов при $P_T = 0.7$; *д* — решения уравнений в вариациях при $P_T = 0.6$

ческого определения относительных движений ротора генератора (при отклонениях параметров), располагая предварительно рассчитанным или полученным экспериментально некоторым опорным движением.

Использование уравнений в вариациях для расчета характеристик переходных процессов. Аналитические зависимости между варьируемыми параметрами, отражающими появление в системах больших возмущений или каких-либо других аварийных явлений, и параметрами, определяющими протекание переходных процессов, могут быть приближенно представлены в виде многочленов. Для общности рассуждений предположим, что переходный процесс в нелинейной системе описывается уравнением

$$dx/dt = f(t, x, \mu), \quad (7.38)$$

При интегрировании уравнения (7.36) получим зависимость $\langle \delta(t) \rangle$. Если удаление короткого замыкания будет отличаться от принятого в качестве опорного, то относительное движение ротора генератора определится другим уравнением:

$$T_J d^2 \delta / dt^2 = P_0 - EU b \sin \delta. \quad (7.37)$$

В послеаварийном и исходном режимах взаимные проводимости в уравнениях (7.36), (7.37) одинаковы по значению.

Относительные движения ротора генератора при различных удалениях короткого замыкания от начала линии могут быть определены при многократном интегрировании уравнения (7.37). Такое определение переходных процессов при отклонениях взаимной проводимости от опорного значения требует проведения большой вычислительной работы, поскольку уравнения в общем случае интегрируются численными методами.

В этих условиях целесообразно использовать более простые и менее трудоемкие методы аналитического

где μ — исходный параметр, изменение которого приводит к появлению переходного процесса $x(t)$.

При некотором опорном значении параметра $\langle \mu \rangle$ решение уравнения (7.38) также будет опорным $\langle x(t) \rangle$. Необходимость в отыскании способов аналитического представления связи между решением и исходной функциональной зависимостью $x = \varphi(t, \mu)$ появляется вследствие того, что решение уравнения (7.38) не может быть получено в виде элементарных функций и их комбинаций. Произвольное значение параметра μ можно представить в виде

$$\mu = \langle \mu \rangle + \Delta\mu. \quad (7.39)$$

Решение уравнения (7.38), соответствующее этому параметру, также можно рассматривать в виде суммы:

$$x(t) = \langle x(t) \rangle + \Delta x(t), \quad (7.40)$$

где $\Delta x(t) = \varphi(t, \mu) - \varphi(t, \langle \mu \rangle)$.

Если функция $x = \varphi(t, \mu)$ в окрестности $\langle x \rangle = \varphi(t, \langle \mu \rangle)$ разложима в ряд Тейлора по параметру μ , то для приращения решения справедливо выражение

$$\Delta x(t) = L_1(t) \Delta\mu + \frac{1}{2!} L_2(t) \Delta\mu^2 + \frac{1}{3!} L_3(t) \Delta\mu^3 + \dots, \quad (7.41)$$

где

$$L_1(t) = d\varphi(t, \mu)/d\mu|_{\mu=\langle \mu \rangle}; \quad L_2(t) = d^2\varphi(t, \mu)/d\mu^2|_{\mu=\langle \mu \rangle}. \quad (7.41a)$$

Увеличивая число членов разложения, можно уменьшить погрешности в определении приращений решения $\Delta x(t)$ при заданном отклонении параметра $\Delta\mu$. Можно также, сохраняя погрешность, расширять диапазон изменений $\Delta\mu$, увеличивая число членов разложения.

Представление решений в виде разложений (7.41) имеет важное практическое значение. Оно дает возможность просто пересчитывать характеристики переходных процессов в нелинейных системах и представлять решения в сжатой форме. Коэффициенты $L_i(t)$ могут быть определены в виде решений уравнений в вариациях, получаемых в результате дифференцирования по параметру уравнения (7.38), после формальной подстановки в него решения $x = \varphi(t, \mu)$. Так, после однократного дифференцирования уравнения (7.38) по параметру μ и его дальнейшего преобразования с учетом (7.41a) получается уравнение вида

$$\frac{dL_1(t, \mu)}{dt} = a(t, x, \mu) L_1(t, \mu) + g_1(t, x, \mu), \quad (7.42)$$

где

$$a(t, x, \mu) = \frac{\partial f(t, x, \mu)}{\partial x}; \quad g_1(t, x, \mu) = \frac{\partial f(t, x, \mu)}{\partial \mu}.$$

При подстановке опорных значений параметров $\langle \mu \rangle$ и $\langle x(t) \rangle$ в (7.42), у которых $\langle x(t) \rangle$ определяется численным интегрированием опорного уравнения (7.38), получим

$$dL_1/dt = a(t) L_1 + g_1(t). \quad (7.43)$$

Уравнение (7.43) удобно также решать численными методами и затем при необходимости аппроксимировать аналитическими выражениями полученную зависимость.

Уравнение, описывающее изменение во времени коэффициента $L_2(t, x, \mu)$, можно найти дифференцированием по варьируемому параметру μ уравнения (7.42). При этом получается уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial L_2(t, \mu)}{\partial t} = a(t, x, \mu) L_2(t, \mu) + g_2(t, x, \mu), \quad (7.44)$$

где

$$g_2(t, x, \mu) = h(t, x, \mu) L_1 + \frac{\partial g_1}{\partial x} L_1(t, \mu) + \frac{\partial g_1}{\partial \mu};$$

$$h(t, x, \mu) = \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} L_1(t, \mu) + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial \mu} \right].$$

Если параметрам x и μ придать опорные значения, то уравнение (7.44) преобразуется к виду

$$dL_2/dt = a(t) L_2 + g_2(t). \quad (7.45)$$

Аналогично можно получить уравнения и для других коэффициентов L_i . В общем случае коэффициент L_i представляется уравнением

$$\partial L_i(t, \mu)/\partial t = a(t, x, \mu) L_i(t, \mu) + g_i(t, x, \mu), \quad (7.46)$$

где

$$g_i(t, x, \mu) = h(t, x, \mu) L_{i-1}(t, \mu) + \frac{\partial g_{i-1}}{\partial x} L_1(t, \mu) + \frac{\partial g_{i-1}}{\partial \mu}.$$

Рассмотрим получение уравнений в вариациях и приближенное аналитическое представление характеристик переходных процессов в простейшей электрической системе. Предположим, каким-либо методом, например последовательных интервалов, найдено решение опорного уравнения движения:

$$T_J d^2 \langle \delta \rangle / dt^2 = F(\langle b \rangle, \langle \delta \rangle), \quad (7.47)$$

где

$$F(\langle b \rangle, \langle \delta \rangle) = P_T - EU \langle b \rangle \sin \langle \delta \rangle.$$

Уравнение (7.47) описывает переходный процесс в системе, показанной на рис. 7.32, а. Для произвольного удаления короткого замыкания от начала линии и соответственно произвольного значения взаимной проводимости относительное движение ротора генератора можно представить в виде ряда с переменными коэффициентами:

$$\delta(t, b) = \langle \delta(t, \langle b \rangle) \rangle + \frac{\partial \delta}{\partial b} \Big|_{b=\langle b \rangle} \overset{\circ}{b} + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \delta}{\partial b^2} \Big|_{b=\langle b \rangle} \overset{\circ}{b}^2, \quad (7.48)$$

где $\langle \delta \rangle$ — опорный переходный процесс; $\overset{\circ}{b} = b - \langle b \rangle$ — отклонение взаимной проводимости от опорного значения.

Частные производные в (7.48) зависят от времени и отклоняющегося параметра — взаимной проводимости

$$\partial\delta/\partial b = L_1(t, b); \quad \partial^2\delta/\partial b^2 = L_2(t, b). \quad (7.49)$$

При подстановке в (7.49) опорного значения взаимной проводимости $b = \langle b \rangle$ коэффициенты L_i можно рассматривать зависящими только от времени. Таким образом,

$$\delta(t) = \langle \delta \rangle + L_1(t) \overset{\circ}{b} + L_2(t) \overset{\circ}{b}^2 / 2. \quad (7.50)$$

Переменные коэффициенты в (7.50) определяются уравнениями в вариациях, которые получаются дифференцированием (7.47) по отклоняющемуся параметру b после формальной подстановки в него решения $\delta(t, b)$:

$$\frac{d}{db} \left[T_J \frac{d^2\delta(t, b)}{dt^2} \right] = \frac{d}{db} F[b, \delta(t, b)]. \quad (7.51)$$

Дифференцируя (7.51) получим

$$T_J d^2L_1(t, b)/dt^2 = a(t, \delta, b) L_1(t, b) + g_1(t, \delta, b), \quad (7.52)$$

где

$$a(t, \delta, b) = \partial F/\partial\delta = -EU b \cos \delta; \quad g_1(t, \delta, b) = \partial F/\partial b = -EU \sin \delta.$$

При подстановке в (7.52) опорных параметров $\langle b \rangle$ и $\langle \delta \rangle$ получим уравнение в вариациях, определяющее первый переменный коэффициент $L_1(t)$:

$$T_J d^2 L_1/dt^2 = a(t) L_1 + g_1(t). \quad (7.53)$$

Далее, дифференцируя (7.52) по отклоняющемуся параметру и осуществляя аналогичные преобразования, получим

$$T_J \frac{d^2 L_2(t, b)}{dt^2} = a(t, \delta, b) L_2(t, b) + g_2(t, \delta, b), \quad (7.54)$$

где

$$g_2(t, \delta, b) = h(t, \delta, b) L_1(t, b) + \frac{\partial g_1(t, \delta, b)}{\partial b} L_1(t, b) + \frac{\partial g_1(t, \delta, b)}{\partial b};$$

$$h(t, \delta, b) = \left[\frac{\partial^2 F}{\partial \delta^2} L_1(t, b) + \frac{\partial^2 F}{\partial \delta \partial b} \right].$$

Подставляя в $g_2(t, \delta, b)$ выражения для $g_1(t, \delta, b)$ и $F[b, \delta(t, b)]$ и осуществляя несложные преобразования, запишем

$$g_2(t, \delta, b) = EU b \sin \delta L_1^2(t, b) - 2EU \cos \delta L_1(t, b).$$

При подстановке в (7.54) опорных параметров $\langle b \rangle$ и $\langle \delta \rangle$ получим уравнение в вариациях, определяющее второй переменный коэффициент $L_2(t)$:

$$T_J d^2 L_2/dt^2 = a(t) L_2 + g_2(t). \quad (7.55)$$

При необходимости можно увеличить число учитываемых членов разложения в (7.48) и получить для них уравнения в вариациях, аналогичные (7.53) и (7.55). Уравнения (7.53) и (7.55) — линейные с переменными коэффициентами $a(t)$ и $g_i(t)$. Эти уравнения можно интегрировать параллельно с опорным уравне-

нием (7.47), сразу определяя аналитическое представление множества характеристик переходных процессов при отклонениях значений взаимной проводимости. По формулам (7.48), учитывающим два члена разложения, можно практически для всех встречающихся отклонений параметров определять протекание переходных процессов и их устойчивость в пределах 1,0—1,5 с, т. е. в первом цикле качаний роторов генераторов.

Покажем применение метода опорных значений (вариаций) для схемы электрической системы, приведенной на рис. 7.32, а. Расчеты переходных процессов проводились при вариациях удаления трехфазного короткого замыкания от начала линии. Продолжительность короткого замыкания принималась равной 0,15 с, после чего предполагалось отключение повреждений цепи на 0,4 с и затем успешное автоматическое повторное включение. Опорное значение взаимной проводимости (рис. 7.32, б) в аварийном режиме равно в относительных единицах 0,425. Отклонение от опорной проводимости принималось равным 100% от ее значения, т. е. рассматривался процесс при коротком замыкании в начале или конце линии, при котором взаимная проводимость равна нулю.

Опорный процесс рассчитывался обычным способом по методу последовательных интервалов. Процесс при нулевом значении проводимости определялся аналитически с помощью степенных рядов с учетом первого, второго, третьего и четвертого членов разложения. Этот же процесс для оценки погрешности рассчитывался методом последовательных интервалов.

На рис. 7.32, в приведены характеристики устойчивых процессов при передаче относительной мощности в систему, равной 0,6, а на рис. 7.32, г — 0,7, при которой процесс оказывается неустойчивым. Изменения во времени первых двух коэффициентов степенного ряда показано на рис. 7.32, д.

Анализ результатов расчета показывает, что на рассматриваемых интервалах времени, т. е. в пределах 1с, достаточно ограничиться учетом двух членов разложения. При учете четырех членов разложения кривые, полученные методом последовательных интервалов и с помощью степенных рядов, практически совпадают как для устойчивых, так и для неустойчивых процессов.

Изложенный подход к анализу переходных процессов применим и при одновременном учете нескольких отклоняющихся параметров. Использование этого подхода к пересчету характеристик переходных процессов при вариациях параметров должно предусматривать оценку погрешностей результатов. Одним из возможных способов определения погрешности может быть сравнение результатов расчетов, полученных обычным способом и с помощью уравнений в вариациях. Если погрешность окажется недопустимо большой, то ее можно уменьшить либо увеличивая число членов разложения, либо уменьшая диапазон отклонений мощности от опорной.

Располагая достаточно простыми аналитическими зависимостями (7.48), можно, используя методы функциональных преобразований случайных величин, получать необходимые вероятностные характеристики переходных процессов, которые могут служить основой для расчета показателей надежности переходных электромеханических процессов в электроэнергетических системах.

§ 7.5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПРИ РАСЧЕТАХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассмотрение электроэнергетической системы как сложной системы требует учета большого числа взаимосвязанных элементов. Такими элементами являются генераторы, регуляторы возбуждения, трансформаторы, ЛЭП, двигатели производственных механизмов, компенсирующие устройства и т. д. Во время работы электрической системы происходят непрерывные изменения параметров режима и связей между элементами системы, меняются схема электрической системы, состав включенного оборудования. Все многообразие процессов, происходящих в электрической системе, и сочетание условий, при которых эти процессы возникают, невозможно однозначно определить.

Режим работы электрической системы, следовательно, во многом определяется случайными явлениями, особенно ощутимыми при рассмотрении переходных процессов, вызванных большими аварийными возмущениями. К случайным относятся такие явления, как обрывы проводов, падения опор, сбросы и набросы мощностей элементов электрической системы, вызванные изменениями нагрузок, появление коротких замыканий. Вид короткого замыкания, его продолжительность и место возникновения также имеют случайную природу.

Переходные электромеханические процессы при больших случайных возмущениях в системе описываются вероятностными закономерностями, что вносит специфические особенности в их расчет по сравнению с расчетом процессов в детерминированной системе.

Здесь можно различить вероятностно-определенный характер процессов, когда для определяющих их случайных величин точно известны вероятностные характеристики. Когда для случайных величин вероятностного описания нет или оно заведомо не точно, процессы будут описанными неопределенно. Исходная информация в этом случае задается некоторыми интервалами или отрезками возможных значений. Последнее время получает развитие теория расплывчатой информации.

Обычное допущение о том, что параметры и возмущения могут быть заданы однозначно, является идеализацией процессов, происходящих в реальной электрической системе. Этот подход, во многих случаях вполне приемлемый, позволяет с достаточной точностью (с точки зрения поставленной задачи) отразить наиболее существенные свойства электрической системы. Однако решение таких задач, как определение показателей надежности электрической системы, невозможно без применения методов теории вероятностей и математической статистики.

Выбор мероприятий по улучшению устойчивости электрической системы, основанный на детерминированном подходе, содержит опасность недостаточной обоснованности их. Так, ориентируясь на наиболее тяжелый режим, можно допустить неоправданно большой расход средств на улучшение устойчивости из-за малой вероятности появления этого режима.

При случайных возмущениях и случайных исходных параметрах результаты расчетов переходных процессов также будут случайными. Например, случайными будут значения относительных углов роторов генераторов и коэффициенты запасов устойчивости.

Вероятностные значения отдельных исходных параметров и возмущений определяются путем сбора в энергетических системах статистических данных и последующей их обработки методами математической статистики. Чтобы получить вероятностные характеристики

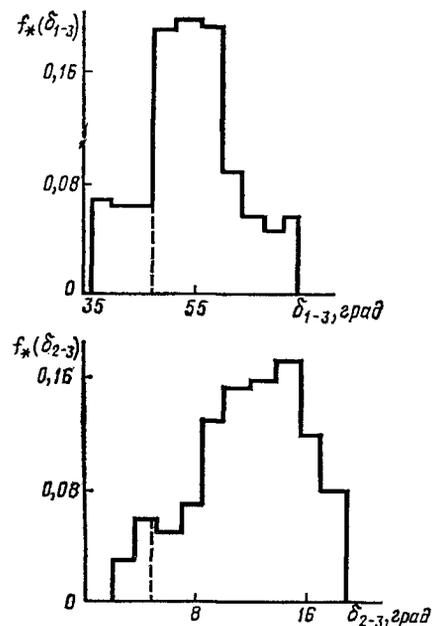
параметров, определяющих протекание переходных процессов (например, относительных углов роторов генераторов), необходимо применять специальные методы расчета. Вероятностные характеристики таких «выходных» параметров могут рассматриваться как результат преобразования вероятностных характеристик исходных «входных» параметров и возмущений.

Вероятностные оценки переходных процессов получаются с помощью экспериментов, позволяющих собрать статистические данные и определить вероятностные характеристики «выходных» параметров в реальной системе.

Возможен путь расчетно-экспериментальный, когда различными численными методами проводятся многократные расчеты (каждый по своему детерминированному алгоритму).

Например, при расчетах по методу статистического моделирования (метод Монте—Карло) используется комплекс программ, в который входят программа расчета устойчивости и специальная программа статистической вариации исходных данных.¹ Случайная вариация исходных данных осуществляется с помощью устройства для генерирования последовательности случайных чисел с равномерным (нормальным) законом распределения вероятностей. Для каждого случайного сочетания значений исходных данных производится расчет устойчивости. При многократном повторении таких расчетов собираются статистические данные об искомых параметрах, характеризующих переходный процесс. Последующая обработка этих данных дает возможность получить эмпирические плотности вероятностей и функции распределения.

Рис. 7.33. Гистограммы распределений максимальных значений относительных углов роторов генераторов



Метод статистического моделирования позволяет одновременно учитывать относительно большое число случайно заданных параметров и рассматривать достаточно сложные электрические системы*.

На рис. 7.33 приведены гистограммы распределений максимальных значений относительных углов роторов генераторов в первом цикле качания, полученные для сложной электрической системы, содержащей 17 генераторов. При построении гистограммы весь диапазон значений максимальных вылетов относительных углов разбивается на интервалы, которые (δ_i, δ_{i+1}) показаны на том же рисунке. На каждом интервале, как на основании, строится прямоугольник, площадь которого равна отношению числа значений максимальных углов, оказавшихся внут-

* См.: Веников Г. В., Головицын Б. И., Стров В. А. Применение метода статистических испытаний к анализу устойчивости электрических систем. — Электричество, 1969, № 1, с. 13—18.

при данного интервала m_i при статистических испытаниях, к общему числу испытаний n :

$$p_i^* = m_i/n = f_i^* (\delta_{i+1} - \delta_i).$$

Сумма площадей всех прямоугольников, или полная площадь гистограммы,

$$\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{n} = \sum_{i=1}^k f_i^* (\delta_{i+1} - \delta_i) = 1,$$

так как $\sum_{i=1}^k m_i = n$, где k — число интервалов. Рассматривалось трехфазное короткое замыкание на шинах одной из станций в предположении, что параметры генераторов, трансформаторов, ЛЭП и нагрузок известны с погрешностями, значения которых распределены по нормальному закону*.

Вероятностные характеристики устойчивости могут быть определены также при рассмотрении различных аварийных ситуаций, т. е. сложных случайных событий (например, возмущения, вызывающего изменения углов δ , действия в некоторые моменты времени устройства защиты и автоматики и т. д.). Все многообразие случайных аварийных ситуаций можно разбить на два непересекающихся — устойчивое и неустойчивое — подмножества, определяя вероятность нарушения устойчивости системы как вероятность появления аварийной ситуации в неустойчивом подмножестве.

Численные методы определения вероятностных характеристик (статистическое моделирование) переходных процессов требуют такого большого количества вычислений, что расчеты сложных электрических систем, содержащих множество станций, нагрузок и разветвленную сеть, становятся затруднительными даже при использовании вычислительных машин. Эти методы используются для частных случаев, т. е. справедливы только для конкретных условий, принятых в расчете. Поэтому их можно применять в тех случаях, когда либо отсутствуют аналитические методы, либо их применение затруднено.

Методы аналитического получения вероятностных характеристик переходных электромеханических процессов, успешно используются при решении задач анализа и синтеза. Так, задаваясь желаемыми вероятностными характеристиками переходных процессов, вытекающими, например, из требований, предъявляемых к надежности электрических систем, можно целенаправленно выбирать мероприятия по улучшению устойчивости.

Вероятностные характеристики предельного времени отключения короткого замыкания. В реальных условиях работы электрических систем параметры, определяющие протекание процесса, могут принимать различные значения из области возможных изменений. Влияние каждого из этих параметров в отдельности на предельное время отключения короткого замыкания было показано на рис. 7.3. Предельное время отключения короткого замыкания, полученное при условии, что сопротивление дуги в точке короткого замыкания равно нулю, удаление его от начала линии равно нулю, а также отклонения э. д. с. и сопротивления гене-

* См.: Цукерник Л. В., Дерзкий В. П. Комплекс программ для анализа на ЦВМ устойчивости с учетом погрешности исходной информации и реализации расчетных режимов. Проблемы Технической Электродинамики. — Киев: Наукова думка, 1970, вып. 25.

ратора от значений, называемых расчетными, равно нулю, было принято за единицу. Действительные значения параметров зависят от большого числа факторов, которые практически не могут быть учтены в расчетах. Например, точка возникновения короткого замыкания зависит от атмосферных условий, состояния изоляции на различных участках ЛЭП и т. д. Сопротивление дуги в месте короткого замыкания зависит также от ряда факторов, учесть которые практически невоз-

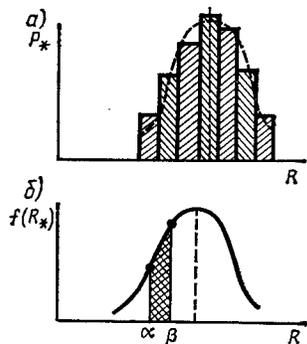


Рис. 7.34. Вероятностные характеристики дуги:
а — примерные гистограммы сопротивления; б — вероятность появления дуги, имеющей сопротивление R

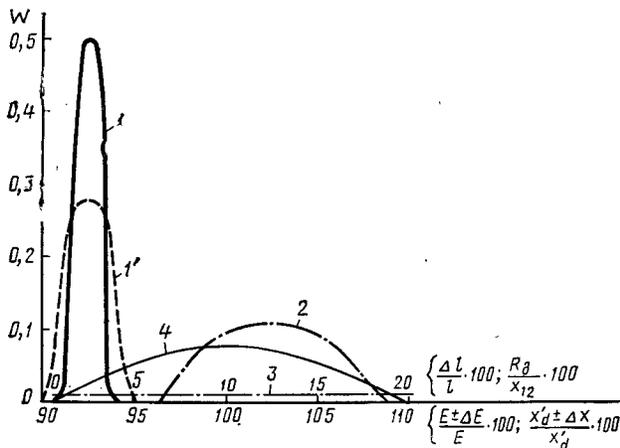


Рис. 7.35. Плотности вероятностей W параметров режима и параметров системы:

$$1 - W\left(\frac{R_d}{x_{12}} 100\right); \quad 1' - \text{то же, при } \sigma_1 < \sigma_2; \quad 2 - W\left(\frac{E \pm \Delta E}{E} 100\right); \quad 3 - W\left(\frac{\Delta l}{l} 100\right); \quad 4 - W\left(\frac{x'_d \pm \Delta x}{x'_d} 100\right)$$

можно. При многократной регистрации сопротивления дуги случайные ее значения получаются различными; их можно разбить на ряд равных интервалов и на каждом, как на основании, построить прямоугольники с высотами, равными частотам P_{*i} появления значений сопротивлений (рис. 7.34, а). Полученная ступенчатая кривая представляет собой *гистограмму распределения сопротивления дуги*:

$$P_{*i} = \varphi(R).$$

Частота, соответствующая i -му интервалу,

$$P_{*i} = m_i/n, \quad \text{причем} \quad \sum_{i=1}^n P_{*i} = \sum_{i=1}^n (m_i/n) = 1,$$

где m_i — число появлений данного сопротивления дуги в i -м интервале значений; n — общее число наблюдений сопротивления дуги.

При увеличении числа наблюдений и выборе более мелких интервалов гистограмма превратится в кривую, ограничивающую площадь, равную единице, и называемую *плотностью вероятностей сопротивления дуги*. На рис. 7.34, б

приведена плотность распределения нормального закона распределения, т. е. значения $f(R_*) = \varphi(R)$, отвечающего гистограмме, показанной на рис. 7.34, а.

Плотность вероятности (или плотность распределения) является одной из форм закона распределения случайной величины, устанавливающей связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Если выделить некоторый интервал значений сопротивления дуги от α до β , то вероятность случайного события, состоящего в том, что при появлении короткого замыкания сопротивление дуги окажется в этом интервале, равна заштрихованной на рис. 7.34, б площади:

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(R) dR = p(\alpha < R < \beta).$$

Зная плотность вероятности $f(R)$, можно найти теоретическую функцию распределения случайной величины

$$F(R) = \int_{-\infty}^R f(R) dR,$$

которая определяет вероятность случайного события, состоящего в том, что сопротивление дуги будет меньше R . Эта функция является наиболее универсальной и наиболее полной, с вероятностной точки зрения, характеристикой случайной величины.

Плотности вероятностей случайных параметров, влияющих на предельное время отключения короткого замыкания, имеют вид, показанный на рис. 7.35. При этом предполагается, что сопротивление дуги, э. д. с. и переходное сопротивление генератора распределены по усеченному нормальному закону, а удаление короткого замыкания от начала линии — по равномерному закону.

Усеченные законы распределения случайных величин применяются в тех случаях, когда необходимо ограничить область изменения этих величин. Случайная величина, распределенная по нормальному закону, изменяется от $-\infty$ до $+\infty$. При рассмотрении сопротивления дуги целесообразно ограничить область изменения его значения практически возможными пределами, например не рассматривать отрицательное значение сопротивления дуги.

Вероятностные характеристики параметров, заданные здесь априорно, должны определяться путем наблюдений, число которых обычно ограничено и которые содержат элементы случайности. Для уменьшения влияния случайных погрешностей в математической статистике разработаны методы выравнивания статистических рядов с последующей их проверкой по критериям согласия с теоретическими распределениями.

Априорные характеристики, применяемые при отсутствии статистических данных на основе сведений о физических свойствах рассматриваемых явлений, могут успешно применяться в расчетах первого приближения. Например, предположение о том, что сопротивление дуги подчинено усеченному нормальному закону распределения и может быть представлено в виде неизменной во времени величины, является условным. В действительности сопротивление дуги меняется во времени, так как меняются длина дуги и ток, протекающий через нее. Длина дуги определяется направлением пути перекрытия, на ее изменение оказывают

влияние восходящие потоки воздуха, обусловленные выделением энергии столбом дуги, и атмосферные условия. Из анализа экспериментальных данных можно установить эмпирическую формулу для определения сопротивления дуги в зависимости от ее длины и тока, которые изменяются во времени. Эти изменения приближенно могут быть учтены уравнениями первой степени.

Влияние случайных вариаций значений сопротивления дуги и различных способов представления ее в расчетах на относительное движение ротора генератора показано в виде гистограмм (рис. 7.36).

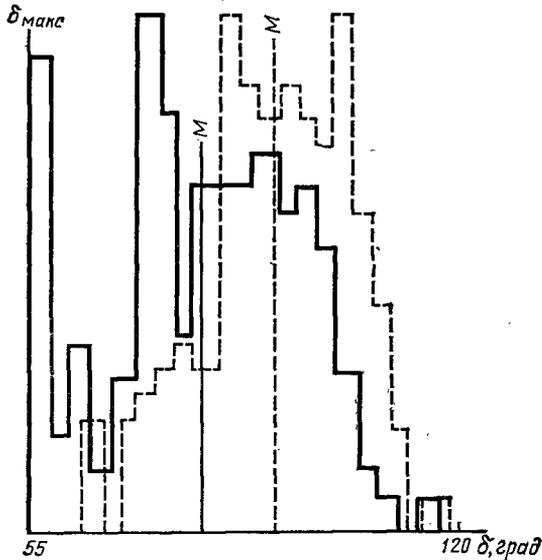


Рис. 7.36. Гистограммы δ_{\max} :

— с учетом изменения сопротивления дуги во времени; --- без учета этого изменения

При учете изменения во времени сопротивления дуги получаются более легкие условия протекания переходного процесса. Так, среднее вероятностное значение максимального вылета угла ротора генератора без учета изменения во времени сопротивления дуги $\delta_{\max} = 92,27^\circ$, а при учете изменения во времени сопротивления дуги $\delta_{\max} = 81,59^\circ$.

Предполагая, что принятые вероятностные характеристики параметров реальны, рассмотрим вероятностные характеристики предельного времени отключения короткого замыкания $t_{*\text{откл}}$. Предельное время, как было указано выше, является случайной величиной, функционально зависящей от случайных параметров. Функция его распределения позволяет оценивать вероятности появления любых возможных значений.

Плотность вероятности предельного времени $f(t_{*\text{откл}})$ можно определить по известной плотности вероятности сопротивления дуги $f(R_{*\delta})$ и функциональной зависимости $t_{*\text{откл}} = \xi(R_{*\delta})$ в предположении, что остальные параметры заданы в виде детерминированных величин.

Функция $\xi(R_{*\delta})$ дифференцируема, ей отвечает однозначно обратная функция $R_{*\delta} = \varphi(t_{*\text{откл}})$. Величины $t_{*\text{откл}}$ и $R_{*\delta}$ связаны между собой взаимно однозначным соответствием и из неравенства

$$R_{*\delta 0} < R_{*\delta} \leq R_{*\delta 0} + dR_{*\delta} \quad (7.56)$$

следует неравенство

$$t_{*\text{откл} 0} < t_{*\text{откл}} \leq t_{*\text{откл} 0} + dt_{*\text{откл}} \quad (7.57)$$

где $t_{*\text{откл} 0} = \xi(R_{*\delta 0})$, и наоборот. Следовательно, вероятность выполнения условия (7.56) равна вероятности выполнения условия (7.57). Эти вероятности равны заштрихованным площадкам S_R и S_t , приведенным на рис. 7.37, а, в.

С точностью до малых высшего порядка можно записать

$$f(R_{*0}) dR_{*0} = f(t_{* \text{откл}}) dt_{* \text{откл}} \quad (7.58)$$

Искомая плотность вероятности определится из (7.58):

$$f(t_{* \text{откл}}) = f(R_{*0}) |dR_{*0}/dt_{* \text{откл}}|.$$

Производная берется по модулю, так как плотности вероятностей — неотрицательные функции*.

Подставляя в $f(t_{* \text{откл}})$ вместо случайной величины R_{*0} ее выражение $R_{*0} = \varphi(t_{* \text{откл}})$, получим

$$f(t_{* \text{откл}}) = f[\varphi(t_{* \text{откл}})] |d\varphi(t_{* \text{откл}})/dt_{* \text{откл}}|.$$

В рассмотренном случае обратная функция однозначна (рис. 7.37, б).

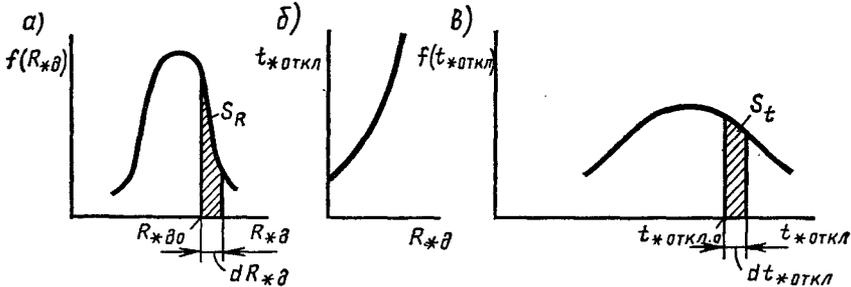


Рис. 7.37. Определение плотности вероятности предельного времени отключения:

а — плотность вероятности сопротивления дуги; б — связь времени отключения с вероятностными факторами; в — плотность вероятности предельного времени

При общих предположениях функциональная зависимость между случайными величинами $y = \xi(x)$ может быть такой, что обратная функция $x = \varphi_j(y)$ ($j = 1, 2, \dots, k$) будет многозначной. Тогда плотность вероятности функции случайной величины

$$f(y) = \sum_{j=1}^k f_x[\varphi_j(x)] |d\varphi_j(x)/dx|. \quad (7.59)$$

Зависимости предельного времени отключения короткого замыкания от влияющих факторов можно приближенно представить линейными функциями вида

$$t_{* \text{откл}} = a + bR_{*0}. \quad (7.60)$$

С учетом (7.60) плотность вероятности предельного времени отключения короткого замыкания

$$f(t_{* \text{откл}}) = f[(t_{* \text{откл}} - a)/b] |1/b|. \quad (7.61)$$

* См.: Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Советское радио, 1969, с. 104.

Интегрируя (7.61), получим функцию распределения предельного времени отключения короткого замыкания:

$$F(t_{* \text{откл}}) = \int_{-\infty}^{t_{* \text{откл}}} f(t_{* \text{откл}}) dt_{* \text{откл}}$$

На рис. 7.38 отражены результаты расчетов, отвечающие вероятностным характеристикам параметров, приведенным на рис. 7.35. Эти функции дают возможность определять вероятность нарушения устойчивости при различных фактических значениях времени отключения короткого замыкания.

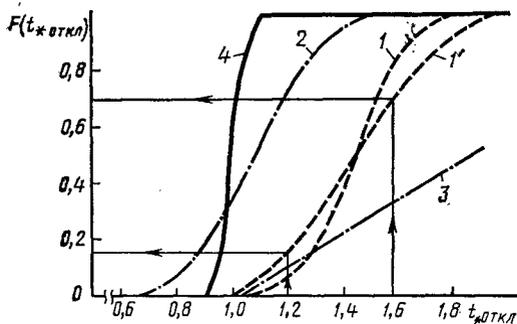


Рис. 7.38. Функции распределения:

1 — при усеченном нормальном распределении сопротивления дуги в месте короткого замыкания; 1' — то же, при $\sigma_1 > \sigma_2$; 2, 4 — при усеченном нормальном распределении переходного реактивного сопротивления генератора; 3 — при равномерном распределении места короткого замыкания

В системе произойдет нарушение устойчивости, если предельное время отключения короткого замыкания будет меньше фактического. Вероятности таких событий определяются кривыми, приведенными на рис. 7.38. Если предположить, что фактическое время отключения короткого замыкания $t_{* \text{откл}} = 1,2$, то при случайном изменении сопротивления дуги с вероятностью 0,15 (кривая 1') произойдет нарушение устойчивости. При увеличении значения фактического времени отключения короткого замыкания, например до 1,6, вероятность нарушения устойчивости возрастает до 0,7.

Рассмотрим влияние среднеквадратического значения отключения сопротивления дуги на вероятностные характеристики устойчивости системы. Это влияние зависит от соотношения между фактическим временем отключения короткого замыкания $t_{* \text{ф}}$ и математическим ожиданием предельного времени отключения $M\{t_{* \text{откл}}\}$.

Если фактическое время отключения $t_{* \text{ф}}$ больше математического ожидания ($t_{* \text{ф}} > M\{t_{* \text{откл}}\}$), то с увеличением рассеяния случайных значений сопротивления дуги (с увеличением среднеквадратического отклонения σ_R) вероятность нарушения устойчивости уменьшается (рис. 7.38, кривые 1 и 1'). Действительно, при $t_{* \text{ф}} = 1,6$ и $\sigma_R = 0,8$ устойчивость нарушается с вероятностью 0,84, а при $\sigma_R = 1,5$ — с вероятностью 0,7. В предельном случае, когда $\sigma_R = 0$ и $t_{* \text{ф}} > M\{t_{* \text{откл}}\}$, при коротком замыкании устойчивость нарушается с вероятностью, равной единице. Если же фактическое время отключения короткого замыкания меньше математического ожидания ($t_{* \text{ф}} < M\{t_{* \text{откл}}\}$), то с увеличением σ_R вероятность нарушения устойчивости увеличивается.

Располагая вероятностными характеристиками $t_{* \text{откл}}$, можно обоснованно выбрать целесообразные значения $t_{* \text{ф}}$ и мероприятия по улучшению устойчивости. Предположим, что в результате расчетов получена такая функция распределения предельного времени отключения короткого замыкания, при которой вероятности нарушения устойчивости в системе оказываются недопустимо большими. Эту функцию распределения можно изменить в желательном направлении, проведя мероприятия по улучшению устойчивости.

Вероятностный подход к определению влияния вариаций параметров на предельное время отключения короткого замыкания позволяет оценить не только диапазон возможных значений предельного времени, но и случайные распределения этих значений внутри диапазона. Например, определяя вероятностные характеристики предельного времени отключения короткого замыкания при последовательном учете влияния каждого параметра, надо учесть, что не все из перечисленных параметров могут изменяться одновременно и в этих условиях $t_{*откл}$ может рассматриваться в виде гиперповерхности, построенной в координатах влияющих параметров.

Вероятностные характеристики $t_{*откл}$ могут быть определены и при одновременном учете случайного характера совокупности параметров. Для этого необходимо выразить предельное время как функцию от всех случайных параметров.

Вероятностные характеристики относительных движений роторов генераторов*. Приближенное решение дифференциальных уравнений относительного движения ротора при вариациях исходных параметров позволяет на каждом шаге интегрирования устанавливать функциональные зависимости между относительными углами и варьируемыми параметрами. При неоднозначно заданной взаимной проводимости соотношения имеют вид

$$\delta_i = -L_i b, \text{ где } i = 1, 2, \dots \quad (7.62)$$

Отклонение взаимной проводимости от ее опорного значения вызвано изменением точки возникновения короткого замыкания. В общем случае точка возникновения короткого замыкания является случайной. Следовательно, случайная природа свойственна также взаимной проводимости и относительным углам роторов генератора.

Относительное движение ротора генератора при учете взаимной проводимости в виде случайной величины может быть представлено неслучайным изменением во времени случайного относительного угла генератора. В соответствии с (7.62) для любого момента времени t_i угол δ_i является величиной случайной, а изменение во времени угла δ происходит неслучайным образом. Если зафиксировать некоторое значение взаимной проводимости \hat{b} , то ей будет соответствовать детерминированная функция времени $\hat{\delta}(t)$.

Неслучайное изменение во времени случайного относительного угла ротора генератора называется *квазидетерминированным процессом*. Наиболее полной вероятностной характеристикой квазидетерминированного процесса является его одномерная функция распределения. Определим плотность вероятности и функцию распределения относительного угла ротора генератора в момент времени t_i при удалении на случайное расстояние от начала линии трехфазного короткого замыкания.

Взаимная проводимость в режиме короткого замыкания функционально зависит от случайного расстояния l . Эту зависимость можно получить из комплексной схемы замещения системы, преобразовав ее к виду, показанному на

* Подробнее см.: Веников В. А., Путьгин Е. В. Вероятностный подход к определению динамической устойчивости электрических систем. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1972, № 5.

рис. 7.39, откуда и определяется значение взаимной проводимости в аварийном режиме III. Связь значения взаимной проводимости $b'''(l)$ длины участка l линии передачи, за которым происходит короткое замыкание, показана на рис. 7.40.

Для более сложных систем зависимость взаимной проводимости от удаления короткого замыкания может быть определена приближенно путем многократных

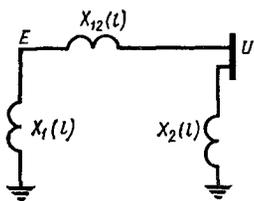


Рис. 7.39. Эквивалентная схема замещения передачи

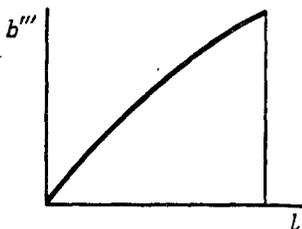


Рис. 7.40. Примерный характер зависимости проводимости от места короткого замыкания

расчетов значений проводимости при перемещении точки короткого замыкания вдоль ЛЭП. По результатам таких расчетов может быть определено аналитическое выражение зависимости $b(l)$. В большинстве случаев как для сложных, так и для простых систем зависимости взаимной проводимости от удаления короткого замыкания (от начала линии) хорошо аппроксимируются многочленами второй степени

$$b(l) = a_0 + a_1 l + a_2 l^2,$$

Коэффициенты a_i ($i = 0, 1, 2$) обычно определяются по методу наименьших квадратов.

Отклонение взаимной проводимости от опорного значения (см. § 7.4)

$$\overset{\circ}{b}(l) = a_0 - \langle b \rangle + a_1 l + a_2 l^2.$$

Отклонение относительного угла ротора генератора от опорного значения в момент времени, соответствующий i -му интервалу интегрирования, вызванное отклонением проводимости $\overset{\circ}{b}(l)$,

$$\delta_i = T_i^{(0)} + T_i^{(1)} l + T_i^{(2)} l^2,$$

где

$$T_i^{(0)} = -L_i(a_0 - \langle b \rangle); T_i^{(1)} = -L_i a_1; T_i^{(2)} = -L_i a_2. \quad (7.63)$$

Примерный характер зависимости $\delta_i(l)$ показан на рис. 7.41.

Значение относительного угла ротора генератора с учетом соотношения (7.63) представим в виде

$$\delta_i = \tilde{T}_i^{(0)} + T_i^{(1)} l + T_i^{(2)} l^2$$

где

$$\tilde{T}_i^{(0)} = \langle \delta_i \rangle + T_i^{(0)}.$$

Изменение во времени относительного угла ротора генератора может быть определено по формуле

$$\delta(t) = \tilde{T}^{(0)}(t) + T^{(1)}(t)l + T^{(2)}(t)l^2. \quad (7.64)$$

Вероятностные характеристики изменения относительного угла ротора генератора могут быть определены методами функциональных преобразований случайных величин в соответствии с (7.64). Обратная функция $l = \varphi(\delta_i)$ однозначна (рис. 7.41).

Зависимости плотности вероятности $F(\delta_i)$ и функции распределения $f(\delta_i)$ относительно угла δ_i ротора генератора можно оценить кривыми, приведенными

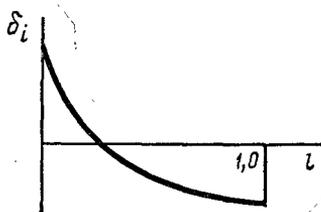


Рис. 7.41. График зависимости значения угла δ_i от места аварии

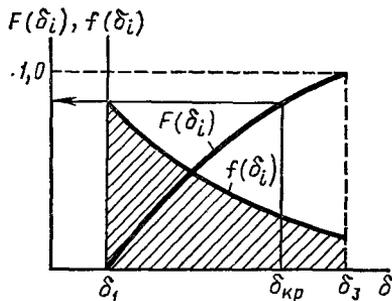


Рис. 7.42. Плотность вероятности и распределение относительного угла δ_i

на рис. 7.42. Они построены в предположении, что случайное удаление короткого замыкания от начала линии подчинено закону равномерной плотности. По виду плотности вероятности и функции распределения относительного угла ротора генератора можно заключить, что значения относительных углов будут с большими вероятностями располагаться вблизи нижней границы возможных значений.

При вероятностной оценке устойчивости электрических систем представляют интерес случаи, когда при некоторых значениях удаления короткого замыкания от начала линии возможны нарушения устойчивости. При этом область возможных реализаций переходного процесса $\delta(t)$, показанная на рис. 7.43, содержит критическую кривую 1, разделяющую рассматриваемую область на устойчивую (кривые 2) и неустойчивую (кривые 3) подобласти. Вероятность сохранения устойчивости определяется согласно функции распределения относительного угла ротора генератора, для чего в соответствии с рис. 7.44 делается подстановка критического угла $\delta_{кр}$ в исследуемую функцию. Вероятность нарушения устойчивости равна $1 - F(\delta_{кр})$. В ряде случаев, не проводя многократных расчетов, можно выделить критическое значение исходного случайного параметра, соответствующего критической кривой переходного процесса $\delta_{кр}(t)$.

Так, предположим, что угол отключения $\delta_{откл}$ короткого замыкания известен. Так как взаимная проводимость в аварийном режиме является величиной случайной, то и угловые характеристики мощности, показанные на рис. 7.44, будут для условий аварийного режима III иметь случайные значения (штриховые кривые).

Максимальное значение угловой характеристики мощности P_m^{III} в рассматриваемом режиме также будет случайным. При постепенном уменьшении зна-

чения P_m^{III} может наступить такое положение, при котором угол отключения станет равным предельному, т. е. площадка ускорения будет равна площадке возможного торможения (рис. 7.44). Значение максимума угловой характеристики аварийного режима называется *предельным* $P_{m\text{пр}}^{III}$ и определяется по формуле

$$P_{m\text{пр}}^{III} = \frac{P_0(\delta_{кр} - \delta_0^I) + P_m^{II}(\cos \delta_{кр} - \cos \delta_{откл.пр})}{\cos \delta_0^I - \cos \delta_{откл.пр}}$$

Располагая функцией распределения величины P_m^{III} , можно найти вероятность нарушения устойчивости. При этом оценивается вероятность события,

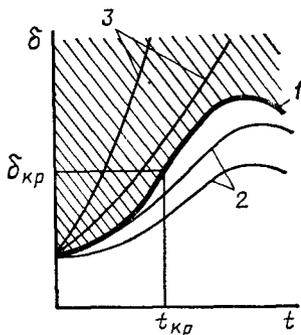


Рис. 7.43. Разделение $\delta = f(t)$ на устойчивые и неустойчивые области

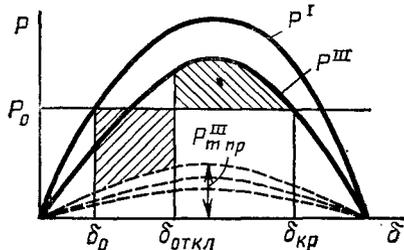


Рис. 7.44. Угловые характеристики мощностей при учете вероятностных факторов

состоящего в том, что при коротком замыкании должно выполняться соотношение $P_m^{III} < P_{m\text{пр}}^{III}$.

Полученные ранее функции распределения относительного угла ротора генератора и соответствующая ей вероятность нарушения устойчивости являются условными, поскольку они найдены в предположении, что в системе произошло короткое замыкание определенного вида. Появление короткого замыкания является событием случайным.

Если рассматривать некоторый промежуток времени, например один год, то число появлений короткого замыкания будет случайным, а следовательно, случайным будет и число нарушений устойчивости.

Для решения практических вопросов проектирования и эксплуатации электрических систем важно знать вероятностные характеристики нарушений устойчивости в течение продолжительных интервалов времени, вызванных действием на электрическую систему больших возмущений определенного вида. Характеристики нарушений устойчивости могут быть найдены, если известны вероятностные характеристики возмущений определенного вида, например коротких замыканий, и характеристики устойчивости при возникновении одного возмущения.

Сложность получения вероятностных характеристик нарушений устойчивости вызывается тем, что с течением времени меняются условия работы электри-

ческой системы и ее свойства, вследствие чего вероятностные характеристики потока больших возмущений и устойчивости при возникновении одного возмущения также не остаются стабильными. При рассмотрении продолжительных интервалов времени исходные вероятностные характеристики больших возмущений и устойчивости при одном возмущении должны определяться с использованием различных методов прогнозирования.

Поток больших возмущений в энергетических системах можно рассматривать как поток редких событий, подчиненных закону распределения Пуассона. Вероятность события, состоящего в том, что за время τ произойдет m возмущений,

$$P_m(\tau) = [(\lambda\tau)^m / m!] e^{-\lambda\tau}, \quad (7.65)$$

где λ — плотность потока; τ — приведенное время, равное суммарной продолжительности работы системы в рассматриваемом режиме в течение реального промежутка времени Δt .

Соотношение (7.65) справедливо для простейшего потока, удовлетворяющего условиям стационарности, отсутствия последействия и ординарности*. В действительности условие стационарности может быть справедливым только для ограниченного отрезка времени, так как плотность потока (число возмущений, приходящихся на единицу времени) в течение продолжительного периода не остается постоянной. С течением времени совершенствуются устройства грозозащиты, повышаются уровни изоляции, улучшаются параметры элементов электрических систем и т. д. При долгосрочных прогнозах необходимо учитывать нестационарность потока больших возмущений, т. е. необходимо вводить в расчеты мгновенную плотность $\lambda(t)$, зависящую от времени. Тогда вероятность появления m возмущений за время τ , отсчитанное от некоторого момента t_0 ,

$$P_m(\tau, t_0) = (a^m / m!) e^{-a}, \quad (7.66)$$

где $a = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \lambda(t) dt$ — математическое ожидание числа возмущений на участке времени $[t_0, t_0 + \tau]$.

Зависимость $\lambda(t)$ должна определяться современными методами прогнозирования с учетом тенденций в изменении характеристик параметров системы и режима, а также с учетом изменения структуры системы, совершенствования средств защиты и автоматики и т. д. При этом должны использоваться возможности всех методов научно-технического прогнозирования — экстраполяции, экспертных оценок и моделирования. Экстраполяционные оценки основываются на предположениях о неизменности или об относительной стабильности тенденций в развитии. В экстраполяционные зависимости с течением времени должны вноситься корректировки, учитывающие опыт эксплуатации. Продолжительность таких оценок обычно ограничивается 10—15 годами.

В первом приближении можно воспользоваться данными о среднестатистических значениях (математических ожиданиях) числа возмущений за выбранный промежуток времени. Если математическое ожидание числа однофазных коротких замыканий в течение года обозначить через \bar{n} , а вероятность нарушения устойчивости при появлении короткого замыкания — через p , то вероятность числа k нарушений за m лет определится по формуле биномиального распределения:

* См.: Венцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969, с. 524—527.

$$p_{k, n} = C_n^k p^k q^{n-k} = \frac{n! p^k q^{n-k}}{(n-k)! k!} \quad (7.67)$$

где $n = \overline{1, m}$; $q = 1 - p$ — вероятность сохранения устойчивости при коротком замыкании.

Вероятность, того, что за m лет не произойдет ни одного нарушения устойчивости, определяется при $k = 0$:

$$P_{0, n} = q^n. \quad (7.68)$$

§ 7.6. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА [ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ] СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЕ ЧИСЛО СТАНЦИЙ СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ И НАГРУЗОК

Электрическая система может быть оценена как сложная по ряду различных признаков. Если сложность системы оценивать только по ее схеме, полагая принятые расчетные модели одинаковыми (например, $E'_q = \text{const}$ или $E' = \text{const}$ и т. п.), то систему «станция — шины бесконечной мощности» следует считать *простейшей*, систему «две станции — нагрузка» — *простой* и три станции и более, связанные сетями, имеющими нагрузки, — *сложной*. Сложность системы в расчетном смысле зависит также от того, какие расчетные уравнения (математическая модель) положены в основу исследования. Так, например, если анализ проводится по упрощенным уравнениям простой системы, содержащей различные регуляторы с учетом ряда влияющих факторов, вероятностных и статических свойств, то такая система *рассматривается как сложная*. Таким образом, *понятие сложности системы условно* и пользоваться им следует, имея в виду сделанные выше замечания.

Существенным для проведения расчетов является наличие в системе шин бесконечной мощности. При отсутствии их в системе исследование динамической устойчивости обычно сводится к рассмотрению относительного движения генераторов сложной системы. Предполагается, что одинаковое изменение всех углов указывает на изменение частоты в системе и свидетельствует о ее динамической устойчивости, т. е. устойчивости в той стадии переходного процесса, где изменение частоты еще не стало решающим*. При расчете устойчивости сложной системы по полному уравнению Парка—Горва можно было бы воспользоваться методом последовательных приближений или общими аналитическими методами. Однако трудности их применения в сложной системе настолько велики, что практически приемлемым является только метод численного интегрирования (последовательных интервалов) упрощенных уравнений ($p\psi = 0$; $p\delta = 0$) переходных процессов, составленных для всех элементов системы.

Обычно все синхронные машины вводятся в расчет э. д. с. E_Q и сопротивлениями x_q , при этом для неявнополюсных машин $E_Q = E_q$ и $x_q = x_d$. Механическая мощность турбин в простейших расчетах принимается постоянной; в более точных учитываются уравнения турбины и согласно им находится изменение мощности от интервала к интервалу. Действие регуляторов возбуждения пропорционального типа может быть приближенно учтено исходя из предположения,

* Устойчивость в этой стадии называют *синхронной динамической устойчивостью*.

что $E'_q = \text{const}$, или учтено изменением э. д. с. E_{qe} в каждом интервале. В наиболее простых расчетах это изменение находится согласно заданной характеристике $E_{qe} = f(U_r)$, где U_r — напряжение на шинах генератора.

В более сложных расчетах в каждом интервале времени решается уравнение, описывающее действие системы возбуждения. Все нагрузки системы представляются полными сопротивлениями Z_n , которые или постоянны во всех рассматриваемых режимах, или изменяются от интервала к интервалу, причем сопротивления (проводимости) нагрузок могут определяться в соответствии с их динамическими характеристиками.

Основные расчетные выражения получаются следующим образом. Токи, протекающие в каждом генераторе, выражаются через э. д. с. и проводимости:

$$I_j = \dot{E}_{Qj} Y_{jj} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^m \dot{E}_{Qn} Y_{jn}, \quad (7.69)$$

где j — номер машины ($j = 1, 2, \dots, m$).

Из (7.69) находятся продольные составляющие токов отдельных машин:

$$I_{dj} = E_{Qj} y_{jj} \cos \alpha_{jj} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^m E_{Qn} y_{jn} \cos (\delta_{jn} - \alpha_{jn}), \quad (7.70)$$

где $\delta_{jn} = \delta_j - \delta_n$ — углы между роторами машин.

Продольные составляющие токов можно выразить иначе:

$$I_{dj} = (E_{Qj} - E'_{qj}) / (x_{qj} - x'_{dj}). \quad (7.71)$$

Приравнявая токи, найденные согласно (7.70), найденным согласно (7.71), получим систему уравнений, в которой содержится столько уравнений, сколько имеется станций, т. е. э. д. с. E_Q или E_q :

$$A_j E'_{qj} = a_{jj} E_{Qj} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^m a_{jn} E_{Qn}, \quad (7.72)$$

где коэффициенты

$$A_j = 1 / (x_{qj} - x'_{dj}); \quad a_{jj} = A_j - y_{jj} \cos \alpha_{jj}; \quad a_{jn} = y_{jn} \cos (\delta_{jn} - \alpha_{jn}).$$

Полученная система уравнений (7.72) связывает переходные э. д. с. E'_q и э. д. с. E_q (или расчетные э. д. с. E_Q при явнополюсных машинах) с параметрами данной системы. При любом резком нарушении режима все переходные э. д. с. в первый момент времени остаются неизменными, а все э. д. с. E_Q и E_q изменяются скачком.

Нарушение режима можно свести к мгновенному изменению параметров системы, т. е. изменению всех коэффициентов a и A в уравнениях (7.72). Подставляя в уравнения (7.72) значения э. д. с. $E'_q(0) = E'_{q0}$, т. е. оставляя их такими же как в исходном режиме, и значения коэффициентов a и A , отвечающих аварийному режиму, можно найти значения m э. д. с. E_Q и E_q при $t = 0$. Для этого надо

решить систему из m уравнений с m неизвестными. При расчетах методом последовательных интервалов эти уравнения должны быть разрешаемы в каждом интервале Δt , так как их коэффициенты изменяются с течением времени. В каждом интервале значения э. д. с. E'_q и коэффициентов a должны изменяться согласно соответствующим формулам. Однако такое решение, требующее больших затрат времени, возможно только на ЦВМ. При расчетах, выполняемых вручную на расчетных столах, ограничиваются решением системы уравнений лишь в первых интервалах после нарушения режима, например при появлении короткого замыкания и его устранения. В остальных же интервалах времени, когда изменения э. д. с. невелики, проводят расчет приближенно, решая первое из уравнений (7.72) относительно E_{Q1} , второе — относительно E_{Q2} и т. д. Уравнения при этом получают вид

$$E_{Qj} = \frac{A_j}{a_{jj}} E'_{qj} - \frac{1}{a_{jj}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^m a_{jn} E_{Qn}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (7.73)$$

В правой части уравнений (7.73) преобладающее значение имеют первые члены, пропорциональные переходным э. д. с. E'_q . Все остальные члены обычно невелики сравнительно с первыми. Поэтому э. д. с. E_{Q1} с достаточной степенью точности можно вычислить непосредственно из первого уравнения (7.73), принимая для всех остальных э. д. с. (E_{Q2} , E_{Q3} и т. д.), кроме переходных э. д. с. их значения из предыдущего интервала времени. При этом значения э. д. с. E'_q и коэффициентов a_{12} , a_{13} и т. д. (зависящих от углов) должны быть приняты соответствующими данному (но не предыдущему) интервалу времени.

Аналогично, э. д. с. E_{Q2} можно найти из второго уравнения системы (7.73), принимая значения для E_{Q1} , E_{Q3} и т. д. из предыдущего интервала времени; э. д. с. E_{Q3} — из третьего уравнения и т. д.

Если разница между первыми и остальными членами в правой части уравнений (7.73) незначительна, то вычисленные значения э. д. с. E_Q следует рассматривать как первое приближение. Подставив их в правые части, можно найти новые, уже более точные значения э. д. с. E_Q . Таким образом, расчет ведется путем последовательных приближений, что проще, чем решение системы уравнений.

Если по каким-либо соображениям часть станций системы можно представить постоянной э. д. с. (обычно это э. д. с. E'_q , приложенная за x'_d), то числа неизвестных и уравнений соответственно уменьшаются. Число уравнений получается равным числу машин, для которых желательно учитывать изменение во времени реакции якоря и характеристики возбудителей. Число же членов в правой части каждого уравнения всегда равно общему числу машин в системе. При этом вместо E_Q вводят э. д. с. E'_q в те уравнения, которые соответствуют машинам с постоянной э. д. с.

Для остальных машин изменение переходных э. д. с. E'_q в течение данного интервала времени определяется для каждой станции в отдельности с помощью выражений вида

$$\Delta E'_{qj(i)} = (E_{qej(i)} - E_{qj(i-1)}) \Delta t / T_{d0j}, \quad (7.74)$$

где $j = 1, 2, \dots, m$ — номер станции; i — номер интервала.

Отдельные этапы расчета переходного процесса сложной системы сводятся к следующему:

а) находят э. д. с. $E'_{q1}, E'_{q2}, \dots, E'_{qm}$ и $E_{q1}, E_{q2}, \dots, E_{qm}$, а также углы $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$, определяющие положения роторов станций системы в условиях ее нормального режима;

б) вычисляют сопротивления обратной и нулевой последовательностей эквивалентного шунта в точке короткого замыкания; составляют схему замещения системы в аварийном режиме;

в) вычисляют для схемы замещения аварийного режима собственные и взаимные проводимости;

г) строят кривые изменения э. д. с. E_{qe} в функции времени, приближенно отражая этим действие регуляторов возбуждения;

д) составляют схему послеаварийного режима, т. е. схему системы с отключенным аварийным участком, и для этой схемы определяют собственные и взаимные проводимости системы.

Далее проводят численное интегрирование и расчет методом последовательных интервалов.

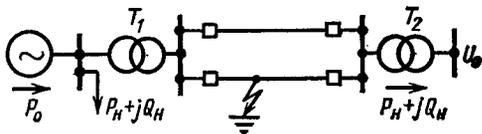


Рис. 7.45. Исследуемая система

Пример 7.1. В электропередаче, показанной на рис. 7.45, на одной из цепей происходит двухфазное короткое замыкание на землю. Электропередача передает в систему мощность $P_c = 225$ МВт, $\cos \varphi_c = 0,9$. Напряжение на шинах системы $U_c = 118$ кВ поддерживается неизменным. Нейтралн повышающего и понижающего трансформаторов глухо заземлены.

Элементы электропередачи имеют следующие параметры: генератор — $S_{ном} = 400$ МВ·А; $U_{ном} = 10,5$ кВ; $\cos \varphi_{ном} = 0,85$; $x'_d = 0,235$; $x_2 = 0,164$; $T_J = 7$ с; трансформатор T_1 — $S_{ном} = 360$ МВ·А; $e_K = 12\%$; $K_1 = 10,5/248$; трансформатор T_2 — $S_{ном} = 340$ МВ·А; $e_K = 12\%$; $K_2 = 220/121$; линия электропередачи (две цепи) — $l = 225$ км; $x_1 = 0,4$ Ом/км; $x_0 = 3x_1 = 1,2$ Ом/км; нагрузка $P_H = 50$ МВт; $\cos \varphi_H = 0,85$.

О п р е д е л и т ь предельное время отключения короткого замыкания, проведя расчет приближенно, без учета активных сопротивлений и зарядной мощности линий. Принять, что переходная э. д. с. при нарушении режима остается неизменной.

Решение. Расчет проведем в относительных единицах. За базисные мощности и напряжение примем $S_б = 255$ МВ·А и $U_б = 215$ кВ на ступени 220 кВ. Тогда напряжение на шинах системы в относительных единицах составит

$$U_{*c} = (U_c/U_б) K_2 = (118/215) (220/121) = 1.$$

Мощность, передаваемая в систему,

$$P_{*c} = P_c/S_б = 225/255 = 0,882; \quad Q_{*c} = P_c \operatorname{tg} \varphi_c = 0,882 \cdot 0,483 = 0,427,$$

где $\varphi_c = \arccos 0,9 = 25,8^\circ$.

Мощность, потребляемая нагрузкой,

$$P_{*H} = P_H/S_б = 50/255 = 0,196; \quad Q_{*H} = P_{*H} \operatorname{tg} \varphi_H = 0,196 \cdot 0,62 = 0,122,$$

где $\varphi_H = \arccos 0,85 = 31,8^\circ$.

Приведем параметры всех элементов электропередачи к базисным условиям:

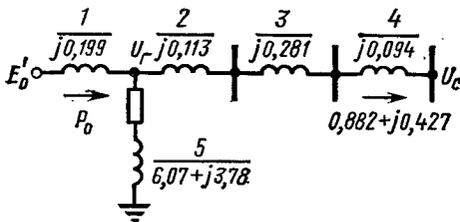
$$x'_{*d} = x'_d \frac{U_{ном}^2 S_б}{S_{ном} U_б^2} \left(\frac{1}{K_1} \right)^2 = 0,235 \frac{10,5^2 \cdot 255}{400 \cdot 215^2} \left(\frac{248}{10,5} \right)^2 = 0,199.$$

Аналогично,

$$x_{*2} = 0,164 \frac{10,5^2 \cdot 255}{400 \cdot 215^2} \left(\frac{248}{10,5} \right)^2 = 0,139;$$

$$x_{*T1} = \frac{e_K}{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}} \frac{U_{в.н}^2}{U_6^2} = \frac{12}{100} \frac{255}{360} \frac{248^2}{215^2} = 0,113; \quad x_{*T2} = \frac{12}{100} \frac{255}{340} \frac{220^2}{215^2} = 0,094;$$

$$x_{*Л} = \frac{1}{2} x_{1l} \frac{S_6}{U_6^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 225 \cdot \frac{255}{215^2} = 0,281; \quad T_{*J} = T_J \frac{S_{НОМ}}{S_6} = 7 \frac{400}{255} = 10,98 \text{ с.}$$



В дальнейших расчетах используются параметры, приведенные к базисным условиям, звездочки у символов для краткости опускаются. На рис. 7.46 показана схема замещения для нормального режима. Определим э. д. с. генератора за переходным реактивным сопротивлением. Суммарное сопротивление между шинами генератора и шинами бесконечной мощности

$$x_c = x_2 + x_3 + x_4 = 0,113 + 0,281 + 0,094 = 0,488.$$

Рис. 7.46. Схема замещения

Напряжение на шинах генератора

$$U_{Г0} = \sqrt{(1 + 0,427 \cdot 0,488/1)^2 + (0,882 \cdot 0,488/1)^2} = \sqrt{1,209^2 + 0,431^2} = 1,284;$$

$$\operatorname{tg} \delta_c = 0,431/1,209 = 0,356; \quad \delta_c = 19,6^\circ.$$

Сопротивление нагрузки

$$Z_H = \frac{U_H^2}{S_H^2} (P_H + jQ_H) = \frac{1,284^2}{0,196^2 + 0,122^2} (0,196 + j0,122) = 6,07 + j3,78.$$

Потери реактивной мощности в сети до шин генераторного напряжения

$$\Delta Q_C = \frac{P_C^2 + Q_C^2}{U_C^2} x_c = \frac{0,882^2 + 0,427^2}{1^2} 0,488 = 0,469.$$

Мощность, отдаваемая генераторной станцией,

$$\dot{S}_0 = \dot{S}_H + \dot{S}_C + j\Delta Q_C = 0,196 + j0,122 + 0,882 + j0,427 + j0,469 = 1,078 + j1,018.$$

Э. д. с. за переходным реактивным сопротивлением генератора

$$E'_0 = \sqrt{\left(1,284 + \frac{1,018 \cdot 0,199}{1,284}\right)^2 + \left(\frac{1,078 \cdot 0,199}{1,284}\right)^2} = \sqrt{1,442^2 + 0,167^2} = 1,452;$$

$$\operatorname{tg} (\delta'_0 - \delta_c) = 0,167/1,442 = 0,116; \quad \delta'_0 - \delta_c = 6,6^\circ.$$

Угол между э. д. с. E'_0 и напряжением U_C

$$\delta'_0 = 19,6 + 6,6 = 26,2^\circ.$$

Методом преобразования определим собственные и взаимные проводимости схемы замещения для нормального режима (рис. 7.46):

$$Z_{11}^i = Z_1 + \frac{Z_C Z_5}{Z_C + Z_5} = j0,199 + \frac{j0,488 (6,07 + j3,78)}{j0,488 + 6,07 + j3,78} = 0,027 + j0,669 = 0,670 < 87,7^\circ;$$

$$Y_{11}^I = 1/Z_{11}^I = 1/0,67 \angle 87,7^\circ = 1,49 \angle -87,7^\circ,$$

причем дополнительный угол $\alpha_{11}^I = 2,3$;

$$\begin{aligned} Z_{12}^I &= Z_1 + Z_c + Z_1 Z_c / Z_5 = j0,199 + j0,488 + j0,199 \cdot j0,488 / (6,07 + j3,78) = \\ &= -0,012 + j0,694 = 0,694 \angle 91^\circ; \quad Y_{12}^I = 1/0,694 \angle 91^\circ = 1,44 \angle -91^\circ, \end{aligned}$$

причем дополнительный угол $\alpha_{12}^I = -1^\circ$.

Схема замещения электропередачи для прямой последовательности в режиме двухфазного короткого замыкания на землю отличается от схемы замещения в нормальном режиме включением в точку короткого замыкания аварийного шунта, сопротивление которого равно сложным параллельно результирующим сопротивлениям (относительно точки короткого замыкания) схем обратной и нулевой последовательностей.

Значения сопротивлений элементов электропередачи для токов обратной последовательности приведены на рис. 7.47. Сопротивление нагрузки принято равным 0,35 от сопротивления прямой последовательности.

Результирующие сопротивления схемы для токов обратной последовательности относительно точки короткого замыкания

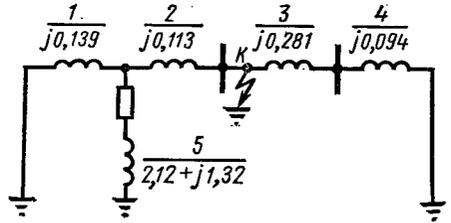


Рис. 7.47. Схема замещения обратной последовательности

$$Z_{2\Sigma} = [Z_2 + Z_1 Z_5 / (Z_1 + Z_5)] \parallel (Z_3 + Z_4),$$

$$\text{где } Z_2 + \frac{Z_1 Z_5}{Z_1 + Z_5} = j0,113 + \frac{j0,139(2,12 + j1,32)}{j0,139 + 2,12 + j1,32} = 0,006 + j0,248; \quad Z_3 + Z_4 = j0,281 + j0,094 = j0,375.$$

При этом

$$Z_{2\Sigma} = (0,006 + j0,248) j0,375 / (0,006 + j0,248 + j0,375) = 0,003 + j0,149.$$

Результирующие сопротивления схемы для токов нулевой последовательности относительно точки короткого замыкания (рис. 7.48)

$$Z_{0\Sigma} = Z_2 \parallel (Z_3 + Z_4),$$

$$\text{где } Z_3 + Z_4 = j0,843 + j0,094 = j0,937; \quad Z_{0\Sigma} = j0,113 \cdot j0,937 / (j0,113 + j0,937) = j0,101.$$

Результирующее сопротивление аварийного шунта в точке короткого замыкания

$$Z_k = Z_6 = \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} = \frac{(0,003 + j0,149) j0,101}{0,003 + j0,149 + j0,101} \approx j0,06.$$

Эквивалентная схема замещения электрической системы для двухфазного короткого замыкания на землю приведена на рис. 7.49.

Методом единичных токов найдем собственные и взаимные проводимости.

Пусть ток в сопротивлении Z_4 равен единице:

$$\dot{i}_4 = \dot{i}_3 = 1 + j0.$$

Напряжение в точке b

$$\dot{U}_b = (1 + j0) j0,375 = j0,375.$$

Ток, протекающий по аварийному шунту,

$$\dot{I}_6 = \dot{U}_b / Z_6 = j0,375 / j0,06 = 6,25.$$

Ток и падение напряжения на сопротивлении ветви 2

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_4 + \dot{I}_6 = 1 + 6,25 = 7,25; \Delta \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_2 = 7,25 \cdot j0,113 = j0,819.$$

Напряжение в точке *a*

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b + \Delta \dot{U}_2 = j0,375 + j0,819 = j1,194.$$

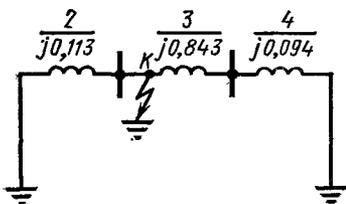


Рис. 7.48. Схема замещения нулевой последовательности

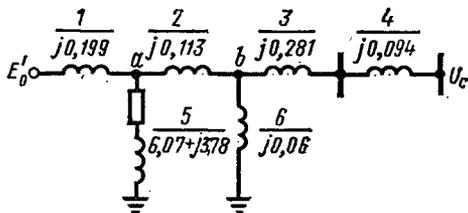


Рис. 7.49. Эквивалентная схема аварийного режима

Ток в ветвях 5 и 1 соответственно

$$\dot{I}_5 = \dot{U}_a / Z_5 = j1,194 / (6,07 + j3,78) = 0,088 + j0,141;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_5 = 7,25 + 0,088 + j0,141 = 7,338 + j0,141.$$

Падение напряжения на сопротивлении в ветви 1

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 = (7,338 + j0,141) j0,199 = -0,028 + j1,460.$$

Э. д. с. в точке подключения передающей станции

$$\dot{E} = \dot{U}_a + \Delta \dot{U}_1 = j1,194 + (-0,028 + j1,460) = -0,028 + j2,654.$$

Собственная проводимость схемы короткого замыкания относительно передающей станции $Y_{11}^{III} = 1/Z_{11}^{III}$, где

$$Z_{11}^{III} = \dot{E} / \dot{I}_1 = (-0,028 + j2,654) / (7,338 + j0,141) = 0,003 + j0,362 = 0,362 < 89,5^\circ.$$

Дополнительный угол $\alpha_{11}^{III} = 0,5^\circ$.

Взаимная проводимость схемы короткого замыкания

$$Y_{12}^{III} = 1/Z_{12}^{III}, \text{ где } Z_{12}^{III} = \dot{E} / \dot{I}_4 = (-0,028 + j2,654) / (1 + j0) = -0,028 + j2,654 = 2,654 < 90,6^\circ.$$

Дополнительный угол $\alpha_{12}^{III} = -0,6^\circ$.

В схеме замещения электрической цепи для послеаварийного режима аварийный шунт отключен, сопротивление линии электропередачи увеличено вдвое (рис. 7.50). Собственные и взаимные проводимости для нее определяются так же, как и для схемы нормального режима:

$$Y_{11}^{II} = 1,083 < -86,1^\circ; \alpha_{11}^{II} = 3,9^\circ; Y_{12}^{II} = 1,021 < -91,1^\circ; \alpha_{12}^{II} = -1,1^\circ.$$

Характеристики электрической мощности генераторов передающей станции для различных режимов найдем из следующих выражений:

Нормальный режим

$$P^I = 1,452^2 \cdot 1,49 \sin 2,3^\circ + 1,452 \cdot 1 \cdot 1,44 \sin (\delta' + 1^\circ) = 0,126 + 2,09 \sin (\delta' + 1^\circ);$$

$$P_m^I = 0,126 + 2,09 = 2,216.$$

Аварийный режим (двухфазное короткое замыкание на землю)

$$P^{II} = 1,452^2 \cdot 2,763 \sin 0,5^\circ + 1,452 \cdot 1 \cdot 0,377 \sin (\delta' + 0,6^\circ) = 0,051 + 0,547 \sin (\delta' + 0,6^\circ);$$

$$P_m^{II} = 0,051 + 0,547 = 0,598.$$

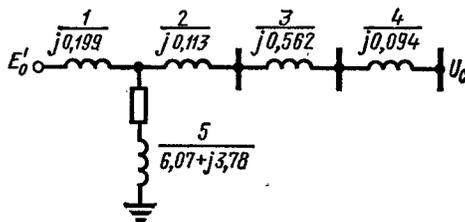


Рис. 7.50. Схема замещения послеаварийного режима

Послеаварийный режим

$$P^{II} = 1,452^2 \cdot 1,083 \sin 3,9^\circ + 1,452 \cdot 1 \cdot 1,021 \sin (\delta' + 1,1^\circ) = 0,155 + 1,483 \sin (\delta' + 1,1^\circ);$$

$$P_m^{II} = 0,155 + 1,483 = 1,638.$$

Из условия равенства площадок ускорения и торможения* (рис. 7.51) определим предельный угол отключения короткого замыкания. В соответствии с выражением $\delta'_{кр} = 180 - \arcsin(P_0/P_m^{II}) = 180 - \arcsin(1,078/1,638) = 138,8^\circ$ получим

$$\cos \delta'_{откл} = \frac{1,078 (138,8 - 26,2) \pi / 180 + 1,638 \cos 138,8^\circ - 0,598 \cos 26,2^\circ}{1,638 - 0,598} = 0,341;$$

$$\delta'_{откл} = 70^\circ.$$

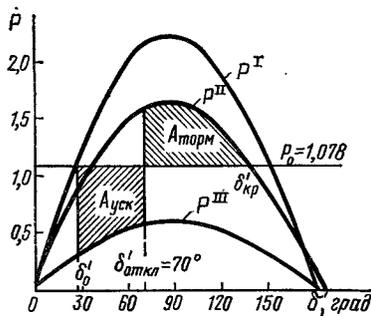


Рис. 7.51. Угловые характеристики и площадки ускорения $A_{уск}$ и торможения $A_{торм}$

Чтобы найти предельное время отключения короткого замыкания, необходимо построить зависимость $\delta' = f(t)$, которая может быть определена из уравнения движения ротора. Решим это уравнение методом последовательных интервалов (численное интегрирование).

Длительность расчетных интервалов Δt примем равной 0,05 с. При этом в уравнении (7.47)

$$K = 360 f \Delta t^2 / T_J = 360 \cdot 50 \cdot 0,05^2 / 10,98 = 4,1.$$

Первый интервал (0—0,05 с)

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в первый момент после возникновения короткого замыкания,

* Пренебрегаем при этом сдвигом характеристик относительно начала координат.

$$P_{(0)} = 1,452^2 \cdot 2,763 \sin 0,5^\circ + 1,452 \cdot 1 \cdot 0,377 \sin (26,2^\circ + 0,6^\circ) = 0,051 + 0,547 \cdot 0,451 = 0,297.$$

Избыток мощности в начале интервала

$$\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)} = 1,078 - 0,297 = 0,781.$$

Приращение угла за интервал

$$\Delta \delta'_1 = K \Delta P_{(0)} / 2 = 4,1 \cdot 0,781 / 2 = 1,6^\circ.$$

Угол к концу первого интервала

$$\delta'_{(1)} = \delta'_{(0)} + \Delta \delta'_{(1)} = 26,2 + 1,6 = 27,8^\circ.$$

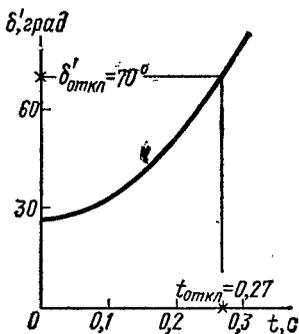
Второй интервал (0,05—0,1 с)

$$P_{(1)} = 0,051 + 0,547 \sin (27,8^\circ + 0,6^\circ) = 0,311; \quad \Delta P_{(1)} = 1,078 - 0,311 = 0,767;$$

$$\Delta \delta'_{(2)} = 1,6 + 4,1 \cdot 0,767 = 1,6 + 3,14 = 4,74^\circ; \quad \delta'_{(2)} = 27,8 + 4,74 = 32,54^\circ.$$

Проведем расчет для третьего и последующих интервалов. По результатам расчета, приведенным в таблице, построим кривую $\delta' = f(t)$ (рис. 7.52). Зная, что $\delta'_{\text{откл}} = 70^\circ$, по кривой найдем $t_{\text{откл}} = 0,27$ с:

t , с	δ' , град	P , отн. ед.	ΔP , отн. ед.	$\Delta \delta'$, град	t , с	δ' град	P , отн. ед.	ΔP , отн. ед.	$\Delta \delta'$, град
0,00	26,20	0,297	0,781	1,60	0,20	50,73	0,47	0,600	12,93
0,05	27,80	0,311	0,767	4,74	0,25	63,66	0,543	0,535	15,12
0,10	32,54	0,350	0,728	7,72	0,30	78,78	—	—	—
0,15	40,26	0,409	0,669	10,47					



Пример 7.2. На одной из линий электропередачи, показанной на рис. 7.53, а, рассматриваются трехфазные замыкания, удаленные от начала линии на $l_{*1} = l_1/L = 0,5$ и $l_{*2} = l_2/L = 0,75$. Продолжительность коротких замыканий 0,25 с. Схема замещения электропередачи и ее параметры показаны на рис. 7.53, б.

Пользуясь центрированным уравнением, рассчитать относительное движение ротора генератора и построить угловые характеристики мощности при коротком замыкании в точке k_2 , при этом выбрать в качестве опорного переходный процесс при коротком замыкании в точке k_1 .

Решение. Определим взаимное сопротивление в исходном режиме:

$$x_{12} = x_1 + 0,5x_2 + x_6 = 0,385 + 0,5 \cdot 0,68 + 0,15 = 0,875.$$

Взаимная проводимость

$$b^I = 1/x_{12} = 1,14.$$

Э. д. с. за переходным реактивным сопротивлением генератора

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 x_{12}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_{12}}{U_c} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,1 \cdot 0,875}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,6 \cdot 0,875}{1} \right)^2} = 1,2.$$

Угол между э. д. с. E' и напряжением U_c

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0 x_2}{E' U_c} = \arcsin \frac{0,6 \cdot 0,875}{1,2 \cdot 1} = 26^\circ.$$

Опорный переходный процесс при коротком замыкании в точке k_1 рассчитаем методом последовательных интервалов. Взаимная проводимость в аварийном режиме определяется в соответствии со схемой замещения:

$$\langle b_{k1}^{III} \rangle = 0,34.$$

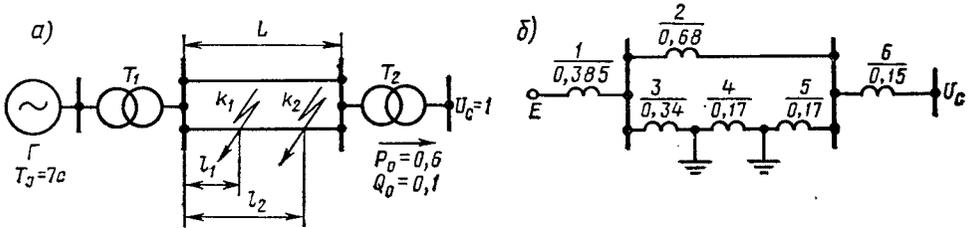


Рис. 7.53. Электропередача (а) и ее схема замещения (б)

Максимум электрической мощности передающей станции

$$\langle P_{mk1}^{III} \rangle = E U_c \langle b_{k1}^{III} \rangle = 1,2 \cdot 1 \cdot 0,34 = 0,41.$$

Длительность расчетных интервалов Δt примем равной 0,05 с. При этом

$$K = 360 f \Delta t^2 / T_j = 360 \cdot 50 \cdot 0,05 / 7 = 6,43.$$

Первый интервал (0—0,05 с)

Избыточная мощность на валу генератора в первый момент после возникновения короткого замыкания

$$\langle \Delta P_{(0)} \rangle = P_0 - \langle P_{mk1}^{III} \rangle \sin \delta_{(0)} = 0,6 - 0,41 \sin 26^\circ = 0,42.$$

Приращение угла за первый интервал

$$\langle \Delta \delta_{(1)} \rangle = K \langle \Delta P_{(0)} \rangle / 2 = 6,43 \cdot 0,42 / 2 = 1,35^\circ.$$

Значение угла к концу первого интервала

$$\langle \delta_{(1)} \rangle = \delta_{(0)} + \langle \Delta \delta_{(1)} \rangle = 26^\circ + 1,35^\circ = 27,35^\circ.$$

Второй интервал (0,05—0,1 с)

$$\langle \Delta P_{(1)} \rangle = 0,6 - 0,41 \sin 27,35^\circ = 0,412;$$

$$\langle \Delta \delta_{(2)} \rangle = \langle \Delta \delta_{(1)} \rangle + K \langle \Delta P_{(1)} \rangle = 1,35 + 6,43 \cdot 0,412 = 4^\circ;$$

$$\langle \delta_{(2)} \rangle = 27,35 + 4 = 31,35^\circ.$$

Результаты расчетов для последующих интервалов приведены в таблице:

t, c	$\langle \delta \rangle, \text{град}$	$-L$	$\delta, \text{град}$	$\overset{\sim}{\delta} = \langle \delta \rangle + \delta, \text{град}$	$\delta, \text{град}$	t, c	$\langle \delta \rangle, \text{град}$	$-L$	$\delta, \text{град}$	$\overset{\sim}{\delta} = \langle \delta \rangle + \delta, \text{град}$	$\delta, \text{град}$
0,05	27,35	1,69	0,21	27,56	27,56	0,35	76,63	73,61	9,00	85,63	87,27
0,10	31,35	6,84	0,83	32,19	32,20	0,40	82,99	83,68	10,20	93,19	95,74
0,15	37,84	15,71	1,92	39,76	39,80	0,45	86,99	92,39	11,30	98,29	101,77
0,20	46,58	28,68	3,50	50,08	50,18	0,50	88,49	100,82	12,30	100,79	105,48
0,25	57,25	46,39	5,67	62,92	63,13	0,55	87,49	109,61	13,30	100,79	106,94
0,30	67,95	61,32	7,50	75,45	76,36	0,60	83,99	116,18	14,20	98,19	106,15

Далее рассчитаем переходный процесс в точке k_2 , который представим как сумму опорного и центрированного процессов:

$$\delta(t) = \langle \delta(t) \rangle + \overset{\sim}{\delta}(t).$$

Центрированный процесс может быть записан в виде

$$\overset{\sim}{\delta}(t) = L(t) \overset{\sim}{\delta}^*,$$

где значения коэффициентов $L(t)$ берутся в моменты времени, соответствующие интервалам численного интегрирования.

Взаимная проводимость при коротком замыкании в точке k_2

$$b_{k_2}^{III} = 0,218.$$

Следовательно,

$$\overset{\sim}{\delta} = 0,218 - 0,34 = -0,122.$$

Определим значения коэффициентов L .

Первый интервал (0—0,05 с).

$$T_0 = KEU \sin \delta_{(0)} = 6,43 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot \sin 26^\circ = 3,38; \quad L_1 = -0,5T_0 = -1,69.$$

Отклонение угла от опорного

$$\overset{\sim}{\delta}_{(1)} = L_1 \overset{\sim}{\delta} = -1,69 (-0,122) = 0,206.$$

Второй интервал (0,05—0,1 с)

$$S_1 = 2 - \frac{\pi}{180} KEU \langle b \rangle \cos \langle \delta_{(1)} \rangle = 2 - \frac{\pi}{180} 6,43 \cdot 1,2 \cdot 0,34 \cos 27,35^\circ = 1,96;$$

$$T_1 = KEU \sin \langle \delta_{(1)} \rangle = 6,43 \cdot 1,2 \cdot 1 \sin 27,35^\circ = 3,54;$$

$$L_2 = S_1 L_1 - T_1 = 1,96(-1,69) - 3,54 = -6,84; \quad \overset{\sim}{\delta}_{(2)} = L_2 \overset{\sim}{\delta} = -6,84 (-0,122) = 0,835^\circ.$$

Результаты расчетов функции $L(t)$ и отклонений углов $\overset{\sim}{\delta}(t)$ приведены выше в таблице. В этой же таблице приведены результаты расчетов переходного процесса $\delta(t)$ при корот-

* Выражения для $\overset{\sim}{\delta}(t)$ можно получить и в зависимости от удаления короткого замыкания l_* .

ком замыкании в точке k_2 , полученные при решении методом последовательных интервалов уравнения движения. Расхождения между углами δ и $\tilde{\delta}$ (рис. 7.54) определяют погрешность метода. На рис. 7.55 показан график функции $L(t)$.

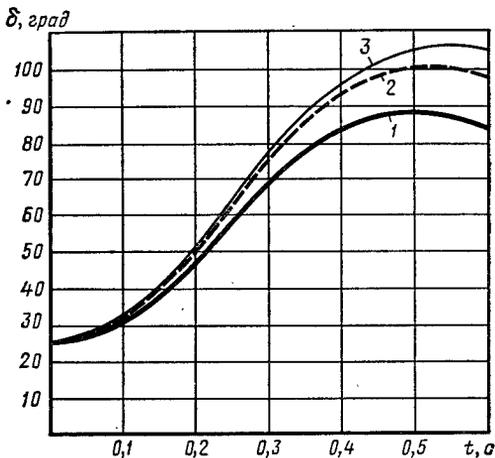


Рис. 7.54. Движение ротора генератора:

1 — $\langle \delta(t) \rangle$; 2 — $\tilde{\delta}(t) - \langle \delta(t) \rangle + \hat{\delta}(t)$; 3 — $\delta(t)$

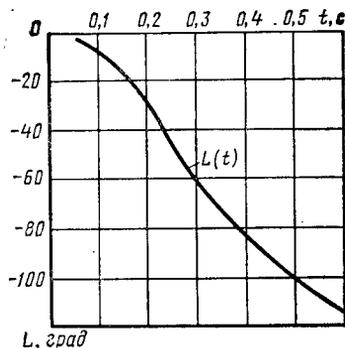


Рис. 7.55. Изменение коэффициента L во времени

Для построения угловых характеристик мощности используются формулы:

Н о р м а л ь н ы й р е ж и м

$$P^I = EUb^I \sin \delta.$$

А в а р и й н ы й р е ж и м (короткое замыкание в точке k_2)

$$P^{III} = EUb^{III} \sin \delta.$$

Электрическая мощность генератора при представлении движения ротора в виде суммы опорного и центрированного движений

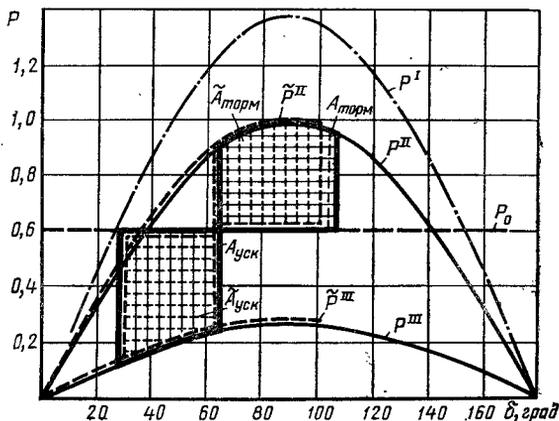


Рис. 7.56. Характеристики мощности $P = \varphi(\delta)$

$$\tilde{P}^{III} = EU \langle b^{III} \rangle \sin \langle \delta \rangle + EU \langle b^{III} \rangle \frac{\pi}{180} \cos \langle \delta \rangle \delta + EU \sin \langle \delta \rangle \delta^2.$$

Заметим, что каждому значению $\langle \delta \rangle$ соответствует единственное значение δ , определяемое отклонением взаимной проводимости от опорной δ .

П о с л е а в а р и й н ы й р е ж и м

$$P^{II} = EUb^{II} \sin \delta; \quad P^{II} = EU \langle b^{II} \rangle \sin \langle \delta \rangle + \frac{\pi}{180} EU \langle b^{II} \rangle \cos \langle \delta \rangle \delta.$$

Угловые характеристики, площадки ускорения и торможения показаны на рис. 7.56.

Контрольные вопросы

7.1. Назовите причины больших возмущений (возмущающих воздействий) в электрических системах.

7.2. Что является задачей исследования динамической устойчивости?

7.3. Каковы основные допущения при исследовании динамической устойчивости?

7.4. Каковы основные предпосылки при численном интегрировании уравнений относительного движения системы?

7.5. Как влияет демпфирование (\pm) на характер переходного процесса?

7.6. Как влияет регулирование возбуждения на характер переходного процесса (пояснить на рис. 7.24 и 7.25)?

7.7. Как возникают и развиваются колебания ротора генератора под действием внешней возмущающей силы?

7.8. Определите большие вынужденные колебания и назовите их виды.

7.9. Какую можно ожидать разницу в расчетах динамической устойчивости, проведенных при $E_q = \text{var}$, $E'_q = \text{const}$, $E' = \text{const}$? Каков (примерно) характер изменения этих э. д. с. в момент короткого замыкания и в момент его отключения?

7.10. Какие допущения делаются в отношении изменения электрической мощности в системе при изменениях ее режима?

7.11. Каков порядок учета вероятностного характера сопротивления дуги в месте короткого замыкания при расчетах устойчивости?

7.12. Что такое гистограмма параметров переходного процесса?

7.13. Перечислите особенности получения расчетных выражений для анализа системы методом последовательных интервалов.

7.14. Как влияет учет регуляторов скорости и возбуждения на выбор расчетного интервала?

7.15. Перечислите особенности учета регулирования скорости на гидрогенераторах. Какие ограничения необходимо учитывать?

7.16. Каковы изменения расчетных выражений при учете регуляторов возбуждения с. д. по сравнению с регуляторами п. д.?

7.17. Что изменяется в оценке устойчивости нормального и переходного режимов системы при повышении ее сложности?

7.18. Назовите два способа учета нагрузок электрических систем и определите влияние способа учета нагрузки на методику исследования сложной системы.

7.19. В чем состоит особенность анализа устойчивости системы при отсутствии в ней шин неизменного напряжения и частоты?

7.20. Что дает способ приближенного решения дифференциальных уравнений движения ротора при отклонении параметров?

7.21. Какие вероятностные характеристики переходных процессов учитываются при анализе?

Темы рефератов

1. Природа демпфирования и его влияние на переходные процессы.

2. Вероятностная оценка переходных процессов.

3. Применение уравнений в вариациях для исследования переходных процессов.

**СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.
ПРОЦЕССЫ ПРИ МАЛЫХ СВОБОДНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ**

§ 8.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Статическая устойчивость, или устойчивость исходного установившегося режима, — это способность электрической системы возвращаться в исходное состояние (исходный режим) после малого его возмущения (отклонения режимных параметров).

В любой электрической системе установившийся режим не означает неизменность всех его параметров. Электрическая система имеет огромное количество нагрузок, непрерывно меняющихся, причем эти изменения появляются и исчезают, происходя стохастически. В связи с этим на генераторах системы появляются некоторые дополнительные незначительные моменты ΔM , также стохастические, уменьшающие или увеличивающие моменты, действующие на валах генераторов и смещающие их роторы на некоторые небольшие углы $\Delta \delta$. Так как изменения скорости $\Delta \omega = \varphi(\Delta P)$ относительно синхронной очень малы, то во всех рассуждениях и расчетах можно принять, что $\Delta M = \Delta P$.

Таким образом, в электрической системе постоянно происходят малые возмущения, причина которых и место возникновения не фиксированы. Это некие свободные возмущения, вызывающие соответственно свободные движения, которые могут быть нарастающими или затухающими, колебательными или аперiodическими. Их характер и определяет статическую устойчивость, являющуюся необходимым условием работоспособности системы. Статическая устойчивость проверяется при перспективном и рабочем проектировании, разработке специальных устройств автоматического регулирования (расчеты и эксперименты), вводе в эксплуатацию новых элементов системы, изменении условий эксплуатации (объединении систем, вводе новых электростанций, промежуточных подстанций ЛЭП и т. д.).

Исследования статической устойчивости могут проводиться в плане решения задач либо анализа, либо синтеза.

При решении задач анализа проверяется устойчивость заданного установившегося режима, определяется предельно устойчивый режим электрической системы, заданной всеми параметрами, оцениваются некоторые показатели качества переходного процесса.

При решении задач синтеза определяются тип системы возбуждения и его регулирования, закон регулирования, параметры системы возбуждения и регуляторов. При этом исходят из заданных требований к предельно устойчивому режиму или качеству электроэнергии в установившемся режиме (точность поддержания напряжения и других параметров режима).

Физика переходных процессов, определяющих статическую устойчивость. В отличие от переходных процессов, рассматривавшихся при исследовании ди-

намической устойчивости, непрерывно появляющиеся в системе возмущения, вызывающие малые отклонения (статическая устойчивость), не определяются ни по месту их возникновения, ни по значению. Таким образом, заранее предполагается, что происхождение возмущений таково, что *установить абсолютные значения изменений параметров режима при их отклонениях от установившихся (начальных) значений невозможно*. Задача исследования статической устойчивости сводится, следовательно, к задаче определения только характера изменения параметров режима.

При установлении простейших условий статической устойчивости (практических критериев) ответ получается только в форме «да — нет», «уйдет — не уйдет» режим из начального его состояния при малом возмущении системы. При установлении критериев устойчивости, основанных на исследовании уравнений движения — уравнений малых колебаний (малых отклонений), физическая природа происходящих явлений выясняется более полно: устанавливается в любом случае (устойчивость, неустойчивость) характер движения (апериодическое, колебательное — затухающее или нарастающее).

Рис. 8.1, рассматривающий влияние на характер переходного процесса разных значений возмущения, приложенного в разных точках системы, показывает, что влияния эти при малых возмущениях исчезающе малы, а при больших существенны.

*** Математическая формулировка задачи.**
Электрическая система при изучении переходных процессов описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\sum_{j,i=1}^m \left(A_{ji} \frac{d^2 x_i}{dt^2} + B_{ji} \frac{dx_i}{dt} + C_{ji} x_i \right) = F_j(t).$$

Коэффициенты A_{ji} , B_{ji} , C_{ji} — действительные. Они определяются параметрами системы и нелинейными функциями $\Phi(x_i)$ от переменных x_i , характеризующих состояние системы в каждый момент времени; $F_j(t)$ — внешние (или иначе называемые возмущающими) силы, переменные во времени, отражающие изменение внешних условий системы.

При $F_j(t) = F_{j0}$ система имеет решение $x_i(t) = x_{i0}$; $dx_i/dt = 0$; $d^2x_i/dt^2 = 0$;

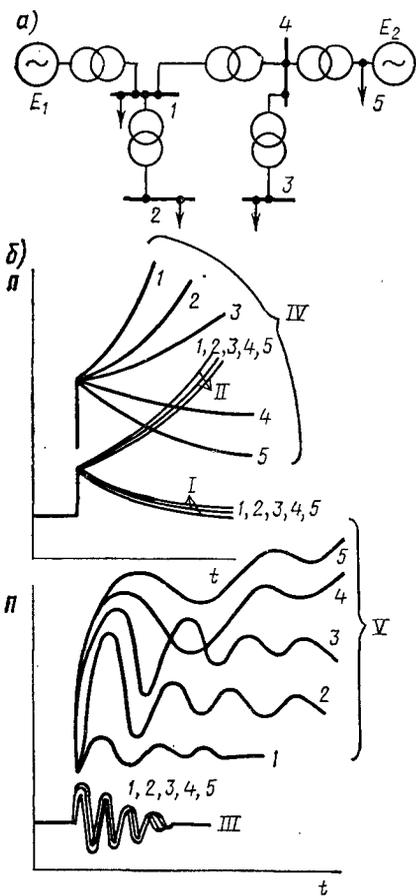


Рис. 8.1. Сравнительный характер процессов при малых и больших возмущениях:

a — схема исследуемой системы, в точках 1, 2, 3, 4, 5 которой происходит возмущения; *b* — примерный характер изменения параметра Π , определяющего устойчивость. При малых возмущениях в разных точках: I — при апериодически устойчивом процессе; II — при апериодически неустойчивом процессе; III — при периодически устойчивом процессе.

При больших различных по значению возмущениях в разных точках: IV — при апериодически устойчивых и неустойчивых процессах; V — при колебательных устойчивых и неустойчивых процессах.

$$\sum_{j,i=1}^m C_{ji} x_{i0} = F_{j0}.$$

Это решение соответствует состоянию равновесия, т. е. определяет параметры установившегося режима электрической системы. При изучении статической устойчивости рассматриваются переходные процессы при условии малости отклонения всех переменных и внешних сил от состояния равновесия. Математически это условие записывается так:

$$F_j(t) - F_{j0} = f_j(t); \quad x_i(t) - x_{i0} = \Delta x_i; \quad dx_i/dt = d\Delta x_i/dt; \quad d^2x_i/dt^2 = d^2\Delta x_i/dt^2.$$

Метод изучения статической устойчивости называется устойчивостью в малом или методом малых отклонений (малых колебаний). Нелинейные функции $\Phi(x_i)$, входящие в коэффициенты исходной системы уравнений, линеаризуют в точке, соответствующей состоянию равновесия. Эта процедура состоит из разложения нелинейной функции в ряд Тейлора и оставления только линейных членов этого ряда. Заметим, что часто $\Phi(x_i)$ является функцией нескольких переменных, тогда

$$\Phi(x_i) = \Phi(x_{i0}) + (\partial\Phi/\partial x_1)_{x_{i0}} \Delta x_1 + (\partial\Phi/\partial x_2)_{x_{i0}} \Delta x_2 + \dots$$

Проведя линеаризацию по первому приближению, перейдем от системы нелинейных дифференциальных уравнений к системе линеаризованной — линейной. Решение таких систем уравнений с помощью так называемого *характеристического уравнения* (иногда называемого характеристическим многочленом) известно из математики*. Будем далее пользоваться им, изучая процессы при действии внешних сил, меняющихся во времени:

$$\sum_{j,i=1}^m \left(a_{ji} \frac{d^2x_i}{dt^2} + b_{ji} \frac{dx_i}{dt} + c_{ji} \Delta x_i \right) = f_j(t).$$

Коэффициенты a_{ji} , b_{ji} , c_{ji} включают в себя частные производные $(\partial\Phi/\partial x_i)_{x_{i0}}$,

* См.: *Понтрягин Л. С.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. — М.: ГИФМЛ, 1970, с. 311.

Напомним некоторые определения. Система дифференциальных уравнений называется *линейной*, если все неизвестные функции и их производные, вместе взятые, входят в уравнение системы линейно. Таким образом, система линейных уравнений общего вида может быть записана в форме

$$\sum_{j,k} a_{ijk}(t)(x^j)^{(k)} + b_i(t) = 0; \quad i = 1, \dots, n. \quad (a)$$

Здесь x^1, \dots, x^n — неизвестные функции независимого переменного t , а коэффициенты $a_{ijk}(t)$ и свободные члены $b_i(t)$ уравнений являются функциями t . Если все свободные члены системы (a) тождественно равны нулю, то система называется *однородной*. Каждой линейной системе соответствует однородная линейная система, получающаяся из нее отбрасыванием свободных членов. Таким образом, линейной системе (a) соответствует линейная однородная система

$$\sum_{j,k} a_{ijk}(t)(y^j)^{(k)} = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (б)$$

взятые в точке исходного режима. Таким образом, эти коэффициенты зависят от исходного режима, что и отражает свойства действительной нелинейной системы, подлежащей исследованию.

С помощью линеаризованных уравнений изучаются переходные процессы: 1) *вынужденные* при действии внешней — возмущающей силы; 2) *свободные* после возникновения начальных отклонений и исчезновения внешней силы, вызвавшей эти отклонения. В первом случае при $f_j(t) \neq 0$ ротор под действием заданной например малой синусоидальной, возмущающей, постоянно действующей силой совершает малые колебания (см. § 7.3).

Во втором случае ротор генератора, получивший под действием какой-то (не фиксированной) внешней (возмущающей) силы отклонение от положения равновесия, т. е. от угла δ_0 на $\Delta\delta$, будучи предоставлен действию только внутренних сил, будет совершать те или иные движения, «возвращаясь» или «уходя» от положения равновесия δ_0 . При заданной внешней возмущающей силе $f_j(t) \neq 0$ условия устойчивости отличаются от условий динамической устойчивости только малостью $f_j(t)$, которая настолько мала, что процесс практически *не зависит от ее значения и места приложения* (рис. 8.1). Это обстоятельство отражено в решении линеаризованного уравнения, из *характеристического уравнения которого влияния значения возмущения — и места приложения его, — реально существующие, — в силу сделанных допущений исчезли.*

Теорема Ляпунова. При этих исследованиях возникал вопрос: насколько правомерно суждение об устойчивости нелинейной системы по виду корней линеаризованных уравнений? Ответ был дан знаменитым русским математиком, А. М. Ляпуновым. Им был предложен (1893) так называемый метод первого приближения, предназначенный для обоснованного исследования тех линейных (линеаризованных) уравнений движения системы, которые получаются после разложения в ряд нелинейной функции*, находящейся в правой части исходного уравнения.

При использовании линеаризации (что делалось и до Ляпунова) всегда возникали сомнения в правомерности получаемых результатов. Две теоремы Ляпунова дали строгое обоснование уравнений первого приближения.

Т е о р е м а I утверждает, что при характеристическом уравнении первого приближения, имеющем корни только с отрицательными вещественными частями, *невозмущенное движение** устойчиво и притом асимптотически*, каковы бы ни были нелинейные функции в правой части исходного уравнения.

Т е о р е м а II утверждает, что если в числе корней характеристического уравнения первого приближения имеются корни, вещественные части которых положительны, то невозмущенное движение неустойчиво, каковы бы ни были нелинейные функции в правой части исходного уравнения.

* Предполагается, что эта нелинейная функция имеет производные.

** Напомним, что *невозмущенным* называется движение системы, обусловленное действием внешних сил и происходящее согласно заданному закону движения. Например, ротор генератора движется по закону $x_i = A \sin \omega t$ под действием определенного вращающего момента турбины и противодействующего ему электромагнитного момента. Если на систему кроме заданных действуют дополнительные внешние силы, которые затем перестанут действовать, то под их влиянием система перейдет в новое, возмущенное движение. Заданное невозмущенное движение называется устойчивым в том случае, если возмущенное движение со временем войдет в некоторую заданную область, определяемую величинами $\varepsilon_i = x_i(t) - x_{i0}(t)$ (см.: Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. — М.: Энергия, 1965, ч. I, гл. VI, то же, ч. III, 1970).

Случай, когда характеристическое уравнение не имеет корней с положительной вещественной частью, но имеет хотя бы один корень с нулевой вещественной частью, является особым случаем. В о с о б ы х с л у ч а я х по корням характеристического уравнения линеаризованной системы нельзя сделать заключения об устойчивости или неустойчивости реальной (исходной) системы. Для получения такого заключения необходимы дополнительные исследования вида нелинейной функции (исследование членов, отброшенных при ее разложении) или привлечение к анализу физических соображений.

В более сложных случаях требуется специальное исследование поведения системы на границе области устойчивости. Граница может быть *опасной* в том смысле, что при переходе ее в системе возникнут нарастающие колебания, практически означающие нарушение устойчивости. Граница будет *безопасной*, если при переходе ее возникают незатухающие и ненарастающие колебания, которые не выводят полностью систему из рабочего состояния.

Проверку границ области устойчивости и выявление ее опасных и безопасных частей можно проводить, определяя знак так называемой ляпуновской величины g . При $g < 0$ граница устойчивости безопасна. Для построения этой величины применительно к различным критическим случаям (один нулевой корень, пара чисто мнимых корней, две пары чисто мнимых корней и т. д.) существуют правила, которые, однако, пока не нашли эффективного применения в практике исследований работы электрических систем. В этих исследованиях разделение границ области устойчивости на опасные и безопасные сравнительно просто выполняется по способу, основанному на построении так называемых кривых равных амплитуд автоколебаний [3].

Исследование переходных процессов при малых отклонениях от состояния равновесия. Запишем линеаризованную систему уравнений в изображениях:

$$\sum_{j,i=1}^m (a_{ji} p^2 + b_{ji} p + c_{ji}) \Delta x_i(p) = \Psi_j(p),$$

где $\Psi_j(p)$ — изображения внешней (возмущающей) силы.

В общем случае изображение переменных

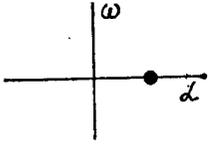
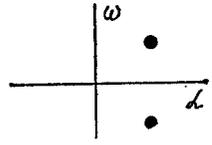
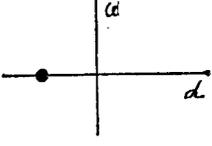
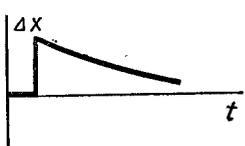
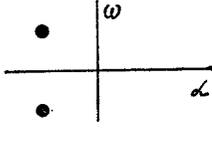
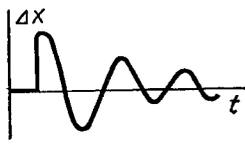
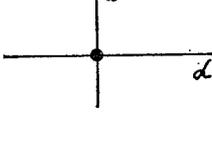
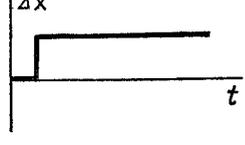
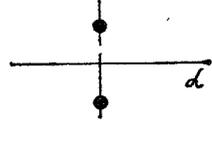
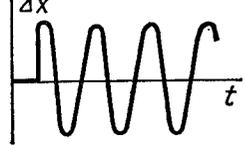
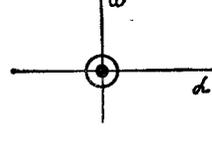
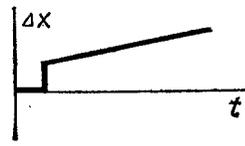
$$\Delta x_i(p) = \sum_{j=1}^m \frac{D_{ji}(p) \Psi_j(p)}{D(p)},$$

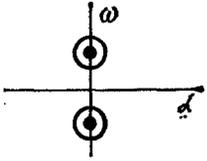
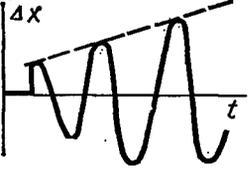
где $D(p)$ — главный определитель системы, называемый характеристическим; $D_{ji}(p)$ — алгебраическое дополнение элемента, стоящего на j -й строке в i -м столбце главного определителя.

Если внешняя возмущающая сила $\Psi_j(p)$ исчезла ($\Psi_j(p) = 0$) и движение рассматривается как свободное, то

$$\Delta x_i(p) = \sum_{j=1}^m \frac{0}{D(p)},$$

т. е. никаких сведений о конкретном движении $\Delta x_i(p)$ получить невозможно. Если принять $D(p) = 0$ и исследовать его корни, то по их значениям можно судить о характере изменений (движении) $\Delta x_i(t)$.

Случай	Корни		Расположение корней	Вид переходного процесса	
	α	$j\omega$		$\Delta x = f(t)$	описание
a	+	0			Возрастающая экспонента с постоянной $T = \frac{1}{\alpha}$
b	+	\pm			Экспоненциально нарастающее гармоническое колебание
в	-	0			Затухающая экспонента с постоянной $T = -\frac{1}{\alpha}$
г	-	\pm			Затухающие гармонические колебания
д	0	0			Сохранение постоянного отклонения Δx_0
е	0	\pm			Гармонические колебания с постоянной амплитудой Δx_0 и частотой γ
ж	0	0			Линейно нарастающая зависимость $\Delta x = f(t)$

Случай	Корни		Расположение корней	Вид переходного процесса	
	α	$j\omega$		$\Delta x = f(t)$	описание
в	0	\pm			Линейно нарастающие колебания

Можно вести рассуждения, переходя от изображений к оригиналам. Так, полагая корни p_k характеристического уравнения $D(p) = 0$ простыми и применяя теорему разложения, известную из электротехники, получаем оригинал:

$$\Delta x_i(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{D_{ji}(p_k) \Psi_j(p_k)}{D'(p_k)} e^{p_k t}$$

Изучение статической устойчивости исходного режима — способности системы возвращаться в исходное (или близкое к нему) состояние после малого возмущения — предполагает следующее. На промежуток времени $t(-\infty, t_0)$, где в качестве t_0 обычно берут $t_0 = 0$, внешние силы $f_j(t)$ вызывают отклонения системы от положения равновесия. В момент t_0 действие внешней силы $f_j(t_0)$ прекращается и под действием начального отклонения $\Delta x_i(t_0), x'_i(t_0)$ начинается свободный переходный процесс, характер которого полностью определяется корнями характеристического уравнения (табл. 8.1):

$$\Delta x_i(t) = C_{1i} e^{p_1 t} + C_{2i} e^{p_2 t} + \dots + C_{ni} e^{p_n t}$$

Так как коэффициенты характеристического уравнения, определяемые реальными параметрами системы, — действительные числа, то его корни могут быть либо действительными, либо комплексно-сопряженными.

Действительному корню в решении соответствует член $C_{ki} e^{\alpha_k t}$. Паре комплексно-сопряженных корней соответствуют два члена в решении

$C_{si} e^{(\alpha_s + j\omega_s)t} + C_{s+1,i} e^{(\alpha_s - j\omega_s)t}$, где C_{si} и $C_{s+1,i}$ — всегда комплексно-сопряженные: $C_{si} = A_{si} - jB_{si}$; $C_{s+1,i} = A_{si} + jB_{si}$, поэтому

$$\begin{aligned} (C_{si} e^{j\omega_s t} + C_{s+1,i} e^{-j\omega_s t}) e^{\alpha_s t} &= \left[A_{si} (e^{j\omega_s t} + e^{-j\omega_s t}) + \right. \\ &+ \left. B_{si} \left(\frac{e^{j\omega_s t} - e^{-j\omega_s t}}{j} \right) \right] e^{\alpha_s t} = 2 [A_{si} \cos \omega_s t + B_{si} \sin \omega_s t] e^{\alpha_s t} = \\ &= 2 |C_{si}| e^{\alpha_s t} \sin(\omega_s t + \varphi_{si}), \end{aligned}$$

где

$$|C_{si}| = \sqrt{A_{si}^2 + B_{si}^2}; \quad \varphi_{si} = \arctg(A_{si}/B_{si}).$$

Таким образом, как это следует из теорем Ляпунова, если все действительные корни и действительные части всех комплексных корней отрицательны, то все составляющие переходного процесса по модулю экспоненциально затухают (у колебательных составляющих экспоненциально затухает огибающая). Рассматриваемый режим системы статически устойчив.

Если среди действительных корней появляется хотя бы один корень $\alpha_h > 0$, то составляющая решения, определяемая этим корнем, неограниченно возрастает (по модулю). Исходный режим системы статически неустойчив (аперiodическое нарушение устойчивости, или «сползание»).

Если среди комплексных корней появляется пара, имеющая $\alpha_s > 0$, то составляющая решения, определяемая этой парой, имеет вид экспоненциально нарастающих во времени колебаний. Исходный режим системы статически неустойчив (колебательное нарушение устойчивости, или самораскачивание).

Таким образом, необходимым и достаточным условием статической устойчивости проверяемого режима электрической системы является требование отрицательности вещественной части всех корней характеристического уравнения.

Сформулируем кратко порядок операций, необходимых для исследования статической устойчивости:

- 1) составить математическое описание переходных процессов в изучаемой системе в виде нелинейных дифференциальных уравнений;
- 2) провести линеаризацию уравнений по первому приближению и получить систему линеаризованных уравнений;
- 3) составить характеристический определитель;
- 4) вычислить частные производные для исследуемого режима;
- 5) определить устойчивость с помощью методов, выявляющих знак действительных корней и действительных частей комплексных корней характеристического уравнения.

При высокой степени характеристического уравнения отыскание его корней является трудоемкой операцией, поэтому ее обычно заменяют операцией отыскания закономерностей, связывающих корни с коэффициентами характеристического уравнения или с некоторыми функциями от коэффициентов. Такие закономерности называют *критериями устойчивости*. Математически критерии (или условия) устойчивости означают отсутствие корней в правой полуплоскости (см. табл. 8.1).

Критерии устойчивости, подробно описанные в [3], классифицируются как *прямые*, требующие нахождения корней характеристического уравнения, и как *косвенные*, не требующие вычисления корней. Это критерии алгебраические (методы Рауса и Гурвица) и частотные (методы *D*-разбиения, Михайлова, Найквиста). Критерии устойчивости формулируют необходимые и достаточные условия устойчивости, основанные на анализе корней характеристического уравнения, но не требующие их вычисления.

Для анализа статической устойчивости электрических систем наиболее часто применяются критерий Гурвица и метод *D*-разбиения. В обоих случаях предварительно составляется характеристическое уравнение и определяются выражения его коэффициентов.

Критерий Гурвица *устанавливает соотношения между коэффициентами характеристического уравнения в виде неравенств* (положительность всех определителей Гурвица), соблюдение которых является необходимым и достаточным условием статической устойчивости системы любой сложности. Для предварительной оценки устойчивости в первую очередь используется необходимое условие — положительность всех коэффициентов характеристического уравнения. Критерий Гурвица дает возможность определить характер нарушения устойчивости. Так, изменению знака свободного члена характеристического уравнения при утяжелении режима устойчивой системы соответствует аperiodическое нарушение устойчивости, а предпоследнего определителя — колебательное (см. рис. 8.2 и 8.5, 8.6).

Критерий Гурвица позволяет для простых случаев (порядок характеристического уравнения $n \leq 4$) легко получить аналитические выражения для граничных условий устойчивости, например минимально необходимые и максимально допустимые значения коэффициента регулирования по отклонению напряжения в АРВ п. д.

Метод *D-разбиения устанавливает область статической устойчивости в координатах выделенных параметров*. В качестве таких параметров наиболее часто выбираются коэффициенты усиления и постоянные времени АРВ. Кроме того, метод *D-разбиения* определяет характер границы области статической устойчивости (аperiodическая или колебательная, в последнем случае определяет частоту колебаний). Забегая вперед, дадим на рис. 8.2 сводку и характеристику наиболее часто применяемых критериев при оценке устойчивости электрических систем.

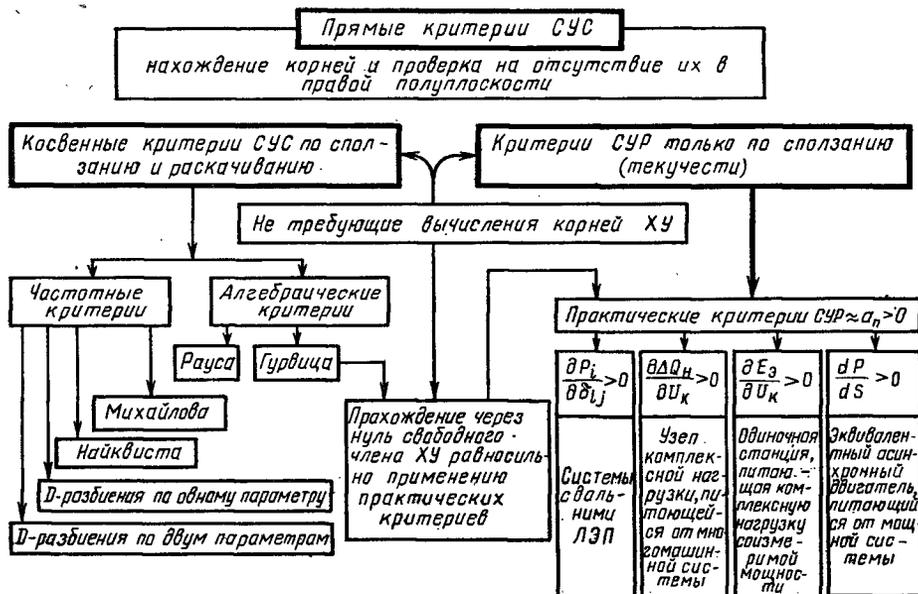


Рис. 8.2. Критерии статической устойчивости:

СУС — статическая устойчивость системы; СУР — статическая устойчивость режима; ХУ — характеристическое уравнение

**§ 8.2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ
ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЕЕ ГЕНЕРАТОРОВ
РЕГУЛЯТОРОМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Все генераторы современных систем снабжены автоматическими регуляторами возбуждения пропорционального действия (АРВ п. д.) или сильного действия (АРВ с. д.). Поэтому рассматривать статическую устойчивость электрической системы следует только при применении этих регуляторов возбуждения.

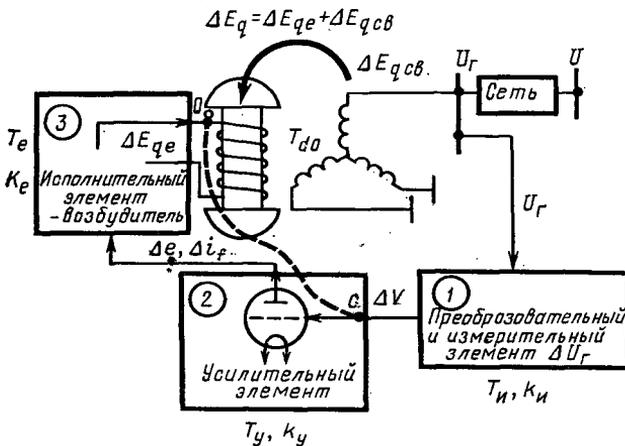


Рис. 8.3. Схема простейшей электрической системы, имеющей регулятор возбуждения пропорционального действия, представленный тремя элементами (1, 2, 3):
--- обратная связь, в результате действия которой $T_e = T_b \pm T_{o.o}$

Схема простейшей электрической системы, применительно к которой будет изучаться статическая устойчивость, показана на рис. 8.3. Система имеет автоматическое регулирование возбуждения, составленное из трех элементов, параметры которых представлены на схеме. Изменение тока возбуждения генератора, т. е. изменение E_q , осуществляется регулятором, вводящим в обмотку возбуждения э. д. с.

$$\Delta E_{qe} = k_e \Delta i_{в.в} ; \text{ в свою очередь, } \Delta i_{в.в} = \frac{\Delta e}{R_e (1 + T_e p)} \text{ или } \Delta E_{qe} = \frac{k_e \Delta e}{1 + T_e p} .$$

Из аналогичных соображений можно записать

$$\Delta e = \frac{k_y \Delta v}{1 + T_y p} ; \Delta v = \frac{k_n (-\Delta U_r)}{1 + T_n p} .$$

Очевидно, что

$$\Delta E_{qe} = \frac{K_0 (-\Delta U_r)}{(1 + T_n p) (1 + T_y p) (1 + T_e p)} = \gamma(p) \Delta U_r .$$

Здесь $K_0 = k_e k_y k_n$;

$$\gamma(p) = \frac{-K_0}{(1 + T_n p) (1 + T_y p) (1 + T_e p)} .$$

При переходном процессе в генераторе появятся свободная э. д. с. (см. гл. 6)

$$\Delta E_{qсв} = -T_{d0} p \Delta E'_q \text{ или } \Delta E_{qсв} = \xi(p) \Delta E'_q .$$

Таким образом, переходный электромагнитный процесс может быть отражен уравнением, имеющим две слагающие — вынужденную и свободную:

$$\Delta E_q = \Delta E_{qe} + \Delta E_{q\text{св}} = \gamma(p) \Delta U_r + \xi(p) \Delta E'_q. \quad (8.1)$$

Уравнение переходного электромеханического процесса при малых отклонениях $\Delta\delta$ имеет вид

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} = P_0 - P_{эл} = P_0 - P_m \sin \delta.$$

Раскладывая $P_m \sin \delta$ в ряд Тейлора по малой величине $\Delta\delta$ в окрестности δ_0 (т. е. полагая $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$) и оставляя только нулевой и первый (линейный) член разложения, запишем

$$T_J p^2 \Delta\delta + P_d p \Delta\delta = P_m \sin \delta_0 - P_m \sin \delta_0 - \frac{dP}{d\delta} \Delta\delta = -\Delta P,$$

где ΔP — изменение мощности при отклонении угла на $+\Delta\delta$.

Следовательно, уравнение электромеханического процесса можно представить как

$$\Delta P = -T_J p^2 \Delta\delta - P_d p \Delta\delta. \quad (8.2)$$

В результате для описания переходного процесса получено два уравнения с пятью неизвестными (δ , E'_q , E_q , U_r , ΔP). Очевидно, что для решения задачи об устойчивости необходимы еще три уравнения. Эти уравнения могут быть получены, если одно и то же изменение мощности ΔP представить как функции э. д. с. E_q , E'_q и напряжения U_r :

$$\Delta P_1 = \varphi(E_q, \delta) = \frac{\partial P_{E_q}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial P_{E_q}}{\partial E_q} \Delta E_q; \quad (8.3)$$

$$\Delta P_2 = \varphi(E'_q, \delta) = \frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial P_{E'_q}}{\partial E'_q} \Delta E'_q; \quad (8.4)$$

$$\Delta P_3 = \varphi(U_r, \delta) = \frac{\partial P_{U_r}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial P_{U_r}}{\partial U_r} \Delta U_r. \quad (8.5)$$

Подставив в (8.2) значение ΔP из (8.3), (8.4), (8.5), а из (8.1) значение ΔE_q в (8.3), после элементарных преобразований получим три основных уравнения:

$$[T_J p^2 + c_1(p)] \Delta\delta + b_1 \xi(p) \Delta E'_q + b_1 \gamma(p) \Delta U_r = 0; \quad (8.3a)$$

$$[T_J p^2 + c_2(p)] \Delta\delta + b_2 \Delta E'_q + 0 = 0; \quad (8.4a)$$

$$[T_J p^2 + c_3(p)] \Delta\delta + 0 + b_3 \Delta U_r = 0. \quad (8.5a)$$

Здесь обозначено:

$$c_1(p) = c_1 + P_d p; \quad c_1 = \frac{\partial P_{E_q}}{\partial \delta}; \quad b_1 = \partial P_{E_q} / \partial E_q;$$

$$c_2(p) = c_2 + P_d p; \quad c_2 = \frac{\partial P_{E_q'}}{\partial \delta}; \quad b_2 = \partial P_{E_q'} / \partial E_q';$$

$$c_3(p) = c_3 + P_d p; \quad c_3 = \frac{\partial P_{U_r}}{\partial \delta}; \quad b_3 = \partial P_{U_r} / \partial U_v.$$

Все коэффициенты c являются, следовательно, частными производными от мощностей, выраженных через E_q , E_q' , U_r по углу: коэффициенты b — частными производными от тех же мощностей по тем э. д. с., через которые выражены

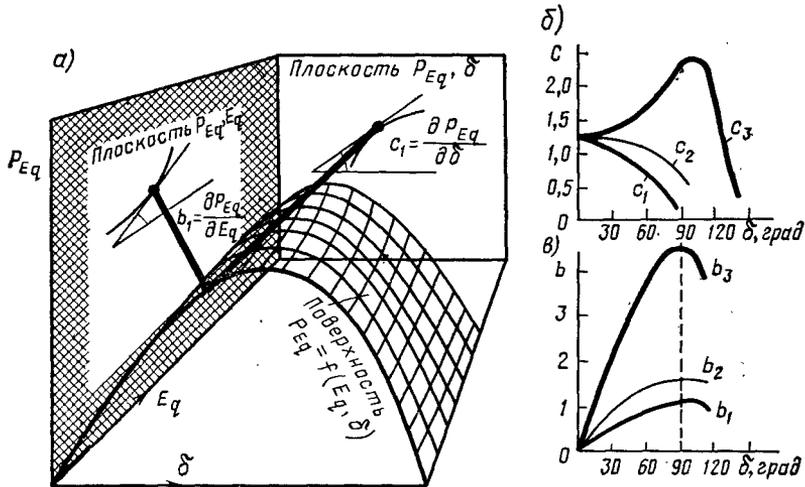


Рис. 8.4. Природа и примерный характер изменения коэффициентов c и b : а — пример определения b_1 и c_1 как частных производных от P_{E_q} ; б — зависимости от режима [$c=f(\delta)$] для конкретного случая при $r_{сг} \approx 0$; в — то же, зависимости $b=f(\delta)$

эти мощности. Коэффициенты c_1 , c_2 , c_3 , b_1 , b_2 , b_3 — это величины, постоянные при данном (исследуемом) режиме в окрестности δ_0 , но переменные при изменении режима. Их смысл наглядно иллюстрирует рис. 8.4.

Расчетные значения этих и других вспомогательных коэффициентов приведены в табл. 8.2, при этом активное сопротивление статора принималось ничтожно малым: $r_{сг} \approx 0$. Система однородных уравнений (8.3а), (8.4а) и (8.5а) не имеет определенного решения, что соответствует постановке задачи о статической устойчивости (значение и место возмущений не заданы). Любой отыскиваемый параметр режима (например, $\Delta\delta$) можно представить в виде $\Delta\delta = 0/D_1(p)$, причем определитель системы (8.3а), (8.4а), (8.5а) $D_1(p) = 0$ дает полином, являющийся характеристическим уравнением, по корням которого можно судить о факте устойчивости системы и о виде происходящих процессов:

$$D_1(p) = \begin{vmatrix} T_J p^2 + c_1(p) & b_1 \xi(p) & b_1 \gamma(p) \\ T_J p^2 + c_2(p) & b_2 & 0 \\ T_J p^2 + c_3(p) & 0 & b_3 \end{vmatrix} = (T_J p^2 + c_1(p)) b_2 b_3 - (T_J p^2 + c_2(p)) b_1 b_3 \xi(p) - (T_J p^2 + c_3(p)) b_1 b_2 \gamma(p).$$

Обозначения	Аналитические выражения частных производных для простейшей системы при неявнополюсной синхронной машине
$\frac{\partial P_{E_q}}{\partial \delta} = c_1$	$\frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta$
$\frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta} = c_2$	$\frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta - U^2 \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma} x'_{d\Sigma}} \cos 2\delta$
$\frac{\partial P_{U_r}}{\partial \delta} = c_3$	$\frac{U U_r}{x_c} \left(\cos \delta_r \cos \delta + \sin \delta \frac{\partial \cos \delta_r}{\partial \delta} \right) - \frac{U^2 x_d}{x_c x_{d\Sigma}} \cos 2\delta =$ $= c_1 + U^2 \frac{x_d}{x_{d\Sigma} x_c} (\sin \delta - \operatorname{tg} \delta_r \cos \delta) \sin \delta$
$\frac{\partial P_{E_q}}{\partial E_q} = b_1$	$\frac{U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta$
$\frac{\partial P_{E'_q}}{\partial E'_q} = b_2$	$\frac{U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta$
$\frac{\partial P_{U_r}}{\partial U_r} = b_3$	$\frac{U}{x_c} \sin \delta \frac{1}{\cos \delta_r}$
$\frac{\partial E'_q}{\partial \delta}$	$-U \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma}} \sin \delta$
$\frac{\partial E_q}{\partial E_q}$	$\frac{x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}}$
$\frac{\partial U_r}{\partial \delta}$	$\frac{U}{U_r} \frac{x_d}{x_{d\Sigma}} (U_{rd} \cos \delta - U_{rq} \sin \delta)$
$\frac{\partial U_r}{\partial E_q}$	$\frac{U_{rq}}{U_r} \frac{x_c}{x_{d\Sigma}}$
$\frac{\partial I}{\partial \delta}$	$\frac{U}{x_{d\Sigma}} \frac{I_q}{I} \cos \delta + \frac{U}{x_{d\Sigma}} \frac{I_d}{I} \sin \delta$
$\frac{\partial I}{\partial E_q}$	$\frac{I_d}{I x_{d\Sigma}}$
$\frac{\partial \delta}{\partial \delta}$	1
$\frac{\partial \delta}{\partial E_q}$	0

Обозначения	Аналитические выражения частных производных для простейшей системы при невыполнющейся синхронной машине
$\frac{\partial \delta_c}{\partial \delta}$	$1 - \frac{U}{U_r^2} \frac{x_d}{x_{d\Sigma}} (U_{rd} \sin \delta + U_{rq} \cos \delta)$
$\frac{\partial \delta_c}{\partial E_q}$	$\frac{U_{rd}}{U_r^2} \frac{x_c}{x_{d\Sigma}}$

Примечание. Здесь $\delta_D = \langle \dot{E}_q, \dot{U}_D \rangle$; $\cos \delta_r = \sqrt{1 - \left(\frac{U x_d \sin \delta}{U_D x_{d\Sigma}} \right)^2}$; $\delta_c = \delta - \delta_r = \delta - \arctg U_{rd}/U_{rq}$.

После подстановки передаточных функций $\xi(p)$ и $\gamma(p)$ будем иметь

$$D_1(p) = D(p)/W(p),$$

где $W(p) \neq 0$ и, следовательно, $D(p) = 0$.

Приведа полученное выражение к общему знаменателю, раскрывая значения $c_1(p)$, $c_2(p)$, $c_3(p)$ и вводя $T'_d = (b_1/b_2)T_{d0}$, получим в развернутом виде характеристическое уравнение шестого порядка:

$$\begin{aligned} D(p) = & T_n T_y T_e T_J T'_d p^6 + [T_J T'_d (T_n T_y + T_n T_e + T_y T_e) + T_n T_y T_e (T_J + \\ & + P_d T'_d)] p^5 + [T_J T'_d (T_n + T_y + T_e) + (T_n T_y + T_n T_e + T_y T_e) (T_y + P_d T'_d) + \\ & + T_n T_y T_e (P_d + c_2 T'_d)] p^4 + [T_J T'_d + (T_n + T_y + T_e) (T_J + P_d T'_d) + (T_n T_y + \\ & + T_n T_e + T_y T_e) (P_d + c_2 T'_d) + T_n T_y T_e c_1] p^3 + \left[T_J \left(1 + \frac{b_1}{b_3} K_{0U} \right) + P_d T'_d + \right. \\ & \left. + (T_n + T_y + T_e) (P_d + c_2 T'_d) + (T_n T_y + T_n T_e + T_y T_e) c_1 \right] p^2 + \\ & + \left[P_d \left(1 + \frac{b_1}{b_3} K_{0U} \right) + c_2 T'_d + (T_n + T_y + T_e) c_1 \right] p + \left(c_1 + c_3 \frac{b_1}{b_3} K_{0U} \right) = 0, \end{aligned}$$

или*

$$D(p) = a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6 = 0. \quad (8.6)$$

Проверка на устойчивость может быть выполнена (см. § 8.1) по методу Гур-

* Здесь и далее через a^\downarrow будет обозначаться коэффициент, отражающий получаемое воздействие от регулятора возбуждения: $a^\downarrow = a + \Delta a$, где Δa — «добавка», обусловленная действием А.В.

вица. Напомним, что критерий Гурвица формулируется следующим образом: для того чтобы система, содержащая автоматическое регулирование, была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все определители $\Delta_1, \Delta_2, \dots$, составленные по коэффициентам характеристического уравнения системы до n -го порядка включительно, были положительны, при этом должно быть $a_0 > 0$.

При соблюдении критерия положительности коэффициентов характеристического уравнения проверка последнего определителя (матрицы) Гурвица Δ_n не обязательна, так как из равенства $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$ при $\Delta_{n-1} > 0$ всегда следует, что $\Delta_n > 0$.

Определители Гурвица будут:

$$\Delta_1 = a_1; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}; \quad \Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_n \end{vmatrix}.$$

При составлении определителя Гурвица n -го порядка руководствуются следующими правилами:

1) выписывают по главной диагонали все коэффициенты от a_1 до a_n в порядке возрастания индексов;

2) дополняют все столбцы определителя вверх от диагонали коэффициентами с последовательно возрастающими, а вниз — с последовательно убывающими индексами;

3) устанавливают, находя наибольший порядок определителя Гурвица, степень характеристического уравнения;

4) на места коэффициентов, индексы которых должны были бы быть больше n и меньше нуля, ставят нули;

5) находят последний определитель $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$ (и предпоследний Δ_{n-1}).

Применительно к задачам исследования электрических систем важны некоторые условия, вытекающие из общих свойств метода Гурвица.

1. Необходимым и достаточным условием отсутствия аperiodической неустойчивости является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения.

2. Необходимым и достаточным условием отсутствия колебательной неустойчивости является положительность диагональных миноров матрицы Δ_n Гурвица (или предпоследнего, Δ_{n-1} , определителя).

Введем понятие утяжеления

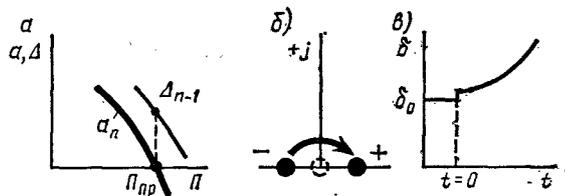


Рис. 8.5. Появление аperiodической неустойчивости:

a — переход a_n через ноль при $\Delta_{n-1} > 0$; $б$ — переход корня в правую полуплоскость; $в$ — $\delta = f(t)$; $\Pi_{пр}$ — предельное значение утяжеляемого параметра

режима, т. е. увеличения некоторого параметра Π (мощность, угол и т. д.), рост которого у х у д ш а е т устойчивость. При этом существенно обратить внимание на следующее (рис. 8.5):

При утяжелении режима прохождение через нуль коэффициента a_n при $\Delta_{n-1} > 0$ (рис. 8.5, а) означает переход действительного корня из левой полу-

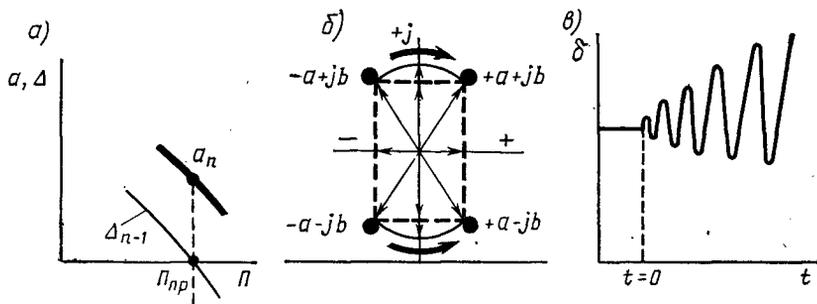


Рис. 8.6. Появление колебательной неустойчивости:

а — переход Δ_{n-1} через нуль при $a_n > 0$; б — переход комплексных корней в правую полуплоскость; в — $s - \delta = f(t)$; Π_{np} — предельное значение утяжеляемого параметра

плоскости в правую (рис. 8.5, б), что указывает на а п е р и о д и ч е с к о е н а р у ш е н и е устойчивости (рис. 8.5, в).

При утяжелении режима прохождение через нуль Δ_{n-1} при $a_n > 0$ (рис. 8.6, а) будет означать переход пары комплексных корней с отрицательной вещественной частью из левой полуплоскости в правую (рис. 8.6, б), что укажет

Левая полуплоскость Правая полуплоскость

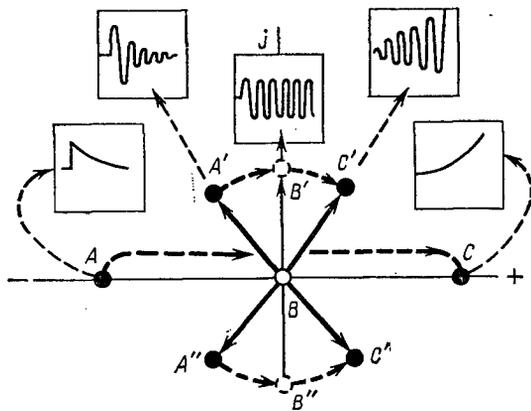


Рис. 8.7. Переход рабочей точки из левой в правую полуплоскость и изменение корней характеристического уравнения:

А — аperiodический устойчивый процесс; С — то же, неустойчивый; А', А'' — колебательный устойчивый процесс; С', С'' — то же, неустойчивый; В', В'' — процесс на границе (ось j)

на колебательное нарушение устойчивости (рис. 8.6, в).

В обоих случаях прохождение изображающей (рабочей) точки через ось j укажет на границу устойчивости, на которой возникают незатухающие колебания (рис. 8.7).

В соответствии с отмеченным выше проверка устойчивости режимов производится в двух направлениях:

1) проверяется устойчивость заданного нормального режима. Устойчивость его может нарушаться при невыполнении условий устойчивости в связи с появлением отрицательных значений T_d', P_d , определенных соотношений коэффициентов c_1, c_2, c_3 и др., входящих в ком-

бинацию с ними. Работа по определению коэффициентов a_0, \dots, a_6 характеристического уравнения и определителей Гурвица $\Delta_2, \dots, \Delta_5$, проводимая таким образом, очень трудоемка;

2) проверяется устойчивость заведомо устойчивого режима при утяжелении его. Для этого в соответствии с рис. 8.5, 8.6, увеличивая передаваемую мощность, необходимо установить предельное значение $P = P$, при котором пройдет через нуль a_n или Δ_{n-1} . Очевидно, что работа эта весьма трудоемкая и дает ответ только для конкретного случая, не позволяя получить достаточно наглядных результатов. Чтобы получить некоторые общие представления, упростим уравнение (8.6), приняв в нем $T_n = T_y = 0$, т. е. пренебрежем электромагнитной инерцией измерительного и усилительного элементов, что можно сделать, так как эти постоянные на порядок меньше T_e, T'_d . После этого упрощения получим характеристическое уравнение четвертого порядка, имеющее вид

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + \Delta a_2) p^2 + (a_3 + \Delta a_3) p + a_4 + \Delta a_4 = 0. \quad (8.7)$$

Здесь обозначено:

$$\begin{aligned} a_0 &= T_J T'_d T_e; & a_1 &= T'_d T_e P_d + T_J (T'_d + T_e); & a_2 + \Delta a_2 &= T_J + T'_d T_e c_2 + \\ &+ P_d (T'_d + T_e) + T_J K_{0U} b_1/b_3; & a_3 + \Delta a_3 &= P_d + T_e c_1 + T'_d c_2 + P_d K_{0U} b_1/b_3; \\ a_4 + \Delta a_4 &= c_1 + c_3 K_{0U} b_1/b_3. \end{aligned}$$

Условия устойчивости сводятся к требованиям:

- 1) $a_0 > 0$ при $P_d > 0$;
- 2) $a_1 > 0$ при $T'_d > 0$ и $P_d > 0$; при $P_d < 0$ необходимо, чтобы

$$|P_d| < \frac{T_J (T'_d + T_e)}{T'_d T_e};$$

- 3) $a_2 > 0$ при $P_d > 0, c_2 > 0, K_{0U} > 0$;
- 4) $a_3 + \Delta a_3 > 0$ при $P_d > 0, c_2 > 0, c_1 > 0$;
- при $c_1 < 0$ необходимо, чтобы

$$|c_1| = \frac{P_d (1 + K_{0U} b_1/b_3) + T'_d c_2}{T_e};$$

5) $a_4 + \Delta a_4 > 0$ означает требование установки $K_{0U} > K_{0U \text{ мин}}$, где значение $K_{0U \text{ мин}} = (| -c_1 | / c_3) (b_3/b_1)$.

Определим далее коэффициент $K_{0U \text{ макс}}$. Чтобы получить максимально допустимое значение коэффициента усиления по отклонению напряжения K_{0U} , необходимо, приравняв определитель Гурвица нулю ($\Delta_{\text{Гур}} = 0$), раскрыть значения коэффициентов a_i и Δa_i , где $i = 1, 2, 3, 4$, в соответствии с полученными для них выражениями:

$$\Delta_{\text{Гур } n} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 + \Delta a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 + \Delta a_2 & a_4 + \Delta a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 + \Delta a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 + \Delta a_2 & a_4 + \Delta a_4 \end{vmatrix} =$$

$$= (a_4 + \Delta a_4) \begin{vmatrix} a_1 & a_3 + \Delta a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 + \Delta a_2 & a_4 + \Delta a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 + \Delta a_3 \end{vmatrix} = 0.$$

Или, так как $(a_4 + \Delta a_4) > 0$, запишем

$$\Delta_{\text{Гур}}^{n-1} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 + \Delta a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 + \Delta a_2 & a_4 + \Delta a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 + \Delta a_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (8.8)$$

Развертывая запись определителя (8.8) и подставляя значения параметров в выражения коэффициентов a_i , Δa_i , $i = 0, 1, 2, 3, 4$, получим уравнение вида

$$AK_{0U}^2 + BK_{0U} + C = 0.$$

Для определения коэффициента K_{0U} необходимо решить записанное выше квадратное уравнение.

Введем обозначения:

$$K_1 = P_d + T_e c_1 + T_d' c_2; \quad K_2 = T_J (T_d' + T_e) + T_d' T_e P_d; \quad K_3 = T_J + P_d (T_d' + T_e) + T_d' T_e c_2;$$

$$A = (b_1^2/b_3^2) \{ [T_J (T_d' + T_e) + T_d' T_e P_d] P_d T_J - T_J T_d' T_e P_d^2 \} = \\ = (b_1^2 P_d T_J / b_3^2) (K_2 - T_d' T_e P_d) = (b_1^2/b_3^2) P_d T_J (T_d' + T_e);$$

$$B = (b_1/b_3) \{ [P_d T_J (T_d' + T_e) + T_d' T_e P_d^2] [T_J + P_d T_d' + P_d T_e + T_d' T_e c_2] + \\ + [T_J^2 (T_d' + T_e) + T_J T_d' T_e P_d] (P_d + T_e c_1 + T_d' c_2) - 2 T_J T_d' T_e P_d (P_d + T_e c_1 + \\ + T_d' c_2) - c_3 \{ T_J (T_d' + T_e) + T_d' T_e P_d \}^2 \} = (b_1/b_3) (P_d K_2 K_3 + T_J K_2 K_1 - \\ - 2 T_J T_d' T_e P_d K_1 - c_3 K_2^2) = (b_1/b_3) [K_2 (P_d K_3 - c_3 K_2 + T_J K_1) - 2 K_1 T_J T_d' T_e P_d];$$

$$C = [T_d' T_e P_d + T_J (T_d' + T_e)] [T_J + T_d' T_e c_2 + P_d (T_d' + T_e)] [P_d + T_e c_1 + \\ + T_d' c_2] - T_J T_d' T_e (P_d + T_e c_1 + T_d' c_2) (P_d + T_e c_1 + T_d' c_2) - [T_d' T_e P_d + \\ + T_J (T_d' + T_e)]^2 c_1 = K_1 K_2 K_3 - T_J T_d' T_e K_1^2 - K_2^2 c_1.$$

Таким образом, максимально допустимое значение коэффициента усиления

$$K_{0U \text{ макс}} = (-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}) / (2A). \quad (8.9)$$

К сожалению, получить какие-либо общие закономерности из уравнений (8.9) не представляется возможным, но для конкретных случаев может быть установлен ряд важных закономерностей, показанных, например, на рис. 8.8.

Положительность критериев Гурвица для исходного режима указывает на устойчивость этого режима. Дальнейшая проверка на утяжеление по параметру Π позволяет установить его предельное значение (см. рис. 8.5, 8.6), одновременно выявив характер нарушения устойчивости.

Дальнейшие упрощения. Некоторые обобщения. Для возможности некоторых обобщений упростим полученное уравнение (8.7), пренебрегая в нем демпферным эффектом ($P_d = 0$). Тогда характеристическое уравнение примет вид

$$T_e T_d' T_J p^4 + T_J (T_d' + T_e) p^3 + (T_J + T_d' T_e c_2 + K_{0U} T_J b_1/b_3) p^2 + (T_d' c_2 + T_e c_1) p + c_1 + K_{0U} c_3 b_1/b_3 = 0 \quad (8.10)$$

или

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + \Delta a_2) p^2 + a_3 p + (a_4 + \Delta a_4) = 0.$$

Рассмотрим, чем обеспечивается с точки зрения физических соотношений и параметров положительность коэффициентов этого уравнения. Очевидно, что:

всегда $a_0 > 0$, если $T_d' > 0$;

$a_1 > 0$, если $T_d' > 0$ или $T_d' < T_e$ при $T_d' < 0$;

$a_2^{\pm} = a_2 + \Delta a_2 > 0$, если $c_2 > 0$ или при $c_2 < 0$

$$(1 + K_{0U} b_1/b_3) T_J > T_d' T_e c_2.$$

Рабочий режим всегда будет существовать при $c_2 > 0$ (рис. 8.9), и данное условие всегда соблюдается.

Значение a_3 будет > 0 , если $T_d' c_2 > T_e c_1$ или $c_2 > (T_e/T_d') | - c_1 |$ (положительное значение c_2 больше отрицательного c_1 , умноженного на T_e/T_d'). Из этого условия следует, что предельным режимом при регулировании данного типа, не оказывающего воздействия на a_3 , будет режим при $c_2 \geq 0$.

Получить предельный режим, очевидно, можно при увеличении T_e , что, как указывалось выше,

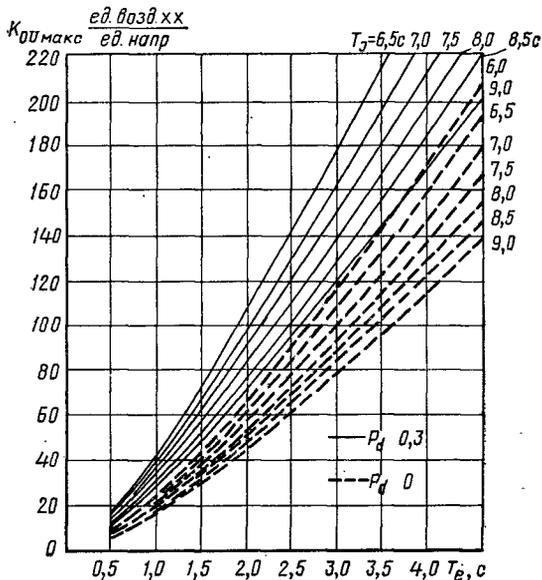


Рис. 8.8. Влияние демпфирования на максимальный коэффициент усиления:
 $K_{0U\max} = f(T_e)$; ——— $P_d = 0.3$; $T_J = 7.0$; 8.0 ; 9.0 с;
 - - - - - $P_d = 0$; $T_J = 6.0$; 7.0 ; 8.0 ; 9.0 с

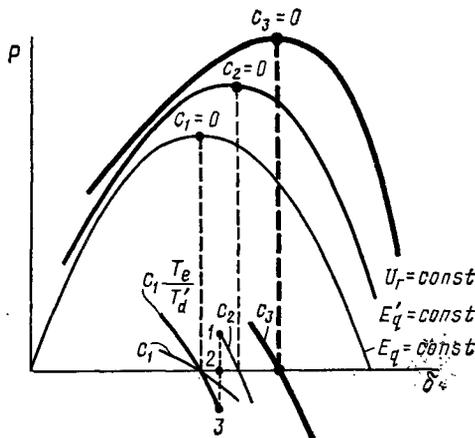


Рис. 8.9. Предельные значения мощности по условиям устойчивости при поддержании постоянства U_r , E_q или E_q' (без регулирования)

достигается введением гибкой отрицательной обратной связи. Все полученные соотношения, обеспечивающие положительность коэффициентов a_0, \dots, a_3 , связаны только с режимными ограничениями (рис. 8.9).

Эффект любого автоматического регулирования возбуждения математически отражается в добавках Δa к коэффициентам a характеристического уравнения. При регулировании пропорционального действия появляются две добавки:

Δa_2 и Δa_4 . Первая добавка открывает возможность (теоретическую) «продвинуться» по характеристике мощности $P_{E_q'}$ до ее максимума, т. е. до точки $c_2 = 0$. Вторая добавка позволяет установить требования к коэффициенту усиления K_{OU} . В самом деле, $a_4^{\downarrow} = a_4 + \Delta a_4 = c_1 + K_{OU} (b_1/b_3)c_3$, или, так как c_1 отрицательно (рис. 8.10), $K_{OU} (b_1/b_3)c_3 \gg |c_1|$. Это означает, что коэффициент усиления, обеспечивающий большие значения мощности $P_{E_q'}$ (при $c_1 < 0, c_2 > 0$),

должен быть больше (или равен) некоторого $K_{OU \text{ мин}}$, где $K_{OU \text{ мин}} = |c_1|b_3/b_1c_3$. Чем меньше будет K_{OU} , тем меньше удастся продвинуться по характеристике $E_q = \text{const}$ в сторону точки $c_2 = 0$. В пределе при $K_{OU} = 0$ система будет работать как нерегулируемая согласно характеристике $P_{E_q} = \text{const}$ (рис. 8.10, а), а напряжение будет уменьшаться с ростом нагрузки (рис. 8.10, б). При $K_{OU \text{ макс}} = 0$ из уравнения (8.10) следует, что апериодическое нарушение устойчивости

Рис. 8.10. Предельные мощности без регулирования возбуждения ($c_1 = 0$) при поддержании $U_r = \text{const}$ ($c_3 = 0$):

а — движение рабочей точки a, a', \dots, c_3 при увеличении тока возбуждения $[E_q]$ при $K_{OU} = \infty$; б — изменение напряжения U_r

будет наступать при $c_1 = 0$. Если взять другой крайний случай, приняв $K_{OU \text{ макс}} = \infty$, то уравнение (8.9) принимает вид $T_J p^2 + c_3 = 0$, где корни уравнения

$$p_{1,2} = \sqrt{-c_3/T_J} = \pm j \sqrt{c_3/T_J}.$$

Это означает, что система устойчива при $c_3 = 0$ (формально, так как не учтено затухание, находится на границе устойчивости). При $c_3 = 0$ наступает предельный режим. При $K_{OU} = \infty$ напряжение генератора U_r при всех изменениях режима поддерживается постоянным (рис. 8.10, б). Это, разумеется, очень привлекательно в условиях эксплуатации. Однако и теоретические соображения, и опыт создания регуляторов пропорционального действия показывают, что реализовать работу системы при $K_{OU} = \infty$ невозможно и что для каждой системы есть некоторое предельное значение $K_{OU \text{ макс}} < K_{OU \infty}$. Каково же это значение?

Согласно рис. 8.6, прохождение через нуль предпоследнего определителя Гурвица [в данном случае это определитель (8.8)] вызывает колебательную неустойчивость. Из (8.8) с учетом демпфирования было найдено значение макси-

мально возможного коэффициента усиления в виде выражения (8.9). Если в (8.9) принять $P_d = 0$, $T_e = 0$, то можно получить простое выражение*

$$K_{OU \text{ макс}} = [(c_2 - c_1)/(c_3 - c_2)] (b_3/b_1). \quad (8.11)$$

Если $T_e \neq 0$, то

$$K_{OU \text{ макс}} = K_{OU \text{ макс } T_e=0} \xi, \quad (8.12)$$

где ξ — поправочный (учет T_e) коэффициент:

$$\xi = \left(1 + \frac{T_e^2}{T_J} \frac{T'_d c_2 + T_e c_1}{T_e + T'_d} \right) / \left(1 + \frac{T_e}{T'_d} \frac{c_3 - c_1}{c_3 - c_2} \right).$$

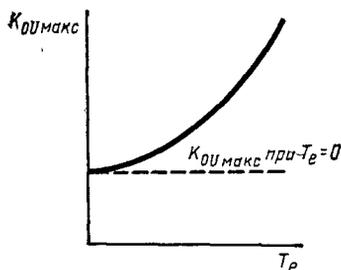


Рис. 8.11. Влияние эквивалентной постоянной времени системы возбуждения T_e на максимальный коэффициент усиления $K_{OU \text{ макс}}$

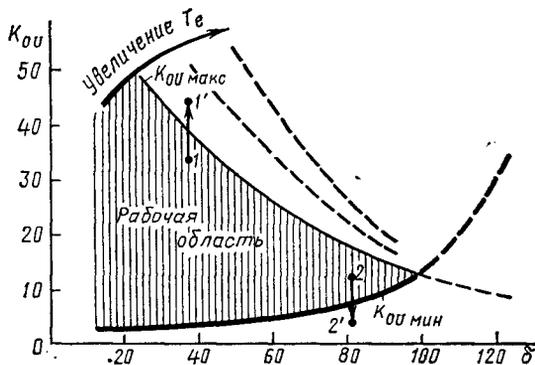


Рис. 8.12. Предельные значения коэффициента усиления:

$K_{OU \text{ макс}} = f(\delta)$; $K_{OU \text{ мин}} = \varphi(\delta)$; 1-1' — переход из рабочей области в область колебательной неустойчивости; 2-2' — то же, в область аперiodической неустойчивости

Значение $K_{OU \text{ макс}}$ зависит от режима системы и параметра T_e , увеличение которого приводит к росту возможного $K_{OU \text{ макс}}$ (рис. 8.11). Значение коэффициента усиления должно находиться между $K_{OU \text{ мин}}$ и $K_{OU \text{ макс}}$, причем зависимость эти имеют вид, примерно показанный на рис. 8.12.

Практически приемлемое значение коэффициента усиления K_{OU} должно, следовательно, отвечать неравенству $K_{OU \text{ мин}} < K_{OU} < K_{OU \text{ макс}}$. Выбор той или иной величины, как это показано на рис. 8.13, влияет на режим системы и ее предельно передаваемые мощности:

— при $K_{OU} \approx 0$ система будет нерегулируемой. В этой системе предел передаваемой мощности определяется точкой c_1 (рис. 8.13, а), а напряжение существенно падает с ростом нагрузки (рис. 8.13, б);

— при $0 < K_{OU} < K_{OU \text{ макс}}$ существует некоторое значение коэффициента, при котором предельная мощность определяется точкой c_2 (рис. 8.13, в), а

* Разумеется, вместо того чтобы упрощать (8.9), полагая $P_d = 0$, можно было подставить в (8.8) значения коэффициентов из (8.10) и раскрыв (8.8), получить тот же результат.

напряжение уменьшается (но сравнительно медленно) с ростом нагрузки (рис. 8.13, з);

— при $K_{OU} < K_{OU \text{ макс}}$, но значении большем, чем в случае, показанном на рис. 8.13, в, напряжение поддерживалось бы лучше, но раскачивание произошло бы несколько раньше;

— при $K_{OU} \approx \infty$ (рис. 8.13, д) поддержание напряжения будет очень хорошим (рис. 8.13, е), но при росте нагрузки (еще до достижения предела c_3) по-

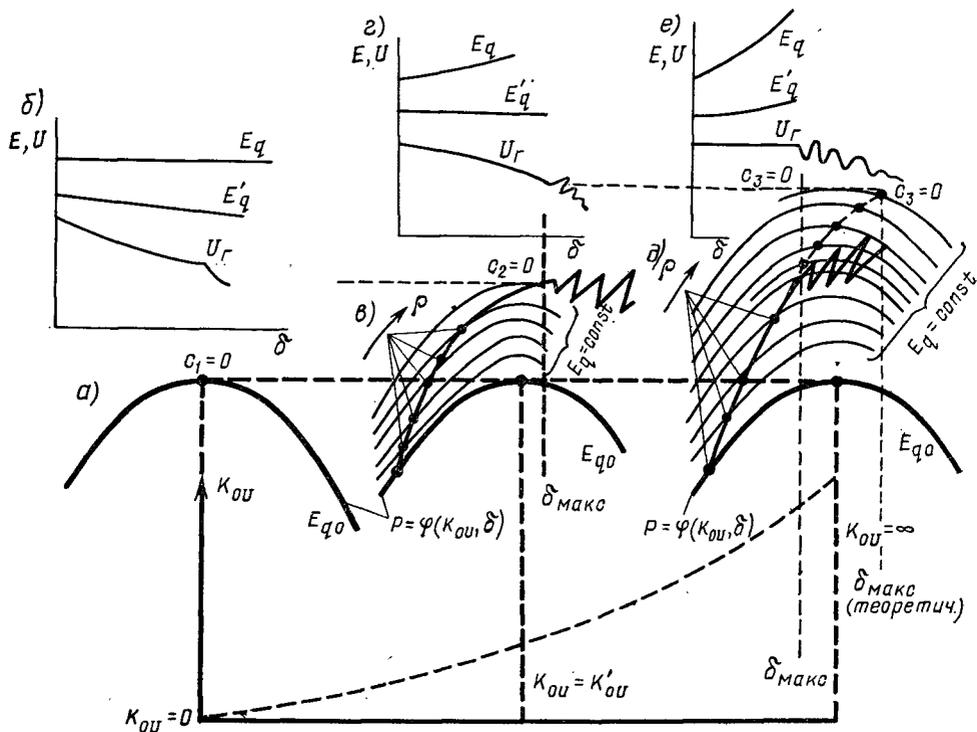


Рис. 8.13. Режим простейшей регулируемой системы в зависимости c^0 коэффициента усиления K_{OU} ..

а, б — без регулирования $K_{OU}=0$, $E_q = \text{const}$; в, з — регулирование при поддержании $E'_q = \text{const}$ ($K_{OU} = K'_{OU}$), при движении рабочей точки ρ по возрастающим характеристикам $E_q = \text{const}$; раскачивание при $c_3 \approx 0$; д — регулирование при поддержании $U_r \approx \text{const}$ ($K_{OU} = \infty$); е — раскачивание при аналогичном случае б движении ρ при P и δ меньших, чем в случае в; теоретический предел при $c_3 = 0$

явится колебательная неустойчивость (рис. 8.13, е), что сделает работу системы невозможной.

Приведенный анализ показывает, что практически регулятор пропорционального действия должен работать при таком коэффициенте усиления K'_{OU} , который *приблизительно отвечает передаваемой мощности при з. д. с.* $E'_q = \text{const}$, приложенной в схеме замещения генератора за сопротивлением Kx'_d , где $K > 1$ имеет значение, зависящее от конкретных условий (см. ниже).

Таким образом, генераторы, имеющие регулирование пропорционального действия, представляются в схеме замещения E'_q , приложенной за Kx_d (грубо $E'_q \approx E'$). Хотя это представление и является весьма приближенным, оно при правильном выборе K (см. § 8.5) дает погрешность, не превышающую 5—10% по предельной мощности.

§ 8.3. НЕРЕГУЛИРУЕМАЯ СИСТЕМА, РАССМОТРЕННАЯ БЕЗ УЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Частный случай, когда в системе предполагается отсутствие регулирования возбуждения и не учитываются переходные процессы, представляет интерес для выяснения влияния этих факторов на предел передаваемой мощности, тем более что рассмотренный ранее (см. гл. 4) способ площадей предполагал именно этот случай ($E = \text{const}$). Частный случай позволяет также выявить зависимость характера процесса от начального режима. Пусть система представлена схемой на рис. 8.14, а. Учтем демпферный момент упрощенно: введем в уравнение движения член, пропорциональный производной угла с постоянным коэффициентом P_d . В этой идеализации переходные процессы в электрической системе будут описываться одним нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$T_J p^2 \delta + P_d p \delta = P_T - P_{эл}. \quad (8.13)$$

Здесь $P_T = P_0 = P_m \sin \delta_0$ — мощность турбины, определяющая исходный установившийся режим электрической системы (P_0, δ_0) (рис. 8.14), статическая устойчивость которого подлежит проверке; $P_{эл} = P_m \sin \delta$ — электромагнитная мощность синхронного генератора, являющаяся нелинейной функцией одной переменной — угла δ .

Раскладывая $P_m \sin \delta$ в ряд Тейлора по малой величине $\Delta \delta$ в окрестности δ_0 (т. е. полагая $\delta = \delta_0 + \Delta \delta$) и оставляя только два (нулевой и линейный) члена разложения или, что то же самое, заменяя участок синусоиды в окрестности δ_0 касательной, получим [вместо (8.13)]

$$T_J p^2 \Delta \delta + P_d p \Delta \delta = P_m \sin \delta_0 - P_m \sin \delta_0 - (dP_{эл}/d\delta) \Delta \delta. \quad (8.14)$$

Введя обозначение* $c_1 = dP_{эл}/d\delta = (E_{q0}U/x_{dx}) \cos \delta_0$, получим линейризованное по первому приближению дифференциальное уравнение (8.13):

$$T_J p^2 \Delta \delta + P_d p \Delta \delta + c_1 \Delta \delta = 0 \quad (8.15)$$

* Величину c_1 иногда называют синхронизирующей мощностью и обозначают через S_{Eg} , где индекс E_g означает, что производная взята при $E_g = \text{const}$. Здесь не будет применяться это обозначение, так как через S обозначена полная мощность, а через s — скольжение.

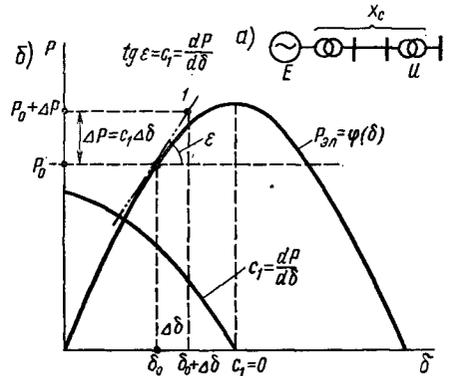


Рис. 8.14. Основные соотношения при малых колебаниях простейшей системы: а — схема; б — характеристика

Величина c_1 зависит от исходного режима (рис. 8.14) и становится равной нулю в режиме, соответствующем $P_m(\delta_0 = 90^\circ)$. Уравнение (8.14) имеет решение

$$\Delta\delta = A_1 e^{\rho_1 t} + A_2 e^{\rho_2 t} \quad (8.15a)$$

Характеристическое уравнение для (8.15)

$$T_J p^2 + P_d p + c_1 = 0 \quad (8.16)$$

имеет два корня:

$$p_{1,2} = \frac{-P_d \pm \sqrt{P_d^2 - 4T_J c_1}}{2T_J} = \pm \sqrt{-\left[\frac{c_1}{T_J} - \left(\frac{P_d}{2T_J}\right)^2\right]} + \frac{-P_d}{2T_J} = \pm j\gamma + \alpha, \quad (8.17)$$

где $\gamma = \sqrt{c_1/T_J - \alpha^2}$ — собственная частота колебаний ротора синхронной машины, $\alpha = -P_d/(2T_J)$ — декремент затухания.

При $c_1 > 0$ система всегда будет устойчива. При $c_1/T_J < \alpha^2$ оба корня будут действительные отрицательные и процесс будет иметь характер, изображенный на рис. 8.15, а. При $c_1/T_J > \alpha^2$ оба корня будут комплексными с отрицательными вещественными частями; характер процесса при этом показан на рис. 8.15, б. При $c_1 < 0$ соотношение между c_1/T_J и α не влияет на характер процесса. Один корень всегда будет действительным и положительным ($\sqrt{c_1/T_J + \alpha^2} + \alpha$), а другой — отрицательным ($-\sqrt{c_1/T_J + \alpha^2} + \alpha$). Протекание процесса соответствует рис. 8.15, в. При $c_1 = 0$ появляется один нулевой корень и один корень, равный $-P_d/T_J$. Наличие нулевого корня указывает на так называемый критический случай

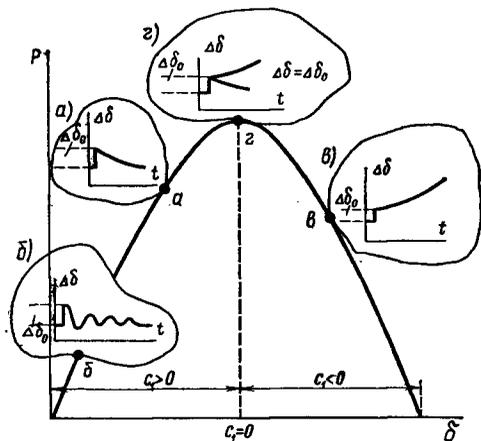


Рис. 8.15. Протекание процесса в простейшей системе $\Delta\delta = f(t)$ после отклонения на $\Delta\delta_0$:

а, б, в, з — характеристики $P = \Phi(\delta)$ в соответствующих точках

(рис. 8.15, з), когда для выяснения действительного поведения системы нельзя пользоваться линеаризованным по первому приближению уравнением (8.15) и нужно или провести дополнительные исследования с учетом уточняющих факторов*, или грубо считать, что у системы, подошедшей к границе устойчивости, после единичного толчка вероятно как нарушение устойчивости (при сколь угодно малом $c_1 < 0$), так и ее сохранение (при малом $c_1 > 0$). Однако практически система может получить такой толчок, который приведет к нарушению устойчивости.

Рассмотрим устойчивость без учета электромагнитных пе-

* Специальные исследования, указывающие неточность, которую внесла линеаризация, имеют смысл для систем более сложных, чем рассматриваемая.

реходных процессов в контурах ротора и без учета демпферного момента ($P_d = 0$). Этот частный случай, соответствующий исследованию простейшей системы как консервативной, приводит к характеристическому уравнению $T_J p^2 + c_1 = 0$, которое имеет два корня, определяющих решение упрощенного уравнения (8.15).

Характер движения зависит от знака c_1 . Если $c_1 > 0$, то два корня мнимые

$$p_{1,2} = \pm j \sqrt{c_1/T_J}$$

и всякое возмущение в системе будет приводить к незатухающим колебаниям с собственной частотой

$$\gamma = \sqrt{c_1/T_J}.$$

Если углы выражены в радианах, время t и постоянная инерция T_J — в секундах, мощности — в относительных единицах, то значения собственной частоты (рад/с) колебаний ротора синхронной машины вычисляются как

$$\gamma = \sqrt{c_1 2\pi f_0/T_J} \quad (8.18)$$

или в Гц

$$f = \gamma/(2\pi). \quad (8.19)$$

Значение периода свободных колебаний [с]

$$T = 2\pi/\gamma \text{ [рад/с]} = \{1/f \text{ [Гц]}\} \quad (8.20)$$

зависит от исходного режима системы и от параметров системы T_J , x_d , x_{d1} , E_{q0} , U . Так, если исходный режим и параметры системы определены значениями $\delta_0 = 60^\circ$, $E_{q0} = 1,2$, $U = 1$, $f_0 = 50$ Гц, $T_J = 10$ с, $x_{d1} = 1,2$, то

$$c_1 = 1,2 \cdot 1 \cdot 0,5/1,2 = 0,5; \quad \gamma = \sqrt{0,5 \cdot 314/10} = 3,96 \text{ рад/с}; \quad f = 3,96/(2 \cdot 3,14) = 0,63 \text{ Гц}; \\ T = 1/0,63 = 1,59 \text{ с}.$$

При $c_1 < 0$ оба корня характеристического уравнения (8.16) действительные и один из них всегда положительный; при всяком малом возмущении в системе будет происходить аperiodическое нарастание угла (рис. 8.15, в).

Угол $\delta_0 = 90^\circ$ является пределом статической устойчивости — границей, разделяющей два вида движения: колебательное при $\delta_0 < 90^\circ$ и аperiodическое, нарастающее при $\delta_0 > 90^\circ$. При $\delta_0 > 90^\circ$ в системе происходит аperiodическое нарушение статической устойчивости (иногда такое нарушение устойчивости называют сползанием).

Область, где $c_1 > 0$, считают практически устойчивой, предполагая, что неизбежное, хотя и не учтенное в упрощенном уравнении, демпфирование превратит незатухающие колебания в затухающие. Условие $c_1 > 0$ отвечает полученному ранее практическому критерию $dP/d\delta > 0$.

§ 8.4. САМОРАСКАЧИВАНИЕ И САМОВОЗБУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование устойчивости, однако, еще не было достаточно полным, так как в нем не рассматривались нарушения устойчивости, имеющие специфический характер самораскачивания и самовозбуждения. Такие наруше-

ния могут наступать при наличии в сети, связывающей исследуемую станцию (эквивалентный генератор) с системой (в частности, с шинами бесконечной мощности), или заметного активного сопротивления ($r/x > 0,05$), или значительной емкости ($-T'_d$). В первом случае возникают установившиеся или нарастающие колебания — *самораскачивание*, во втором происходят самопроизвольный рост тока и увеличение напряжения генераторов, потребляющих емкость ($-Q$) реактивную мощность, — *самовозбуждение**. Анализ происходящих явлений можно было бы провести исходя из уравнения (8.7). Но это уравнение даже после упрощения (8.10) будет заменять физическую картину изучаемых явлений, отрицая влияние регулирования и процессов в возбuditеле. Поэтому пренебрежем ими, приняв в (8.7) $K_{OU} = 0$ и $T'_e = 0$, но учтем демпфирование ($P_d \neq 0$) и переходные процессы ($T'_d \neq 0$). Тогда получим следующее уравнение третьего порядка:

$$T_J T'_d p^3 + (T_J + P_d T'_d) p^2 + (c_2 T'_d + P_d) p + c_1 = 0 \quad (8.21)$$

или

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0.$$

Самораскачивание. Если $T'_d > 0$, то при $P_d < 0$ и условии, что $|-P_d| > T_J/T'_d$, (что обычно не удовлетворяется) и $|-P_d| > c_2 T'_d$, могут появиться отрицательные коэффициенты (a_1 или a_2), что укажет на нарушение устойчивости в связи с отрицательным демпфированием, которое в данном случае предположительно не связано с активным сопротивлением в цепи статора и обусловлено эффектом неправильного регулирования. Однако более вероятно колебательное нарушение устойчивости — самораскачивание (связанное с r в цепи статора), возможность которого выявляется из анализа определителя Гурвица. Представим его в виде

$$\Delta_{\text{Гур}} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_J + P_d T'_d & c_1 \\ T_J T'_d & c_2 T'_d + P_d \end{vmatrix},$$

или

$$\Delta_{\text{Гур}} = (T_J + P_d T'_d)(c_2 T'_d + P_d) - c_1 T_J T'_d \geq 0. \quad (8.22)$$

Очевидно, что условие (8.22) может нарушаться в двух случаях:

- 1) при отрицательном P_d ;
- 2) при заметном активном сопротивлении в цепи статора, что в конечном счете будет равносильно отрицательному P_d .

В первом случае, учитывая, что $c_2 \geq c_1$, перепишем (8.22) в виде

$$\Delta_{\text{Гур}} = c_2 \left(1 + \frac{P_d}{c_2 T'_d} \right) \left(1 + P_d \frac{T'_d}{T_J} \right) - c_1 = 0. \quad (8.23)$$

Получим условия нарушения устойчивости: $|-P_d| > c_2 T'_d$ и $|-P_d| > T_J/T'_d$.

* Самовозбуждение может происходить при подключении генератора к ненагруженной (отключенной от системы) линии электропередачи.

Во втором случае, чтобы получить большую ясность в физике процессов, примем $P_d = 0$, тогда (8.23) примет вид $c_2 - c_1 = 0$, но согласно (2.30) при $r_{сг} = 0$ значение $c_2 - c_1 = \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}} U^2 \sin^2 \delta$, т. е. в любых режимах, кроме $\delta = 0$, значение $c_2 - c_1 > 0$. Наличие активного сопротивления в цепи статора резко меняет соотношение между c_2 и c_1 . Соответствующие зависимости, построенные на рис. 8.16, на основании (2.28) показывают, что в этом случае в диапазоне от

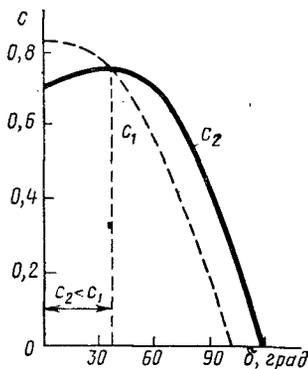


Рис. 8.16. Примерные зависимости $c_1 = f(\delta)$, $c_2 = \varphi(\delta)$ при учете активного сопротивления цепи статора (см. рис. 8.4)

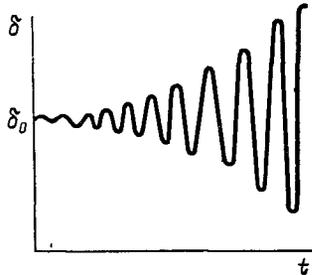


Рис. 8.17. Характер процесса в области $c_2 < c_1$ (рис. 8.16)

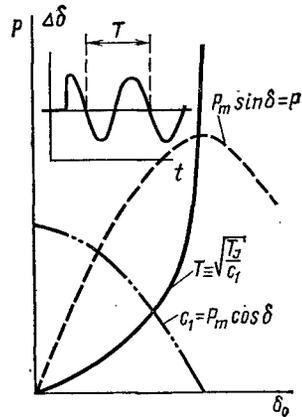


Рис. 8.18. Изменение периода колебаний в зависимости от начального режима (δ_0) системы

0 до $20-35^\circ$ значение $c_2 < c_1$ и условие (8.22) нарушается, указывая на возможность самораскачивания, процесс которого теоретически выглядит так, как это показано на рис. 8.17.

Простейшая трактовка самораскачивания. Не учитывая переходных электромагнитных процессов и не рассматривая причины появления отрицательного демпферного момента, который, изменив знак, становится отрицательным, дополнительно ускоряющим генератор, запишем уравнение переходного процесса в следующем виде:

$$T_J p^2 \Delta \delta - P_{d3} p \Delta \delta + c_1 \Delta \delta = 0.$$

При этом корни соответствующего характеристического уравнения (рис. 8.18)

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{-(c_1/T_J - \alpha^2)} + \alpha, \quad (8.24)$$

где $\alpha = P_{d3}/(2T_J)$ — декремент затухания.

При $c_1 > 0$ и $c_1/T_J > \alpha^2$ угол будет нарастать колебательно (рис. 8.19, а) на участке 1-2 характеристики $P = \varphi(\delta)$. При $c_1/T_J < \alpha^2$ (точка 2) колебания переходят в аperiodическое нарастание (рис. 8.19, б). Далее на участке 3-4 при $c_1 < 0$ происходит аperiodическое увеличение угла (рис. 8.19, в).

Процесс проходит так же, как и при отсутствии демпфирования (см. рис. 8.5, в), но нарастание угла происходит медленнее.

Физика самораскачивания. Физические процессы при самораскачивании были рассмотрены на основе способа площадей. Напомним, что самораскачивание возникает тогда, когда вследствие тех или иных причин (большого активного сопротивления в цепи, неправильного выбора параметров автоматических регуляторов скорости или регуляторов возбуждения, прямо или косвенно реагирующих на изменение скорости) в системе появляется дополнительный, ускоряющий ротор вращающий момент. Этот момент может быть обусловлен поступлением добавочной энергии от первичного двигателя. В ряде случаев такой дополнительный момент может появиться за счет запасенного некоторого значения электромагнитной энергии, освобождающейся во время переходного процесса.

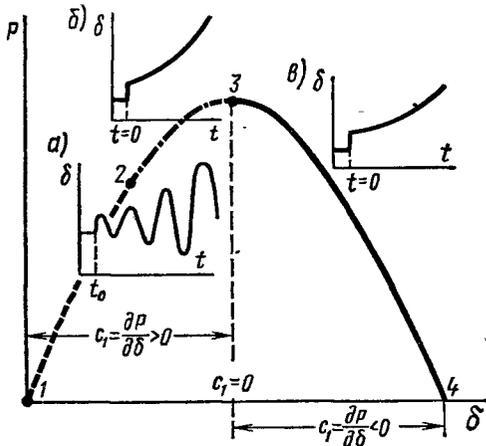


Рис. 8.19. Неустойчивость системы:

- а — процесс на участке 1-2 при $c_T > 0$, $c_1/T_J > a^2$;
- б — процесс на участке 2-3 при $c_T > 0$, $c_1/T_J < a^2$;
- в — процесс на участке 3-4 при $c_T < 0$, $c_1/T_J \cong a^2$

заметно проявляется при малых нагрузках и большом возбуждении генераторов и при заметном активном сопротивлении в цепи статора, которое тем больше, чем меньше мощность генератора.

Самовозбуждение. Если $T'_d < 0$, то a_0 в (8.21) станет отрицательным, что укажет на нарушение устойчивости. Если $|-T'_d| > T_J/P_d$ и $|-T'_d| > P_d/c_2$, то a_1 и a_0 будут также отрицательными, что, однако, при $a_0 < 0$ не существенно, и, следовательно, величиной P_d при рассмотрении в первом приближении явления самовозбуждения можно пренебречь.

Определитель Гурвица (8.21) не дает новых соотношений, а при $P_d = 0$ условие $c_2 - c_1 \geq 0$ будет всегда соблюдаться*. Следовательно, для нарушения статической устойчивости в форме самовозбуждения необходимо и достаточно выполнения условия

$$T'_d < 0.$$

Величина T'_d в общем случае, как известно [4], определяется соотношением

$$T'_d = \frac{(x'_d - x_c)(x_q - x_c) + r^2}{(x_d - x_c)(x_q - x_c) + r^2} T_{d0}. \quad (8.25)$$

* Имеется в виду случай, когда активное сопротивление статора мало.

Здесь все реактивные сопротивления и активное — суммарные сопротивления всей цепи. Величина T'_d будет отрицательной, если числитель или знаменатель (не одновременно) дроби, стоящей сомножителем [... T_{d0} в (8.25)], будет отрицателен.

Запишем предельные условия, при которых появятся отрицательные значения, для числителя и знаменателя соответственно:

$$(x'_d - x_c)(x_q - x_c) + r^2 = \left(x_c - \frac{x_q + x'_d}{2}\right)^2 + r^2 - \left(\frac{x_q - x'_d}{2}\right)^2 = 0; \quad (8.26)$$

$$\left(x_c - \frac{x_d + x_q}{2}\right)^2 + r^2 - \left(\frac{x_d - x_q}{2}\right)^2 = 0; \quad (8.27)$$

Уравнение окружности представим в виде

$$(\xi - \xi_0)^2 + y^2 = \rho^2,$$

откуда видно, что уравнение (8.26) представляется в осях координат x_c (аналог ξ) и r (аналог y) полуокружностью, проведенной радиусом $\rho_{II} = (x_q - x'_d)/2$, а соотношение (8.27) — радиусом $\rho_I = (x_d - x_q)/2$.

На рис. 8.20, а показаны граничные значения и зоны I, II изменения параметров, при которых значение T'_d может становиться отрицательным и, следовательно, самовозбуждение возможно. Физика процесса самовозбуждения объясняется в основном тем, что емкостный ток подмагничивает цепи возбуждения генератора, что приводит, в свою очередь, к дальнейшему увеличению тока статора и т. д.

Самовозбуждение может возникать при синхронной скорости ротора без изменений угла, т. е. при $\Delta\delta = 0$. В самом деле, предположив, что в уравнении (8.1) величина $\gamma(p) = 0$, $\Delta\delta = 0$, будем иметь для анализа вместо (8.1) и (8.3а), (8.4а), (8.5а) только одно уравнение

$$\Delta E_q + T_{d0} p \Delta E'_q = 0,$$

но так как в этом случае вследствие отрицательности x_c

$$x_{d\Sigma} = x_d - x_c; \quad x'_{d\Sigma} = x'_d - x_c,$$

то, следовательно,

$$\Delta E'_q = \frac{x'_d - x_c}{x_d - x_c} \Delta E_q, \quad T_{d0} \frac{x'_d - x_c}{x_d - x_c} = T'_d$$

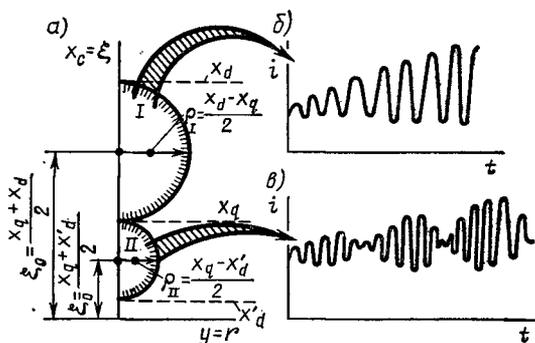


Рис. 8.20. Кривые самовозбуждения в осях x_c , i : а — зоны самовозбуждения: I — зона синхронного самовозбуждения; II — зона асинхронного самовозбуждения; б — самовозбуждение в зоне I (синхронное); в — самовозбуждение в зоне II (асинхронное)

и исходное уравнение будет иметь вид

$$\Delta E_q + T'_d p \Delta E_q = 0.$$

Решение такого уравнения известно:

$$\Delta E_q = \Delta E_{q0} e^{-t/T'_d}.$$

Если постоянная времени T'_d отрицательна, то

$$\Delta E_q = \Delta E_{q0} e^{t/|T'_d|}$$

а, очевидно, ток должен экспоненциально нарастать:

$$\Delta I_a = \Delta I_{a0} e^{t/|T'_{d1}|}.$$

В действительности нарастание тока будет ограничено насыщением магнитных цепей генераторов и трансформаторов. Кроме того, при анализе характера самовозбуждения необходимо было бы учесть особенности переходного электромагнитного процесса при разных соотношениях x_d , x_q , x'_d . Эти особенности приведут, в частности, к тому, что в зоне I ток будет нарастать монотонно (синхронное самовозбуждение), а в зоне II это нарастание будет сопровождаться биениями (асинхронное самовозбуждение). На рис. 8.20, б, в показан примерный характер процесса в зонах I и II (см. подробно [17]).

§ 8.5. УПРОЩЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ, ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ МЕТОДА МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рассмотренный метод малых колебаний является универсальным методом исследования статической устойчивости. Метод применим как для простых, так и для сложных систем и позволяет учесть все переходные процессы и действие любых устройств автоматического регулирования.

Недостатками метода малых колебаний являются сложность и трудоемкость расчетов. Последний недостаток в значительной мере снимается при использовании вычислительных машин непрерывного действия или цифровых машин дискретного счета. Однако вопрос о разумных упрощениях при проведении практических расчетов и эксплуатационной оценке устойчивости системы остается существенным.

В свете этого представляется целесообразным отыскать такие простейшие схемы замещения, которые позволили бы регулируемый генератор представлять в расчетах переходных процессов так же, как и нерегулируемый (x_d , x_q , x'_d). Это оказывается возможным, если считать, что настройка системы возбуждения генератора идеальна в том смысле, что самораскачивание полностью устранено и нарушение устойчивости может быть только апериодическим. Наиболее благоприятные условия устойчивости любая электрическая система при поддержании заданного напряжения будет иметь тогда, когда самораскачивание будет каким-то путем полностью устранено и предел мощности совпадет с пределом устойчивости. Нарушение устойчивости в этом случае будет носить

апериодический характер и в зависимости от степени поддержания напряжения определяться по одному из условий: $c_1 = 0$; $c_2 = 0$; $c_3 = 0$ (табл. 8.3).

В самом деле, характеристическое уравнение (8.10) простейшей регулируемой электрической системы имеет вид (при $T_e = 0$)

$$T_J T_d' p^3 + (T_J + T_J K_{0U} b_1/b_3) p^2 + c_2 T_d' p + c_1 + c_3 K_{0U} b_1/b_3 = 0.$$

Предположим, что коэффициент усиления K_{0U} очень велик ($K_{0U} \rightarrow \infty$) и, следовательно, $U_p = \text{const}$, что возможно при исключении самораскачивания. Тогда уравнение системы после деления всех членов на значение K_{0U} , которое стремится к бесконечности, запишется как

$$p^2 T_J + c_3 = 0.$$

Корни этого уравнения

$$p_{1,2} = \sqrt{-c_3/T_J}.$$

Условием устойчивости будет

$$c_3 > 0 \text{ или } \partial P_{U_p}/\partial \delta > 0.$$

Если постоянная времени T_d' очень велика ($T_d' \rightarrow \infty$) и в силу этого э. д. с. $E_q' = \text{const}$, то уравнение системы примет вид

$$p(T_J p^2 + c_2) = 0, \text{ где } p_{1,2} = \sqrt{-c_2/T_J}.$$

Условием устойчивости будет

$$c_2 > 0 \text{ или } \partial P_{E_q'}/\partial \delta > 0.$$

Если возбуждение не регулируется ($K_{0U} = 0$) и задано от такого мощного источника, что ток возбуждения всегда постоянен и в обмотках генератора не может происходить никаких переходных процессов, способных стимулировать изменение тока возбуждения, то (принимая $E_q = \text{const}$), следует предположить $T_{d0} = 0$, $T_d' = 0$. В этом случае уравнение системы представим в виде

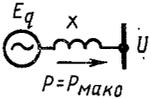
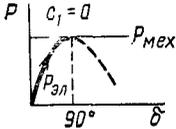
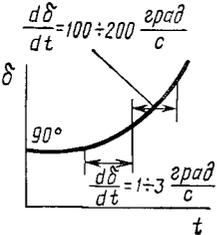
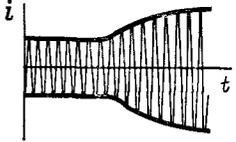
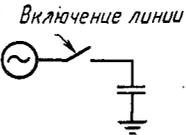
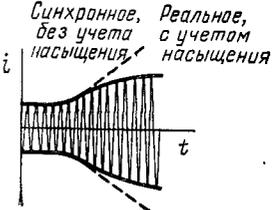
$$T_J p^2 + c_1 = 0, \quad p_{1,2} = \sqrt{-c_1/T_J}.$$

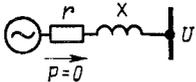
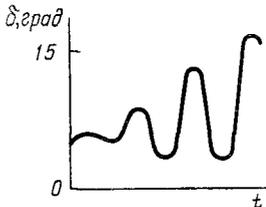
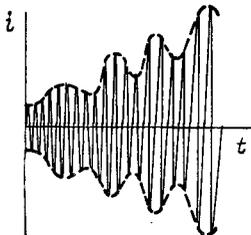
Условием устойчивости при этом будет

$$c_1 > 0 \text{ или } \partial P_{E_q}/\partial \delta > 0.$$

Из приведенного анализа видно, что, *сняв каким-либо образом опасность самораскачивания, можно получить методически одинаковый подход к определению мощности, при которой произойдет нарушение устойчивости. Нарушение это всегда будет а п е р и о д и ч е с к и м, а мощность будет тем большей, чем лучше поддерживается напряжение. Здесь не учитывается то обстоятельство, что в действительности стремление обеспечить постоянство напряжения за счет увеличения коэффициента усиления (уменьшения статизма) приводит к возможности самораскачивания, которое, если не принято специальных мер, возникает до того, как будет достигнут предел по условию апериодической устойчивости.*

Если считать, что нарушение устойчивости из-за самораскачивания исклю-

Название	Характерная схема	Опасный исходный режим	Характер протекания процесса	
			изменение угла δ	изменение тока статора i
Текущая режими, или сползание, — нарушение статистической устойчивости (апериодическое)		<p>Большая нагрузка генератора и подход к предельным значениям мощности и угла</p> 		
Самовозбуждение	<p>а) Включение линии</p>  <p>б) Увеличение компенсации</p> 	<p>Большая величина емкостной последовательной компенсации реактивного сопротивления цепи статора (при любой нагрузке) или подключение к линии ненагруженных генераторов (режим холостого хода). В случаях а и б при $x_q < x_C < x_d$ синхронное, при $x_d < x_C < x_q$ асинхронное самовозбуждение</p>	<p>Нехарактерно (режим изолированной машины (а) и изменение реактивной нагрузки с колебаниями угла за счет потерь)</p>	<p>Синхронное, Реальное, без учета насыщения, с учетом насыщения</p>  <p>Асинхронное</p> 

Название	Характерная схема	Опасный исходный режим	Характер протекания процесса	
			изменение угла δ	изменение тока статора
Самораскачивание		<p>Работа при холостом ходе (малых нагрузках) на цепь, обладающую большим активным сопротивлением. Самораскачивание обычно интенсивнее в явнополюсных машинах и при большом возбуждении</p>		

чено, то в этом случае для любой (регулируемой и нерегулируемой) системы можно принять постоянство некоторой э. д. с. E_x , приложенной за сопротивлением $\Delta x = K_1 K_2 x_a$, и на основе этого допущения вести расчеты по определению пределов мощности и устойчивости. Для нерегулируемой системы коэффициент K_1 , отражающий способ регулирования, равен единице, при АРВ п. д. коэффициент $K_1 = (x'_a/x_a) K_3$, где $K_3 = 0,8 \div 0,95$ при длинных линиях и $K_3 = 1,05 \div 1,2$ при коротких. При сильном регулировании $K_1 \approx 0$, т. е. можно исходить из постоянства напряжения на зажимах генератора или в начале линии. В случае регулирования с зоной нечувствительности при большом коэффициенте усиления предел будет определяться по величине $U_T = \text{const}$, но при условии $c_1 = 0$. Коэффициент K_2 , отражающий влияние явноплюсности и насыщения, может быть принят равным 0,85—0,95 в зависимости от типа машины и режима, в котором она работает.

Таким образом, на основе сделанных (достаточно грубых) допущений об отсутствии самораскачивания можно утверждать, что анализ переходных процессов в любой электрической системе, имеющей машины при любом регулируемом возбуждении, может быть проведен так же, как и для нерегулируемой системы. При этом генераторы вводятся в схему замещения некоторыми фиктивными (обычно уменьшенными) сопротивлениями и соответствующими э. д. с., приложенными за этими сопротивлениями. Такой подход в дальнейшем будет применяться и при расчете устойчивости сложных систем, где будет предполагаться, что все генераторы могут быть представлены постоянными сопротивлениями и приложенными за этими сопротивлениями э. д. с.

§ 8.6. ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ. КРИТЕРИИ МЕТОДА МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ

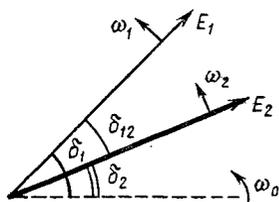


Рис. 8.21. Векторная диаграмма э. д. с. двух станций конечной мощности

Условия устойчивости системы «две станции — общая нагрузка». Этой схемой начнем рассмотрение сложных систем, не имеющих в своем составе ШБМ и, следовательно, фиксированной частоты. На диаграмме (рис. 8.21) изображены э. д. с. E каждой из станций и движение по отношению к вектору, вращающемуся с постоянной скоростью ω_0 . Уравнения движения при малых отклонениях от синхронной скорости запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} p(\delta_1 - \delta_2) &= p\delta_{12} \text{ или } p\Delta\delta_{12} - \Delta\omega_1 + \Delta\omega_2 = 0; \\ p\omega_1 &= -\frac{\Delta M_1}{T_{J1}} \approx -\frac{\Delta P_1}{T_{J1}} \text{ или } T_{J1} p\Delta\omega_1 = -\Delta M_1; \\ p\omega_2 &= -\frac{\Delta M_2}{T_{J2}} \approx -\frac{\Delta P_2}{T_{J2}} \text{ или } T_{J2} p\Delta\omega_2 = -\Delta M_2. \end{aligned} \right\} (8.28)$$

В уравнениях (8.28) принципиально более правильно выражать ускорения

через ΔM . Однако практически в силу малости изменений скоростей замена ΔM на ΔP не приводит к сколь-нибудь существенной погрешности*.

Примем момент каждой станции $M = \varphi(\delta_{12}, \omega_1, \omega_2)$, тогда нет необходимости отдельно записывать уравнения отклонений режима нагрузки и достаточно ввести в (8.28) значения

$$\Delta M_1 = \frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial M_1}{\partial \omega_1} \Delta \omega_1 + \frac{\partial M_1}{\partial \omega_2} \Delta \omega_2 = c'_1 \Delta \delta_{12} + d_{11} \Delta \omega_1 + d_{12} \Delta \omega_2; \quad (8.29)$$

$$\Delta M_2 = \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial M_2}{\partial \omega_1} \Delta \omega_1 + \frac{\partial M_2}{\partial \omega_2} \Delta \omega_2 = c''_1 \Delta \delta_{12} + d_{21} \Delta \omega_1 + d_{22} \Delta \omega_2. \quad (8.30)$$

Любое малое изменение параметра режима находится из (8.28), (8.29), (8.30) в виде

$$\Delta \delta_{12} = 0/D(p); \quad \Delta \omega_1 = 0/D(p); \quad \Delta \omega_2 = 0/D(p),$$

где

$$D(p) = \begin{vmatrix} p & -1 & 1 \\ c'_1 & T_{J1}p + d_{11} & d_{12} \\ c''_1 & d_{21} & T_{J2}p + d_{22} \end{vmatrix}. \quad (8.31)$$

Раскрывая определитель $D(p)$ и приравнявая его нулю, получим характеристическое уравнение

$$p^3 + a_1 p^2 + (a_{12} + a'_2) p + a_3 = 0. \quad (8.32)$$

Здесь

$$a_1 = \frac{\partial M_1}{\partial \omega_1} \frac{1}{T_{J1}} + \frac{\partial M_2}{\partial \omega_2} \frac{1}{T_{J2}};$$

$$a_{12} = \frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} \frac{1}{T_{J1}} - \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} \frac{1}{T_{J2}};$$

$$a'_2 = \left(\frac{\partial M_1}{\partial \omega_1} \frac{\partial M_2}{\partial \omega_2} - \frac{\partial M_1}{\partial \omega_2} \frac{\partial M_2}{\partial \omega_1} \right) \frac{1}{T_{J1} T_{J2}};$$

$$a_3 = \left[\frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial M_2}{\partial \omega_1} + \frac{\partial M_2}{\partial \omega_2} \right) - \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial M_1}{\partial \omega_1} + \frac{\partial M_1}{\partial \omega_2} \right) \right] \frac{1}{T_{J1} T_{J2}}.$$

Характеристическое уравнение (8.32) дает возможность, применяя метод Гурвица, установить условия устойчивости. Однако из-за сложной структуры коэф-

* Необходимо учесть, что с изменением угловой скорости генератора изменяются значения э. д. с., частота ее и обусловленный ею ток, изменяются также вращающие моменты и мощности турбин синхронных машин. С изменением частоты изменяются все реактивные сопротивления системы, в том числе и сопротивления нагрузок, а следовательно, и их мощности, меняется режим асинхронных двигателей, хотя в отношении их обычно предполагают, что вследствие малого значения постоянных инерций угловая скорость всех двигателей следует за изменениями скорости генераторов.

Таким образом, при учете изменения скорости генераторов необходимо было бы учесть большое число связанных процессов. Однако в большинстве случаев ограничиваются учетом только тех процессов, которые в данных условиях практически наиболее существенны.

фициентов лучше это делать для частных случаев применительно к конкретным числовым значениям.

Заметим, что прохождение через нуль свободного члена a_3 , зависящего от частоты каждой станции, не зависит от их инерций (постоянные T_J сокращаются при $a_3 = 0$).

Практические критерии. Рассмотрение определителя (8.31) позволяет сделать важные выводы. Если вместо устойчивости медленных движений при малых колебаниях вновь (см. гл. 4) выявить устойчивость установившегося режима, то, положив в (8.31) $p = 0$, получим для установившегося режима

$$D_{y.p} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ c'_1 & d_{11} & d_{12} \\ c'_1 & d_{21} & d_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ \frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial M_1}{\partial \omega_1} & \frac{\partial M_1}{\partial \omega_2} \\ \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} & \frac{\partial M_2}{\partial \omega_1} & \frac{\partial M_2}{\partial \omega_2} \end{vmatrix} = \\ = \frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial M_2}{\partial \omega_1} + \frac{\partial M_2}{\partial \omega_2} \right) - \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial M_1}{\partial \omega_1} + \frac{\partial M_1}{\partial \omega_2} \right). \quad (8.33)$$

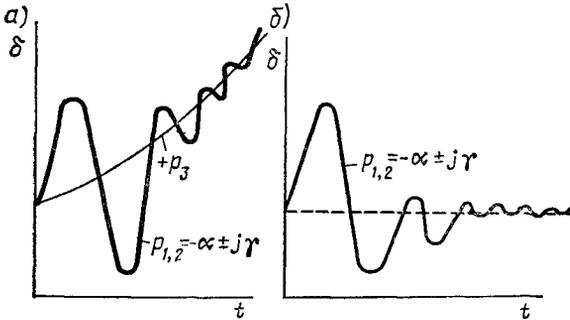


Рис. 8.22. Решение характеристического уравнения (8.32):

а — при учете трех корней; при отражении изменений частоты ($+p_3$) системы; б — при учете только комплексных корней; при пренебрежении изменением частоты

Выражение (8.33) определяет те же условия, которые были получены в гл. 4 [см. (4.8а), (4.8б)] при нахождении устойчивости нормального режима* (его текучести или сползания); условия эти были названы *практическими критериями*, но, кроме того, уравнение (8.33) является свободным членом a_3 характеристического уравнения малых колебаний (8.32). Это означает, что свободный член a_3 и любой практический критерий, поскольку он получен на основе равенства $D_{y.p} = a_3$, пройдут через нуль одновременно; следовательно,

все практические критерии при равенстве их нулю определяют только границу аперодической устойчивости и в этом смысле любой из них равносильен условию $a_n = 0^{**}$.

Влияние изменений скорости. Уравнение (8.32), имеющее третий порядок, учитывает изменение скорости каждого эквивалентного генератора. Это уравнение имеет три корня, один из которых (p_3) характеризует общее аперодическое движение системы, а два других обычно бывают комплексными и указывают на

* При этом в силу малости отклонений ω можно принять $P = M$.

** При выводе этого положения была использована упрощенная система уравнений (8.28), отвечающая уравнениям (4.7). Такой же результат, но только после более громоздких преобразований, мог бы быть получен на основании уравнений (4.1).

наличие колебательных затухающих ($-\alpha \pm j\gamma$) или нарастающих ($+\alpha \pm j\gamma$) составляющих. Характер процесса показан на рис. 8.22, а. Если определяется только устойчивость станций 1, 2, а не абсолютная устойчивость каждой станции, то их общим движением (корень p_3) можно пренебречь и рассмотреть только движение (рис. 8.22, б) одной станции относительно другой. При этом задачу можно упростить, приближенно оперируя только с относительной скоростью $\rho \Delta \delta_{12} = \Delta \omega$. Тогда уравнение третьей степени перейдет в квадратное, так как $\Delta \omega = d\delta/dt = \partial \omega_1 = \partial \omega_2$. С учетом этого в (8.32)

$$a_3 = \frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} dt - \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} dt \right) - \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} \left(\frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} dt - \frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} dt \right) = 0;$$

$$a'_2 = 0; \quad a_2 = \alpha_{12}.$$

Уравнение (8.32) при этом примет вид $p^3 + a_1 p^2 + \alpha_{12} p = 0$. Сокращая далее p , что означает потерю корня, определявшего общее движение, получим характеристическое уравнение только относительного движения системы:

$$p^2 + p a_1 + \alpha_{12} = 0,$$

где

$$\alpha_{12} = \frac{\partial M_1}{\partial \delta_{12}} \frac{1}{T_{J1}} - \frac{\partial M_2}{\partial \delta_{12}} \frac{1}{T_{J2}}.$$

Прохождение α_{12} через ноль определяет нарушение апериодической устойчивости. При этом следует обратить внимание на то, что предел устойчивости оказался зависящим от постоянных инерции, что обусловлено рассмотрением относительного движения вместо абсолютного (см. § 8.7).

§ 8.7. УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРЕДСТАВЛЕНИИ НАГРУЗОК ПОСТОЯННЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

Задача об устойчивости системы «две станции — нагрузка» решалась ранее с учетом изменений частоты на каждом генераторе. При этом косвенно учитывался эффект демпфирования. Исследуем теперь чисто позиционную систему, все режимы которой зависят только от положения («позиций») ее элементов. Рассмотрим задачу применительно к системе, изображенной на рис. 8.23. В данной системе станция 1 передает мощность в приемную систему. Предположим, что при увеличении мощности станции 1 мощность станции 2 уменьшается. Запишем соотношения мощностей аналитически:

$$P_1 = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}); \quad (8.34)$$

$$P_2 = E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} - E_1 E_2 y_{12} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}) \quad (8.35)$$

и представим их графически (рис. 8.24).

В системах, аналогичных изображенной на рис. 8.23, дополнительный угол взаимного сопротивления α_{12} обычно отрицателен. В уравнении (8.34) значение α_{12} отрицательно, а следовательно, максимум характеристики P_1 наступает при угле ($90^\circ - |\alpha_{12}|$), минимум характеристики P_2 наступает при угле ($90^\circ + |\alpha_{12}|$). Таким образом, расхождение между экстремальными значениями характеристик

составляет величину $2\alpha_{12}$. На эту же величину расходятся и значения углов, при которых синхронизирующие мощности $\partial P_1/\partial\delta_{12}$ и $\partial P_2/\partial\delta_{12}$ равны нулю.

Пользуясь упрощенными уравнениями и полагая вращающие моменты численно равными мощностям, для малых отклонений можно записать

$$T_{J1} \frac{d^2\delta_1}{dt^2} + \frac{dP_1}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} = 0; \quad T_{J2} \frac{d^2\delta_2}{dt^2} + \frac{dP_2}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} = 0. \quad (8.36)$$

Вычитая из первого уравнения (8.36) второе, получим

$$d^2\Delta\delta_{12}/dt^2 + \alpha_{12}\Delta\delta_{12} = 0.$$

Здесь

$$\Delta\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2; \quad \alpha_{12} = \frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_2}{d\delta_{12}}.$$

Характеристическое уравнение имеет вид

$$p^2 + \alpha_{12} = 0.$$

Из рис. 8.24 следует, что характеристика относительного ускорения $\alpha_{12} = f(\delta_{12})$ будет находиться между характеристиками синхронизирующих мощностей. Точка на оси δ_{12} где относительное ускорение проходит через нуль, будет, очевидно, сдвинута при $|\alpha_{12}| < 0$ по отношению к максимуму кривой $P_1 = f\delta_{12}$ в сторону больших углов.

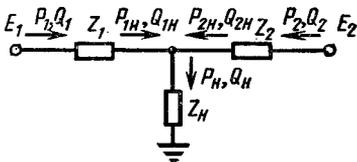


Рис. 8.23. Схема системы

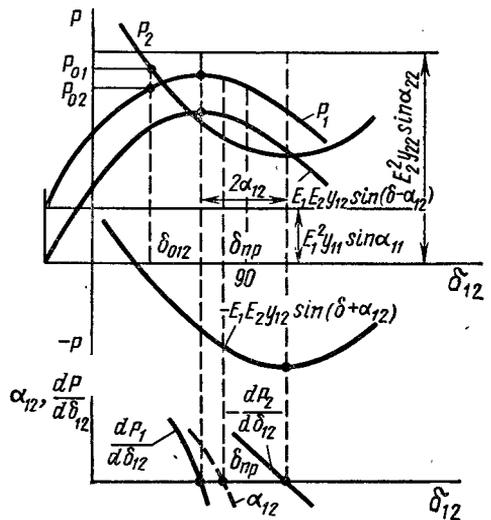


Рис. 8.24. Характеристики мощности $P = \varphi(\delta_{12})$, относительного ускорения $\alpha_{12} = f(\delta_{12})$ и синхронизирующих мощностей $\partial P/\partial\delta_{12} = f(\delta_{12})$

Значение предельного угла находится из условия

$$\delta_{12 \text{ пр}} = \text{arctg} \left(-\frac{\cos \alpha_{12}}{\sin \alpha_{12}} \frac{1+m}{1-m} \right), \quad (8.37)$$

где $m = T_{J1}/T_{J2}$.

Таким образом, предельный режим при позиционной идеализации зависит от отношения $r/x = \sin \alpha_{12}/\cos \alpha_{12} = \text{tg} \alpha_{12}$ и соотношения постоянных инерции m .

На рис. 8.25 показано изменение предела статической устойчивости $\delta_{12} = f(m, r/x)$.

Следовательно, предел устойчивости системы, состоящей из двух станций, лежит при больших углах, чем предел мощности станции, работающей на шинах бесконечной мощности. Выявленное обстоятельство могло бы иметь практическое значение, указывая на то, что система, состоящая из двух станций, может работать у предела мощности без потери устойчивости при малых толчках. Но обычно углы α_{12} невелики* и расхождение по углу пределов мощности и устойчивости

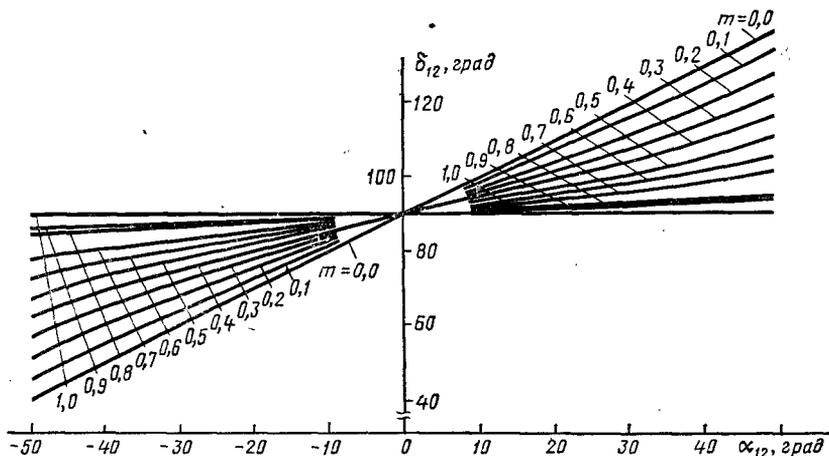


Рис. 8.25. Предельный угол δ_{12} аperiodически устойчивых режимов позиционной системы в зависимости от угла α_{12}

редко составляет угол больше $5-15^\circ$, а наличие ряда не учтенных в анализе существенных факторов заставляет осторожно относиться к выводам, касающимся возможности работы у предела мощности.

Заметим, что при рассмотрении относительного движения станций возникшие колебания будут незатухающими, если только не учитывать то обстоятельство, что $z_H = \sqrt{R_H^2 + (\omega x_H)^2}$ будет зависеть от изменений $\omega = \omega_0 + d\delta/dt$.

Расчет сложной позиционной системы методом малых отклонений (колебаний). Приведенное в § 8.5 рассмотрение системы как консервативной позиционной является идеализацией, при которой любые возмущения режима приводят к незатухающим колебаниям. В этих системах автоматическое регулирование учитывается идеализированно: генератор замещается неизменной э. д. с. E_x , приложенной за сопротивлением Δx , меньшим x_d или x_q . Регулирование скорости первичных двигателей при этом отражается тем, что вращающие моменты (мощности) и частота в установившемся режиме принимаются неизменными независимо от наличия шин бесконечной мощности.

Рассмотрение статической устойчивости в отличие от динамической и резуль-

* Относится к магистральным передачам. При передачах с промежуточными отборками и слабых связях углы α_{12} много больше и соответственно заметнее упомянутый эффект.

тирующей* предполагает определение *условий возникновения относительного движения роторов генераторов системы и выявления его характера только в начальной стадии движения машин* (возможность возникновения монотонно или колебательно развивающегося выпадения их из синхронизма). Подробного анализа дальнейшего протекания процесса при этом не производится, хотя на основе методов анализа статической устойчивости в некоторых случаях могло бы выявиться и протекание процесса во времени.

При таких допущениях обычно выявляется характер изменения электрического режима: возможность появления монотонно развивающегося снижения напряжения — так называемой лавины напряжения (см. гл. 11), монотонно или колебательно развивающегося самовозбуждения или колебательно развивающегося самораскачивания, переходящего иногда в устойчивые автоколебания.

§ 8.8. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Одна из главных задач анализа — выбор стабилизирующих параметров АРВ с. д., обеспечивающих статическую устойчивость электрической системы при задании следующих величин: а) параметров системы; б) ее режимов и диапазонов их изменения; в) точности поддержания напряжения (что обеспечивается предварительным выбором коэффициентов усиления по отклонению режимных параметров). Эту задачу можно решать методом, примененным в § 8.2, или методом *D*-разбиения по двум параметрам, т. е. построением серии областей статической устойчивости в координатах коэффициентов усиления по двум производным.

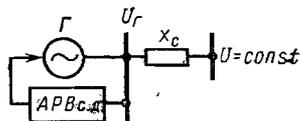


Рис. 8.26. Упрощенная схема системы при рассмотрении АРВ с. д.

В первом случае систему линеаризованных уравнений простой системы (рис. 8.26) при установке на генераторах станции АРВ с. д. запишем следующим образом. Вместо (8.1), согласно структурной схеме (рис. 8.27), получим

$$\Delta E_q = \Delta E_{qe} + \Delta E_{qсв} = \left[\frac{1}{1 + pT_e} \sum_j \frac{1}{1 + pT_{рпj}} (K_{опj} + K_{1пj}p + K_{2пj}p^2) \Delta \Pi_j \right] + (-T_{доp} \Delta E'_q), \quad (8.38)$$

где Π_j — параметр режима, выбранный для регулирования, $K_{пj}$ и $T_{рпj}$ — коэффициенты усиления и постоянные времени соответствующих каналов регулирования (рис. 8.27).

Остальные уравнения будут такие же, как в (8.1). Параметры режима Π_j связаны со значениями коэффициентов характеристического уравнения, и именно эта связь отражает влияние регулятора на устойчивость.

* Можно было бы предложить методы анализа, одинаковые для всех трех видов устойчивости, например в любом случае количественно задавать возмущение и численным интегрированием находить изменение всех параметров режима во времени. Можно было бы также применить методы, выявляющие в любом случае характер движения, без численного интегрирования, например прямой метод Ляпунова. Однако в принятом делении есть практические удобства, а методы, исключющие это деление, пока разработаны недостаточно.

Выбор параметров режима Π_j часто определяется удобством измерения параметров и удобством эксплуатации (надежностью, простотой переключения схемы коммутации и т. д.). Суммирование по j вводится в тех случаях, когда АРВ регулирует одновременно по нескольким параметрам режима, что часто выполняется в современных АРВ с. д. (например, используются напряжение и ток, напряжение и частота, напряжение и угол и т. д.).

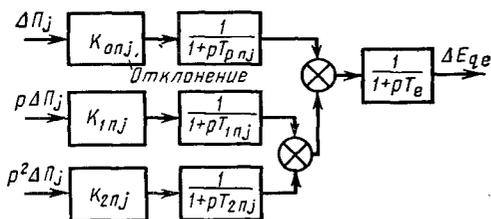


Рис. 8.27. Общая структурная схема АРВ с. д. при введении в регулятор j отклонений параметров (коэффициент усиления $K_{0\Pi j}$, постоянная времени по каналам усиления $T_{p\Pi j}$) и первых и вторых производных по любым параметрам при коэффициентах усиления $K_{1\Pi j}$ по первой производной, $K_{2\Pi j}$ — по второй, при постоянных времени по каналам усиления $T_{1\Pi j}$ и соответственно $T_{2\Pi j}$

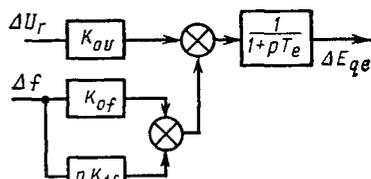


Рис. 8.28. Упрощенная структурная схема замещения АРВ с. д., принятая для анализа

Предположим, что регулирование происходит по отклонению напряжения генератора ΔU_{Γ} и первой и второй производным угла δ ($p\delta = \Delta f$; $p^2\delta = p\Delta f$), тогда значение ΔE_{qe} в (8.38) при $T_{p\Pi j} = 0$ примет вид

$$\Delta E_{qe} = \frac{1}{1 + pT_e} \left[K_{0U} \Delta U_{\Gamma} + (K_{0f} + pK_{1f}) \Delta f \right]. \quad (8.39)$$

Соответственно упростится структурная схема (рис. 8.27). Проводя точно такие же выкладки, что и в § 8.1, но учитывая в (8.38) значение E_{qe} , согласно (8.39) получим характеристическое уравнение системы, имеющей регулятор сильного действия со структурной схемой, приведенной на рис. 8.28. Оно имеет вид

$$D(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + \Delta a_2) p^2 + (a_3 + \Delta a_3) p + (a_4 + \Delta a_4) = 0, \quad (8.40)$$

где

$$\Delta a_2 = K_{0U} T_J b_1/b_3 + K_{1f} b_1; \quad \Delta a_3 = K_{0f} b_1; \quad \Delta a_4 = K_{0U} c_3 b_1/b_3;$$

$$a_0 = T_J T_e T'_d; \quad a_1 = T_J (T_e + T'_d);$$

$$a_2 = T_J + T'_d T_e c_2; \quad a_3 = T_e c_1 + T'_d c_2; \quad a_4 = c_1;$$

$$c_1 = \frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta; \quad c_2 = \frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta} = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{U^2 (x_d - x'_d)}{x_{d\Sigma} x'_{d\Sigma}} \cos 2\delta;$$

$$c_3 = c_1 + U^2 \frac{x_d}{x_{d\Sigma} x_c} (\sin \delta - \operatorname{tg} \delta_r \cos \delta) \sin \delta, \quad b_1 = \frac{\partial P_{E_q}}{\partial E_q} = \frac{U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta;$$

$$b_3 = \frac{\partial P_{U\Gamma}}{\partial U_{\Gamma}} = \frac{U}{x_c} \sin \delta \frac{1}{\cos \delta_{\Gamma}}.$$

При $T'_d > 0$ все коэффициенты характеристического уравнения положительны. Неустойчивость может возникнуть только в связи с переходом через нуль опередителя Гурвица, который для данной системы имеет вид

$$\Delta_{\text{Гур}} = (a_3 + \Delta a_3) [a_1 (a_2 + \Delta a_2) - a_0 (a_3 + \Delta a_3)] - a_1^2 (a_4 + \Delta a_4) \geq 0,$$

или после подстановки конкретных значений параметров

$$(T_e c_1 + T'_d c_2 + K_{of} b_1) [T_J (T_e + T'_d) (T_J + T'_d T_e c_2 + K_{OU} T_J b_1 / b_3 + K_{1f} b_1) - T_J T_e T'_d (T_e c_1 + T'_d c_2 + K_{of} b_1)] - [T_J (T_e + T'_d)]^2 (c_1 + K_{OU} c_3 b_1 / b_3) \geq 0. \quad (8.41)$$

Из (8.41) после простых, хотя и громоздких, преобразований находится коэффициент усиления по напряжению, в выражении которого жирным выделены коэффициенты, обуславливающие эффект сильного регулирования:

$$K_{OU \text{ макс}} = \frac{b_3 (T_e c_1 + T'_d c_2 + K_{of} b_1) [T_J + T'_d T_e c_2 + K_{1f} b_1 - T_J b_1 [T_e (c_3 - c_1) + T'_d (c_3 - c_2) - K_{of} b_1]]}{T_J b_1 [T_e (c_3 - c_1) + T'_d (c_3 - c_2) - K_{of} b_1]} - \frac{T_e T'_d}{(T_e + T'_d)} (T_e c_1 + T'_d c_2 + K_{of} b_1) - b_3 (T_e + T'_d) c_1 T_J}{T_J b_1 [T_e (c_3 - c_1) + T'_d (c_3 - c_2) - K_{of} b_1]}. \quad (8.42)$$

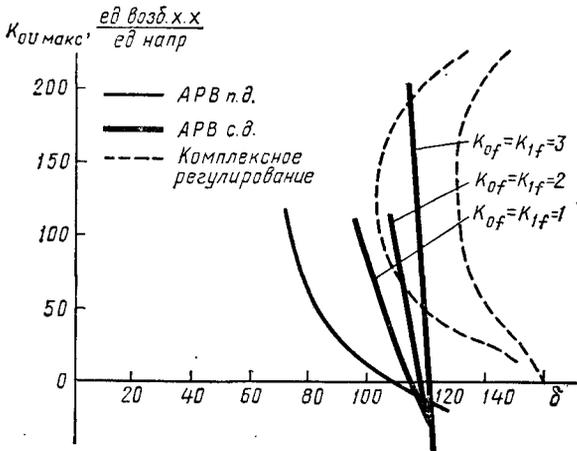


Рис. 8.29. Максимальный коэффициент усиления при различных способах регулирования возбуждения для схемы системы рис. 8.26

система — $x_c = 1,0$; $T'_{d\Sigma} = 1,94$ с;
исходный режим — $U_{\Gamma} = 1,0$; $U = 1,0$; $P = \text{var.}$

Заметим, что при $K_{of} = K_{1f} = 0$ выражение (8.42) приобретает вид уравнения (8.12), полученного для АРВ п. д. Максимальный коэффициент усиления, найденный согласно (8.42), для АРВ с. д. оказывается значительно больше определенного по (8.12) и позволяет хорошо поддерживать напряжение (см. рис. 8.13).

Зависимость $K_{OU \text{ макс}} = f(\delta)$ для АРВ с. д., построенная по выражению (8.42), представлена на рис. 8.29, где для сравнения приведена зависимость $K_{OU \text{ макс}}$ для АРВ п. д.

Расчет проводился для схемы, имеющей следующие параметры:
генератор — $x_d = 2,5$; $x'_d = 0,36$; $T_{d0} = 5$ с; $T_J = 5$ с; $T_e = 5$ с.

Метод D-разбиения. Несколько усложним рассмотренную задачу, предположив, что в (8.39) ΔE_{qe} является функцией отклонений напряжения ΔU_r и тока ΔI_r генератора, а также функцией первой и второй производных некоторого параметра Π , который пока выбирать не будем.

Положим при этом, что $T_{pU} = T_{pI} = T_{p\Pi} = T_p$. После преобразований, аналогичных сделанным в § 8.1, получим характеристический определитель системы уравнения в виде суммы трех определителей:

$$\begin{aligned} & \left| \begin{array}{cc} T_J p^2 + c_1 & b_1 \\ (1 + pT_e)(1 + pT_p)T'_d \frac{x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} p \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} - & (1 + pT'_d)(1 + pT_e)(1 + pT_p) - \\ - \left(K_{0U} \frac{\partial U_r}{\partial \delta} + K_{0I} \frac{\partial I}{\partial \delta} \right) & - \left(K_{0U} \frac{\partial U_r}{\partial E_q} + K_{0I} \frac{\partial I}{\partial E_q} \right) \end{array} \right| + \\ & + \left| \begin{array}{cc} T_J p^2 + c_1 & b_1 \\ -K_{1\Pi} p \frac{\partial \Pi}{\partial \delta} & -K_{1\Pi} p \frac{\partial \Pi}{\partial E_q} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} T_J p^2 + c_1 & b_1 \\ -K_{2\Pi} p^2 \frac{\partial \Pi}{\partial \delta} & -K_{2\Pi} p \frac{\partial \Pi}{\partial E_q} \end{array} \right| = \quad (8.43) \\ & = D_0(p) + K_{1\Pi} D_1(p) + K_{2\Pi} D_2(p). \end{aligned}$$

Здесь $D_0(p)$ — многочлен пятого порядка, коэффициенты которого получают раскрытием первого определителя (8.43), имеющего вид

$$D_0(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + (a_3 + \Delta a_3) p^2 + a_4 p + a_5 + \Delta a_5 = 0,$$

где

$$a_0 = T_J T'_d T_e T_p; \quad a_1 = T_J (T'_d T_e + T'_d T_p + T_e T_p);$$

$$a_2 = T_J (T'_d + T_e + T_p) + T'_d T_e T_p c_2; \quad a_3 = T_J + T_e T_p c_1 + T'_d (T_e + T_p) c_2;$$

$$a_4 = (T_e + T_p) c_1 + T'_d c_2; \quad a_5 = c_1;$$

$$\Delta a_3 = K_{0U} \Delta_{2U} + K_{0I} \Delta_{2I}; \quad \Delta a_5 = K_{0U} \Delta_{0U} + K_{0I} \Delta_{0I}.$$

Определители $D_1(p) = p(\Delta_{2\Pi} p^2 + \Delta_{0\Pi})$ и $D_2(p) = p^2(\Delta_{2\Pi} p^2 + \Delta_{0\Pi})$, входящие в (8.43), зависят от коэффициентов $\Delta_{0\Pi}$ и $\Delta_{2\Pi}$, аналитические выражения которых для разных параметров режима (различных Π_j) приведены в табл. 8.4.

В соответствии с методом D -разбиения [3] подставим в характеристическое уравнение $p = j\omega$ и запишем

$$D(j\omega) = D_0(j\omega) + K_{1\Pi} D_1(j\omega) + K_{2\Pi} D_2(j\omega) = 0.$$

Каждый из многочленов можно представить в виде мнимых и действительных составляющих:

$$D_0(j\omega) = R_1(\omega) + jR_2(\omega); \quad D_1(j\omega) = Q_1(\omega) + jQ_2(\omega); \quad D_2(j\omega) = P_1(\omega) + jP_2(\omega).$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} R_1(\omega) &= a_1 \omega^4 - (a_3 + \Delta a_3) \omega^2 + a_5 + \Delta a_5; & R_2(\omega) &= a_0 \omega^5 - a_2 \omega^3 + a_4 \omega; \\ Q_1(\omega) &= 0; & Q_2(\omega) &= -\Delta_{2\Pi} \omega^3 + \Delta_{0\Pi} \omega; \\ P_1(\omega) &= \Delta_{2\Pi} \omega^4 - \Delta_{0\Pi} \omega^2; & P_2(\omega) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.44)$$

Π_j	$\Delta_{2\Pi}$	$\Delta_{0\Pi}$
δ	0	b_1
$\Delta U = U_0 - U_r$	$T_J \frac{\partial U_r}{\partial E_q} = T_J \frac{b_1}{b_3}$	$\frac{\partial U_r}{\partial E_q} c_1 - \frac{\partial U_r}{\partial \delta} b_1 = c_3 \frac{b_1}{b_3}$
I	$-T_J \frac{\partial I}{\partial E_q}$	$-\frac{\partial I}{\partial E_q} c_1 + \frac{\partial I}{\partial \delta} b_1$
$\delta_c = \delta - \delta_r$	$T_J \frac{\partial \delta_r}{\partial E_q}$	$\frac{\partial \delta_r}{\partial E_q} c_1 + \left(1 - \frac{\partial \delta_r}{\partial \delta}\right) b_1$

Запишем систему двух уравнений для комплексных и действительных многочленов таким образом, чтобы в первом столбце стоял параметр, который при построении области статической устойчивости откладывается по горизонтальной оси (в данном случае это обычно коэффициент усиления по второй производной):

$$\left. \begin{aligned} K_{2\Pi} P_1(\omega) + K_{1\Pi} Q_1(\omega) &= -R_1(\omega); \\ K_{2\Pi} P_2(\omega) + K_{1\Pi} Q_2(\omega) &= -R_2(\omega). \end{aligned} \right\} \quad (8.45)$$

Решив систему уравнений (8.45) относительно $K_{1\Pi}$ и $K_{2\Pi}$, получим

$$K_{1\Pi} = \Delta_{1\Pi}(\omega)/\Delta(\omega); \quad K_{2\Pi} = \Delta_{2\Pi}(\omega)/\Delta(\omega); \quad (8.46)$$

где главный определитель

$$\Delta(\omega) = \begin{vmatrix} P_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ P_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix} = P_1(\omega)Q_2(\omega);$$

так как $P_2(\omega) = Q_1(\omega) = 0$, миноры запишутся как

$$\begin{aligned} \Delta_{1\Pi}(\omega) &= \begin{vmatrix} P_1(\omega) & -R_1(\omega) \\ P_2(\omega) & -R_2(\omega) \end{vmatrix} = -P_1(\omega)R_2(\omega); \\ \Delta_{2\Pi}(\omega) &= \begin{vmatrix} -R_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ -R_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix} = -R_1(\omega)Q_2(\omega). \end{aligned}$$

Подставляя выражения определителей в (8.46), получим

$$K_{1\Pi} = -R_2(\omega)/Q_2(\omega); \quad K_{2\Pi} = -R_1(\omega)/P_1(\omega).$$

Подставив выражения многочленов (8.44), окончательно запишем:

$$\left. \begin{aligned} K_{1\Pi} &= (a_0\omega^4 - a_2\omega^2 + a_4)/(\Delta_{2\Pi}\omega^2 - \Delta_{0\Pi}); \\ K_{2\Pi} &= -[a_1\omega^4 - (a_3 + \Delta a_3)\omega^2 + a_5 + \Delta a_5]/[\omega^2(\Delta_{2\Pi}\omega^2 - \Delta_{0\Pi})]. \end{aligned} \right\} \quad (8.47)$$

Меняя ω от 0 до $\pm\infty$ и рассчитывая значения $K_{1П}$ и $K_{2П}$ по уравнениям (8.47), прочертим кривую D -разбиения. Применяя правила штриховки [3], найдем области статической устойчивости. Эти области определяют соотношения коэффициентов усиления по производным (параметрам устройства стабилизации), обеспечивающим статическую устойчивость исходного режима электрической системы, заданной всеми параметрами. Построив области устойчивости для серии расчетных режимов, можно найти общий участок этих областей, определяющий такую совокупность коэффициентов усиления по производным, которая обеспечивает статическую устойчивость во всем диапазоне расчетных режимов.

Приведем примеры построения областей статической устойчивости с АРВ с. д. для серии режимов с выделением общего участка. Предположим, что в качестве параметров, по которым в АРВ вводятся производные, выбран ток:

$$K_{1П} = K_{1I}; \quad K_{2П} = K_{2I}.$$

Согласно табл. 8.4, находим $\Delta_{2П}$ и $\Delta_{0П}$ и строим области устойчивости

(8.47). На рис. 8.30, а показаны получающиеся при этом границы областей для различных режимов ($\delta = 30, 60, 100^\circ$). Здесь следует обратить внимание на изменение характера процесса $\delta = f(t)$. При продвижении вдоль границы области от А в направлении В и далее в направлении С частота колебаний на границе непрерывно возрастает. При этом амплитуда колебаний при соответствующей настройке АРВ и малых возмущениях может оставаться ограниченной, сохраняя устойчивость на границе [5, § 8.2]. Выбором параметров регулирования иногда можно расширить область устойчивости. Так, при регулировании по углу $K_{1П} = K_{1\delta}$, $K_{2П} = K_{2\delta}$ получим области (рис. 8.30, б), более целесообразные в эксплуатации.

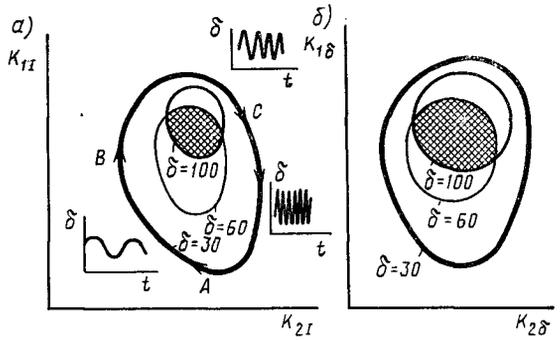


Рис. 8.30. Области устойчивости при сильном регулировании:

а — при введении в регулятор первой K_{1I} и второй K_{2I} производных тока; б — то же, угла $K_{1\delta}$, $K_{2\delta}$. Заштрихована общая область, отвечающая режимам при $\delta = 30 \div 100^\circ$

Комплексное сильное регулирование. Регулирование по отклонению параметров режима и производным этих параметров может осуществляться не только при воздействии на возбуждение, но и при воздействии на первичный двигатель* (турбину или установки, поглощающие избыточную мощность в переходном режиме, — накопители, ИРМ и т. д.). При одновременном воздействии на возбудители и первичный двигатель уравнение (8.1) примет вид

$$\Delta E_q = \xi(p) \Delta E'_q + \gamma(p) \Delta U_r + \gamma_1(p) p \Delta \Pi + \gamma_2(p) p^2 \Delta \Pi. \quad (8.48)$$

Уравнение (8.2) при $P_d = 0$ представим как

$$\Delta P = -T_J p^2 \Delta \delta - \rho_1(p) p \Delta \Pi - \rho_2(p) p^2 \Delta \Pi. \quad (8.49)$$

Уравнение (8.48) предполагает воздействие по производным, осуществляемое через регулятор возбуждения, а уравнение (8.49) — через регулятор скорости турбины.

* Разумеется, воздействие на турбину возможно только при современных турбинах, имеющих малоинерционное регулирование.

Очевидно, что, как и в рассмотренном случае регулирования только возбуждения генератора, в характеристическом уравнении появляются «добавки» к его коэффициентам. Пусть воздействие на ΔP и ΔE_{qe} записывается соответственно в виде $p\Delta\delta = \Delta f$ и $p^2\Delta\delta = p\Delta f$, тогда уравнения (8.48) и (8.49) можно представить так:

$$\Delta E_q = \xi(p) \Delta E'_q + \gamma(p) \Delta U_r + [\gamma_1(p)p + \gamma_2(p)p^2] \Delta\delta; \quad (8.50)$$

$$\Delta P = -\{[T_J + \rho_2(p)]p^2 + \rho_1(p)p\} \Delta\delta. \quad (8.51)$$

Примем обозначения:

$$\xi(p) = -T_{d0}p; \quad \rho_1(p) = \frac{K_1}{1+pT_p};$$

$$\gamma(p) = \frac{-K_{0U}}{(1+pT_e)(1+pT_w)(1+pT_y)}; \quad \rho_2(p) = \frac{K_2}{1+pT_p};$$

$$\gamma_1(p) = \frac{K_{0f}}{(1+pT_e)(1+pT_y)(1+pT_1)}; \quad T'_J(p) = T_J + \rho_2(p);$$

$$\gamma_2(p) = \frac{K_{1f}}{(1+pT_e)(1+pT_y)(1+pT_2)}; \quad T'_{1J}(p) = T'_{1J}(p)p^2 + \rho_1(p)p;$$

$$\gamma_0(p) = \gamma_1(p)p + \gamma_2(p)p^2; \quad T_{1J}(p) = T'_{1J}(p) + b_1\gamma_0(p).$$

Тогда после преобразований (см. § 8.1) получим определитель исследуемой системы:

$$D_1(p) = \begin{vmatrix} T'_{1J}(p) + c_1 & b_1\xi(p) & b_1\gamma(p) \\ T'_{1J}(p) + c_2 & b_2 & 0 \\ T'_{1J}(p) + c_3 & 0 & b_3 \end{vmatrix}. \quad (8.52)$$

Исследование его для конкретных случаев можно провести аналогично тому, как это было сделано для регулятора пропорционального действия. Получив довольно громоздкие выражения (см. § 8.2), их следует свести к квадратному уравнению. Решение этого уравнения, проведенное для конкретных числовых данных АРВ п. д., позволяет определить зависимости максимального коэффициента усиления (на рис. 8.29 штриховая линия) при различных способах регулирования.

Таким образом, дополнительное регулирование турбины расширяет возможности автоматического регулирования и пропорционального, и сильного действия. Похожий эффект дает регулирование ИРМ, подключенных к шинам генератора. Возможности комплексного регулирования очень широки, но пока они еще не используются.

§ 8.9. СИНТЕЗ СТРУКТУР СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

При проектировании АРВ с. д. синхронных машин часто ставится задача синтеза такой структуры, в которой не существовало бы противоречия между точностью поддержания напряжения на шинах генератора и устойчивостью. Возникает задача — создать систему,

устойчивую при сколь угодно большом коэффициенте усиления. Как правило, такая структура позволяет также получить большие размеры областей статической устойчивости во всех режимах и повысить качество переходного процесса при постоянной настройке. Под *синтезом структуры АРВ* понимается выбор стабилизирующего устройства и параметров регулирования, или, иначе, выбор закона регулирования.

Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности математически решает следующую задачу.

Пусть имеется характеристическое уравнение n -й степени

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0. \quad (8.53)$$

Запишем его в виде уравнения

$$D(p) = D_0(p) + D_1(p), \quad (8.54)$$

описывающего переходные процессы в электрической системе при автоматическом регулировании возбуждения. Требуется обеспечить условия статической устойчивости при неограниченном увеличении коэффициента усиления по отклонению напряжения, т. е. при поддержании напряжения синхронной машины с высокой точностью.

Для решения этой задачи необходимо сформулировать математические условия статической устойчивости и провести синтез структуры АРВ, обеспечивающей их выполнение.

Условия статической устойчивости при неограниченном увеличении коэффициентов усиления АРВ. Рассмотрим увеличение коэффициента усиления K_0 одного звена, входящего последовательно в структурную схему АРВ с. д. Передаточная функция АРВ с. д.

$$W_{\Pi}(p) = K_0 W_*(p),$$

где
$$W_*(p) = K_{*0U} + \sum_{i=1}^l K_{*i\Pi} p^i; \quad K_{*0U} = K_{0U} / K_0; \quad K_{*i\Pi} = K_{i\Pi} / K_0.$$

Задачей синтеза структуры АРВ с. д. является выбор числа производных l и параметра регулирования Π (либо одной, либо комбинации нескольких режимных параметров). Характеристическое уравнение (8.54) представим как

$$D(p) = D_0(p) + K_0 D_{*1}(p) = 0. \quad (8.55)$$

Здесь $D_0(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n$;

$$D_{*1}(p) = K_{*0U} (\Delta_{2U} p^2 + \Delta_{3U}) + (\Delta_{2\Pi} p^2 + \Delta_{0\Pi}) \sum_{i=1}^l K_{*i\Pi} p^i.$$

Выражения для $\Delta_{2\Pi}$ и $\Delta_{0\Pi}$ приведены в табл. 8.4.

При $K_0 \rightarrow \infty$ часть коэффициентов характеристического многочлена $D(p) \rightarrow \infty$, что возможно только при условии, когда часть корней характеристического уравнения $D(p) = 0$ уходит в бесконечность. Для устойчивости системы при $K_0 \rightarrow \infty$ необходимо и достаточно, чтобы все корни уравнения $D(p) = 0$ лежали в левой полуплоскости корней. Для выполнения этого требования поступим следующим образом. Разделим (8.55) на K_0 и обозначим $1/K_0 = m$. Здесь m является малым параметром, так как при $K_0 \rightarrow \infty$ значение $m \rightarrow 0$. Система будет устойчива при сколь угодно большом коэффициенте K_0 , если уравнение

$$m D_0(p) + D_{*1}(p) = 0 \quad (8.56)$$

удовлетворяет условию устойчивости.

При $m = 0$ уравнение (8.56) вырождается в уравнение n_1 -й степени:

$$D_{*1}(p) = b_0 p^{n_1} + b_1 p^{n_1-1} + \dots + b_{n_1} = 0. \quad (8.57)$$

Уравнение (8.57), характеризующее систему при $K_0 \rightarrow \infty$, называется *вырожденным*. Вследствие непрерывной зависимости корней алгебраического уравнения от его коэффициентов можно утверждать, что когда $m \rightarrow 0$, то n корней уравнения $D(p) = 0$ стремятся к n_1 корням уравнения $D_{*1}(p) = 0$. Остальные $n - n_1$ корней уравнения $D(p) = 0$ стремятся к бесконечности.

Если уходящие в бесконечность корни при $m \rightarrow 0$ располагаются слева от мнимой оси, то устойчивость будет определяться вырожденным уравнением. Число корней, уходящих при $m \rightarrow 0$ в бесконечность, зависит от разности порядков $n - n_1$. Практический интерес представляет случай, когда $n_1 < n$.

Рассмотрим случай, когда вырожденное уравнение удовлетворяет условиям устойчивости, т. е. все его n_1 корней лежат в левой полуплоскости корней. Если $m \rightarrow 0$, то n_1 корней уравнения $D(p) = 0$ будут стремиться к n_1 корням уравнения $D_{*1}(p) = 0$, которые в этом случае будут расположены слева от мнимой оси комплексной плоскости корней. Остальные $n - n_1$ корней $D(p) = 0$ будут уходить в бесконечность.

Сформулируем условия, при выполнении которых $n - n_1$ корней будут уходить в бесконечность слева от мнимой оси плоскости корней.

Пусть $n - n_1 = 1$. В этом случае уравнение (8.56) запишется как

$$m(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) + b_0 p^{n-1} + b_1 p^{n-2} + \dots + b_{n-2} = 0.$$

Произведем замену переменных $p = q/m$:

$$a_0 \frac{q^n}{m^{n-1}} + a_1 \frac{q^{n-1}}{m^{n-2}} + \dots + b_0 \frac{q^{n-1}}{m^{n-1}} + b_1 \frac{q^{n-2}}{m^{n-2}} + \dots + b_{n-1} = 0.$$

Умножив на m^{n-1} , получим

$$a_0 q^n + a_1 m q^{n-1} + \dots + b_0 q^{n-1} + b_1 m q^{n-2} + \dots + b_{n-1} m^{n-1} = 0.$$

При $m \rightarrow 0$ это уравнение стремится к виду

$$a_0 q^n + b_0 q^{n-1} = q^{n-1} (a_0 q + b_0) = 0.$$

Уравнение, коэффициентами которого являются старшие члены полиномов $D_0(p)$ и $D_1(p)$, записывается как

$$a_0 q + b_0 = 0 \tag{8.58}$$

и называется вспомогательным уравнением первого рода.

Решением уравнения (8.58) будет

$$q = -b_0/a_0 \text{ или } p = -b_0/(ma_0).$$

При $m \rightarrow 0$ значение $p \rightarrow -\infty$, если $b_0/a_0 > 0$. Таким образом, когда $n - n_1 = 1$, единственный корень, уходящий в бесконечность при $m \rightarrow 0$, будет расположен слева от мнимой оси на плоскости корней, если $b_0/a_0 > 0$.

Рассмотрим случай, когда $n - n_1 = 2$. Уравнение (8.56) в этом случае запишем как

$$m(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) + b_0 p^{n-2} + b_1 p^{n-3} + \dots + b_{n-2} = 0.$$

Произведя замену переменных $p = m^{-1/2}$, получим

$$a_0 \frac{q^n}{m^{\frac{n}{2}-1}} + a_1 \frac{q^{n-1}}{m^{\frac{n-1}{2}-1}} + \dots + a_n + b_0 \frac{q^{n-2}}{m^{\frac{n-2}{2}}} + b_1 \frac{q^{n-3}}{m^{\frac{n-3}{2}}} + \dots + b_{n-2} = 0.$$

Умножим на $m^{\frac{n-2}{2}}$:

$$a_0 q^n + a_1 q^{n-1} m^{1/2} + \dots + b_0 q^{n-2} + b_1 q^{n-3} m^{1/2} + \dots = 0.$$

При $m \rightarrow 0$ это уравнение стремится к виду

$$a_0 q^n + b_0 q^{n-2} = q^{n-2} (a_0 q^2 + b_0) = 0.$$

Уравнение

$$a_0 q^2 + b_0 = 0 \tag{8.59}$$

называется *вспомогательным уравнением второго рода*.

Решением уравнения (8.59) будет

$$q = \sqrt{-b_0/a_0} \text{ или } p = \sqrt{-(b_0/a_0)/m}.$$

При $b_0/a_0 > 0$ значение $p_{1,2} = \pm j \sqrt{b_0/(ma_0)}$.

При $m \rightarrow 0$ корни $p_{1,2}$ стремятся к $\pm j\infty$, что соответствует условию, при котором система находится на границе устойчивости.

Устойчивость или неустойчивость системы зависит от того, с какой стороны от мнимой оси плоскости корней движутся корни к мнимой оси при $m \rightarrow 0$. Для того чтобы это установить и найти условия, при которых корни подходят к мнимой оси слева, учтем первое приближение к малой величине m :

$$a_0 q^n + a_1 q^{n-1} m^{1/2} + b_0 q^{n-2} + b_1 q^{n-3} m^{1/2} = 0.$$

Разделим на q^{n-3} , получим

$$a_0 q^3 + a_1 m^{1/2} q^2 + b_0 q + b_1 m^{1/2} = A_0 q^3 + A_1 q^2 + A_2 q + A_3 = 0.$$

Запишем условие устойчивости по Гурвицу:

$$\Delta_{\text{Гур}} = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 & 0 \\ A_0 & A_2 & 0 \\ 0 & A_1 & A_3 \end{vmatrix} = A_3 (A_1 A_2 - A_0 A_3) > 0$$

или

$$a_1 m^{1/2} b_0 - a_0 b_1 m^{1/2} = m^{1/2} (a_1 b_0 - a_0 b_1) > 0.$$

Поделим последнее уравнение на $a_0 b_0$, в результате получим

$$a_1/a_0 - b_1/b_0 > 0.$$

Таким образом, при $n - n_1 = 2$ два корня будут уходить в бесконечность слева от мнимой оси плоскости корней, если выполняется условие

$$a_1/a_0 - b_1/b_0 > 0.$$

Рассмотрим случай, когда $n - n_1 = 3$. Поступая так же, как в предыдущих двух случаях, получим вспомогательное уравнение $a_0 p^3 + b_0 = 0$, корни которого

$$p_{1,2,3} = \sqrt[3]{-b_0/a_0}.$$

Заметим, что при извлечении кубического корня из минус единицы, которую можно представить вектором $-1 = e^{j(\pi+2\pi+2\pi)}$, на комплексной плоскости корней получается единичная звезда с компонентами $p_1 = e^{j\pi/3}$, $p_2 = e^{j\pi}$, $p_3 = e^{j5\pi/3}$. При извлечении кубического корня из плюс единицы, которую можно представить совокупностью трех векторов $1 = e^{j(0+2\pi+2\pi)}$, на комплексной плоскости корней образуется единичная звезда с компонентами $p_1 = e^{j0}$, $p_2 = e^{j2\pi/3}$, $p_3 = e^{j4\pi/3}$.

Движение корней при $m \rightarrow 0$ определяется уравнением $p_{1,2,3} = \sqrt[3]{-b_0/(ma_0)}$. При $b_0/a_0 > 0$ три корня исходного уравнения при $m \rightarrow 0$ стремятся к асимптоте звезды $\sqrt[3]{-1}$, а при $b_0/a_0 < 0$ — к асимптоте звезды $\sqrt[3]{+1}$.

Таким образом, при $n - n_1 = 3$ независимо от знака b_0/a_0 всегда найдутся корни (два комплексных или один действительный), которые при $m \rightarrow 0$ стремятся в плюс бесконечность, т. е. подходят к мнимой оси справа.

Следовательно, в случае вспомогательного уравнения третьей степени исходная система при $K_0 \rightarrow \infty$ будет всегда неустойчива.

Проведенный анализ позволяет сформулировать необходимые и достаточ-

ные условия устойчивости системы, описываемой уравнением $D(p) = 0$ при неограниченном увеличении K_0 :

- 1) вырожденное уравнение должно указывать на устойчивость;
- 2) $n - n_1 \leq 2$;
- 3) корни вспомогательного уравнения должны лежать в левой полуплоскости либо на мнимой оси комплексной плоскости корней уравнения $D(p) = 0$.

Выбор структуры АРВ по необходимому условию $n - n_1 \leq 2$. 1. АРВ п. д. по отклонению напряжения. Характеристическое уравнение

$$D(p) = D_0(p) + K_{0U}(\Delta_{2U}p^2 + \Delta_{0U}), \quad (8.60)$$

где $n = 5, n_1 = 2, n - n_1 = 3$.

Невыполнение необходимого условия $n - n_1 \leq 2$ показывает, что система, снабженная АРВ п. д., принципиально не может обладать статической устойчивостью при неограниченном увеличении коэффициента усиления по отклонению напряжения.

Таким образом, структура АРВ п. д. не удовлетворяет требованиям систем автоматического регулирования высокой точности.

Решение вспомогательного уравнения $ma_0p^3 + \Delta_{2U} = 0$

$$p^3 = -\Delta_{2U} / (ma_0), \quad p_{1, 2, 3} = \sqrt[3]{-\Delta_{2U} / (ma_0)}$$

при $\Delta_{2U}/a_0 > 0$ показывает, что с увеличением K_{0U} два комплексных корня стремятся в правую полуплоскость, т. е. нарушение устойчивости в этом случае имеет характер самораскачивания.

2. АРВ с. д. с регулированием по отклонению напряжения и стабилизацией по производным угла δ . В этом случае выбор структуры заключается в определении числа производных угла δ . Характеристическое уравнение простой регулируемой системы имеет вид

$$D(p) = D_0(p) + K_{0U}(\Delta_{2U}p^2 + \Delta_{0U}) + \Delta_{0\delta}(K_{1\delta}p + K_{2\delta}p^2 + K_{3\delta}p^3) = 0.$$

Условие $n - n_1 \leq 2$ выполняется только при структуре стабилизирующего устройства АРВ с. д., содержащего первую, вторую и третью производные угла δ .

3. АРВ с. д. с регулированием по отклонению напряжения и производными режимного параметра Π . Характеристическое уравнение простой системы с регулированием по отклонению напряжения и производными режимных параметров Π имеет вид

$$D(p) = D_0(p) + K_{0U}(\Delta_{2U}p^2 + \Delta_{0U}) + (K_{1\Pi}p + K_{2\Pi}p^2 + K_{3\Pi}p^3)(\Delta_{2\Pi}p^2 + \Delta_{0\Pi}) = 0.$$

Так как для всех рассматриваемых режимных параметров, кроме угла δ , $\Delta_{2\Pi} \neq 0$, то условие $n - n_1 = 2$ выполняется при осуществлении стабилизации как по одной первой производной параметра Π , так и по первой и второй производным.

Выбор параметров режима для устройства стабилизации АРВ с. д. Условие $n - n_1 \leq 2$ позволило сформулировать требования относительно числа производных в зависимости от параметров режима. Это условие лишь необходимое условие устойчивости системы при $K_0 \rightarrow \infty$.

Следующей задачей синтеза является выбор параметров режима, которые необходимо ввести в стабилизирующее устройство АРВ с. д. Это задача решается с помощью условия устойчивости вырожденного уравнения. Рассмотрим вырожденное уравнение для случая регулирования по отклонению напряжения, первой и второй производным параметра режима Π (при условии $\Delta_{2\Pi} \neq 0, \Delta_{0\Pi} \neq 0$):

$$\begin{aligned} D_1(p) &= K_{*0U}(\Delta_{2U}p^2 + \Delta_{0U}) + (pK_{*1\Pi} + p^2K_{*2\Pi})(\Delta_{2\Pi}p^2 + \Delta_{0\Pi}) = \\ &= K_{*2\Pi}\Delta_{2\Pi}p^4 + K_{*1\Pi}\Delta_{2\Pi}p^3 + (K_{*0U}\Delta_{2U} + K_{*2\Pi}\Delta_{0\Pi})p^2 + K_{*1\Pi}\Delta_{0\Pi}p + K_{*0U}\Delta_{0U} = \\ &= \Delta a_1p^4 + \Delta a_2p^3 + \Delta a_3p^2 + \Delta a_4p + \Delta a_5 = 0. \end{aligned}$$

Здесь

$$\Delta a_1 = K_{*2\Pi}\Delta_{2\Pi}; \quad \Delta a_2 = K_{*1\Pi}\Delta_{2\Pi}; \quad \Delta a_3 = K_{*0U}\Delta_{2U} + K_{*2\Pi}\Delta_{0\Pi};$$

$$\Delta a_4 = K_{*1\Pi}\Delta_{0\Pi}; \quad \Delta a_5 = K_{*0U}\Delta_{0U}.$$

Необходимое условие устойчивости вырожденного уравнения — положительность коэффициентов — формулирует требования к знакам единичных добавок (при условии положительности всех коэффициентов регулирования) во всех режимах от начального (δ_0) до предельного ($\delta_{пр}$), статическая устойчивость которых должна быть обеспечена ($0 \leq \delta_0 \leq \delta_{пр}$):

$$1) \Delta_{2П} > 0; 2) \Delta_{0П} > 0, \Delta_{0U} > 0.$$

Выражения для этих добавок приведены в табл. 8.4. Качественные зависимости единичных добавок от режима (рис. 8.31, а) показывают, что первому условию — необходимому условию устойчивости вырожденного уравнения — удовлетворяет только напряжение ($\Pi = U_0 - U_r$). Все остальные параметры режима не удовлетворяют этому условию:

$$\Delta_{2\delta} = 0, \quad \Delta_{2\delta} < 0, \quad \Delta_{2I} < 0.$$

Второму необходимому условию удовлетворяют все рассмотренные параметры режима.

Необходимые и достаточные условия устойчивости вырожденного уравнения определим по критерию Гурвица. Запишем определитель для вырожденного уравнения четвертого порядка:

$$H_4 = \begin{vmatrix} \Delta a_2 & \Delta a_4 & 0 & 0 \\ \Delta a_1 & \Delta a_3 & \Delta a_5 & 0 \\ 0 & \Delta a_2 & \Delta a_4 & 0 \\ 0 & \Delta a_1 & \Delta a_3 & \Delta a_5 \end{vmatrix} = \Delta a_5 H_3.$$

При $\Delta a_5 > 0$ требуется, чтобы $H_3 > 0$, где

$$H_3 = \begin{vmatrix} \Delta a_2 & \Delta a_4 & 0 \\ \Delta a_1 & \Delta a_3 & \Delta a_5 \\ 0 & \Delta a_2 & \Delta a_4 \end{vmatrix} = \Delta a_4 H_2 - \Delta a_5^2 \Delta a_5.$$

Получим выражение для определителя:

$$H_2 = \begin{vmatrix} \Delta a_2 & \Delta a_4 \\ \Delta a_1 & \Delta a_3 \end{vmatrix} = \Delta a_2 \Delta a_3 - \Delta a_1 \Delta a_4 = K_{*1П} \Delta_{2П} (K_{*0U} \Delta_{2U} + K_{*2П} \Delta_{0П}) - K_{*2П} \Delta_{2П} K_{*1П} \Delta_{0П} = K_{*0U} K_{*1П} \Delta_{2П} \Delta_{2U}.$$

При $K_{*0U} > 0$, $K_{*1П} > 0$, $\Delta_{2U} > 0$, $\Delta_{2П} > 0$ выполняется требование $H_2 > 0$. Подставив выражение H_2 в H_3 , получим

$$H_3 = K_{*1П}^2 K_{*0U} \Delta_{2П} (\Delta_{0П} \Delta_{2U} - \Delta_{0U} \Delta_{2П}).$$

Анализ зависимостей H_3 от режима, приведенных на рис. 8.31, показывает, что условие $H_3 > 0$ выполняется для всех параметров, кроме напряжения (при $\Pi = \Delta U_r$ $H_3 = \Delta_{0U} \Delta_{2U} - \Delta_{0U} \Delta_{2П} \equiv 0$).

Выполнение трех условий устойчивости вырожденного уравнения для разных режимных параметров иллюстрируется табл. 8.5, где знаком «+» отмечено выполнение, а знаком «-» — невыполнение соответствующего условия.

Как видно из табл. 8.5, все условия устойчивости одновременно выполняются только при введении в закон регулирования комбинированного параметра Π_K , представляющего собой линейную комбинацию параметров режима:

$$\Pi_K = -U_r + a_n \Pi,$$

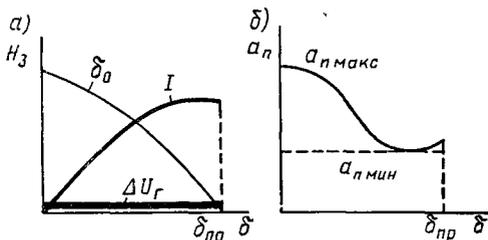


Рис. 8.31. Характеристики вспомогательного уравнения:

a — связь определителя H_3 с параметрами начального режима; b — изменение долевых коэффициентов

Условие	Параметры				
	ΔU_r	I	δ_0	$\delta_{пр}$	$\Pi_k = -U_r + a_n \Pi$
$\Delta_{2\Pi} > 0$	+	-	-	-	+
$\Delta_{0\Pi} > 0$	+	+	+	+	+
$H_3 > 0$	-	+	+	+	+
					при условии $0 < a_n < a_{n\max}$

где a_n — коэффициент долевого участия второго параметра, Π — любой режимный параметр, кроме напряжения.

Условие $\Delta_{2\Pi_k} = \Delta_{2U} + a_n \Delta_{2\Pi} > 0$ вследствие неравенств $\Delta_{2U} > 0$, $\Delta_{2\Pi} > 0$ приводит к требованию

$$a_n < \Delta_{2U} / |\Delta_{2\Pi}|.$$

Так как $H_{3U} = 0$, то условие $H_{3\Pi_k} = H_{3\Pi} > 0$ выполняется при любом $a_n > 0$. Поэтому требования к a_n формулируются в виде неравенства

$$0 < a_n < a_{n\max} = \Delta_{2U} / |\Delta_{2\Pi}|.$$

Так как Δ_{2U} и $\Delta_{2\Pi}$ зависят от режима, то и a_n зависит от режима (рис. 8.31, б). Для того чтобы комбинированный параметр Π_k удовлетворял всем расчетным режимам ($0 \leq \delta_0 < \delta_{пр}$), он должен быть найден из условия

$$0 < a_n < (a_{n\max})_{\min} = [\Delta_{2U} / |\Delta_{2\Pi}|]_{\min}.$$

После выбора структуры стабилизации (числа производных, вида комбинированного режимного параметра, долевого участия каждого из параметров режима в выбранном комби-

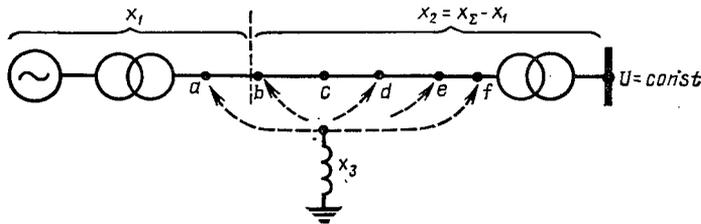


Рис. 8.32. Схема исследуемой системы

нированном параметре) следует рассчитать области статической устойчивости для определения рабочей настройки. Опыт показал, что АРВ с. д. с синтезированным законом регулирования обеспечивает не только статическую устойчивость при высокой точности поддержания напряжения, но и большой, общий для всех режимов участок области устойчивости, что облегчает выбор рабочей настройки и улучшает качество переходных процессов.

Пример 8.1. На ЛЭП, связывающей станцию с системой неограниченной мощности (рис. 8.32), происходят короткие замыкания в точках a, b, \dots, e, f .

Установить, как будет меняться характер переходного процесса $\delta = f(t)$ в зависимости от места короткого замыкания (точки a, b, \dots, e, f) и значения реактивного сопротивления x_3 , за которым происходят короткие замыкания.

Решение. Переходный процесс будет определяться начальными условиями и соотношением характеристик мощности в нормальном P^I и аварийном P^{III} режимах:

$$P^I = \frac{EU}{x_{\Sigma}} \sin \delta; \quad P^{III} = \frac{EU}{x_{12 \text{ ав}}} \sin \delta = \frac{EU}{x_{\Sigma}} k \sin \delta,$$

где

$$k = 1/[1 + x_1(x_2 - x_1)/(x_2 x_3)].$$

Предположим, что x_3 меняется, принимая значения $0; 0,1x_{\Sigma}; 0,25x_{\Sigma}; 0,5x_{\Sigma}; x_{\Sigma}; 5x_{\Sigma}; 10x_{\Sigma}; 100x_{\Sigma}$. Построим зависимости k от x_3 и места его подключения l (рис. 8.33). Соответствующие характеристики мощности $P = \varphi(\delta)$ показаны на рис. 8.34, а зависимости $\delta = f(t)$ — на рис. 8.35.

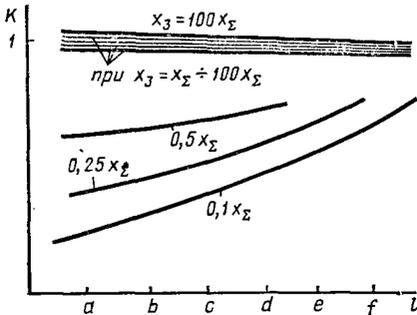


Рис. 8.33. Влияние удаленности (x_3) и места (a, b, \dots, e, f) короткого замыкания на линии длиной l

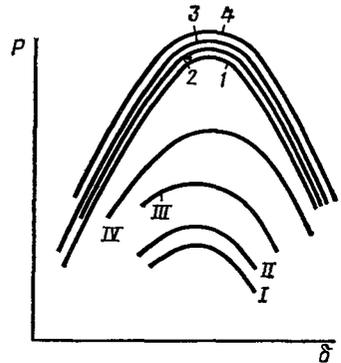


Рис. 8.34. Характеристики $P = \varphi(\delta)$ при больших (I—IV) и малых (1—4) возмущениях в различных точках

Рассмотрение полученных соотношений показывает, что при уменьшении возмущения (больших x_3) влияние места приложения на характер возмущения уменьшается и при малых возмущениях практически исчезает.

Пример 8.2. Станция работает через ЛЭП на приемную систему неограниченной мощности (рис. 8.36). Параметры станции и ЛЭП следующие (в относительных единицах): $x_{дв} =$

$$= 1,5; \quad E_q = 1,07; \quad U = 1; \quad T_J = 15 \text{ с.}$$

1. Проверить устойчивость системы, найти частоту и период собственных колебаний в различных режимах без учета с учетом демпферного момента.
2. Построить зависимость изменения угла во времени при отклонении ротора на 1° от положения установившегося режима и $\delta_0 = 0, 60, 90$ и 100° .

Решение. Выяснить характер переходного процесса, установив, устойчива или неустойчива система при малом возму-

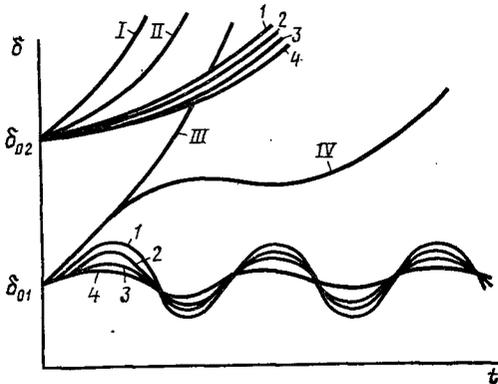


Рис. 8.35. Характеристики $\delta = f(t)$ для условий, отвечающих рис. 8.33 и 8.34

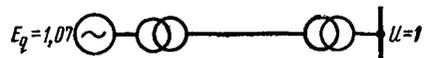


Рис. 8.36. Схема системы

нении, а также построить кривые переходного процесса можно, пользуясь методом малых колебаний.

Рассмотрим сначала протекание процесса без учета демпферного момента [$P_d = 0$]. Чтобы определить изменение угла во времени, найдем корни уравнения (8.15), которые будут (при $c_1 > 0$)

$$p_{1,2} = \pm j \sqrt{c_1/T_J} = \pm j\gamma.$$

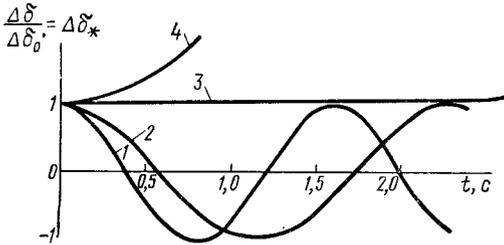


Рис. 8.37. Изменение угла $\Delta\delta_* = f(t)$ без учета демпферной обмотки:

1 — для $\delta_0 = 0^\circ$; 2 — $\delta_0 = 60^\circ$; 3 — $\delta_0 = 90^\circ$; 4 — $\delta_0 = 100^\circ$

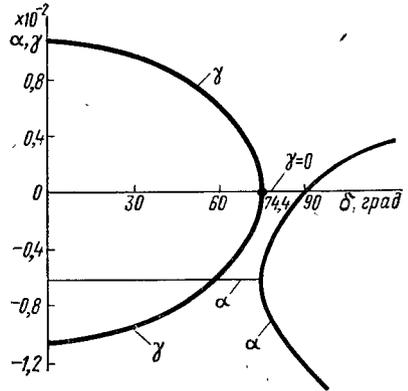


Рис. 8.38. Изменение корней $p_{1,2} = -\alpha \pm j\gamma$

Произвольные постоянные A_1 и A_2 в уравнении (8.15а) определяются из начальных условий: $\Delta\delta_{t=0} = \Delta\delta_0$, $(d\delta/dt)_{t=0} = 0$. Первое и второе условия соответственно позволяют определить

$$A_1 + A_2 = \Delta\delta_0; \quad p_1 A_1 + p_2 A_2 = 0.$$

Решим их совместно: $A_1 = A_2 = \Delta\delta_0/2$. При этом получим, что

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 (e^{j\gamma t} + e^{-j\gamma t})/2 = \Delta\delta_0 \cos \gamma t,$$

т. е. система устойчива.

При $\delta > 90^\circ$, $c_1 < 0$ и $p_{1,2} = \pm \gamma$

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 (e^{\gamma t} + e^{-\gamma t})/2,$$

т. е. система неустойчива; $\delta = 90^\circ$ — критический случай, т. е. граница находится между устойчивым и неустойчивым режимами.

Рассмотрим конкретные режимы. Пусть угол $\delta_0 = 0$. Синхронизирующая мощность

$$c_1 = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta_0 = \frac{1,07 \cdot 1}{1,5} \cos 0^\circ = 0,713.$$

В соответствии с (8.18) угловая частота колебаний

$$\gamma = \sqrt{0,713 \cdot 314/15} = 3,86 \text{ рад/с, при этом } f = 0,614 \text{ Гц.}$$

В соответствии с (8.20) период колебаний

$$T = 1/0,614 = 1,63 \text{ с.}$$

Уравнение движения ротора генератора

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \cos 3,86t,$$

где t выражено в секундах.

График $\Delta\delta_* = f(t)$ для $\delta_0 = 0$ представлен на рис. 8.37 (кривая 1). При $\delta_0 = 60^\circ$ имеем следующие значения: $c_1 = 0,356$, $\gamma = 2,73$ рад/с, $f = 0,435$ Гц, $T = 2,3$ с, $\Delta\delta = \Delta\delta_0 \cos 2,73t$, где t выражено в секундах. График $\Delta\delta_* = f(t)$ также показан на рис. 8.37 (кривая 2).

При $\delta_0 = 90^\circ$ рассмотрение режима практически не имеет смысла, так как он является граничным и малейшее возмущение уводит систему к углам $\delta > 90^\circ$ или $\delta < 90^\circ$.

Рассмотрим режим при $\delta_0 = 91^\circ$. В этом режиме синхронизирующая мощность близка к нулю и, следовательно, $\gamma \approx 0$, $\rho_{1,2} \approx 0$, $T \approx \infty$. Подставив $\rho_{1,2} = 0$ в уравнение движения, получим

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 (e^{\alpha t} + e^{\alpha t})/2.$$

Таким образом, при $\delta_0 \approx 90^\circ$ угол δ меняется настолько медленно, что первое время можно считать его сохраняющим начальное значение (рис. 8.37, кривая 3).

Сопоставляя кривые $\Delta\delta_*(t)$ при различных начальных углах δ_0 , можно видеть, что с увеличением δ_0 , т. е. передаваемой мощности, период собственных колебаний растет, достигая бесконечно большого значения при $\delta_0 = 90^\circ$.

При $\delta_0 = 100^\circ$ синхронизирующая мощность

$$c_1 = (1,07/1,5) \cos 100^\circ = -0,124.$$

Корни характеристического уравнения

$$\rho_{1,2} = \pm \sqrt{0,124 \cdot 314/15} = \pm 1,61.$$

Изменение угла $\Delta\delta(t)$ в этом случае описывается уравнением

$$\Delta\delta_* = \Delta\delta_0 (e^{1,61t} + e^{-1,61t})/2,$$

где t выражено в секундах. График $\Delta\delta_* = f(t)$ нанесен также на рис. 8.37 (кривая 4). Угол непрерывно возрастает, что определяется первым слагаемым уравнения движения. Второе слагаемое экспоненциально затухает с постоянной времени $T = 1/1,61 = 0,62$ с, оказывая заметное влияние лишь в начальный период процесса.

Рассмотрим процесс с учетом демпферного момента. При $P_d \neq 0$ корни уравнения (8.15) определяются выражением (8.17). Характер изменения вещественной и мнимой частей корней для данного конкретного случая показан на рис. 8.38. Мнимая часть становится равной нулю в режиме, когда подкоренные выражения в (8.17) меняют свой знак, т. е. при

$$c_1/T_J = P_d^2/(4T_J^2) \text{ или } \delta_0 = \arccos [(P_d^2/4T_J) (x_{d\Omega}/E_q U)].$$

В рассматриваемом случае мнимая часть становится равной нулю при $\delta_0 = 74,4^\circ$. При углах δ_0 , меньших $74,4^\circ$, характер затухания $\Delta\delta_*$ периодический, так как $\gamma \neq 0$; при углах, больших $74,4^\circ$, — аperiodический, так как $\gamma = 0$.

Для периодического процесса уравнение (8.15а) можно привести к виду, более удобному для проведения расчетов:

$$\Delta\delta_* = (\Delta\delta_0/\gamma) e^{-\alpha t} \sqrt{a_0} \sin(\gamma t + \psi_0),$$

где

$$\psi_0 = \arctg(\gamma/\alpha); \quad \alpha_0 = c_1/T_J.$$

Кривые переходного процесса, построенные для режимов при различных δ_0 , приведены на рис. 8.39. В режимах при $\delta_0 = 0$ и $\delta_0 = 60^\circ$ характер процесса периодический, однако

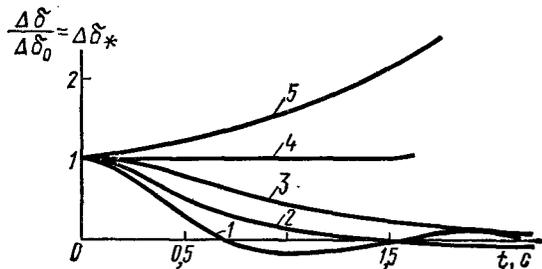


Рис. 8.39. Изменение угла $\Delta\delta_* = f(t)$ при расчете с учетом демпферной обмотки:

1 — для $\delta_0 = 0$; 2 — $\delta_0 = 60^\circ$; 3 — $\delta_0 = 80^\circ$; 4 — $\delta_0 = 90^\circ$; 5 — $\delta_0 = 100^\circ$

период колебаний больше, чем в тех же режимах, но рассмотренных без учета демпферного момента. При $\delta_0 = 80^\circ$ процесс аperiodический. При $\delta_0 \approx 90^\circ$ угол также остается почти неизменным на протяжении рассматриваемого времени, как и при отсутствии демпферного момента. При $\delta_0 = 100^\circ$ угол непрерывно возрастает, однако действие демпферного момента приводит к замедлению роста угла.

Пример 8.3. На станции, работающей через электропередачу на систему неограниченной мощности, установлены регуляторы возбуждения пропорционального типа с регулированием по отклонению напряжения. Параметры системы и исходного режима следующие: $x_{d\Sigma} = 1,486$; $x'_{d\Sigma} = 0,848$; $x_c = 0,504$; $T_J = 7,5$ с; $T'_d = 2,85$ с; $T_e = 2$ с; $K_{OU} = 30$; $P_0 = 1$; $E_{q0} = 1,972$; $U_c = 1$; $\delta_0 = 49^\circ$.

Найти предел статической устойчивости.

Решение. Упростим задачу, заменив полное напряжение его поперечной составляющей ($U_{Гq0} \approx U_{Гq0}$):

$$U_{Гq0} = \frac{x_c}{x_{d\Sigma}} E_{q0} + \frac{x_{d\Sigma} - x_c}{x_{d\Sigma}} U_c \cos \delta_0 = \frac{0,504}{1,486} 1,972 + \frac{1,486 - 0,504}{1,486} \cdot 1 \cdot 0,656 = 1,102.$$

Далее запишем [после преобразования (8.12)]

$$K_{OU \text{ макс}} = \frac{x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma} - x_c} \frac{1 + T_e^2 \omega_0 (c_2 T'_d + c_1 T_e) / [T_J (T'_d + T_e)]}{1 + T_e (x_{d\Sigma} - x_c) x'_{d\Sigma} / [T'_d (x'_{d\Sigma} - x_c) x_{d\Sigma}]}$$

Приравняв это значение заданному ($K_{OU} = 30$), раскрывая выражения c_1 , c_2 и подставляя в них

$$E_q = E_{q0} - K_{OU} (U_{Гq} - U_{Гq0}) = \frac{E_{q0} + K_{OU} \{U_{Гq0} - [(x_{d\Sigma} - x_c) / x_{d\Sigma}] U_c \cos \delta\}}{1 + K_{OU} x_c / x_{d\Sigma}},$$

получаем квадратное уравнение относительно $\cos \delta$, откуда находим предельно допустимый (по условиям самораскачивания) угол $\delta_{\text{пр}}$. Подставим значения параметров системы и заданного режима:

$$\begin{aligned} & \left[30 \frac{(1,486 - 0,504) \cdot 1^2 \cdot (2,85 + 2)}{(1,486 + 0,504 \cdot 30) \cdot 1,486} + 1^2 \frac{1,486 - 0,848}{1,486 \cdot 0,848} \cdot 2,85 \right] \cos^2 \delta_{\text{пр}} - \\ & - \frac{1(1,972 + 30 \cdot 1,102)(2,85 + 2)}{1,486 + 0,504 \cdot 30} \cos \delta_{\text{пр}} - 1^2 \cdot \frac{1,486 - 0,848}{1,486 \cdot 0,848} \cdot 2,85 + \\ & + \left[30 \left(1 + \frac{2}{2,85} \cdot \frac{1,486 - 0,504}{0,848 - 0,504} \cdot \frac{0,848}{1,486} \right) \frac{0,848 - 0,504}{1,486 - 0,848} - 1 \right] \frac{7,5(2,85 + 2)}{2^2 \cdot 314} = 0; \end{aligned}$$

или

$$\cos^2 \delta_{\text{пр}} - 1,41 \cos \delta_{\text{пр}} - 0,0176 = 0,$$

откуда $\cos \delta_{\text{пр}} = -0,046$ и $\delta_{\text{пр}} = 92,6^\circ$.

Характеристика $P = f(\delta)$ определяется выражением

$$P = (E_q U_c / x_{d\Sigma}) \sin \delta = (E_q / 1,486) \sin \delta.$$

Далее получим

$$E_q = \frac{1,972 + 30 \left(1,102 - \frac{1,486 - 0,504}{1,486} \cdot 1 \cdot \cos \delta \right)}{1 + (0,504 / 1,486) 30} = \frac{35,03 - 19,8 \cos \delta}{11,2}.$$

Изменяя значения δ , найдем серию значений E_q и построим зависимость $P = \varphi(\delta)$, согласно которой предельному значению угла $\delta_{\text{пр}} = 92,6^\circ$ отвечает мощность $P_{\text{пр}} \approx 2,18$.

Пример 8.4. На станции, работающей через дальнюю электропередачу на систему неограниченной мощности по условию обеспечения статической устойчивости, проводится настройка АРВ п. д., которые реагируют на отклонение напряжения и имеют для стабилизации гибкую отрицательную обратную связь, охватывающую возбудитель.

Найти область настроечных параметров $T_e = T_{e0} + K_{Гос}$, K_{OU} , которые обеспечивают статическую устойчивость регулируемой электрической системы, работающей в режиме $\delta_0 = 90^\circ$, $U_{Г} = U = 1$ и имеющей следующие параметры (синхронная машина неявнополюсная): $x_d = 0,7$; $x_d' = 0,3$; $T_{d0} = 5$ с; $T_J = 17$ с; $x_c = 1,5$.

Решение. Применим метод D -разбиения, подробно изложенный выше. Примем форму записи исходных уравнений, в которой время выражается в секундах, углы — в радианах, мощность, напряжение, сопротивления — в относительных единицах. В этом случае числовое значение T_J (с), входящее в расчетные уравнения, определяется как

$$T_J = \frac{1}{2\pi f} T_J = 17/314 = 0,054.$$

Расчеты кривой D -разбиения будем проводить по параметрическим уравнениям. Частные производные, входящие в эти уравнения, вычисляются по упрощенным выражениям при $U_{Г} = U = 1$, $\delta_0 = 90^\circ$:

$$c_1 = 0; \quad c_2 = (x_d - x_d') / (x_{d\Sigma} x_{d\Sigma}') = (0,7 - 0,3) / (2,2 \cdot 1,8) = 0,101;$$

$$c_3 = x_d / (x_{d\Sigma} x_c) = 0,7 / (2,2 \cdot 1,5) = 0,212; \quad b_1/b_3 = (x_c / x_{d\Sigma}) \cos \delta_{Г} =$$

$$= (1,5/2,2) 0,943 = 0,647; \quad \cos \delta_{Г} = \sqrt{1 - (x_d / x_{d\Sigma})^2} = \sqrt{1 - (0,7/2,2)^2} = 0,948;$$

$$T_d' = T_{d0} x_{d\Sigma}' / x_{d\Sigma} = 5 \cdot 1,8/2,2 = 4,1.$$

Подставляя эти значения, получим расчетные выражения:

$$T_e = -4,1 [1 - 0,101 / (0,054\omega^2)];$$

$$K_{OU} = - \frac{0,054^2 \omega^4 + 4,1^2 \omega^2 (0,054\omega^2 - 0,101)^2}{0,647 \cdot 0,054\omega^2 (0,054\omega^2 - 0,212)} = - \frac{0,0834\omega^2 + 482 (0,054\omega^2 - 0,101)^2}{0,054\omega^2 - 0,212}.$$

Построим кривую D -разбиения при изменении ω от 0 до $\pm\infty$ по следующим характеристическим точкам:

а) $\omega = 0$; $T_e \rightarrow \infty$; $K_{OU} = 23,2$;

б) $\omega_1^2 = 0,101/0,054 = 1,87$ ($\omega_1 = 1,37$); $T_e = 0$; $K_{OU} = -0,0834 \cdot 1,87 / (0,054 \cdot 1,87 - 0,212) = 1,4$;

в) точка разрыва $\omega_2^2 = 0,212/0,054 = 3,93$ ($\omega_2 = 1,98$);

$$T_e = -4,1 [1 - 0,101 / (0,054 \cdot 3,93)] = -2,15; \quad K_{OU} \rightarrow \pm\infty;$$

г) $\omega \rightarrow \infty$; $T_e = -4,1$; $K_{OU} \rightarrow -\infty$;

д) частоты, соответствующие экстремумам кривой D -разбиения, при $0 < \omega < \omega_2$ и $\omega_2 < \omega < \infty$ находятся из условия $d^2 K_{OU}(\omega) / d\omega^2 = 0$:

$$\omega_3^2 = 1,77 \quad (\omega_3 = 1,33); \quad \omega_4^2 = 6,08 \quad (\omega_4 = 2,46).$$

Найдем координаты точек кривой D -разбиения при ω_3 и ω_4 :

при $\omega_3 = 1,33$ $T_e = -4,1 [1 - 0,101 / (0,054 \cdot 1,77)] = 0,226$; $K_{OU} = - [0,0834 \cdot 1,77 + 482 (0,054 \cdot 1,77 - 0,101)^2] / (0,054 \cdot 1,65 - 0,212) = 1,4$;

при $\omega_4 = 2,46$ $T_e = -4,1 [1 - 0,101 / (0,054 \cdot 6,08)] = -2,84$; $K_{OU} = - [0,0834 \cdot 6,08 + 482 (0,054 \cdot 6,08 - 0,101)^2] / (0,054 \cdot 6,08 - 0,212) = -218$.

Найдем особые прямые в точках $\omega = 0$ и $\omega \rightarrow \infty$ и нанесем их на плоскость настроечных параметров совместно с характерными точками:

а) $\omega = 0$, $a_n = 0$, $K_{OU} = -(c_1/c_3)(b_3/b_1) = 0$; б) $\omega \rightarrow \infty$, $a_0 = 0$, $T_e = 0$.

Штриховка кривой D -разбиения проводится в соответствии с правилами [3] в зависимости от знака главного определителя:

$$\Delta = -(b_1/b_3)\omega(T_J\omega^2 - c_1)(T_J\omega^2 - c_3) = -0,0347\omega^3(0,054\omega^2 - 0,212).$$

Так как при $0 < \omega < \omega_2$ величина $\Delta > 0$, то при возрастании ω от 0 до ω_2 кривая D -разбиения штрихуется слева. При $\omega > \omega_2$ знак главного определителя меняется и часть кривой D -разбиения при $\omega_2 < \omega < \infty$ штрихуется справа*.

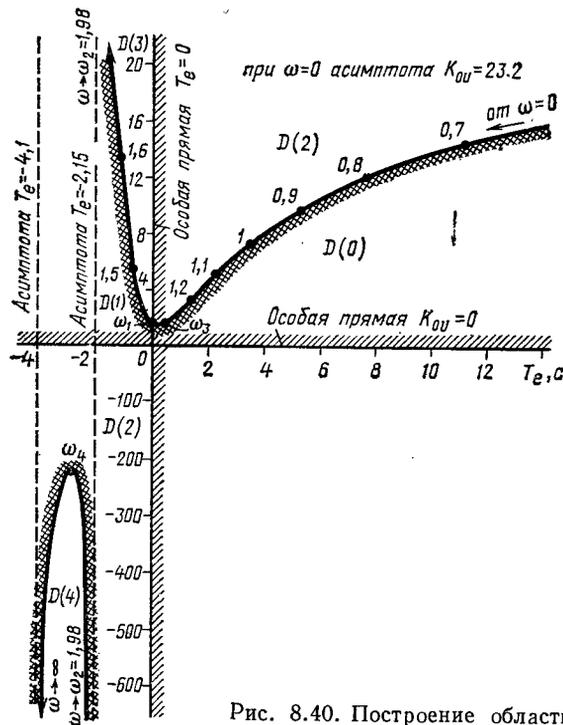


Рис. 8.40. Построение области устойчивости

Заметим, что граница области статической устойчивости проведена на участке $0 < \omega < \omega_2$ очень грубо и при необходимости ее уточнения следует провести дополнительные расчеты, взяв несколько промежуточных значений в этом диапазоне (на рис. 8.40 на кривой D -разбиения нанесены точки с частотами $\omega = 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,5; 1,6$).

Пример 8.5. Станция работает через электрическую передачу на систему неограниченной мощности. В **ы** б р а т ь настройку АРВ с. д., реагирующего на отклонение, первую и вторую производные тока линии.

Решение. Предположим, что характеристическое уравнение системы и его коэффициенты известны:

$$D(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a^3 p^2 + a_4 p + a_5 + (\Delta_{2I} p^2 + \Delta_{0I})(K_{0I} + K_{1I} p + K_{2I} p^2) = 0.$$

Допустим, что значения коэффициентов заданы в зависимости от режима, т. е. $a_i = \varphi_i(\delta_{л})$, где $i = 1, \dots, 5$; $\Delta_{2I} = \varphi_{2I}(\delta_{л})$ и $\Delta_{0I} = \varphi_{0I}(\delta_{л})$, где $\delta_{л}$ — угол между векторами напряжений в начале линии и приемной системы.

Минимальный коэффициент усиления по отклонению тока выбирается из условия обеспечения положительности свободного члена характеристического уравнения:

$$a_5 + K_{0I} \Delta_{0I} \geq 0 \quad \text{или} \quad K_{0I \text{ мин}} = -a_5 / \Delta_{0I} = -\varphi_5(\delta_{л}) / \varphi_{0I}(\delta_{л}).$$

* Так как главный определитель является нечетной функцией $\Delta(\omega) = -\Delta(-\omega)$, то при изменении знака ω (от $-\infty$ до 0) направление штриховки меняется и кривая D -разбиения оказывается заштрихованной дважды.

Для любого значения $\delta_{л}$ можно подсчитать значение K_{0I} . При заданных параметрах системы для угла $\delta_{л} = 90^\circ$ значение $K_{0I \text{ мин}} = 0,5$.

Если K_{0I} известно, то в $D(p)$ имеется только две неизвестные: K_{2I} и K_{1I} . После подстановки $p = j\omega$ и преобразований, аналогичных приведенным в примере (8.4), получим:

$$K_{1I} = (a_0\omega^4 - a_2\omega^2 + a_4)/(\Delta_{2I}\omega^2 - \Delta_{0I}); \quad K_{2I} = -(a_1\omega^4 - a_3\omega^2 + a_5)/[\omega^2(\Delta_{2I}\omega^2 - \Delta_{0I})] + K_{0I}/\omega^2.$$

Вычисленные границы D -разбиения представлены на рис. 8.41. Проверка по критерию Рауса показала, что зона, ограниченная кривой D -разбиения, является областью устойчивости. Настройка регулятора должна быть выбрана внутри общей для всех режимов области (на рис. 8.41 она заштрихована).

Пример 8.6. Дальняя электропередача имеет промежуточную подстанцию, на которой установлены синхронные компенсаторы (рис. 8.42). Схема замещения имеет следующие параметры (рис. 8.43): $x_{л} = 0,552$; $x_c = 4$; $y_{12} = y_{23} = 1,81$; $y_{22} = y_{22} = 1,56$; $x_T = 0,40$.

При $\Delta x = x_d' = 7,93$ значения $y_{13} = 1,01$; $y_{14} = 0,067$.

При $\Delta x = x_d' = 1,20$ значения $y_{13} = 0,880$; $y_{14} = 0,304$.

При $\Delta x = 0$ значения $y_{13} = 0,585$; $y_{14} = 0,805$.

Параметры исходного режима: $P_0 = 1,1$; $U_1 = U_2 = U_3 = 1$; $\delta_0 = 37,4^\circ$.

О п р е д е л и т ь пределы передаваемой мощности по условию статической устойчивости при различных способах регулирования возбуждения синхронного компенсатора: а) при отсутствии регулирования, б) при АРВ п. д., в) при АРВ с. д., обеспечивающем постоянство напряжения на выходах синхронного компенсатора, г) то же, что и в п. в), но с учетом действия корректора напряжения, поддерживающего неизменным уровень напряжения в точке присоединения синхронного компенсатора к линии.

Напряжение в начале и конце линии принять постоянным.

Решение. Предельная по условию статической устойчивости передаваемая мощность при регулировании возбуждения, соответствующем п. а) и в) условия задачи, может быть найдена как максимум характеристики мощности:

$$P = y_{13}U_1U_3 \sin \delta_{13} + y_{14}U_1E_x \sin \delta_{14}.$$

При отсутствии регулирования возбуждения $E_x = E_q$ и при определении взаимных проводимостей y_{13} и y_{14} синхронный компенсатор замещается синхронным сопротивлением, т. е. $\Delta x = x_d'$.

Величина E_q определяется из условия баланса реактивных мощностей в узловой точке:

$$Q_{с.к} = 2Q_{л} = 2(y_{22}U_2^2 - y_{12}U_1U_2 \cos \delta_0).$$

Определим э. д. с.:

$$E_q = U_2 + (x_T + x_d) Q_{с.к} / U_2.$$

Построим характеристику мощности P_1 на рис. 8.44. Предел передаваемой мощности при отсутствии АРВ на синхронном компенсаторе равен 1,16.

Проведя аналогичные расчеты при АРВ п. д. ($E_x = E'$; $\Delta x = x_d'$) и АРВ с. д. без корректора напряжения ($E_x = U_{с.к}$; $\Delta x = 0$), найдем пределы мощности P_2 и P_3 , соответственно равные 1,20 и 1,28.

При АРВ с. д. с корректором напряжения, поддерживающим неизменным уровень напряжения в точке присоединения синхронного компенсатора к линии, характеристика мощности может быть построена по формуле

$$P = y_{12}U_1U_2 \sin \delta.$$

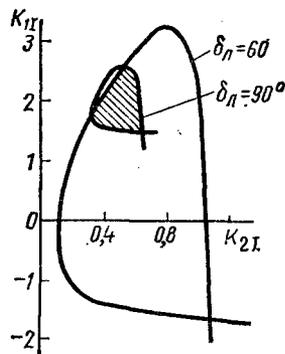


Рис. 8.41. Области устойчивости

Максимум характеристики P_4 имеет место при угле $\delta = 90^\circ$.

Предел устойчивости найдем по критерию устойчивости $dP/d\delta > 0$. Дифференцируя выражение мощности по углу δ при постоянстве э. д. с. E_x , в данном случае равной $U_{c.к.}$, получаем

$$dP/d\delta = 2y_{13}U_1U_3 \cos 2\delta + y_{14}U_1U_{c.к.} \cos \delta, \text{ где } U_{c.к.} = U_2 + x_T Q_{c.к.}/U_2.$$

Построив характеристику синхронизирующей мощности, найдем предельный по условию статической устойчивости угол, отвечающий $dP/d\delta = 0$, и соответствующую ему мощность $P_4 = 1,56$. Эта мощность и есть предельная по условиям статической устойчивости пе-

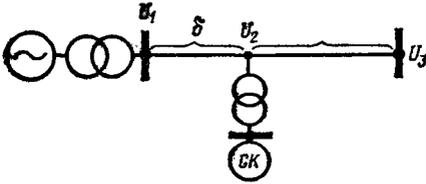


Рис. 8.42. Рассматриваемая система

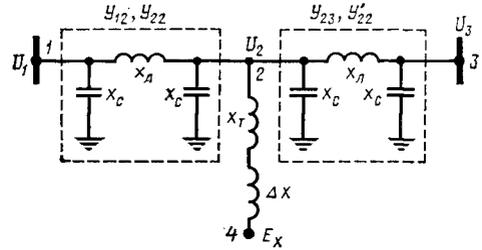


Рис. 8.43. Схема замещения

редаваемая мощность при установке на синхронных компенсаторах АРВ с. д., которые обеспечивают предел статической устойчивости, определяющийся постоянством напряжения на выводах синхронного компенсатора. Предполагается при этом, что с помощью корректора напряжения поддерживается неизменный уровень напряжения на линии в точке присоединения синхронного компенсатора.

Сопоставляя пределы передаваемой мощности при различных АРВ, можно видеть, что эффективным регулированием возбуждения промежуточных синхронных компенсаторов является АРВ с. д. с корректором.

Пример 8.7. Станция работает через электропередачу на систему неограниченной мощности. Схема системы показана на рис. 8.45. Параметры генератора и трансформаторов: $x_d = 1,8$; $x'_d = 0,461$; $x_{T1} = 0,197$; $x_{T2} = 0,142$; $Q_{02} = Q_0 = 0,362$.

О п р е д е л и т ь запас статической устойчивости системы в следующих случаях: а) при отсутствии АРВ, б) при АРВ п. д., в) при АРВ с. д.

Решение. а) При отсутствии АРВ предел передаваемой мощности определяется исходя из условия постоянства синхронной э. д. с.: $E_q = \text{const}$; $U_0 = 1$.

Суммарное сопротивление электропередачи

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_{T1} + x_L/2 + x_{T2}.$$

Подставляя значения сопротивлений, найдем $x_{d\Sigma} = 2,49$.

Синхронная э. д. с.

$$E_q = \sqrt{(U_0 + Q_0 x_{d\Sigma}/U_0)^2 + (P_0 x_{d\Sigma}/U_0)^2} = 2,39.$$

Предел передаваемой мощности

$$P_{\text{пр}} = E_q U_0 / x_{d\Sigma} = 0,96.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости

$$K_3 = (P_{\text{пр}} - P_0)/P_0 = 0,65.$$

б) При установке на генераторах АРВ п. д. предел передаваемой мощности и устойчивости можно приближенно определить, исходя из постоянства э. д. с. за переходным сопротивлением: $E' = \text{const}$. В этом случае

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_{T1} + x_{л/2} + x_{T2} = 1,15;$$

$$E' = \sqrt{(U_0 + Q_0 x'_{d\Sigma} / U_0)^2 + (P_0 x'_{d\Sigma} / U_0)^2} = 1,57; \quad P_{пр} = E' U_0 / x'_{d\Sigma} = 1,365;$$

$$K_3 = (P_{пр} - P_0) / P_0 = 1,34.$$

в) АРВ с. д. в зависимости от настройки обеспечивают постоянство напряжения либо на выводах генераторов, либо в начале линии. Определим предел устойчивости, принимая $U_r = \text{const}$.

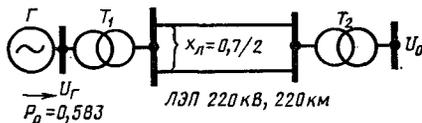
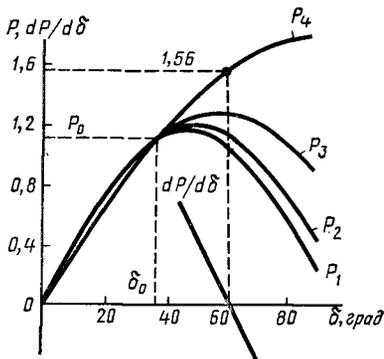


Рис. 8.45. Схема системы

Рис. 8.44. Характеристики мощности при различных способах регулирования:

P_1 — без АРВ; P_2 — АРВ п. д.; P_3 — АРВ без корректора; P_4 — то же, с корректором напряжения

Суммарное сопротивление системы

$$x_c = x_{T1} + x_{л/2} + x_{T2} = 0,689.$$

Напряжение на выводах генераторов

$$U_r = \sqrt{(U_0 + Q_0 x_c / U_0)^2 + (P_0 x_c / U_0)^2} = 1,31.$$

Предел передаваемой мощности

$$P_{пр} = U_r U_0 / x_c = 1,90.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости

$$K_3 = (P_{пр} - P_0) / P_0 = 2,26.$$

Сопоставляя результаты расчетов, можно видеть, что при АРВ п. д. обеспечивается запас статической устойчивости на 0,69 больше, чем без АРВ. При АРВ с. д. запас увеличивается еще на 0,92. Повышение предела передаваемой мощности обусловлено тем, что АРВ полностью (АРВ с. д.) или частично (АРВ п. д.) исключает влияние собственных сопротивлений генераторов на предел передаваемой мощности и (при сделанных допущениях) на статическую устойчивость.

Пример 8.8. Показать, что в системе «две станции — нагрузка» при рассмотрении взаимной устойчивости двух станций без анализа их движения относительно синхронной оси опускается часть корней характеристического уравнения.

Решение. Представим $\Delta\delta_{12}$ как разность $\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2$, тогда

$$T_{J1} p^2 \Delta\delta_1 + a_1 \Delta\delta_1 - a_1 \Delta\delta_2 = 0; \quad T_{J2} p^2 \Delta\delta_2 + a_2 \Delta\delta_1 - a_2 \Delta\delta_2 = 0.$$

Подставив в первое уравнение $\Delta\delta_2$, найденное из второго уравнения, получим

$$\Delta\delta_1 [(T_{J1} T_{J2} / a_1) p^4 + T_{J2} p^2 - T_{J1} (a_2 / a_1) p^2] = 0,$$

откуда $\Delta\delta_1 = 0/D(p)$, где $D(p) = p^2[p^2 + (a_1/T_{J1} - a_2/T_{J2})] = 0$.

Характеристическое уравнение имеет вид

$$p^3 (p^2 + \alpha) = 0.$$

Переход к учету взаимного движения (от учета движения относительно синхронной оси) означает, что два корня $p^2 = 0$ опущены.

Пример 8.9. Н а й т и условия устойчивости системы, состоящей из четырех станций, представленных неизменными э. д. с., приложенными за сопротивлениями Δx .

Решение. Составим систему из четырех дифференциальных уравнений для малых колебаний:

$$T_{jj} \frac{d^2 \Delta \delta_j}{dt^2} + \frac{\partial P_j}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial P_j}{\partial \delta_{13}} \Delta \delta_{13} + \frac{\partial P_j}{\partial \delta_{14}} \Delta \delta_{14} = 0, \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

Вычитая из первого уравнения ($j = 1$) поочередно остальные три уравнения, получим:

$$d^2 \Delta \delta_{12} / dt^2 + \alpha_{12}^{12} \Delta \delta_{12} + \alpha_{13}^{12} \Delta \delta_{13} + \alpha_{14}^{12} \Delta \delta_{14} = 0; \quad \alpha_{12}^{13} \Delta \delta_{12} + d^2 \Delta \delta_{13} / dt^2 + \alpha_{13}^{13} \Delta \delta_{13} + \alpha_{14}^{13} \Delta \delta_{14} = 0;$$

$$\alpha_{12}^{14} \Delta \delta_{12} + \alpha_{13}^{14} \Delta \delta_{13} + d^2 \Delta \delta_{14} / dt^2 + \alpha_{14}^{14} \Delta \delta_{14} = 0,$$

где α — относительные ускорения.

Характер изменения относительных углов может быть установлен на основании исследований корней определителя:

$$\begin{vmatrix} p^2 + \alpha_{12}^{12} & \alpha_{13}^{12} & \alpha_{14}^{12} \\ \alpha_{12}^{13} & p^2 + \alpha_{13}^{13} & \alpha_{14}^{13} \\ \alpha_{12}^{14} & \alpha_{13}^{14} & p^2 + \alpha_{14}^{14} \end{vmatrix} = 0.$$

Этот определитель раскрывается в виде характеристического уравнения

$$p^6 + a_2 p^4 + a_4 p^2 + a_6 = 0,$$

где

$$a_2 = \alpha_{12}^{12} + \alpha_{13}^{13} + \alpha_{14}^{14};$$

$$a_4 = \begin{vmatrix} \alpha_{13}^{13} & \alpha_{14}^{13} \\ \alpha_{13}^{14} & \alpha_{14}^{14} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \alpha_{12}^{12} & \alpha_{14}^{12} \\ \alpha_{12}^{14} & \alpha_{14}^{14} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \alpha_{12}^{12} & \alpha_{13}^{12} \\ \alpha_{12}^{13} & \alpha_{13}^{13} \end{vmatrix}; \quad a_6 = \begin{vmatrix} \alpha_{12}^{12} & \alpha_{13}^{12} & \alpha_{14}^{12} \\ \alpha_{12}^{13} & \alpha_{13}^{13} & \alpha_{14}^{13} \\ \alpha_{12}^{14} & \alpha_{13}^{14} & \alpha_{14}^{14} \end{vmatrix}.$$

Для того чтобы характеристическое уравнение, имеющее только четные степени оператора p , привести к нормальному виду, сделаем подстановку $p^2 = \rho$, тогда будем иметь вспомогательное уравнение

$$\rho^3 + a_2 \rho^2 + a_4 \rho + a_6 = 0,$$

которое можно исследовать любым известным методом. Если корни вспомогательного уравнения будут вещественными и отрицательными, то корни характеристического уравнения будут мнимые ($p = \sqrt{\rho}$), а взаимные углы $\Delta \delta_{jn}$ после возмущения будут совершать незатухающие колебания. Любые другие (кроме отрицательных) корни приведут к появлению нарастающих слагающих углов $\Delta \delta_{jn}$. Следовательно, для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы корни вспомогательного уравнения были вещественными, отрицательными. Для того чтобы в системе, состоящей из четырех станций, это условие выполнялось, необходимы следующие соотношения между коэффициентами уравнения: $a_2 > 0$; $a_4 > 0$; $a_6 > 0$; $a_2 a_4 - a_6 > 0$.

Более подробно рассмотрение этой задачи можно найти в литературе [1, с. 376—383].

Контрольные вопросы

- 8.1. Какие существуют подходы к определению статической устойчивости? Что в них общего?
- 8.2. Перечислите особенности задач анализа и синтеза при рассмотрении устойчивости.
- 8.3. Каковы физические особенности переходных процессов, обуславливающих статическую устойчивость?
- 8.4. Что такое линеаризация по первому приближению и при изучении каких процессов она применяется?
- 8.5. Чем отличается характер изучаемых движений при рассмотрении статической и динамической устойчивости?
- 8.6. В чем суть двух основных теорем Ляпунова?
- 8.7. С помощью табл. 8.1 дайте анализ расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости и относительного движения ротора генератора.
- 8.8. Что такое критерии устойчивости? Какие из них являются прямыми, какие — косвенными? (критерий Гурвица? критерий Михайлова? метод D -разбиения?)
- 8.9. Как составляется характеристическое уравнение?
- 8.10. Как определяются максимальные и минимальные значения коэффициента усиления?
- 8.11. Как математически в характеристическом уравнении отражается эффект автоматического регулирования?
- 8.12. Как влияет положительное и отрицательное демпфирование на характер переходного процесса и на предел устойчивости?
- 8.13. Почему предел статической устойчивости нерегулируемой системы определяется при $c_1 = 0$ ($E_q = \text{const}$), а не при $c_2 = 0$ ($E'_q = \text{const}$)? Казалось бы, в связи с появлением свободных токов при движении ротора определение при $E'_q = \text{const}$ более логично.
- 8.14. Каков примерный порядок значений частоты и периода собственных колебаний (при движении «в малом»)?
- 8.15. Каковы природа и математические признаки самораскачивания?
- 8.16. Каковы природа и математические признаки самовозбуждения?
- 8.17. Прокомментируйте табл. 8.1, указав условия каждого вида неустойчивости.
- 8.18. Покажите, что все практические критерии равносильны условию прохождения через нуль свободного члена характеристического уравнения.
- 8.19. В каких случаях при анализе статической устойчивости методом малых колебаний учитывается только относительное движение и соответственно относительная устойчивость?
- 8.20. Почему в критерий устойчивости двух станций $\alpha_{12} = 0$ входят постоянные инерции, хотя обычно «устойчивость в малом» от инерции не зависит?
- 8.21. В чем особенности расчета методом малых колебаний сложной системы, рассматриваемой как позиционная?

Темы рефератов

1. Совмещение расчетов статической устойчивости с расчетами нормального режима.
2. Ляпунов и его теория устойчивости, ее приложение к техническим и электроэнергетическим задачам.
3. Оценка статической устойчивости по практическим критериям и методам малых колебаний.
4. Влияние демпфирования и переходных электромагнитных процессов на предел статической устойчивости.

§ 9.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧИ

В электрической системе, состоящей из ряда станций и нагрузок, можно различать изменения частоты:

а) быстрые и средние (мгновенные или текущие), происходящие во время переходного процесса, связанные с изменением скорости генераторов, возникающие под влиянием небалансов вращающих моментов на валах генераторов;

б) относительно медленные (средние значения), характерные для системы в целом, определяющиеся эквивалентной инерцией всех машин системы и действием автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ) и автоматических регуляторов частоты (АРЧ)*.

Быстрые изменения. При балансе момента (мощности) на валу каждого генератора электрической системы, т. е. при $M_k = M_{\text{мех } k}$, где $k = 1, 2, \dots, n$, и вращении ротора каждого k -го генератора со скоростью $\omega_k = \omega_0$ все э. д. с., напряжения и токи изменяются с частотой $f_0 = \omega_0/(2\pi)$.

Однако во время работы системы появляется расхождение в изменениях мощности, потребляемой нагрузкой, и мощности, отдаваемой генераторами: появляется небаланс момента $\Delta M = M_{\text{мех}} - M$ на валу каждого генератора, изменение его скорости $\Delta \omega_k = \omega_k - \omega_0 = d\delta_k/dt$ и соответственно мгновенной частоты $\Delta f_k = f_k - f_0$.

На этой первой стадии переходного электромеханического процесса ни регуляторы частоты вращения, ни регуляторы частоты еще не действуют. Распределение между станциями системы дополнительной нагрузки, появившейся в результате возмущения, происходит *в первый момент в соответствии с э. д. с. и относительной удаленностью станции* от места возмущения (т. е. взаимной проводимости между э. д. с. станцией и точкой приложения возмущения). *Затем генераторы начинают замедляться в соответствии со значениями полученных набросов мощности и инерционностью агрегатов*, причем машины, получившие наибольший относительный наброс, замедляются более интенсивно, что приводит к увеличению взаимных углов и перераспределению дополнительной нагрузки между станциями.

Таким образом, на первой стадии процесса происходит снижение (или повышение) средней частоты в системе, при этом возникают качания генераторов относительно друг друга и одновременно за счет синхронных связей происходит

* В предыдущих изданиях книги в отношении первичного регулятора турбины употреблялся термин «регулятор скорости», измененный в настоящем издании в соответствии с ГОСТом на «регулятор частоты вращения». При этом имеется в виду частота вращения агрегата, которая может отличаться от электрической частоты в системе, регулируемой «регуляторами частоты».

выравнивание мгновенных значений частоты отдельных станций. Именно эта первая стадия процесса, как правило, определяет далее устойчивость или неустойчивость системы. *Обычные регуляторы, воздействующие на первичный двигатель, здесь неэффективны, если только они не снабжены специальными быстродействующими устройствами*, и в этом случае могут влиять на устойчивость системы.

Медленные изменения. При достижении частотой значения, выходящего за пределы зоны нечувствительности регуляторов частоты вращения (первичные регуляторы), последние вступают в действие, перераспределяя дополнительную нагрузку в соответствии с величинами, обратными статизму регуляторов. В зависимости от возмущения регуляторы вступают в работу через 0,3—2 с после наброса мощности.

На последующей стадии процесса влияние оказывают более медленно действующие регуляторы частоты (вторичные регуляторы), которые изменяют уставки первичных регуляторов одной или группы станций, регулирующих частоту, в результате чего последние принимают на себя небаланс мощности, возникший в системе. При этом частота в системе при наличии достаточного резерва мощности восстанавливается до нормального значения.

Время действия применяемых регуляторов частоты составляет несколько десятков секунд. Поэтому процесс регулирования частоты можно считать очень медленным по отношению к электромеханическому процессу и действию регуляторов скорости, на основании чего эти процессы в ряде случаев можно рассматривать отдельно.

Таким образом, при математическом описании процесса изменения частоты в системе после появления в ней какого-либо небаланса мощности ΔP приходится выделить:

1) относительно быстрые электромагнитные и электромеханические процессы, при которых ни регуляторы частоты вращения, ни регуляторы частоты не действуют;

2) электромеханические процессы средней скорости, происходящие при действии регуляторов частоты вращения;

3) медленные процессы, происходящие при действии регуляторов частоты.

Однако выделение трех стадий и отдельное рассмотрение процессов с учетом только наиболее характерных для данной стадии факторов можно проводить лишь условно.

При рассмотрении второй и третьей стадий переходного процесса можно исходить из предположения, что установившееся отклонение частоты в системе зависит от баланса мощности [см. (3.7а) и (3.7)] и что оно связано с отклонением мощности соотношением

$$\Delta f_k = \Delta M / k_k \approx -\Delta P / k_k, \quad (9.1)$$

где коэффициент пропорциональности k_k имеет размерность МВт/Гц. Иногда его называют энергией регулирования. Чем больше k_k , тем меньше отклонение частоты при данном изменении мощности. Величину, обратную k_k , называют *статизмом агрегата*: $1/k_k = \delta_k$. Появляющиеся при изменениях нагрузки мгновенные изменения частоты сначала различны для каждого генератора. После переходного процесса они становятся одинаковыми: $\Delta f_1 = \Delta f_2 = \Delta f_k = \Delta f$. Суммарное изменение мощности в системе можно представить как $\Delta P = k_{\Sigma} \Delta f$, где k_{Σ} — суммарная энергия регулирования.

Распространение изменения частоты по системе от одной ее узловой точки к другой происходит по сложному закону, математическое выражение которого здесь рассматриваться не будет*.

Характер «выравнивания» частоты, изменение ее значений в отдельных точках системы после возмущения зависят главным образом от параметров элементов, входящих в систему. Представление о процессе выравнивания можно полу-

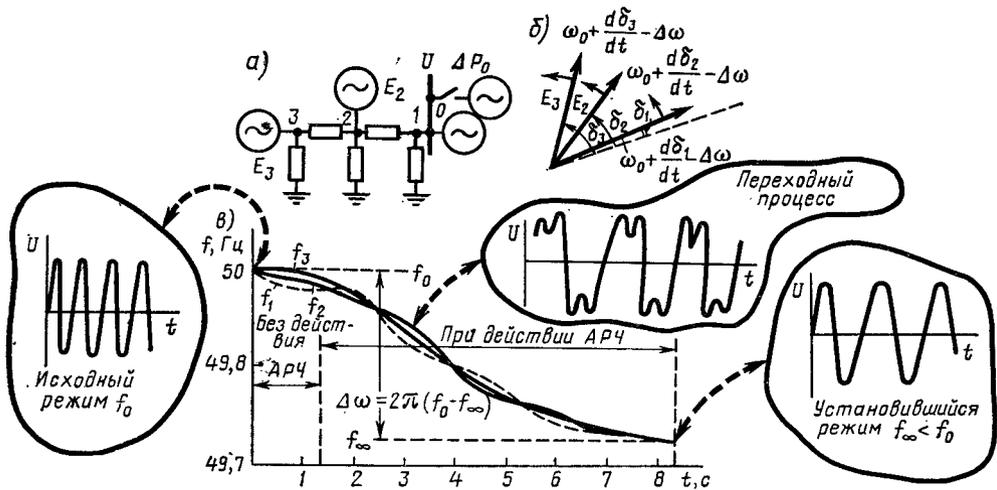


Рис. 9.1. Характер изменения частоты в системе при набросе мощности ΔP_0 в точке 0 схемы: а — схема системы; б — векторная диаграмма; в — зависимость $f = \Phi(t)$; f_0 — исходное значение частоты; f_∞ — установившееся значение частоты (после наброса); t_1, t_2, t_3 — частоты, замеренные в точках 1, 2, 3 системы

чить, рассматривая рис. 9.1, где показаны значения частоты, замеренные в разных точках системы после возмущения. Очевидно, что в начале процесса и в конце его частота (f_0, f_∞) одинакова и постоянна во всех точках системы. В действительности это постоянство — только условное допущение. В системе, в ее установившемся режиме, непрерывно происходят малые возмущения (изменяются нагрузки, мощности генераторов под действием случайных толчков и регуляторов скорости или ручного регулирования) и непрерывно изменяется частота. Примерный характер таких изменений частоты показан на рис. 9.2.

Колебания суммарной нагрузки системы P_{Σ} , вызывающие изменения частоты электрических систем, можно разделить на три группы.

Быстрые колебания имеют период 1—3 с и амплитуду меньше 0,001 P_{Σ} системы. Эти колебания в основном зависят от малых перемещений роторов генераторов, т. е. от электромеханических процессов в генераторах системы. Колебания частоты, вызванные колебаниями нагрузки, обычно составляют сотые доли герц (0,01—0,02 Гц).

* Заметим только, что здесь происходит сложение нескольких (k) синусоидально изменяющихся величин, имеющих разные частоты. Это приводит во время перехода от f_0 до f_∞ к появлению гармонических слагающих в токах и напряжениях системы. Однако это обычно не учитывается (см. гл. 14).

Средние колебания суммарной нагрузки имеют период колебаний порядка десятков секунд (10—30 с) и амплитуду $0,01 P_{\text{дн}}$. Эти колебания вызваны нерегулярными изменениями мощности, происходящими в процессе работы потребителей электрической системы (тяга, печи и др.). Колебания частоты, вызванные этими колебаниями нагрузки, достигают десятых долей герц (0,1—0,2 Гц).

Медленные колебания происходят с периодом порядка минут и десятков минут. Они вызваны изменениями суммарной нагрузки, связанными

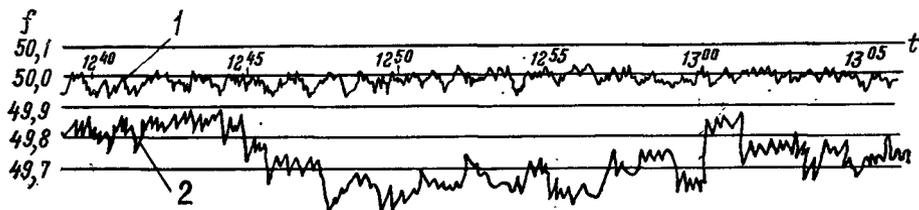


Рис. 9.2. Оциллограммы частоты в установившемся режиме системы:
1, 2 — при автоматическом и ручном регулировании частоты соответственно

с временем суток, атмосферными явлениями, технологией производства и изменениями условий быта (включение плиток, печей и т. д.).

Качество частоты. Частота — общесистемный (единый во всей системе в установившемся режиме) параметр. Частота не должна длительно изменяться более чем на $\pm 0,1$ Гц, хотя кратковременно разрешается работа с отклонением до $\pm 0,2$ Гц. Отклонение частоты происходит при нарушении баланса потребляемой и вырабатываемой активной мощности при отсутствии резерва (см. гл. 3). Если в энергосистеме не соблюдается постоянство частоты, то это ведет к большим убыткам:

с уменьшением частоты возрастает требуемая мощность промышленных потребителей (или снижается их производительность). Для двигателей в угольной промышленности, электрической тяге и т. д. значение $k = 3 \div 10$. Исследования, проведенные во Франции, показали, что снижение частоты на 0,5 Гц и длительная работа системы при этой частоте равносильна (грубо) уменьшению на 5 мин рабочего дня при соответствующем уменьшении продукции. При 6—7-часовом рабочем дне это означает уменьшение выпуска продукции по стране в целом не менее чем на 1—1,4%;

растут потери в энергосистеме, особенно связанные с потерями в стали; изменение частоты влияет на режим станций и систем, вызывая перераспределение мощностей с отклонением их от оптимальных. Это особенно неприятно, если энергосистема страны продает мощность системам других стран, так как отклонения частоты будут вызывать изменения перетоков мощности, что приведет к нарушению соответствующих контрактов на поставку электроэнергии. Поэтому, например, французская энергосистема (EdF), работающая параллельно со всеми системами соседних стран, жестко держит номинальную частоту*;

* Альтернативой хорошего поддержания частоты в этом случае является создание «вставок» постоянного тока, т. е. линий постоянного тока с «нулевой длиной». Это дорого и очевидно, может быть только нецелесообразным вынужденным решением. Особенно если в разделенных частях системы допускается различная частота, приводящая к убыткам.

значительные отклонения частоты неблагоприятно сказываются на работе первичных двигателей (турбин) и при глубоких изменениях могут привести к их повреждениям*.

Все отмеченное требует внимания к поддержанию частоты.

§ 9.2. ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Существующие в электроэнергетических системах виды регулирования, о которых упоминалось выше, обладают свойствами, дополняющими друг друга. Времена их действия обычно различаются не меньше чем на порядок.

Первичный регулятор — АРЧВ (автоматический регулятор частоты вращения) — в течение нескольких секунд устраняет малые отклонения нагрузки (от 1 до 4%) с периодом меньше 1 мин. Он, воздействуя на мощность турбины, компенсирует возмущение в соответствии со своей статической характеристикой.

Вторичный регулятор — АРЧ (автоматический регулятор частоты), — регулируя частоту в системе, обычно осуществляет ее астатическое регулирование, производя его за счет параллельного смещения статической характеристики АРЧВ, проводимого механизмом изменения частоты. Вторичное регулирование в отличие от первичного, которое использует только ограниченные аккумулирующие способности котла и промежуточного перегревателя, должно быть более мощным и должно перекрывать более значительные колебания нагрузки (бóльшие 4% по амплитуде при периоде более 1 мин). Это достигается одновременным воздействием на паропроизводительность котлоагрегата и регулирующие клапаны турбины. При этом необходимо учитывать реальные возможности агрегата: состояние его оборудования, допустимую скорость нагружения, которая определяется температурными напряжениями турбины, давлением пара и т. д. Учет указанных параметров и функций может выполнять обычная вычислительная машина или специальное командное устройство, участвующее таким образом в процессе регулирования частоты. Для этого процесса существенно также то обстоятельство, что постоянные времени котлоагрегата и турбины значительно различаются. Поэтому, когда при быстрых значительных открытиях клапанов расход пара увеличивается, перед турбиной падает давление. Чтобы при этом не нарушилась нормальная работа котлоагрегата и турбины, к существующим регуляторам добавляется еще один «регулятор давления до себя» (РДС). Он ограничивает снижение давления пара перед турбиной, препятствуя росту скорости и увеличению открытия регулирующих клапанов турбины**. *Функция РДС, следовательно, заключается в поддержании постоянства давления пара перед турбиной при воздействии, если это необходимо, на ре-*

* Так, ряд фирм, изготовляющих турбины, считают допустимым длительное снижение частоты на 1% и на 90 мин на 2% (по отношению к номинальной). Возможная длительность работы зависит от конструкции турбины, в частности длины лопаток. В СССР принята автоматика, снижающая нагрузку турбин при понижении частоты (при 47 Гц она срабатывает через 30 с). Для большинства турбин, изготовленных в Советском Союзе, диапазон допустимых длительных изменений частоты лежит в пределах 49,0—50,5 Гц.

** В настоящее время применение регуляторов «до себя» резко ограничивается из-за недостатков, оказываемых на работу агрегата в системе. Они запрещены для использования при непрерывной работе и разрешены только для работы в «ждущем режиме». Включение их при аварии на энергоблоке определяется системными требованиями.

гулирующие клапаны турбины; он прикрывает их, если давление упало, и открывает, если возросло.

Третичный регулятор, действующий наиболее медленно, осуществляет распределение мощности между блоками или станциями в соответствии с оптимальными экономическими характеристиками. Обычно его действие не рассматривается в процессе изменения частоты Δf . Однако если частота системы достаточно длительно отличается от номинальной, то на регуляторе станции появляется воздействие $\Delta f \lambda$, где λ — статизм по частоте, МВт/Гц, и этот регулятор дает сигнал на третичный регулятор, который, таким образом, оказывается вовлеченным в процесс изменения частоты в регулируемой системе.

Протекание переходного процесса изменения частоты в системе зависит от поведения механизмов собственных нужд тепловых электростанций (питательные и циркуляционные насосы, вентиляторы, дымососы), производительность которых сильно зависит от частоты. От ее изменений

зависит работа котлоагрегата, причем понижение частоты до так называемого критического значения (42—45 Гц) приводит к прекращению его работы, так как подача воды в котел приостанавливается. Все это приводит к тому, что при снижении частоты падает мощность блока в соответствии с динамическими характеристиками, показанными на рис. 9.3. Существенно, что в течение 15—30 с с начала изменения частоты мощность не изменяется*, а следует за сбросом (изменением) частоты с запаздыванием, достигая установившегося значения через 1—2 с после того, как восстановится частота. Изменение частоты в системе связано с поведением нагрузки $[P_H = \varphi(f, t)]$, так как именно небалансом мощностей генерации и нагрузки ($\Sigma P_G - \Sigma P_H$) определяется в первую очередь характер переходного процесса.

При изменении частоты в системе реактивная мощность нагрузки меняется заметно, а это приводит к изменению уровня напряжения во всей системе и возможности появления лавины напряжения. Таким образом, изменение частоты и мощности в электроэнергетической системе — это сложный комплексный процесс, состоящий из большого числа различных подпроцессов, могущих в отдельных случаях прибавлять самостоятельное значение (см. § 9.2).

Это надо иметь в виду при рассмотрении изменений частоты, когда будет учтено только действие АРЧВ и АРЧ, приближенно выраженное одной объединенной структурной схемой. Однако качественная характеристика процесса, отражающая физику происходящих явлений и порядок количественных соотношений, в основном дает достаточно правильные для учебных целей представления. Для более подробного изучения рекомендуется специальная литература [9, 14, 15, 16, 20, 21, 22].

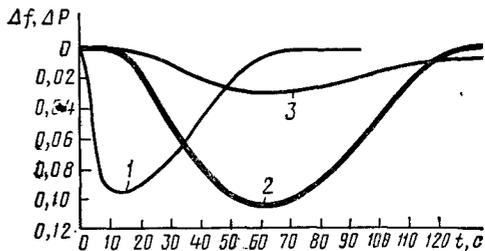


Рис. 9.3. Изменение мощности блока с прямоточным котлом при снижении и восстановлении (после автоматической частотной разгрузки) частоты:

1 — изменение частоты; 2 — изменение мощности при введении РДС; 3 — то же, при выведении РДС

* В обычных условиях это служит основанием для отдельного изучения вопросов статической устойчивости и изменений частоты.

*** § 9.3. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ
[МЕДЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ]**

Установившееся значение частоты при изменении нагрузки турбины, не имеющей регулирования скорости, можно найти способом пересечений характеристик $P = \varphi(f)$ и $P'_H = \varphi(f)$ так, как это показано на рис. 9.4.

При регулировании скорости агрегата регуляторами скорости характеристика активной мощности, отдаваемой генератором, будет получена в результате плавного перехода с одной характеристики $P = \varphi(f)$, построенной при постоянном впуске энергоносителя (постоянном открытии), на другую

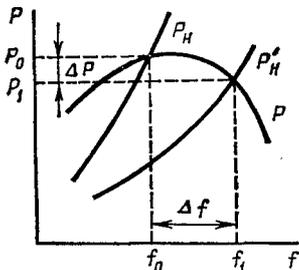
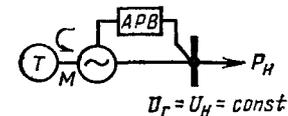


Рис. 9.4. Изменение частоты Δf при изменении нагрузки от P_0 до P_1 :

$P'_H(f)$ и $P_H(f)$ — частотные [$P_H = \varphi(f)$] характеристики нагрузки при $U_H = \text{const}$; $P(f)$ — характеристика нерегулируемой турбины

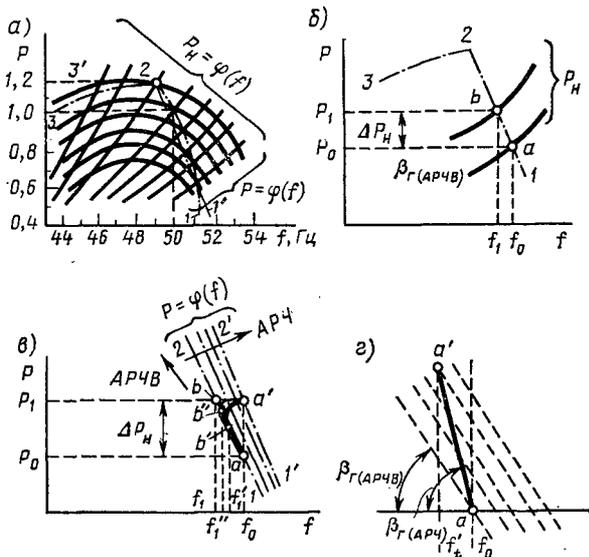


Рис. 9.5. Анализ действия регуляторов скорости и частоты:

a — семейство частотных характеристик нагрузки $P_H = \varphi(f)$ и частотных характеристик нерегулируемой турбины $P = \varphi(f)$; штрихпунктирной линией изображена характеристика регулируемой турбины; b — работа АРЧВ при набросе нагрузки; v — работа АРЧ, настроенного астатически при набросе нагрузки ΔP_H ; z — то же, но при статической настройке регулятора частоты

рис. 9.5, а). На участке 1-2 этой характеристики по мере уменьшения частоты мощность растет. Начиная с точки 2 после полного открытия направляющего аппарата* регулирование уже не может влиять на изменение мощности турбины, и в соответствии с ее естественной характеристикой происходит уменьшение мощности со снижением частоты. Участок 2-3 приблизительно можно заменить прямой 2-3', считая, что при постоянном максимальном открытии направляющего аппарата мощность турбины не изменяется.

При аварийных режимах, когда частота в системе снижается настолько, что регуляторы полностью открывают устройства впуска энергоносителя, процессы считаются протекающими согласно характеристике 2-3 или 2-3'. На участке 2-1

* В случае турбогенератора — после полного открытия клапана.

характеристику $P = \varphi(f)$ можно заменить прямой 2-1', считая, что $P = P_0 + \Delta P$. Характеристики нагрузки также приближенно можно заменить прямыми, полагая $P_n = P_{n0} + \Delta P_n$.

Построенные характеристики относятся к одиночному агрегату, имеющему регулятор скорости, действие которого отражено в данном анализе переходом рабочей точки с одной характеристики $P = \varphi(f)$ на другую. В результате получилась характеристика регулируемой турбины (1-2 на рис. 9.5, а). Если происходит изменение мощности нагрузки на ΔP_n , то, как это показано на рис. 9.5, б, в системе «генератор — нагрузка» установится новая частота f_1 , которая будет соответствовать пересечению новой характеристики нагрузки и характеристики генерации (точка б). Процесс перехода от а к б и соответственно от f_0 к f_1 начинается после того, как отклонение частоты превысит зону нечувствительности регулятора частоты вращения. Происходит он в течение 5—20 с.

Регулирование при обычных механических регуляторах частоты вращения начинается с запаздыванием 0,2—0,5 с. Однако инерционность сервомоторов, а также явления гидродара (у гидротурбин) и расширения пара в паровых объемах паровых турбин приводят к тому, что эффект регулирования проявляется через большой промежуток времени (1—3 с). Зона нечувствительности регуляторов составляет 0,05—0,3%.

После окончания действия регуляторов частоты вращения (АРЧВ) или в процессе их работы в действие вступают регуляторы частоты. Зона нечувствительности автоматического регулятора частоты (АРЧ) значительно меньше, чем регулятора частоты вращения (АРЧВ), но действует он значительно медленнее. Действие его отражается в смещении характеристик $P = \varphi(f)$ из положения 1-2 к положению 1'-2'. Это смещение занимает 10—40 с; оно может быть быстрее (характеристика $ab'a'$) или медленнее ($ab''a'$). В зависимости от быстроты вмешательства АРЧ отклонение частоты при данном набросе мощности может достигать значений f'_1, f''_1 или значения, определенного действием только регулятора частоты f_1 (рис. 9.5, в).

Показанная на рис. 9.5, в настройка АРЧ, когда он восстанавливает частоту до начального значения f_0 , является астатической. При параллельной работе нескольких энергетических систем, снабженных АРЧ, астатическая настройка невозможна (она привела бы к неопределенности в перераспределении мощностей по линиям связи).

При статической настройке* характеристики принимают вид, показанный на рис. 9.5, г. Действие АРЧ в этом случае не изменяет вида зависимости $P = \varphi(f)$, а меняет только ее наклон.

Таким образом, все рассуждения и математические соотношения, полученные для системы с АРЧВ, будут справедливы для системы с АРЧ, но при условии, что углы наклона $\beta_{Г(АРЧВ)}$ и $\beta_{Г(АРЧ)}$ (рис. 9.5, г) будут разными.

Построенные характеристики относятся к единичной турбине и единичной нагрузке. Однако они приближенно могут быть распространены на всю систему. Для этого под характеристикой $P_n = \varphi(f)$ надо понимать суммарную нагрузку системы $P_{н\Sigma}$, а под характеристикой $P_{Г} = \varphi(f)$ — суммарную генерирующую мощность всех агрегатов $P_{Г\Sigma}$.

При изменениях частоты около номинального значения нагрузка будет из-

* Обычно астатическую настройку частоты в системах не применяют.

меняться согласно характеристике $P_{н\Omega} = \varphi(f)$, которая имеет наклон касательной β или крутизну k :

$$\operatorname{tg} \beta_{н} = (\Delta P_{н\Omega} / \Delta f) (f_0 / P_{н0\Omega}) = k_{н} = 1 / \sigma_{н}.$$

Соответственно характеристика генерации имеет вид

$$\operatorname{tg} \beta_{г} = (\Delta P_{г\Omega} / \Delta f) (f_0 / P_{г0\Omega}) = k_{г} = 1 / \sigma_{г},$$

где $P_{н0\Omega}$ — суммарная нагрузка системы при номинальной частоте; $\sigma_{н} = 1/b_f$ и $\sigma_{г}$ — статизм нагрузки и агрегатов системы; b_f — регулирующий эффект нагрузки по частоте.

Суммарные характеристики нагрузок и генераторов системы, полученные при медленных изменениях частоты (статические характеристики), могут существенно отличаться от динамических характеристик системы, получаемых в условиях быстрого изменения частоты, хотя общий характер зависимостей и влияющих факторов обычно не изменяется.

Для системы изменение мощности при изменении частоты составляет

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{г\Sigma} - \Delta P_{н\Sigma},$$

где $\Delta P_{г\Sigma} = -(P_{г0\Omega} / \sigma_{г})(\Delta f / f_0)$; $\Delta P_{н\Sigma} = (P_{н0\Omega} / \sigma_{н})(\Delta f / f_0)$.
С учетом последних соотношений будем иметь

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{\Delta f}{f_0} \left(-\frac{P_{г0\Omega}}{\sigma_{г}} - \frac{P_{н0\Omega}}{\sigma_{н}} \right) = -\frac{\Delta f}{f_0} \frac{P_{н\Omega} (\sigma_{н} \alpha_{п} + \sigma_{г})}{\sigma_{н} \sigma_{г}}$$

$$\text{или } \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{н0\Omega}} = -\frac{\Delta f}{f_0} k_{\Sigma}.$$

Здесь $\alpha_{п} = P_{ном\Sigma} / P_{г\Sigma}$ — коэффициент резерва, показывающий, во сколько раз номинальная мощность всех работающих агрегатов превышает фактическую мощность системы; k_{Σ} — крутизна результирующей характеристики, причем

$$k_{\Sigma} = (\sigma_{н} \alpha_{п} + \sigma_{г}) / (\sigma_{н} \sigma_{г}).$$

Значение результирующего статизма системы, определяемое как

$$\sigma = 1/k_{\Sigma} = \sigma_{н} \sigma_{г} / (\sigma_{н} \alpha_{п} + \sigma_{г}) = 1/(\alpha_{п} k_{г} + k_{н}), \quad (9.2)$$

зависит от резерва и его распределения между агрегатами, от характеристик агрегатов системы и ее нагрузки. Значение σ характеризует установившееся значение частоты через некоторое время после возникновения небаланса мощности. На этом этапе процесса частота устанавливается через несколько секунд за счет действия суммарного регулирующего эффекта по частоте, а далее изменяется за счет действия автоматических регуляторов частоты и реакции котлоагрегатов на ее изменения. Для отдельных регулируемых агрегатов статизм $\sigma_{г} = 0,04 \div 0,05$; для нагрузки он примерно в 10 раз больше. Поэтому при повышении частоты результирующий коэффициент крутизны k_{Σ} определяется в основном крутизной характеристик агрегатов ($k_{\Sigma} \approx k_{г}$). Статизм системы σ будет изменяться в зависимости от значения резерва. Он будет тем меньше, чем больше резерв. В разное время суток статизм будет различен. Так, например, экспери-

ментально определенные и рассчитанные значения статизма для объединения, состоящего из четырех энергосистем, приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Режимы системы	Средний статизм энергосистемы				Средний статизм объединения	
	I	II	III	IV	расчетный	опытный
Утренний максимум	0,19	0,165	0,080	0,258	0,170	0,170
Дневной провал	0,04	0,246	0,072	0,060	0,126	0,109
Вечерний максимум	0,19	0,216	0,156	0,125	0,194	0,184
Ночной провал	0,14	0,150	0,189	0,310	0,158	0,160
Усредненное значение	0,14	0,197	0,124	0,187	0,162	0,155

Эквивалентная механическая постоянная времени также зависит от режима системы или объединения. Так, в одной системе эта постоянная изменялась в течение суток от 15 до 18 с зимой и от 13 до 15 с летом.

Весьма существенно зависимость k_{Σ} (и соответственно σ_{Σ}) от резерва системы α_p . При $\alpha_p \rightarrow \infty$ значение $k_{\Sigma} \rightarrow \infty$ и угол, характеризующий наклон результирующей характеристики, $\beta \rightarrow 90^\circ$. Это означает, что при очень большом резерве частота после переходного процесса восстановит свое прежнее значение.

При снижении частоты и отсутствии резерва ($\alpha_p = 1$) величина k_{Σ} определяется характеристиками нагрузки: $k_{\Sigma} \approx k_H = 2 \div 2,5$. При резерве мощности $k_{\Sigma} = 5 \div 10$ результирующий статизм различен в разное время года и суток, как это видно из табл. 9.1.

* § 9.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ

Изменения частоты, происходящие в электрической системе в переходном процессе, следовало бы определять с учетом действия АРЧВ и АРЧ, вступающих в работу с некоторым запаздыванием. Структурная схема замещения после некоторых упрощений должна была бы выглядеть так, как это показано на рис. 9.6, т. е. иметь передаточную функцию и соответственно характеристическое уравнение четвертого порядка. Пренебрегая точностью описания процесса, упростим задачу, объединив действие звеньев 2—6 и отразив их эффект одной постоянной времени T_{Σ} , которая при этом будет относиться к системе. Тогда изменение частоты в системе будет определяться теми же дифференциальными уравнениями, которые были получены (см. гл. 6) для определения изменений частоты вращения агрегата под действием только АРЧВ. Смысл параметров, входящих в уравнения, при этом изменится: их надо относить не к агрегату, а ко всей системе*.

Изменения частоты $\Delta f_* = \Delta f/f_0$ в системе, имеющей суммарную инерцию T_{Σ} , запишем как

$$T_{\Sigma} p \Delta f_* + P_n - P_T = 0, \quad (9.3)$$

* Далее индекс Σ , принятый в § 9.3, будет опускаться.

где $P_{\text{н}}$ — мощность нагрузки системы в процессе изменения частоты; $P_{\text{т}}$ — то же, эквивалентных турбин системы, причем $P_{\text{т}} = P_{\text{т0}} - P_{\text{рег}}$, $P_{\text{т0}}$ соответствует начальному ($t = 0$) моменту, в который появляется наброс мощности $\Delta P_0 = P_{\text{н0}} - P_{\text{т0}}$, связанный с изменением нагрузки $P_{\text{н0}}$.

Под действием регулирования (АРЧВ, АРЧ) мощность турбин изменяется

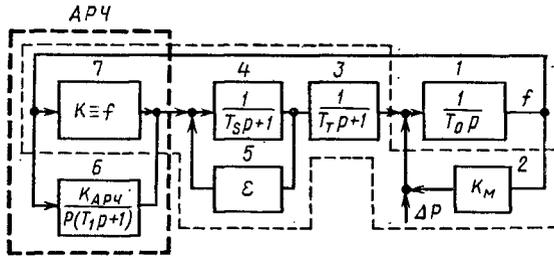


Рис. 9.6. Структурная схема регулирования частоты (АРЧ) и частоты вращения (АРЧВ):

1 — агрегат, постоянная инерции T_j ; 2 — блок саморегулирования агрегата; 3 — турбина (паровой объем); 4 — гидропривод клапанов, регулирующих выпуск пара; 5 — обратная связь; 6 — АРЧ; 7 — элемент измерения частоты

на величину $P_{\text{рег}}$. Для ее определения воспользуемся уравнением (6.31), обозначив в нем

$$P_{\text{т.ном}}/(\sigma T_s) = k_1, \quad 1/T_s = k_2.$$

Тогда вместо (6.31) запишем

$$pP_{\text{рег}} + k_2 P_{\text{рег}} + k_1 \Delta f_* = 0. \quad (9.4a)$$

Предположим, что мощность нагрузки, имеющей регулирующий эффект b_f , изменяется согласно известному (см. гл. 6) соотношению

$$P_{\text{н}} = P_{\text{н0}} (1 + b_f \Delta f_*).$$

С учетом последнего соотношения уравнение (9.3) при изменении мощностей на ΔP_0 примет вид

$$T_j p \Delta f_* + P_{\text{н0}} (1 + b_f \Delta f_*) = P_{\text{т0}} - P_{\text{рег}} = 0, \quad (9.4b)$$

или

$$T_j p \Delta f_* + P_{\text{н0}} b_f \Delta f_* - P_{\text{рег}} + \Delta P_0 = 0.$$

Из уравнения (9.4a) следует, что

$$P_{\text{рег}} = -k_1 \Delta f_* / (p + k_2),$$

откуда

$$T_j p \Delta f_* (p + k_2) + P_{\text{н0}} b_f \Delta f_* (p + k_2) + k_1 \Delta f_* + \Delta P_0 (p + k_2) = 0;$$

$$\Delta f_*(p) = - \frac{\Delta P_0 (p + k_2)}{T_J \left[p^2 + k_2 p + \frac{k_1}{T_J} + \frac{P_{H0} b_f (p + k_2)}{T_J} \right]} = - \frac{\Delta P_0 (p + k_2)}{T_J F(p)}, \quad (9.5)$$

где $F(p) = p^2 + p(k_2 + k'/T_J) + (k_1 + k_2 k')/T_J = 0$. Здесь $k' = b_f P_{H0}$.

Корни $F(p)$ имеют значения

$$p_{1,2} = - \frac{1}{2} \left(k_2 + \frac{k'}{T_J} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(k_2 + \frac{k'}{T_J} \right)^2 - \frac{k_1 + k_2 k'}{T_J}} =$$

$$= - \frac{1}{2} \left(k_2 + \frac{k'}{T_J} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(k_2 - \frac{k'}{T_J} \right)^2 - \frac{k_1}{T_J}} = -\alpha \pm j\Omega_{\text{соб}}, \quad (9.6)$$

где

$$\alpha = 0,5(1/T_s + 1/T_{J\sigma}); \quad T_{J\sigma} = T_J / (b_f P_{H0});$$

$$\Omega_{\text{соб}} = \sqrt{\frac{P_{\text{т.ном}}}{\sigma T_s T_J} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{J\sigma}} \right)^2}.$$

Переходя к временной зависимости, получим

$$\Delta f_*(t) = - \frac{\Delta P_0 \sigma}{P_{\text{т.ном}} + k' \sigma} - \left[(A + jB) e^{(-\alpha + j\Omega_{\text{соб}}) t} + \right.$$

$$\left. + (A - jB) e^{(-\alpha - j\Omega_{\text{соб}}) t} \right] \frac{\Delta P_0}{T_J},$$

$$\text{где } A = - \frac{\sigma T_J}{2(P_{\text{т.ном}} + k' \sigma)}; \quad B = \frac{1}{2\Omega_{\text{соб}}} \left[\frac{\sigma (T_J + k' T_s)}{2T_s (P_{\text{т.ном}} + k' \sigma)} - 1 \right].$$

Заменяя $A + jB = \sqrt{A^2 + B^2} e^{j\varphi}$; $A - jB = \sqrt{A^2 + B^2} e^{-j\varphi}$,

где $\varphi = \arctg(B/A)$, получим

$$\Delta f_*(t) = - \frac{-\Delta P_0 \sigma}{P_{\text{т.ном}} + k' \sigma} - e^{-\alpha t} \sqrt{A^2 + B^2} \frac{\Delta P_0}{T_J} \left[e^{j(\Omega_{\text{соб}} t + \varphi)} + e^{-j(\Omega_{\text{соб}} t + \varphi)} \right],$$

или

$$\Delta f_*(t) = \frac{-\Delta P_0 \sigma}{P_{\text{т.ном}} + P_{H0} b_f \sigma} - 2e^{-\alpha t} \sqrt{A^2 + B^2} \frac{\Delta P_0}{T_J} \cos(\Omega_{\text{соб}} t + \varphi). \quad (9.7)$$

Значение Δf ранее фигурировало в относительных единицах. Окончательное выражение может быть записано в виде

$$f(t) = f_0 \left[1 - \frac{\Delta P_0 \sigma}{P_{\text{т.ном}} + P_{H0} b_f \sigma} - 2e^{-\alpha t} \sqrt{A^2 + B^2} \frac{\Delta P_0}{T_J} \cos(\Omega_{\text{соб}} t + \varphi) \right]. \quad (9.8)$$

Результаты расчетов согласно (9.8) при различных значениях резерва ($\alpha_p = \text{var}$) и регулирующего эффекта нагрузки b_f показаны в виде группы кривых I на рис. 9.7.

С помощью полученных выражений может быть проанализировано влияние регулирующего эффекта нагрузки (рис. 9.7). Очевидно, что расчеты без учета

регулирующего эффекта нагрузки будут давать завышенные отклонения частоты от установившегося значения. При этом надо иметь в виду, что реальные частотные характеристики суммарной нагрузки энергосистем могут иметь нелинейную зависимость от частоты. Однако для диапазона практически важных изменений величин ΔP и Δf ее с достаточной степенью

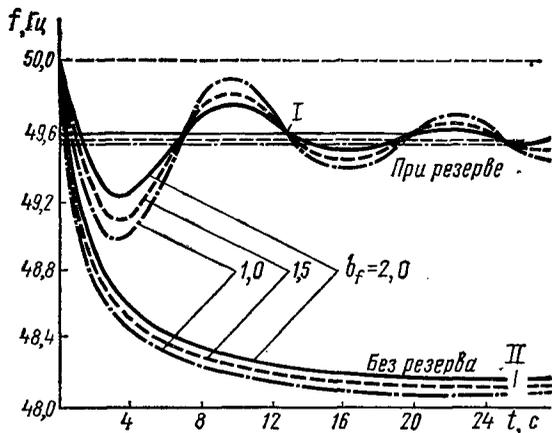


Рис. 9.7. Характер изменения частоты при различных регулирующих эффектах нагрузки ($b_f = 1 \div 2$)

точности можно считать линейной. Поэтому учет характеристик нагрузки в виде зависимости $P_H = P_{H0}(1 + b_f \Delta f_*)$ может считаться вполне приемлемым для практических расчетов изменений частоты в системах.

В установившемся режиме значение частоты

$$f_\infty = f_0 [1 - \Delta P_0 \sigma / (P_{T, \text{ном}} + P_{H0} b_f \sigma)],$$

при $b_f = 0$ отклонение частоты

$$\Delta f = \Delta P_0 \sigma f_0 / P_{T, \text{ном}}.$$

Работа без резерва (полное открытие). Выше предполагалось, что при набросе нагрузки (изменении на ΔP_0) турбина* под действием регулятора изменяет мощность на $P_{\text{рег}}$. Однако это изменение

невозможно, если вся мощность турбины уже использована, т. е. полностью открыт направляющий аппарат (полный выпуск). В этом случае протекание переходного процесса характеризуется уравнением (9.46) при $P_{\text{рег}} = 0^{**}$:

$$T_J \rho \Delta \dot{f}_* + P_{H0} b_f \Delta f_* + \Delta P_0 = 0, \quad (9.9)$$

откуда

$$\Delta f_* = [-\Delta P_0 / (P_{H0} b_f)] (1 - e^{-t/T_{J\Delta}}), \quad (9.10a)$$

где $T_{J\Delta} = T_J / (P_{H0} b_f)$.

Здесь момент инерции для системы определяется как

$$T_J = \Sigma T_{J\Delta} + \Sigma T_{JH},$$

где сумма моментов всех генераторов и турбин (с)

* Напомним, что уравнения (9.4a) и (9.46) и все последующие относились как к агрегату, так и ко всей системе в целом. В зависимости от того, что понималось под T_J и другими параметрами, эти уравнения могли характеризовать изменения частоты под действием АРЧВ и АРЧ (вторичный регулятор) совместно или только АРЧВ-агрегата.

** Процесс в этом случае соответствует участку характеристики 2-3 на рис. 9.10, в то время как уравнения (9.4,6) и (9.8) — участку 1-2.

$$T_{Ja} = \frac{2,74 [\Sigma (GD_r^2 + GD_r^2)] n^2 \cdot 10^{-3}}{\Sigma P_r}; \quad (9.106)$$

$$T_{JH} = \frac{2,74 T_{J*H} \Sigma P_H n_d^2 \cdot 10^{-3}}{\Sigma P_H}, \quad (9.10B)$$

где T_{J*H} — удельная постоянная инерции нагрузки, отнесенная к единице ее мощности при усредненной частоте вращения двигателей n_d .

Изменение частоты Δf_* имеет, согласно (9.10), экспоненциальный характер, показанный на рис. 9.7 в виде группы кривых II. Пример 9.1 иллюстрирует далее расчет для реальной системы. Если при этом нагрузка системы не будет зави-

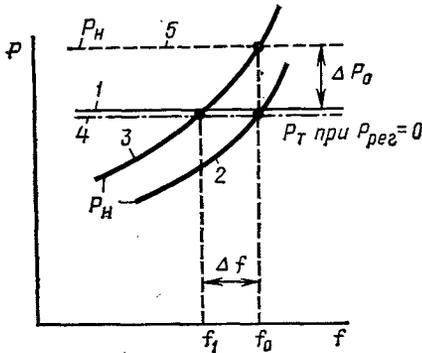


Рис. 9.8. Влияние регулирующего эффекта нагрузки на изменение частоты при набросе нагрузки ΔP_0 :

1 — мощность турбины при $P_T = \text{const}$ и $P_{per} = 0$;
 2 — характеристика нагрузки $P_H = \phi(f)$ при $b_f \neq 0$;
 3 — то же, при набросе мощности ΔP_0 ; 4 — то же, что и 2, но при $b_f = 0$; 5 — то же, что и 3, но при $b_f = 0$

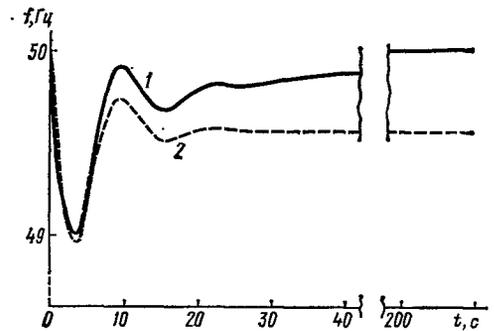


Рис. 9.9. Изменение частоты в энергосистеме после наброса мощности

сеть от частоты ($b_f = 0$), то режим установиться не сможет ($\Delta f_* \rightarrow \infty$). Физически это означает, что при отсутствии регулирования (или саморегулирования) система не могла бы работать, так как появление малейшего небаланса ΔP приводило бы к полному нарушению режима системы (рис. 9.8).

Учет влияния АРЧ уравнениями более высоких порядков, меняя количественные соотношения, обычно не изменяет общей качественной картины. Для примера на рис. 9.9 представлен график изменения частоты после наброса нагрузки при отдельном учете действия АРЧ (кривая 1). Там же для сравнения приведен график изменения частоты без учета АРЧ (кривая 2). Расчет производился при следующих значениях параметров: $T_J = 8$ с; $T_S = 5$ с; $T_2 = 60$ с; $\sigma_1 = 0,1$; $\sigma_2 = 0,05$; $\Delta P_0 = 0,1$.

Из рисунка видно, что в интервале времени от 0 до 5—10 с АРЧ оказывает еще малое влияние и характер процесса определяется в основном влиянием АРЧВ. В интервале 15—20 с и далее процесс изменения частоты определяется действием АРЧ. Приведенный пример показывает, что в ряде случаев действия АРЧВ и АРЧ могут рассматриваться независимо и накладываться друг на друга.

* § 9.5. НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЧАСТОТЫ (ЛАВИНА ЧАСТОТЫ)

Явление неустойчивости (лавины) частоты может возникать при неблагоприятном сочетании характеристик агрегатов и вспомогательных устройств (собственных нужд), определяющих выработку генераторами мощности, с одной стороны, и потребление мощности нагрузкой — с другой. В этих случаях *небольшое начальное снижение частоты может далее как бы усиливаться и приобретать лавинообразный характер*. Причина этого явления заключается в снижении мощности,

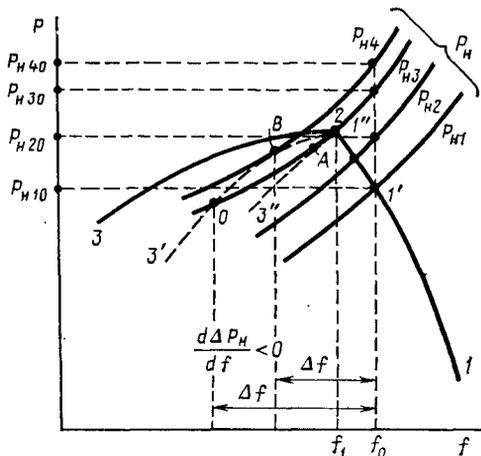


Рис. 9.10. Развитие лавины частоты:

1-2 — характеристика генератора при действии АРЧВ, АРЧ; 2-3 — характеристика генератора при полном открытии (естественная); 2-3' — характеристика генератора при полном открытии и снижении мощности с уменьшенном частоты из-за снижения мощности двигателей собственного расхода вспомогательного оборудования станции; 2-3'' — то же, что и 2-3', но при более резком влиянии вспомогательного оборудования; P_{H1} , P_{H10} — характеристика мощности и мощности нагрузки в нормальном режиме; P_{H2} , P_{H20} , P_{H3} , P_{H30} , P_{H4} , P_{H40} — то же, при набросе нагрузки; 1', 1'', 2 — точки устойчивого режима $d(P_H - P_T)/df > 0$; А, В — точки критического режима, приводящего к лавине частоты $d(P_H - P_T)/df = 0$; 0 — точка неустойчивого режима $d(P_H - P_T)/df < 0$

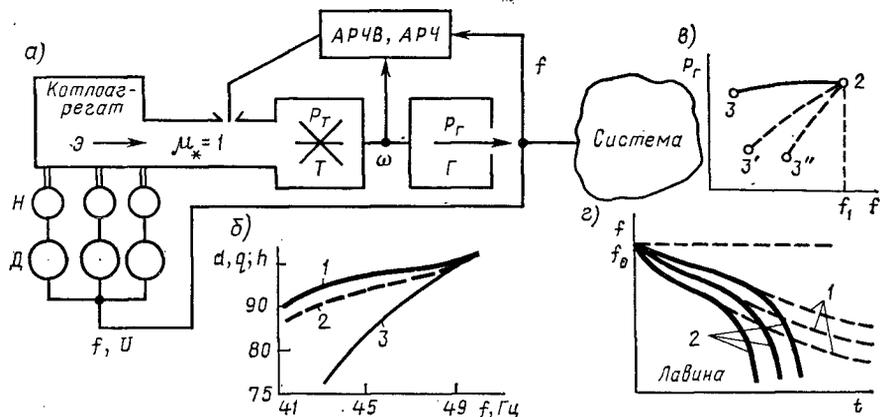


Рис. 9.11. Агрегат эквивалентной системы при полном впуске энергоносителя: а — схема агрегата: Z — впуск энергоносителя при полном открытии ($\mu_* = 1$); Т — турбина; Д — двигатели собственных нужд; Н — насосы; Г — генератор, выдающий мощность P; ω — угловая скорость вала (приведенная к электрической); 1 — частота в системе; б — зависимости: 1 — давления d; 2 — расхода питательной воды q; 3 — напора h в зависимости от частоты f двигателей Д, питающих собственные нужды станции (примерные характеристики); в — изменение мощности генератора P_G : 2-3 — при питании собственных нужд двигателями, не зависящими от частоты; 2-3' — при наличии зависимостей типа показанных на рис. 9.11,б; 2-3'' — то же, при другом характере d, q, h = $\Phi(f)$; з — изменение частоты: 1 — в системе без резерва (участок характеристики 2-3); 2 — при появлении лавины частоты (участки характеристик 2-3', 2-3'')

выдаваемой генераторами при снижении частоты. Это происходит при отсутствии резерва генерирующей мощности в системе в связи с тем, что механизмы собственных нужд тепловых станций снижают производительность со снижением частоты*. Нарушение устойчивости может быть связано также с неправильным действием АРЧ, характеристики и параметры которых могут быть неблагоприятно выбраны в отношении устойчивости их параллельной работы. При учете влияния изменения частоты на работу генераторов характеристики мощности, генерируемой в системе, будут иметь вид, показанный на рис. 9.10.

Не стремясь к выявлению точных количественных соотношений, можно констатировать, что снижение частоты на Δf приводит к деформации характеристики $P_{г}$, благодаря чему точка θ (рис. 9.10)**, в которой балансируются мощности генерации и нагрузки, оказывается неустойчивой, на что указывает практический критерий $d(P_{г} - P_{н})/df < 0$. Снижение частоты развивается далее лавинообразно и приводит к полному нарушению устойчивости системы.

Математическая интерпретация процесса лавины частоты может быть сделана на основе уравнения (9.9), отвечающего полному (рис. 9.11) впуску энергоносителя. На рис. 9.10 этот случай соответствует характеристике 2-3. Изменение частоты $\Delta f = \varphi(f)$ здесь будет происходить согласно (9.10) в виде экспоненциальных зависимостей (группа кривых 1 на рис. 9.11, а).

Если при достижении полного впуска энергоносителя (точка 2 характеристики 1-2 на рис. 9.10) в связи со снижением частоты ($f < f_0$) и возможным одновременным уменьшением напряжения двигателя собственных нужд станций будут уменьшать мощность (рис. 9.11), то характеристика 2-3 превратится в характеристику 2-3' или 2-3'', что, как указывалось ранее, приведет к критическому (точки B, A) или неустойчивому (точка θ) режиму (см. рис. 9.10), показанному также на рис. 9.11, б.

Уравнение (9.10) в этом случае будет записано как

$$\Delta f_* = \left[1 - \frac{P_{но} - \varphi(f, U)}{P_{но} b_f} \right] (1 - e^{-t/T_{Д}}), \quad (9.11)$$

где $\varphi(f, U)$ соответствует значению мощности турбины системы, снижающейся в связи с понижением частоты и напряжения двигателей собственных нужд. Характер изменения $f = f_0 - \Delta f_* f_0$, который может быть оценен путем итеративных приближений [см. (9.11)], показан на рис. 9.11, а. Постепенное уменьшение f (кривые 2), переходящее далее в резкий спад, и привело к «лавине частоты».

§ 9.6. МЕРЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЧАСТОТЫ. АВТОМАТИЧЕСКАЯ РАЗГРУЗКА ПО ЧАСТОТЕ

Из приведенного анализа можно сделать следующие выводы. Снижение частоты в электрической системе в некоторых случаях приводит к уменьшению активной мощности, выдаваемой генераторами, что может привести к неустойчивости их режима (лавине частоты).

* Об этом подробно см. гл. 11, 12.

** Приведенные на рис. 9.10 характеристики строились в предположении постоянства напряжения (значение напряжения поддерживается, например, регулируемым синхронным компенсатором). В действительности одновременно со снижением частоты будет происходить и уменьшение напряжения. Уменьшение угловой скорости генераторов будет приводить к снижению их э. д. с. ($E \equiv \omega^2$). Реактивная мощность генераторов будет уменьшаться, а нагрузки — увеличиваться.

Хотя в условиях сниженной частоты критическое напряжение (при котором наступает опрокидывание двигателей) уменьшается, все же при значительном снижении частоты могут создаваться условия для возникновения и развития лавины напряжения.

Понижение частоты вызывает уменьшение выдачи реактивной мощности и в то же время увеличение потребления реактивной мощности нагрузкой, что приводит к понижению напряжения в узлах нагрузки системы. При снижении частоты до 43—45 Гц напряжение может снизиться до критического значения, при котором возникает лавина напряжения. Лавины частоты и напряжения вызывают массовое отключение потребителей от действия их защит и стимулируют нарушение параллельной работы электрических станций. Ликвидация аварий и восстановление нормального режима системы могут длиться несколько часов.

Явление лавины частоты и, возможно, одновременной лавины напряжения протекает в течение нескольких десятков секунд или секунд. В такое короткое время дежурному персоналу трудно правильно оценить создавшееся положение и провести необходимые мероприятия в системе. Понижение частоты до опасных пределов практически может быть предотвращено в двух случаях: 1) если в системе имеется достаточно большой вращающийся резерв; 2) если с понижением частоты автоматически отключается некоторая часть нагрузки, т. е. производится так называемая *автоматическая частотная разгрузка* (АЧР).

Наиболее быстро дополнительную мощность можно получить в том случае, если вращающийся резерв составляют гидрогенераторы, однако инерционность регулирования гидротурбин позволяет выдать агрегатам резерва всю мощность только через 15—20 с. Это не всегда может предотвратить аварию. Эффективность гидрогенераторного резерва значительно повышается при уменьшении времени регулирования путем выдергивания иглы катаракта, что практически, однако, не всегда используется. Резерв на тепловых электрических станциях может быть эффективен только при достаточной мощности котлов и оборудования агрегатов совершенными автоматическими устройствами. Запуск резервных агрегатов при понижении частоты во многих случаях не может предотвратить развития аварии, так как даже гидрогенераторам требуется не менее 1—2 мин для набора мощности. Эффективными в этом отношении могут быть резервные агрегаты со специальными газовыми или авиационными турбинами (обычно устанавливаются отработавшие свой срок на самолетах двигатели). Однако установка специальных агрегатов пока не получила широкого распространения. Суммарная мощность обычного вращающегося резерва, выбранного по условиям экономичности, должна составлять 10—20%, но часто оказывается меньше. В часы максимума нагрузки системы вращающийся резерв может полностью отсутствовать. Однако при авариях, связанных с отключением генераторов и станций или с разделением системы на отдельные части, может появляться дефицит мощности, достигающий 30% и более. Поэтому в такого рода аварийных условиях наиболее надежным решением является автоматическое отключение соответствующей части нагрузки. Эту задачу и выполняют устройства АЧР.

Роль АЧР особенно велика в энергетических системах небольшой и средней мощности с малым числом электрических станций и слабо развитыми электрическими сетями. По мере укрупнения энергетических систем относительное (а не абсолютное) значение возможного аварийного небаланса мощности снижается. Однако даже в мощных объединенных энергосистемах отказываться от АЧР было бы нецелесообразно. Так, если при объединении систем уменьшается вероятность глубокого понижения частоты в объединенной системе, то остается опасность возникновения подобных аварий при отделении каких-либо частей или более мелких систем, а также при разделении объединенной системы на несинхронно работаю-

щие части. Таким образом, в объединенных системах большое значение имеет разгрузка по частоте.

Пример 9.1. В энергосистеме работают следующие агрегаты:

Номер генератора	Тип генератора	Момент инерции, т·м ²	Турбина	Момент инерции, т·м ²	Частота вращения, об/мин
1	T-2-100-2	23	ВК-100-2	18,71	3000
2	T-2-100-2	23	ВК-100-2	18,71	3000
3	T-50-2	12	АК-50-2	9,28	3000
4	T-2-25-2	4	АТ-25-2	3,52	3000

Вращающиеся резервы мощности отсутствуют. Нагрузка энергорайона $P_{н0} = 275$ МВт. При $f = f_0$ регулирующий эффект нагрузки $b_f = 1,9$. Момент инерции нагрузки в 1 кВт при частоте вращения 1500 об/мин составляет 0,3 т·м².

Определить минимальное (установившееся) значение частоты $f_{мин}$ при отключении генератора № 4 и последующем отключении нагрузки 20 МВт, приводя ее к различным значениям мощности.

Решение. Расчеты первоначально выполним, приводя все величины к мощности нагрузки в исходном режиме: $P_{н0} = P_{т0} = 275$ МВт. Тогда, согласно (9.106),

$$\Sigma T_{Ja} = \frac{2,74 \cdot 2(23 + 18,71) + (4,0 + 3,52) + (12 + 9,28) \cdot 3000^2 \cdot 10^{-6}}{275} = 10,1 \text{ с.}$$

Далее, согласно (9.10в),

$$\Sigma T_{Jн} = \frac{2,74 \cdot 0,3 \cdot 275 \cdot 1500^2 \cdot 10^{-6}}{275} = 1,88 \text{ с; } T_J = \Sigma T_{Ja} + \Sigma T_{Jн} = 10,1 + 1,88 = 11,98 \text{ с.}$$

Постоянная инерции в исходном нормальном режиме при $P_{н0} = P_{*т0} = 1$

$$T_{Ja} = T_J / b_f = 11,98 / 1,9 = 6,3 \text{ с.}$$

При отключении генератора № 4 мощностью 25 МВт отклонение частоты, согласно (9.10), составит

$$\Delta f = (25/275) \cdot (50/1,9) = 2,5 \text{ Гц,}$$

а минимальное значение частоты будет

$$f_{мин} = 50 - 2,5 = 47,5.$$

Согласно (9.10а), после отключения нагрузки $\Delta P_{н} = 20$ МВт, значение $\Delta P_0 = 25 - 20 = 5$ МВт, $P_{н0} = 275 - 20 = 255$ МВт, а отклонение частоты

$$\Delta f = -5 \cdot 50 / (255 \cdot 1,9) = 0,515 \text{ Гц.}$$

Следовательно, $f = 50 - 0,515 \approx 49,5$ Гц.

Таким образом, отключение примерно 7% нагрузки уменьшило снижение частоты в системе с 49,5 до 47,5 Гц, т. е. на 2 Гц. Следовательно, отключение части нагрузки является мощным средством поддержания частоты.

Контрольные вопросы

9.1. Какие три стадии имеет процесс изменения частоты после появления в системе какого-либо небаланса мощности?

9.2. От чего зависит время выравнивания частоты во всех точках системы при сбросе или набросе мощности в этой системе?

9.3. На какие группы можно разделить колебания суммарной нагрузки системы? Какова амплитуда колебаний и их период в каждой из этих групп?

9.4. Как могут быть построены динамические характеристики системы при изменении частоты?

9.5. Какой характер имеет динамика изменения частоты при наличии резерва и его отсутствии?

9.6. В чем причина возможной неустойчивости частоты и каковы меры ее предотвращения?

9.7. Как изменяется частота в системе при набросе мощности в случае отсутствия регулирующего эффекта нагрузки ($b_f = 0$)? Как влияет регулирующий эффект нагрузки на характер процесса?

9.8. Какое назначение устройства АЧР и какова (примерно) его схема?

9.9. Определите лавину частоты как физическое явление и дайте его математическую интерпретацию.

9.10. Назовите основные пути поддержания нормальной частоты в энергосистемах.

Темы рефератов

1. Анализ аварий, связанных с понижением частоты.
2. Характеристика взаимодействия первичного, вторичного и третичного регулирования.

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ,
ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАМИ, ЯВЛЯЮЩИМИСЯ СЛАБЫМИ
СВЯЗЯМИ****§ 10.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

При связи двух электрических систем ЛЭП, имеющей пропускную способность $U_1 U_2 / x$, намного меньшую (на 10—15%) мощности меньшей системы, возникают задачи проверки устойчивости «слабой связи», обеспечения неизменных потоков мощности на «слабых» соединительных линиях и совместного регулирования частоты в объединенных системах.

На режим работы слабых связей заметно влияют нерегулярные колебания нагрузки, происходящие в соединяемых системах. Таким образом, амплитуда колебаний межсистемной мощности все время изменяется и имеет случайный характер. Режим работы самых слабых связей сравнительно мало влияет на режим работы систем. Регулирование межсистемного перетока производится на основе телеизмерений его и соответствующих измерений нагрузки генераторов.

Обеспечение достаточных запасов устойчивости необходимо для надежной работы связанных систем. Колебания частоты (если они выходят из допустимых пределов) означают снижение качества энергии, отдаваемой потребителям, а колебания потоков мощности на линиях связи приводят к колебаниям напряжения. Кроме того, при обмене энергией между системами различных фирм в капиталистических странах колебания отдаваемой или принимаемой мощности оказываются недопустимыми, так как приводят к осложнениям взаиморасчетов (приходится учитывать случайные колебания мощности). Обменные потоки мощности во всех случаях должны быть согласованными и по возможности поддерживаться заданными.

Если бы каждая из объединенных систем могла мгновенно регулировать свою мощность таким образом, чтобы генерация точно соответствовала нагрузке системы при частоте 50 Гц (учитывая запланированные обмены), то частота в системах оставалась бы постоянной, а взаимный обмен происходил бы по установленной программе. Любое изменение нагрузки в каждой системе немедленно компенсировалось бы соответствующим изменением генерации. К сожалению, на практике такое регулирование осуществить нельзя. Фактически невозможно даже определить мгновенную нагрузку как сумму замеренной мощности потребления, так же как невозможно мгновенно изменить мощность, выдаваемую генераторами. Всякое различие между выходной мощностью и нагрузкой приводит к изменению частоты, которое, в свою очередь, вызывает действие первичных регуляторов, постепенно изменяющих генерируемую мощность. Действительное различие между выходной мощностью и нагрузкой можно определить только косвенным путем.

В случае присоединения системы к другой крупной энергетической системе, в которой частоту можно считать неизменной, разность между выходной мощностью и нагрузкой в присоединяемой системе почти немедленно проявляется в из-

менениях потоков мощности на линиях связи. Она может определяться как разность ΔP_{12} между действительным и запланированным обменом мощности.

В электрической системе расхождение между мощностью генерации и нагрузкой приводит к изменению частоты и действию АРЧВ машин, снова устанавливающих равновесие между мощностью генераторов и нагрузкой.

Точности регулирования частоты и обменной мощности связаны между собой. Применение более точной и более быстродействующей системы регулирования одновременно обеспечивает улучшение регулирования обеих указанных величин.

Для крупных объединенных энергетических систем отклонения обменной мощности от запланированной достигают максимальной границы до того, как изменения частоты станут заметными. Поэтому требуемая точность регулирования обменной мощности в линиях обмена определяет характеристики регулирующих устройств.

Анализ изменений обмена мощности в линиях межсистемной связи показывает, что на запланированные величины обмена накладываются колебания мощности. Эти колебания можно приблизительно разделить на два типа:

1) колебания с периодом менее 1 мин, состоящие в основном из отдельных колебаний с периодом в несколько секунд. Их амплитуда возрастает при объединении систем. Эти быстрые колебания обычно не угрожают устойчивости объединений, поэтому уничтожение их с помощью соответствующего регулятора было бы неоправданным, даже если бы оказалось возможным;

2) колебания с периодом более 1 мин, связанные с действительными компенсирующими обменами мощности между системами. Амплитуда этих колебаний зависит от характера нагрузок объединенных систем, значений их регулирующих мощностей, скорости действия и точности оборудования, применяемого для поддержания запланированных обменных мощностей. С увеличением точности и чувствительности регулятора колебания обмена мощности постепенно снижаются.

Эксплуатация линий межсистемных связей показала, что обмен мощностью можно с достаточной точностью отрегулировать в соответствии с программой. Практически требуемая точность регулирования зависит от параметров связанных систем и передач, осуществляющих обмен мощностью между системами.

§ 10.2. ПРОСТЕЙШАЯ ОБЪЕДИНЕННАЯ СИСТЕМА, СОСТОЯЩАЯ ИЗ ДВУХ ОТДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, СВЯЗАННЫХ СЛАБОЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ

Рассмотрим объединенную систему, схематически показанную на рис. 10.1, а. Предположим сначала, что частота в отдельных системах одинакова и в них имеются регуляторы возбуждения, обеспечивающие на всех генераторах постоянство э. д. с. $E'_q \approx E'$. Изменения генерирующей мощности P_g или мощности нагрузки P_n связанных систем, даже сравнительно небольшие по отношению к мощности системы, могут привести к нарушению устойчивости передачи.

Применим для анализа устойчивости системы (рис. 10.1) методику, рассмотренную ранее. Для этого, пренебрегая активным сопротивлением передачи, образуем схему системы так, как это показано на рис. 10.1, б, в.

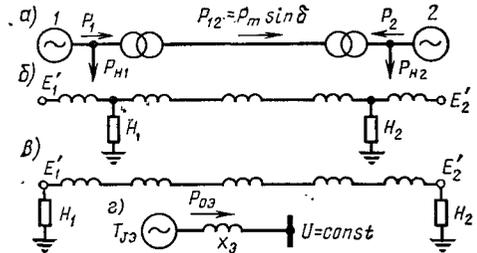
При изменении мощности любого генератора (1 или 2) или соответствующих нагрузок справедливы следующие соотношения приращений мощностей каждой из станций:

$$\Delta P_1 = P_{Г1} - P_{Н1} - P_m \sin \delta_{12}; \quad \Delta P_2 = P_{Г2} - P_{Н2} + P_m \sin \delta_{12}, \quad (10.1)$$

где $P_{Г1}$ и $P_{Г2}$ — мощности первичных двигателей систем 1 и 2, равные мощностям генераторов; $P_{Н1}$ и $P_{Н2}$ — мощности нагрузок, включенных в приемных и передающих частях системы, а в схеме замещения (рис. 10.1, в) — подключенных непосредственно к э. д. с. E'_1 и E'_2 ; $P_m \sin \delta_{12} = E'_1 E'_2 y_{12} \sin \delta_{12}$ — мощность, пере-

Рис. 10.1. Слабая связь передающей и приемной частей системы:

а — принципиальная схема системы; б — схема замещения; в — упрощенная схема замещения (нагрузки разнесены); г — эквивалентная схема условной системы «станция—шины», замещающей исследуемую систему



даваемая по связи (P_m — максимум этой мощности, δ_{12} — угол между э. д. с. E'_1 и E'_2).

Дифференциальное уравнение относительного движения, соответствующее эквивалентной схеме (рис. 10.1, г) системы, запишется как

$$d^2 \delta_{12} / dt^2 = \Delta P_1 / T_{J1} - \Delta P_2 / T_{J2} = \alpha_1 - \alpha_2 = \alpha$$

или

$$T_{J3} d^2 \delta_{12} / dt^2 = P_3 - P_m \sin \delta_{12}, \quad (10.2)$$

где

$$T_{J3} = T_{J1} T_{J2} / (T_{J1} + T_{J2}); \quad (10.3)$$

$$P_3 = (T_{J2} P_{Г1} - T_{J1} P_{Г2}) / (T_{J1} + T_{J2}) - (T_{J2} P_{Н1} - T_{J1} P_{Н2}) / (T_{J1} + T_{J2}). \quad (10.4)$$

Любое изменение нагрузки или мощности генераторов приводит к изменению P_3 . Отключение части генераторов вызывает еще и изменение P_m , так как меняется взаимная проводимость y_{12} .

Предположим, что в приемной части системы отключилось несколько генераторов, т. е. $P_{Г2}$ уменьшилось на $\Delta P_{Г2}$. Это означает, что P_3 увеличится на величину $[T_{J1} / (T_{J1} + T_{J2})] \Delta P_{Г2}$. Установившийся режим будет определяться пересечением характеристик P_3^{II} и $P_m \sin \delta$.

Из рассмотрения рис. 10.2, а видно, что устойчивость сохранит-

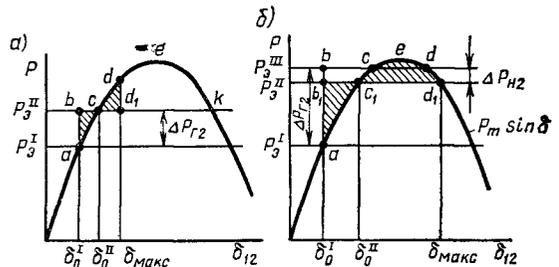


Рис. 10.2. Угловые характеристики для схемы, изображенной на рис. 10.1:

а — устойчивый режим после отключения части генераторов; P_3^I и P_3^{II} — эквивалентные мощности до и после отключения; б — неустойчивый режим после отключения части генераторов (при увеличении P_3 от P_3^I до P_3^{II}) и переход к устойчивому режиму после отключения части нагрузки

ся только в том случае, если площадка ускорения $abca$ будет меньше (или равна) площадки возможного торможения $cdekc$. При этом будут происходить качения, размах которых определяется равенством площадок $adca$ и $cdca$. Если наброс нагрузки (например, мощность отключившихся генераторов ΔP_{12}) слишком велик и система становится неустойчивой, то надо произвести автоматическую разгрузку системы, отключив часть потребителей приемного конца (P_{H2}).

Уменьшение нагрузки на ΔP_{H2} приводит к уменьшению P_3 на величину $[T_{J1}/(T_{J1} + T_{J2})]\Delta P_{H2}$. Соответствующим подбором отключаемой нагрузки можно обеспечить устойчивость системы. Такой случай показан на рис. 10.2, б, где предположено, что автоматическая разгрузка (отключение части нагрузки) происходит одновременно с отключением генераторов. Требование равенства площадок ускорения ab_1c_1a и торможения $c_1ed_1c_1$ может быть записано следующим образом:

$$\int_{\delta_0^I}^{\delta_{\max}^I} P_m (\sin \delta_0^{II} - \sin \delta) d\delta = 0,$$

откуда

$$(\delta_{\max}^I - \delta_0^I) \sin \delta_0^{II} + \cos \delta_{\max}^I - \cos \delta_0^I = 0.$$

Так как $\delta_{\max}^I = \pi - \delta_0^{II}$, получаем уравнение для определения δ_0^{II} :

$$(\pi - \delta_0^{II} - \delta_0^I) \sin \delta_0^{II} - \cos \delta_0^{II} = \cos \delta_0^I.$$

Здесь $\delta_0^I = \arcsin(P_3^I/P_m)$; $\delta_0^{II} = \arcsin(P_3^{II}/P_m)$.

Зная δ_0^I , нетрудно определить, какую часть нагрузки приемной системы ΔP_{H2} нужно отключить при изменении мощности генераторов этой системы и том или ином угле δ_0^I . Очевидно, что при сделанных допущениях $\Delta P_{H2}/\Delta P_{r2} = \varphi[P_3^I/P_m, (\Delta P_{r2}/P_m) \cdot (T_{J1}/(T_{J1} + T_{J2}))]$. На рис. 10.3 показаны соответствующие зависимости.

При слабой связи могут возникать колебания. Так, если одна из систем, передающая мощность P_{12} на шины бесконечной мощности по слабой связи, имеет нагрузку ΔP , мощность которой изменяется с частотой λ , то дифференциальное уравнение колебаний угла будет иметь вид

$$T_J d^2\delta/dt^2 + P_a d\delta/dt + P_{12} \sin \delta = \Delta P \sin \lambda t + P_0, \quad (10.5)$$

где P_0 — среднее значение передаваемой мощности.

При линейном приближении из (10.5) можно найти отклонения угла от среднего значения:

$$\Delta \delta = \Delta P / \sqrt{(T_J \lambda^2 - P_{12} \cos \delta_0)^2 + P_a^2 \lambda^2}.$$

Очевидно, что для каждой системы есть некоторые значения λ , отвечающие максимальным отклонениям угла (рис. 10.4).

При слабой связи могут появляться нерегулярные колебания обменной мощности; они вызываются колебаниями нагрузки и частоты в связываемых системах и реакций регуляторов вращения — турбин на колебания частоты. Средне-

квадратичные отклонения нагрузки $\Delta P_{\text{ср.кв}}$ от среднего уровня суммарной нагрузки P находятся из соотношения

$$\Delta P_{\text{ср.кв1}}/\sqrt{P_1} = \Delta P_{\text{ср.кв2}}/\sqrt{P_2}.$$

При этом влияние регуляторов частоты вращения на колебания межсистемной мощности меньше, чем влияние колебаний нагрузки.

Опыт и исследования показывают, что можно оценивать нерегулярные колебания межсистемного потока мощности, учитывая лишь меньшую из соединяемых энергосистем.

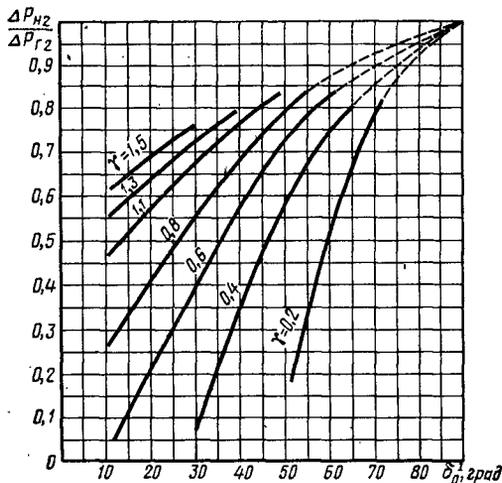


Рис. 10.3. Соотношение отключаемых мощностей генератора и нагрузки:

ΔP_{H2} — мощность нагрузки, которую необходимо отключать для сохранения устойчивости при отключении мощности генераторов ΔP_{r2} ; $\gamma = (\Delta P_{r2}/P_m)[T_{11}/(T_{11}+T_{12})]$

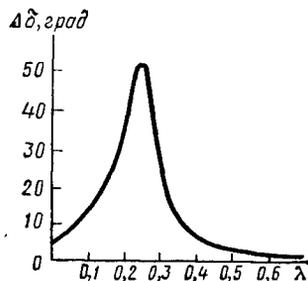


Рис. 10.4. Максимальные отклонения угла в зависимости от частоты колебаний нагрузки

* § 10.3. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СЛАБЫХ СВЯЗЕЙ

Нарушение синхронизма слабых связей часто вызывается отключением одной из параллельных линий или возникновением небаланса мощности в одной из связываемых энергосистем. Короткие замыкания, даже наиболее тяжелые, если они отключаются основными защитами, как правило, не вызывают нарушения синхронной динамической устойчивости. Обусловлено это тем, что отключение слабой связи или короткое замыкание на ней создает сравнительно небольшой небаланс мощности в соединяемых энергосистемах.

Определим зависимость предельного времени отключения трехфазного короткого замыкания $t_{\text{пр}}$ от передаваемой мощности P_0 . Предельное время отключения

$$t_{\text{пр}} = \sqrt{2T_{J_0}(\delta_1 - \delta_0)/P_0}, \quad (10.6)$$

где

$$\delta_1 = \arccos [(P_0/P_{12})(\pi - 2\delta_0) + \cos(\pi - \delta_0)]. \quad (10.7)$$

Используя (10.6) и пренебрегая активным сопротивлением межсистемной слабой связи, считаем, что на ней нет промежуточных нагрузок и что нагрузка в

соединяемых энергосистемах при рассматриваемом коротком замыкании не изменяется. Принимая относительные инерции энергосистем равными и учитывая, что $\delta_0 = \arcsin(P_0/P_{12})$, получим

$$t_{\text{нр}} = \sqrt{\frac{2T_J P_{\text{н1}}/P_{12}}{P_0/P_{12}} \arccos \left[\frac{P_0}{P_{12}} \left(\pi - 2 \arcsin \frac{P}{P_{12}} \right) - \sqrt{\left(1 - \frac{P_0}{P_{12}} \right)^2} \right] - \arcsin \frac{P_0}{P_{12}}}, \quad (10.8)$$

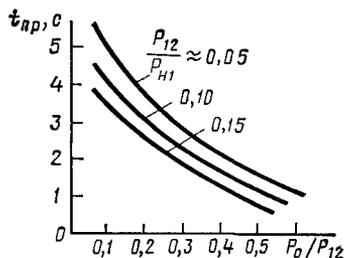


Рис. 10.5. Предельное время отключения трехфазного короткого замыкания в зависимости от соотношения P_0/P_{12} при передаче различной мощности

где значения $t_{\text{нр}}$ и T_J даны в радианах.

По этой формуле на рис. 10.5 построены зависимости $t_{\text{нр}} = f(P_0/P_{12})$ для различных значений $P_{12}/P_{\text{н1}}$ при $T_J = 15$ с. Как видно из кривых, предельное время отключения короткого замыкания достаточно для действия основных защит.

* § 10.4. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СЛАБЫХ СВЯЗЕЙ

Анализ опыта эксплуатации электропередач, являющихся слабыми межсистемными связями, показывает, что причиной нарушения их устойчивости чаще всего является превышение предела статической устойчивости из-за отключения одной из параллельных линий или сравнительно медленно повышения потока мощности, обусловленного изменением его среднего значения или нерегулярными колебаниями. Поэтому определение области статически устойчивых режимов для межсистемных связей электропередач является важной задачей.

На предельную по условиям статической устойчивости мощность влияет ряд факторов: напряжение по концам электропередачи, активные и реактивные сопротивления линий электропередачи, промежуточные нагрузки и значения статизма соединяемых энергетических систем. Прежде всего оценим, насколько предельный угол электропередачи может отличаться от 90° за счет влияния активных сопротивлений электропередачи и значений статизма соединяемых систем. При этом анализе будем считать постоянными эквивалентные э. д. с. энергетических систем. Тогда предельный по условиям устойчивости угол будет определяться из соотношения

$$\alpha = \frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_1}{d\delta} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_2}{d\delta} > 0. \quad (10.9)$$

Для слабой связи можно принять, что*

$$P_1 = (P_{\text{т1}} - P_{\text{н1}}) + b_{f1*} s_* P_{\text{н1}} + P_{12} \sin(\delta - \alpha) = P_{01} + b_{f1*} s_* P_{\text{н1}} + P_{12} \sin(\delta - \alpha); \quad (10.10)$$

* Здесь $P_{\text{т}}$ — мощность турбины; $b_{f*} = (dP/df)(f_0/P_0)$ — коэффициент, характеризующий относительную крутизну статических характеристик нагрузок, где f_0 и P_0 — номинальные значения частоты и мощности; s_* — изменение частоты, вызывающее соответствующее изменение мощности нагрузки ($\Delta P_{\text{н}} = b_{f*} s_* P$).

$$P_2 = (P_{H2} - P_{T2}) + b_{f2*} s_* P_{H2} - P_{12} \sin(\delta + \alpha) = P_{02} + b_{f2*} s_* P_{H2} - P_{12} \sin(\delta + \alpha). \quad (10.11)$$

Суммируя эти выражения и переходя к приращениям, в предположении, что мощности энергосистем балансируются при $\delta \approx \delta_0$, получим

$$s_* = 2P_{12} \sin \alpha \cos \delta_0 / (b_{f1*} P_{H1} + b_{f2*} P_{H2}). \quad (10.12)$$

Подставляя (10.12), (10.10), (10.11) в неравенство (10.9), после преобразований найдем следующее условие:

$$A \cos \delta + B \sin \delta = \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\delta - \lambda) > 0,$$

откуда $\delta_{цр} = 90^\circ + \lambda$, где

$$\begin{aligned} A &= P_{12} (T_{J1} + T_{J2}) \cos \alpha; \quad B = P_{12} [(T_{J2} - T_{J1}) + \\ &+ 2 \frac{T_{J1} b_{f2*} P_{H2} - T_{J2} b_{f2*} P_{H1}}{b_{f1*} P_{H1} - b_{f2*} P_{H2}}] \sin \alpha = P_{12} \frac{(T_{J1} + T_{J2}) (b_{f2*} P_{H2} - b_{f1*} P_{H1})}{b_{f1*} P_{H1} + b_{f2*} P_{H2}} \sin \alpha; \\ \operatorname{tg} \lambda &= \frac{B}{A} = \frac{b_{f2*} P_{H2} - b_{f1*} P_{H1}}{b_{f2*} P_{H2} + b_{f1*} P_{H1}}; \quad \lambda = \operatorname{arctg} \left(\frac{b_{f2*} - b_{f1*} \beta}{b_{f2*} + b_{f1*} \beta} \operatorname{tg} \alpha \right), \end{aligned}$$

причем $\beta = P_{H1}/P_{H2}$ при $P_{H1} > P_{H2}$.

Из приведенных выражений видно, что чем меньше отношение активного сопротивления электропередачи к реактивному, т. е. чем меньше α и λ , тем ближе $\delta_{цр}$ к 90° . При равных относительных значениях статизма энергосистем максимальное значение $\lambda_{\max} = \alpha$ получается при $\beta = 0$, а при $\beta = 1$ — значение $\lambda = 0$. Если статизмы различны, то λ_{\max} не изменяется, а изменяется лишь величина β , при которой $\lambda = 0$. Постоянные инерции энергосистемы не влияют на величину λ , если не учитывается статизм энергосистем. Если же считать, что мощность энергосистем не зависит от частоты, то угол λ зависит от постоянных инерции. Объясняется это положение [16] тем, что в первом случае при появлении ΔP частота в энергосистеме изменяется на ограниченную величину s_* , а во втором — неограниченно. Хотя второй случай дает физически неверную картину явления, конечный результат получается одинаковым, если

$$T_{J1*} = T_{J2*} \quad \text{и} \quad b_{f1*} = b_{f2*}.$$

* § 10.5. НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Регуляторы возбуждения (РВ), которыми снабжены все мощные генераторы, являясь средством повышения надежности для выполнения своих функций, требуют тщательной настройки. Это особенно относится к АРВ с. д., которые при плохой настройке могут давать результаты даже худшие, чем АРВ п. д., т. е. вызывать раскачивание системы.

При регуляторах любого типа размер областей статической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) и их расположение относительно настроечных параметров зависят от режима системы. В пространстве настроечных параметров выбранным их величинам соответствует рабочая точка. Возможно больший диапазон режимов обеспечивается, если эта точка выбирается в общей для некото-

рого множества областей устойчивости системе пространства параметров. Рабочая точка при этом в большинстве случаев оказывается вблизи границ областей устойчивости какого-либо режима, что в плоскости корней соответствует корням, близким к мнимой оси. Области устойчивости, соответствующие различным режимам, должны накладываться друг на друга, иначе для устойчивой работы требуется различная настройка регуляторов, что недопустимо.

При обобщении решения задачи обеспечения устойчивости ЭЭС важен синтез законов регулирования АРВ генераторов электростанций, включающий в себя выбор системы стабилизации АРВ. Законы регулирования и значения параметров АРВ синхронных генераторов электростанций должны обеспечивать одновременное выполнение следующих условий:

а) обеспечение больших общих участков областей статической устойчивости для заданного множества характерных режимов работы электростанции в системе, т. е. минимальные требования к остроте настройки;

б) непротиворечивые условия статической устойчивости в нагрузочных режимах и в режиме холостого хода генераторов, отключенных от сети;

в) хорошее демпфирование малых колебаний;

г) максимально возможное совпадение областей статической и динамической устойчивости (с учетом действия форсировки), удовлетворительное демпфирование больших колебаний.

Все указанные условия важны в равной мере и ни одно из них нельзя считать доминирующим.

Обобщенным показателем качества переходных процессов может быть *степень устойчивости*, или *коэффициент демпфирования*, малых колебаний. Обеспечение высоких значений этих показателей — задача выбора закона регулирования АРВ. Трудности этого выбора обусловлены тем, что в современных ЭЭС все чаще появляются объединения на параллельную работу с помощью межсистемных связей. Это вызывает изменение динамических свойств всего объединения, что может приводить к ухудшению качества переходных процессов, а иногда и к нарушению устойчивости. При этом возникает низкочастотное самораскачивание (с частотой в диапазоне 0,1—0,5 Гц). Это особенно важно при объединении ЭЭС с помощью слабых связей и создании энергообъединений «протяженной структуры». В этих условиях для улучшения статической устойчивости необходимы хорошие системы стабилизации существующих АРВ электростанций (например, замена АРВ п. д. на АРВ с. д.). Изменения в АРВ, выполняемые для различных электростанций, по-разному влияют на устойчивость энергообъединений. Отсюда появляется общая постановка задачи выбора АРВ, которая может быть сформулирована следующим образом: *выявить те электростанции системы, на генераторах которых наиболее целесообразна установка АРВ с. д., и определить системы стабилизации этих АРВ, позволяющие повысить устойчивость ЭЭС в целом и, в частности, демпфировать низкочастотные колебания**.

Одним из приближенных способов выбора стабилизирующих параметров АРВ с. д., пригодным для простых электрических систем, является способ, принимающий во внимание лишь одну частоту электро механических колебаний; он основывается на соображении о том, что выбор обрат-

* См.: Броссманн Э., Веников В. А., Строев В. А. Обобщение подхода к выбору АРВ в сложных электрических системах. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1982, № 3.

ных связей и коэффициентов усиления каналов напряжения во многом определяется условиями устойчивости системы регулирования возбуждения отключенного от системы генератора. Для определения необходимых значений коэффициентов усиления по каналам производных тока или частоты (стабилизирующих параметров) при этом строятся области статической устойчивости для всех характерных режимов работы системы.

С точки зрения статической устойчивости вся совокупность значений коэффициентов усиления стабилизирующих параметров, находящихся внутри общего участка областей устойчивости, равнозначна. Для выбора рабочей настройки АРВ необходимо произвести дополнительную оценку возможных настроек АРВ с помощью тех или иных критериев качества.

При малых возмущениях это может осуществляться построением кривых равного затухания. Для оценки поведения системы при конечных возмущениях предложено рассматривать дополнительные области различных динамических свойств системы и определять эквивалентный коэффициент затухания с учетом нелинейностей угловой характеристики мощности и возбудителя.

Перед вводом в работу новой электростанции рекомендуется проводить аналитические расчеты и эксперименты на моделях, в процессе которых выбирается необходимый закон регулирования и определяются ориентировочные значения коэффициентов усиления по отдельным каналам регулирования. Окончательный выбор настройки АРВ производится после проведения натуральных испытаний.

Обычно принимается следующий порядок настройки: 1) определяется взаимное положение осей параметров регулирования; 2) в этих осях строятся амплитудно-частотные характеристики разомкнутой системы регулирования по отдельным каналам регулирования; 3) находитесь диапазон частот электромеханических колебаний системы; 4) выполняются графические построения и выбираются уставки стабилизирующих параметров.

Таким образом осуществлялась настройка АРВ на ряде мощных ГЭС.

Например, на Братской ГЭС* для определения частоты собственных колебаний системы и оценки влияния закона регулирования и настройки АРВ на гашение электромеханических колебаний в систему подавались ступенчатые и гармонические возмущения, допустимые по условиям работы потребителей ($\Delta\delta_{\max} = 3 \div 5^\circ$). Возмущения подавались в систему возбуждения генератора (на сумматор АРВ). Подача возмущений на вал турбины (непосредственное изменение момента генератора) из-за большой инерционности системы управления гидротурбиной может производиться лишь с очень малой частотой ($\omega < 2 \div 3 \text{ с}^{-1}$), что для данных опытов неприемлемо.

Из сравнения результатов, полученных при подаче различных возмущающих воздействий, видно, что такие переходные характеристики позволяют определить собственную частоту колебаний системы, качественно оценить действие АРВ (демпфирование, раскачивание) и найти приближенные абсолютные значения коэффициента затухания.

Гармонические возмущения позволяют оценить характер действия АРВ в виде максимальных отклонений угла на резонансной частоте при разных настройках, показанных на рис. 10.6. Данные могут использоваться для сравнительной количественной оценки действия различных параметров регулирования (I , f , U и др.) на гашение колебаний угла.

* См.: Гессе Б. А., Литкенс И. В. Практический способ выбора стабилизирующих параметров АРВ сильного действия. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1970, № 6.

Данный способ настройки и выбора стабилизирующих параметров АРВ с. д. достаточно прост и доступен в условиях наладочных испытаний на электростанции. Выбранные с помощью этого способа коэффициенты усиления АРВ обеспечивают интенсивное демпфирование электромеханических колебаний синхронных машин. Однако для сложных систем рассмотренный способ может применяться как часть известной методики последовательной координации настроек регуляторов сильного действия. Иногда в такой методике для оценки качества используют понятие степени устойчивости, характеризуемой модулем вещественной части сопряженных комплексных корней характеристического уравнения, ближайших к мнимой оси. Оптимальные комбинации коэффициентов стабилизации определяются с помощью метода D -разбиения. Методика предусматривает нахождение коэффициентов стабилизации одной из станций, обеспечивающих наибольшую степень устойчивости. Далее настраивается АРВ следующей станции, находится еще пара коэффициентов и затем определяется следующая пара.

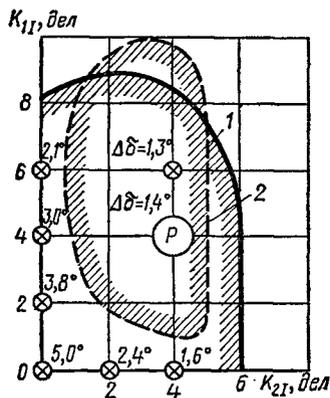


Рис. 10.6. Области статической устойчивости системы $P=0,69$ отн. ед. (1) и $P=1,1$ отн. ед. (2) ($K_{11}=0,27$ ед. возб. $\text{с}^2/\text{ед. тока дел}$, $K_{21}=0,06$ ед. возб. $\text{с}^2/\text{ед. тока дел}$)

Последовательная координация настроек АРВ с. д. в очень сложной системе для повышения ее демпфирующих свойств оказывается малоэффективной, так как рост степени устойчивости уменьшается после настройки регуляторов на одной-двух станциях.

Это объясняется тем, что за счет вариации лишь двух коэффициентов обеспечить одновременное согласованное изменение вещественных частей группы доминирующих корней в сторону больших значений степени устойчивости невозможно. Вариации этих коэффициентов часто приводят к противоположному характеру изменения действительных частей корней относительно ранее достигнутых, т. е. появляется неуправляемость степенью устойчивости*. В результате этого методика не дает возможности оценить и полностью реализовать преимущества пропорционального или сильного регулирования в нескольких точках системы. Очевидно, что желательна одновременная координация настройки ряда регуляторов возбуждения, которая должна обеспечивать существенно лучшие результаты, чем последовательная координация.

Была предложена методика, позволяющая аналитически определять наибольшую степень устойчивости системы, достижимую на первом этапе последовательной координации настроек АРС с. д. При этом была выявлена существенная зависимость управляемости степенью устойчивости системы за счет сильного регулирования возбуждения генератора от принятого режимного параметра стабилизации. В результате показано, что в зависимости от сложности системы, параметров режима и закона регулирования характеристическое уравнение на отдельных этапах оптимизации приобретает либо кратные корни, либо две пары корней с одинаковыми вещественными и разными мнимыми частями. При разночастотных корнях следующий этап оптимизации, как правило, повышает степень устойчивости и приводит к появлению кратных корней характеристического уравнения. В итоге было установлено, что одновременная координация АРВ на нескольких

* См.: Горюнов Ю. П., Левинштейн М. Л., Щербачев О. В. Методика определения оптимальных параметров регулирования в сложных линеаризованных системах с несколькими регулируемыми объектами. — Труды ЛПИ, 1968, № 293, с. 67—70; Груздев И. А., Туруснекова Г. Х. Исследование последовательной оптимизации настроек регуляторов возбуждения по критерию степени устойчивости системы. — Труды ЛПИ, 1982, № 385, с. 32—37.

станциях обеспечивает существенно лучшие результаты, чем последовательный поиск настроек АРВ с. д. Например, на основе метода D -разбиения при равенстве числа одновременно варьируемых коэффициентов стабилизации числу составляющих движения достигается лучшая управляемость степенью устойчивости.

В ряде случаев возникает острая необходимость в специальной настройке АРВ п. д., у которых отсутствие стабилизирующих сигналов по производным режимных параметров не позволяет выбрать произвольно высокий коэффициент усиления канала регулирования по отклонению напряжения. При этом возникали трудности с выдачей обоснованных количественных рекомендаций для выбора настроечных параметров АРВ, учитывающих реальные режимы энергосистемы и станции. Запас статической устойчивости генераторов в режимах недовозбуждения практически неизвестен. Вследствие этого возможно недопустимое приближение к границе статической устойчивости и ее нарушение. Подтверждением этому явились наблюдаемые в 1975—1976 гг. на генераторах некоторых ЭС в режимах минимальных их нагрузок явления автоколебаний, охватывающие всю энергосистему.

Опасность нарушения статической устойчивости системы в указанных случаях была устранена после настройки АРВ генераторов в соответствии с предложенной методикой, которая может быть успешно использована при введении в эксплуатацию в концентрированных энергосистемах новых тепловых и атомных электростанций, настройке систем возбуждения с АРВ п. д. при высокочастотной системе возбуждения. Оказалось, что при высокочастотной системе возбуждения, примененной в обычном заводском исполнении, можно обеспечить статическую устойчивость при правильной настройке АРВ п. д. Однако если на ряде АЭС в силу специфических особенностей генераторы работают в наиболее неблагоприятных условиях с точки зрения периодической статической устойчивости, то, проводя испытания, следует получать параметры функциональной модели, необходимые для расчетных исследований статической устойчивости. При этом надо учитывать существенное влияние коэффициента компаундирования на общий коэффициент усиления системы возбуждения и область периодической статической устойчивости. Следует иметь в виду, что условия возникновения и характера переходных процессов при установлении и устранении колебаний таковы, что имеет место *мягкое возбуждение автоколебаний при нарушении безопасной периодической границы статической устойчивости*. Автоколебания имеют частоту порядка 1 Гц и амплитуду режимных параметров, увеличивающуюся при удалении от границы устойчивости. Предлагаемый* метод перенастройки АРВ п. д. обеспечивает достаточный запас статической устойчивости и исключает возникновение автоколебаний во всем диапазоне рабочих режимов. Метод не требует вмешательства в работу ЭС и не влияет на работу АЭС в ЭС. Опытные результаты без дополнительных расчетов дают ответ на вопрос о правильности выбранной настройки АРВ.

Предложенные методы настройки, описанные выше, в ряде случаев дают положительные результаты. Однако рост сложности современных энергосистем предъявляет все более высокие требования к качеству и скорости настройки устойчивости автоматического управления и регулирования, в особенности АРВ с. д.

Анализ итогов эксплуатации этих регуляторов показывает, что в энергосистемах часто не проводят выбор настройки АРВ применительно к конкретным условиям работы электростанций. Это ведет к снижению запаса устойчивости системы и в ряде случаев является причиной возникновения аварийных ситуаций, начинающихся в результате самораскачивания.

Одной из причин некачественной настройки АРВ является сложность существующих методик выбора настроечных параметров. Для выбора коэффициентов регулирования выявляются динамические свойства системы при ступенчатом либо гармоническом сигнале управления, подключаемом одновременно на контрольные входы АРВ параллельно работающим генераторов. Чтобы найти область ус-

* См.: Ковачева Л. И., Лирич В. Н., Литкенс И. В. Экспериментальное исследование статической устойчивости турбогенераторов АЭС в режиме недовозбуждения. — Электрические станции, 1983, № 4.

тойчивости, опыты проводят при различных сочетаниях настроечных параметров АРВ, в том числе при таких настройках, при которых система приближается к границе устойчивости по самораскачиванию. Изменение настройки АРВ осуществляется путем одновременного варьирования коэффициентов регулирования всех параллельно работающих машин.

Такого рода системные испытания могут привести к нарушению устойчивости системы, а поэтому при выборе настроечных параметров АРВ появляется необходимость создания в энергосистеме на весь период испытаний достаточного горячего резерва мощности на случай нарушения устойчивости.

Предложенный новый метод* настройки позволил контролировать устойчивость энергосистемы и осуществлять выбор настроечных параметров по данным режима нормального функционирования энергосистемы, без проведения специальных системных испытаний. Выбор настройки АРВ осуществляется в этом методе путем обработки с помощью микро-ЭВМ данных о переходном процессе, проявляющемся в системе при малом возмущении.

Сущность метода поясняет схема программы расчета настроечных параметров АРВ (рис. 10.7). Входной информацией служат данные о переходном процессе в энергосистеме, появляющемся при малом ступенчатом сигнале управления на входе АРВ. Входным сигналом для микро-ЭВМ служит напряжение на выходе датчика мгновенного значения частоты в энергосистеме. Датчик частоты подключается к трансформатору шин высокого напряжения электростанции.

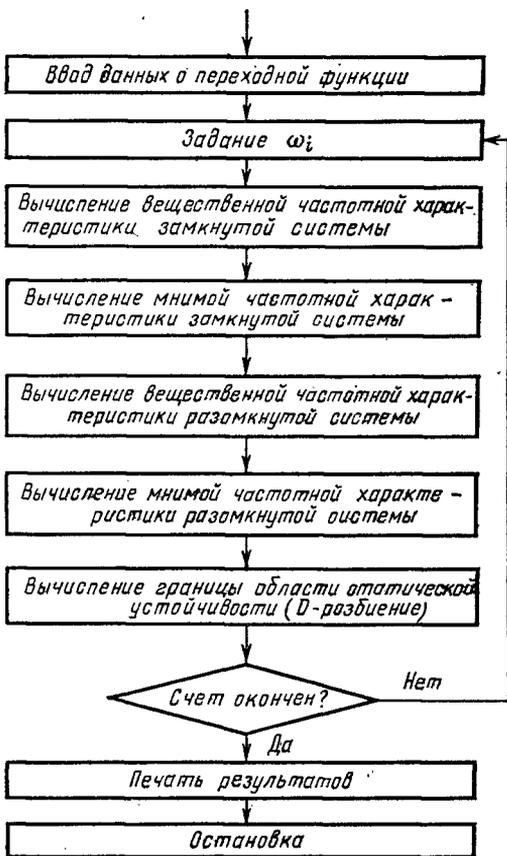


Рис. 10.7. Схема алгоритма программы для расчета настроечных параметров на микро-ЭВМ

Выходное напряжение датчика частоты через равные интервалы времени вводится в память микро-ЭВМ либо с помощью аналого-цифрового преобразователя либо по осциллограмме процесса. Полученный массив данных о переходной функции системы $h(t)$ используется для расчета методом D -разбиения области статической устойчивости.

* См.: Любарский В. Г., Филатов В. И., Любарская Н. В. Метод расчета области устойчивости энергосистемы и выбора настройки АРВ по параметрам переходной функции системы. — Электрические станции, 1982, № 11, с. 40—45.

Алгоритм программы предусматривает выполнение вычислений в такой последовательности:

— исходя из переходной функции системы $h(t)$ по формулам прямого преобразования Фурье вычисляется частотная характеристика замкнутой системы регулирования $W(j\omega)$;

— выполняется расчет частотной характеристики $W_f(j\omega)$ операционных цепей АРВ при данной настройке регуляторов возбуждения, установленных в эксплуатации;

— вычисляется частотная характеристика разомкнутой системы регулирования $W_{po}(j\omega)$;

— по частотной характеристике $W_{po}(j\omega)$ методом D -разбиения вычисляются границы области статической устойчивости системы в плоскости коэффициентов регулирования АРВ по изменению ω и коэффициентов по производной частоты (K_{0f} , K_{1f}).

На рис. 10.8 представлена область устойчивости (кривая 1). В данном режиме для проверки точности применяемой методики были определены близкие к граничным (по устойчивости) значения коэффициентов АРВ путем одновременного варьирования коэффициентов K_{0f} , K_{1f} регуляторов параллельно работающих генераторов.

Для определения верхней границы коэффициентов регулирования по производной частоты максимальное значение коэффициента по этому каналу было увеличено вдвое. На рис. 10.8 граница значений настроечных параметров, в пределах которой производилось варьирование коэффициентов K_{0f} , K_{1f} , показана штриховой линией. Минимальные значения коэффициента K_{1f} , установка которых производилась в процессе опытов, соответствуют кривой 2, максимальные — кривой 3. Обеим кривым соответствуют переходные процессы с малым декрементом затухания, что свидетельствует о близости к границе области статической устойчивости.

На рис. 10.8 точкой A отмечена настройка, при которой по переходной функции рассчитана с помощью микро-ЭВМ кривая 1 области статической устойчивости. Сопоставление результатов экспериментов (кривые 2 и 3) с расчетной кривой по данной автором методике показывает, что в данном случае обеспечивается достаточная точность вычисления предельных по устойчивости коэффициентов регулирования. Данная методика позволяет найти расположение границы области устойчивости во всех четырех квадрантах плоскости коэффициентов K_{0f} , K_{1f} , причем вне зависимости от того, располагается эта граница в пределах соответствующих шкал АРВ либо находится за пределами максимальных значений коэффициентов, предусмотренных в АРВ. Дальнейшее совершенствование способов настройки должно привести к появлению автоматических устройств, подбирающих для данных конкретных условий параметры АРВ п. д. и АРВ с. д.

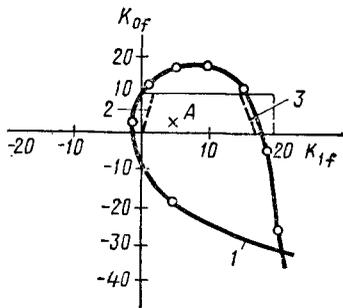


Рис. 10.8. Области устойчивости в зависимости от производных по частоте K_{1f} и K_{0f}

Контрольные вопросы

- 10.1. Что следует понимать под «слабыми» связями энергосистем?
- 10.2. Назовите особенности работы электрических систем, соединенных линиями слабой связи.
- 10.3. Как влияют колебания мощности и частоты в связанных системах на запас устойчивости соединяющей их линии передачи?
- 10.4. Что такое обменная мощность, в чем заключаются задачи регулирования обменной мощности? Какие колебания входят в состав обменной мощности?

10.5. Как можно применить способ площадей для исследования устойчивости передачи, связывающей две системы, в одной из которых происходит отключение части нагрузки или генераторов?

10.6. Какое соотношение частоты и обменной мощности принимается за основу при регулировании?

10.7. Каков примерный характер изменений частоты в связанных системах при набросе мощности в одной из них и как при этом меняется обменная мощность?

10.8. Назовите основные причины нарушения устойчивости энергосистем, соединенных слабыми связями.

10.9. Какие колебания обменной мощности опасны с точки зрения устойчивости объединенных систем?

10.10. Какие факторы наиболее сильно влияют на устойчивость слабосвязанных энергосистем?

Темы рефератов

1. Применение регуляторов частоты и обменной мощности для регулирования межсистемных перетоков мощности и улучшения устойчивости.

2. Влияние вероятностных факторов на перетоки мощности между системами и их устойчивость.

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
(УЗЛАХ НАГРУЗКИ) ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПРИ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ РЕЖИМА**

§ 11.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ

Часть электроэнергетической системы, непосредственно осуществляющая снабжение электрической энергией потребителей, называется *системой электроснабжения*. Она содержит питающие и распределительные сети, трансформаторы, компенсирующие устройства (конденсаторы, синхронные компенсаторы) и устройства, в которых электрическая энергия используется в производственных или бытовых целях. Эти устройства обычно называются *приемниками* электрической энергии, *нагрузками*, *потребителями*. Места подключения отдельных систем электроснабжения к высоковольтным сетям электрических систем называются *узлами нагрузок*.

При нормальной работе систем электроснабжения и во время различных пусков и остановок оборудования происходят нормальные переходные процессы. Отключения отдельных элементов, короткие замыкания в них приводят к аварийным переходным процессам. Установившиеся режимы и переходные процессы в системах электроснабжения должны удовлетворять тем общим требованиям, которые в гл. 1—4 были сформулированы применительно к электрической системе в целом.

Переходные процессы в системах электроснабжения можно различать по виду возмущения (малое, большое, длительное и т. д.), так же как это делалось для системы в целом. Так, в нормальном режиме системы при малых его возмущениях возникает необходимость проверки статической устойчивости синхронных двигателей, синхронных компенсаторов и больших групп асинхронных двигателей, которые, имея мощность, соизмеримую с мощностью питающих их генераторов, могут оказаться неустойчивыми, причем эта неустойчивость проявляется в виде специфического явления, называемого *лавиной напряжения*. Пуски двигателей, резкие колебания момента на их валу и т. д. приводят к изменениям значения и фазы напряжения в узлах нагрузки. Отклонения величин не должны превышать допустимых пределов. Влияние резких изменений режима двигателей обычно заметно проявляется в распределительных сетях в виде *колебаний напряжения*. Более медленные изменения режима двигателей, связанные с технологическими процессами, в которых двигатели участвуют, преимущественно отражаются на уровнях напряжения в питающих сетях (на отклонении напряжения). Такие нарушения режима, как короткие замыкания в элементах питающих сетей, отключения и повторные включения синхронных двигателей, самозапуск асинхронных двигателей после перерывов питания, самовозбуждение и самораскачивание двигателей при работе на емкостное сопротивление и т. д., могут существенно сказываться на режиме всей системы электроснабжения, поэтому переходные процессы в ее элементах рассматриваются не только с точки

зрения обеспечения их надежности и устойчивости, но и с точки зрения обеспечения надежности всей системы электроснабжения.

Переходные процессы в узлах нагрузки могут рассматриваться с двух точек зрения:

1) поведения собственно нагрузки при переходных процессах и влияния этих процессов на работу потребителей (например, мигание ламп при колебаниях напряжения в сети, порча продукции при изменении скорости двигателей во время изменений напряжения или частоты при переходных процессах и т. п.);

2) влияния переходных процессов в нагрузке на режим системы (например, самозапуск двигателей может привести к недопустимому понижению напряжения в системе, а в неправильно спроектированной системе — даже к нарушению ее устойчивости).

Кроме того, процессы, непрерывно происходящие в какой-либо нагрузке, могут оказывать неблагоприятное влияние на работу остальных потребителей системы (например, толчки в нагрузке, содержащей мощные двигатели прокатных станов, могут приводить к колебаниям напряжения и частоты в системе, понижая качество выдаваемой потребителям энергии).

§ 11.2. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Основную часть нагрузки (обычно от 50 до 80%) составляют асинхронные двигатели, свойства которых существенно проявляются в характере переходных процессов всего узла системы. Для них, так же как и для синхронных двигателей, различают статические характеристики, т. е. зависимости тока $|I|$ или вращающего момента $|M|$ двигателя от медленно меняющегося скольжения его ротора $|s|$, и динамические характеристики — зависимости быстро меняющегося скольжения, напряжения и скорости их изменения (ускорения α) от тока. Так, для асинхронного двигателя

$$M_{ст} = \psi(U, s); M_{дин} = \varphi(U, dU/dt, s, ds/dt).$$

Для синхронного двигателя аналогичная зависимость, определяющая статическую характеристику, будет иметь вид

$$M_{ст} = \psi(E, U, \delta); M_{дин} = \varphi(E, dE/dt, U, dU/dt, \delta, d\delta/dt).$$

Эти характеристики графически представлены на рис. 11.1 и 11.2.

Процессы при медленных отклонениях от установившегося состояния могут всегда рассматриваться на основе только статических характеристик. Для изучения процессов при быстрых изменениях, т. е. «в динамике», должны применяться динамические характеристики*. Однако в ряде случаев и при рассмотрении динамических процессов можно пользоваться квазидинамическими, а иногда и статическими характеристиками. Например, при относительно медленных ускорениях асинхронного двигателя и несоизмеримости электромагнитных и электромеханических постоянных времени разница в использовании статических и динами-

* Подробно см.: *Постников И. М.* Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. — М.: Высшая школа, 1975, с. 319; *Казовский Е. Я.* Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. — М.-Л.: АН СССР, 1962, с. 624.

ческих характеристик будет невелика (рис. 11.3). Как видно из рисунка, чем меньше коэффициент K_1 и чем больше так называемая условная скорость изменения скольжения $s_{\text{усл}} \equiv 1/K_1^2 = M_{\text{ном}}/(J\omega_0)$, тем сильнее искажаются статические механические характеристики, становясь динамическими*. Здесь

$$K_1 = \sqrt{160/[(I_{\text{ном}}/I_{\text{п}}s_{\text{ном}})^2 - 4,8] s_{\text{усл}}},$$

где $I_{\text{ном}}$ и $I_{\text{п}}$ — номинальный и пусковой токи.

При изучении ряда переходных процессов асинхронных двигателей приближенно можно считать, что фазовая траектория или динамическая механическая

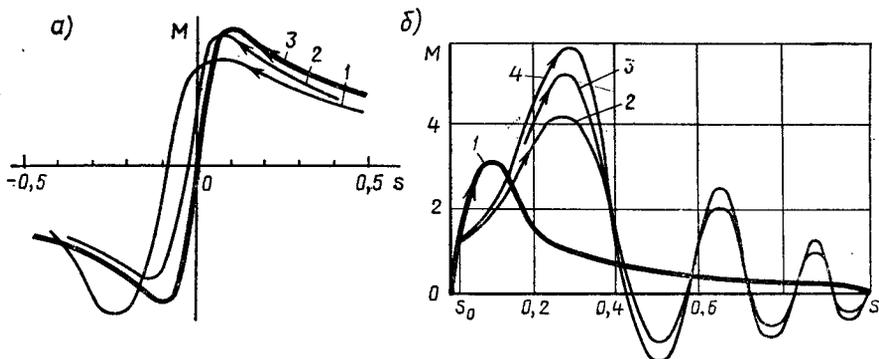


Рис. 11.1. Статические и динамические характеристики асинхронного двигателя:

a — при разгоне: 1 — статическая; 2 — динамическая при малом ускорении α ; 3 — динамическая при большем (чем 2) ускорении; *б* — при торможении: 1 — статическая; 2, 3, 4 — динамические при ускорении

характеристика процесса определяется следующим образом. Принимают, что динамический момент, возникающий при любом нестационарном режиме, состоит из двух составляющих: $M_{\text{дин}} = M_1 + M_2$, где M_1 — составляющая момента, определяемая переходными процессами, связанными с протеканием в обмотках двигателя переходных токов; M_2 — составляющая момента, определяемая как $M_2 = K_2 M_{\text{ст}}$. Здесь $M_{\text{ст}} = f(\omega)$ — статическая механическая характеристика, рассчитанная по известной формуле момента асинхронного двигателя:

$$M_{\text{ст}} = \frac{2M_{\text{кр}}(1+a)}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_{\text{кр}}} + \frac{\omega_0 - \omega_{\text{кр}}}{\omega_r - \omega} + 2a},$$

где $M_{\text{кр}}$ — критический (максимальный) момент; $\omega_{\text{кр}}$ — соответствующая ему скорость; a — поправочный коэффициент.

Таким образом, при расчете моментов применяется принцип наложения, предполагающий пренебрежение нелинейным характером ряда процессов и парамет-

* Здесь $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент; J — момент инерции; $\omega_{\text{ном}}$ — номинальная скорость.

ров*. Практика показывает, что в большинстве случаев это справедливо и получающаяся ошибка невелика.

Коэффициент, учитывающий отличие динамической характеристики от статической, определяется по формуле

$$K_2 = 1 - \frac{1,8 \cdot 10^{-4}}{2T_э s_{кр}} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4T_э s_{кр}}{1,8 \cdot 10^{-4}} M_{кр}} \right],$$

где $T_э$ — электромеханическая постоянная времени; $M_{кр}$ — максимальный (критический) момент.

Обычно $K_2 = 0,7 \div 1$.

Природа динамического момента в значительной мере определяется тем, что при достаточно быстром изменении скорости двигателя момент его *не успевает принять значения, соответствующего статической механической характеристике*, — статическая характеристика искажается.

Коэффициент K_2 может быть определен как отношение времен разгона (или торможения) $K_2 = t_{ст}/t_{дин}$, определенных один раз по статической ($t_{ст}$), а другой раз по динамической (t_2) характеристикам.

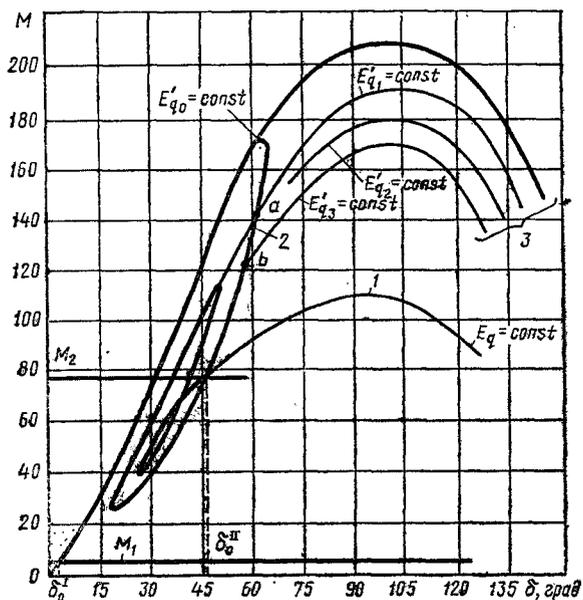


Рис. 11.2. Статическая (1), динамическая (2) и квазидинамические (3) характеристики синхронного двигателя при увеличении нагрузки (момента M) от M_1 до M_2

* См.: Петров И. И., Мейстер А. М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. — М.: Энергия, 1968, с. 264.

Сопоставить динамические и статические характеристики* при разгоне асинхронного двигателя можно по данным табл. 11.1, при составлении которой принято, что статический момент на валу пускаемого двигателя равен нулю. Из таблицы следует, что при больших маховых массах GD^2 и больших мощностях ди-

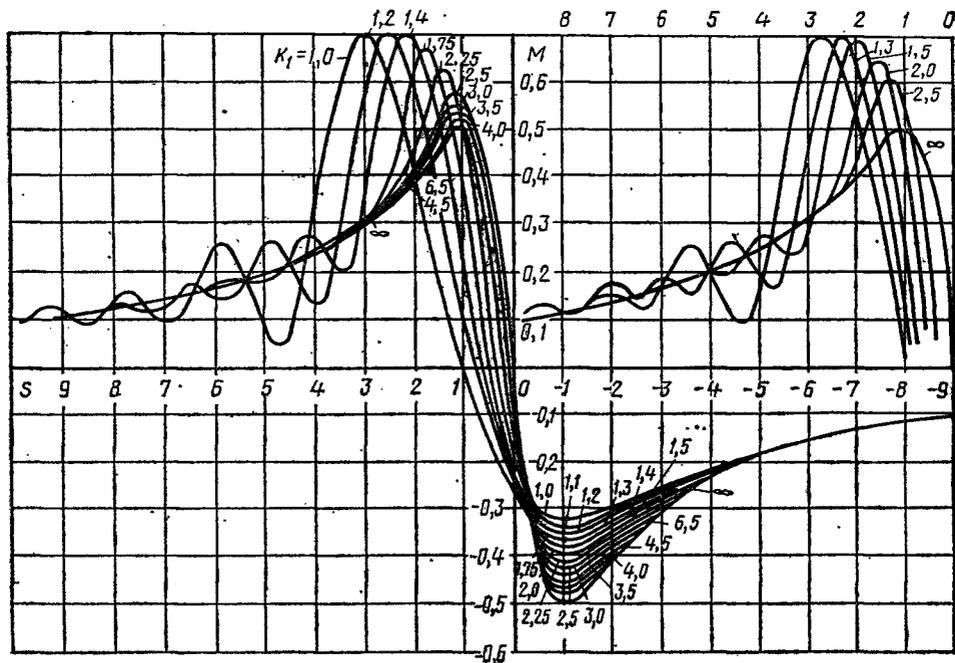


Рис. 11.3. Влияние скорости изменения скольжения α на значения моментов асинхронного двигателя $M = f(K, s)$

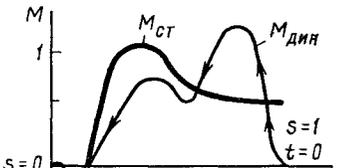
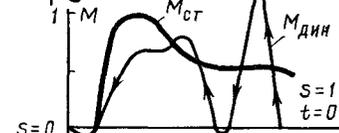
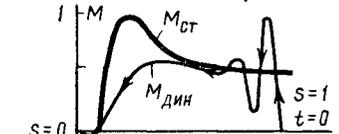
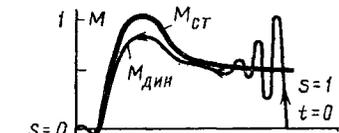
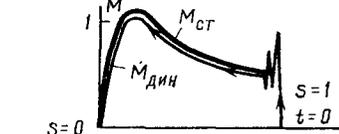
Здесь M представлено в долях от максимального момента; $K_{дин}$ может быть определено как отношение максимального момента $M_{кр}$, полученного из графика, к рассчитанному по статической характеристике

динамические характеристики ближе к статическим, т. е. эта разница тем меньше, чем больше мощность двигателя и чем тяжелее его ротор.

Процессы при ударных нагрузках асинхронных двигателей можно разделить, разумеется, несколько условно, на две группы: 1 — процессы при скольжениях, меньших номинальных или незначительно их превышающих; такие процессы, вызванные ударной нагрузкой, сопровождают большинство реальных переходных режимов работы асинхронного двигателя. При этом колебательные процессы обычно не проявляются; 2 — процессы с достижением и даже превышением критического скольжения. В этих случаях ударная нагрузка может привести к остановке двигателей и колебательные процессы оказываются существенными.

Для обеих групп процессов характер движения можно определять методом

* См. сноску на с. 330.

Типичный характер $M_{дин} = f(t)$	Мощность $P, \text{кВт}$	Маховой момент $G D^2$
	0,5 - 1,0	1
	1,5 - 2,0	2
	2 - 10	3
	10 - 25	4
	Больше 25	Больше 4

последовательных интервалов, причем в пределах каждого интервала процессы линеаризуются.

На рис. 11.4 показаны примерные зависимости моментов от скольжения при набросе ударной нагрузки.

У синхронного двигателя динамическая характеристика может еще сильнее, чем у асинхронного, отличаться от статической. Это различие обусловлено появлением свободных токов в роторе и изменением его скорости относительно синхронной. Деформация статических характеристик может быть существенной (см. рис. 11.2). Так же как и для асинхронного двигателя, ее значение обусловлено параметрами данного двигателя и характером переходного режима. Достаточно адекватный действительности расчет в этом случае может быть выполнен со-

гласно полным уравнениям*. Однако сложность применения полных уравнений и соответственно пользования динамическими характеристиками заставляют обращаться к квазидинамическим характеристикам, построенным при $E'_q = \text{const}$.

Процессы, рассчитанные при упрощенном и полном представлении асинхронного двигателя согласно уравнениям Парка—Горева, для сопоставления показаны на рис. 11.5. На рис. 11.6 показаны аналогичные процессы для синхронного двигателя. На рис. 11.5 представлены также процессы пуска асинхронного двигателя. Осциллограммы получены в результате расчета, проведенного на АВМ**.

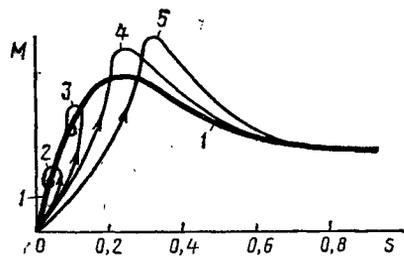


Рис. 11.4. Поведение асинхронного двигателя при ударной нагрузке:

1 — статическая характеристика; 2 — $M_{уд} = 0,5$; 3 — $M_{уд} = 1,0$; 4 — $M_{уд} = 1,5$; 5 — $M_{уд} = 2,0$

Набросы момента $M_{наб}$ в долях от номинального $M_{ном}$: $M_{уд} = M_{наб}/M_{ном}$

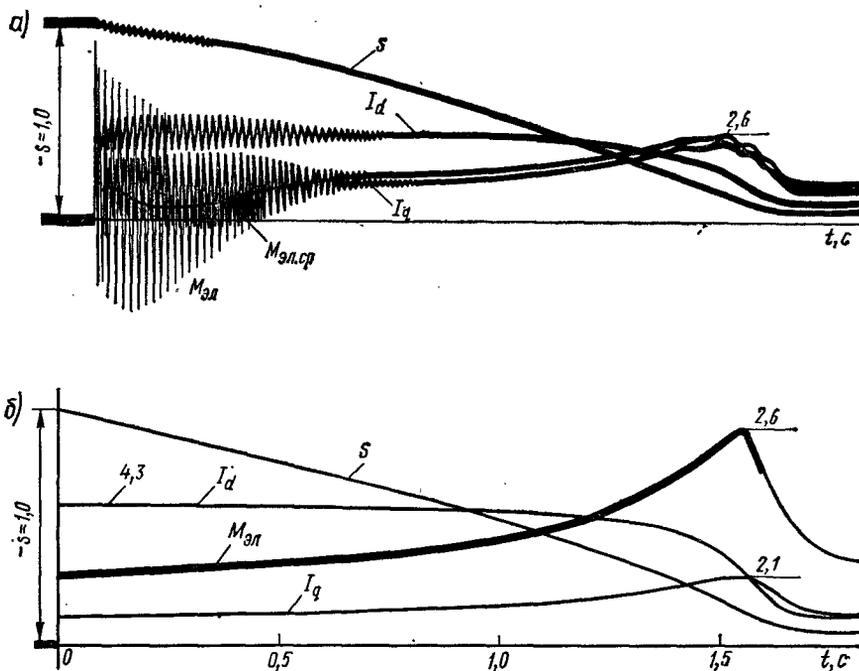


Рис. 11.5. Расчетные осциллограммы, полученные на аналоговой модели пуска асинхронного двигателя:

а — расчет по полным уравнениям при представлении момента динамической характеристикой; б — расчет по упрощенным уравнениям, но при представлении момента статической характеристикой

* Уравнения Парка—Горева. См. гл. 6.

** См.: Груздев А. А., Кучумов Л. А., Подоксик В. Я. Математическое моделирование асинхронной нагрузки. — Труды ЛПИ им. М. И. Калинина, 1965, № 242.

При расчете по полным уравнениям* (рис. 11.5, а) получаются динамические характеристики, в которых гармонические токи основной частоты в статоре и роторе представлены огibaющими, а аperiodические (постоянные) составляющие — в виде гармонических токов. На рис. 11.5, б показано протекание того же процесса, но полученное по упрощенным уравнениям. На рис. 11.6 показаны процессы качаний синхронного двигателя после наброса механической нагрузки на вал. Осциллограммы, снятые, так же как и в предыдущем случае, на АВМ, показывают влияние перехода от полных уравнений к упрощенным. Из этих и других многочисленных исследований можно заключить, что для приближенных расчетов замена динамической характеристики квазидинамической допустима и ведет к тем меньшим погрешностям, чем больше мощность агрегата, меньше r/x в цепи статора и меньше продолжительность изучаемого процесса.

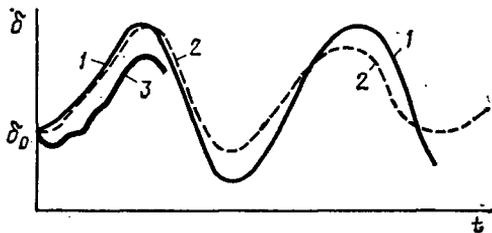


Рис. 11.6. Сопоставление характера переходных процессов в синхронном двигателе при расчетах по полным и упрощенным уравнениям:

1 — упрощенные, $r/x=0$; 2 — полные, $r/x=0,02$; 3 — полные, $r/x=0,05$

Высказанные здесь соображения о возможных упрощениях будут использованы при изложении гл. 11 и 12.

§ 11.3. ЛАВИНА НАПРЯЖЕНИЯ (СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ, ОПРОКИДЫВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ)

В дисциплинах электрических машин и электропривода обычно отмечают, что асинхронные двигатели имеют большие запасы устойчивости и поэтому обеспечение статической устойчивости отдельных двигателей, входящих в нагрузку, не вызывает затруднений. Если запас устойчивости характеризовать отношением максимального вращающего момента к рабочему, то коэффициент запаса составит 1,5—1,7. Следовательно, даже значительные снижения напряжения на шинах двигателей не могут привести к нарушению их устойчивости. Однако это относится к единичному двигателю или группе двигателей, питаемых от шин напряжения, значение которого не зависит от режима двигателя.

Если двигатель или группа двигателей питается от генератора или группы генераторов, замененных эквивалентным генератором соизмеримой мощности, то напряжение на шинах двигателя зависит от режима двигателя (от его скольжения). Условия нарушения устойчивости (опрокидывания) двигателя получаются при этом существенно иными. В этом случае качественные изменения условий устойчивости обусловлены изменением количества двигателей, подключенных к узлу нагрузки. В принятой постановке задачи должна рассматриваться как единая масса двигателей (эквивалентный двигатель), входящих в нагрузку, причем и параметры этих двигателей, и их рабочие режимы известны очень приблизительно. Так, характеризующие нагрузку параметры имеют обычно разброс в следующих пределах (табл. 11.2).

* О полных и упрощенных уравнениях (Парка—Горева) см. гл. 6.

Параметр	Среднее значение	Границы изменения, %
Кратность пускового тока K_{Π}	5—6	± 30
Коэффициент мощности при пуске $\cos \varphi_{\Pi}$	0,2—0,3	± 25
Коэффициент мощности при работе $\cos \varphi$	0,80—0,82	± 10
Удельный начальный момент сопротивления при- водных механизмов $M_{\text{мех } 0}$	0,90—0,95	± 40
Степенной показатель момента сопротивления n	2,0—2,5	± 50

В комплексную нагрузку могут также входить и синхронные двигатели, и различного рода статические устройства (печи, установки электролиза и т. д.), что еще более осложняет задачу в отношении точности. Пытаться оперировать с параметрами отдельных двигателей и по ним отыскивать «эквивалентный», в таких условиях, очевидно, безнадежно, и решение поставленной задачи будет проводиться в два этапа.

1. Получение качественных характеристик и основных математических соотношений в предположении, что для эквивалентного (всей нагрузке) асинхронного двигателя известны параметры схемы замещения. При этом, так как речь идет о качественных — физических — характеристиках, необходимых для обоснования рабочей методики, грубость схемы замещения не может быть существенна.

2. Получение на основе характеристик нагрузки расчетной практической методики для выявления возможности появления лавины напряжения и оценки имеющегося запаса.

§ 11.4. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Представим приближенно всю нагрузку эквивалентным асинхронным двигателем. При этом используем статические характеристики асинхронных двигателей и соответственно упрощенные уравнения. Это оправдано, во-первых, тем, что начальные отклонения, обуславливающие появления неустойчивости, предположены малыми, и, во-вторых, тем, что когда в процессе опрокидывания двигателя приобретают значительную скорость, характер процесса (быстрее, медленнее) не имеет практического значения. В отдельных случаях необходимо переходить к полным уравнениям, т. е. динамическим характеристикам.

Рассмотрим с учетом отмеченного схему системы (рис. 11.7, а), где сопротивление генератора x_r , сети x_c и эквивалентного двигателя, заменяющего все двигатели нагрузки x_s , соизмеримы по величине. Представим схему замещения так, как это показано на рис. 11.7, б. Затем приближенно упростим ее, перенеся x_r в точку 1, к месту приложения э. д. с. E (рис. 11.7, в).

Ток, обусловленный э. д. с. в цепи 1-2 (рис. 11.7, в),

$$I = E / \sqrt{x^2 + (R/s)^2}, \text{ где } x = x_r + x_c + x_s.$$

Предположим, что механический момент двигателя $M_{\text{мех}}$ (момент сопротивле-

ния) не зависит от угловой скорости и что в относительных единицах он численно (приближенно) равен потребляемой из сети мощности P :

$$M_{\text{мех}} = M \approx P/(\omega_0 + \Delta\omega), \text{ где } \omega_0 = 1, \Delta\omega \ll \omega_0.$$

Далее запишем

$$M \approx P = I^2 R/s = E^2 R s / [(x_s)^2 + R^2] = \text{const.} \quad (11.1)$$

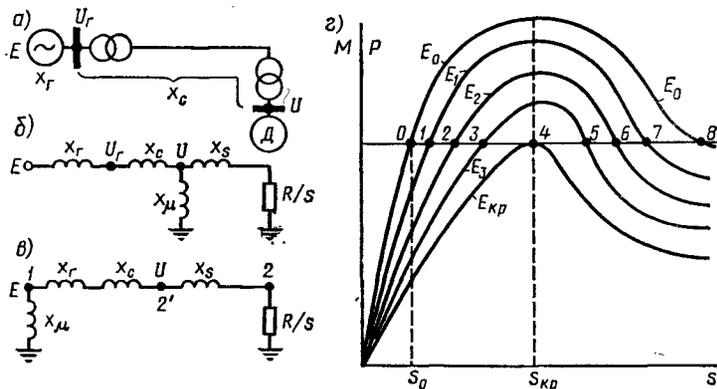


Рис. 11.7. Схема замещения системы:
 а — схема системы; б — схема замещения; в — упрощенная схема замещения; г — характеристики $M = P = f(E, s)$

Характеристики $P = f(E, s)$ построены на рис. 11.7, г, где значение критического скольжения двигателя определяется из условия $dP/ds = 0$. Дифференцируя и приравнявая нулю (11.1), получаем

$$E^2 R (R^2 - x_s^2 s_{кр}^2) / [R^2 + (x_s s_{кр})^2]^2 = 0,$$

откуда $s_{кр} = R/x$. Подставив значение $s_{кр}$ в (11.1), найдем* значение P_m , отвечающее $s_{кр}$:

$$P_m = E^2 / (2x). \quad (11.2)$$

* Выражение для момента эквивалентного двигателя может быть записано в виде

$$M = P = 2P_m / (s_{кр}/s + s/s_{кр}).$$

Для единичного асинхронного двигателя иногда пользуются уточненной характеристикой

$$M = 2M_m (1 + s_{кр}) / (s_{кр}/s + s/s_{кр} + 2s_{кр}).$$

Для определения скольжения в этом случае применяют формулу

$$s_{кр} = \frac{M_m s_{ном} + \sqrt{(M_m s_{ном})^2 - [1 - 2s_{ном}(M_m - 1)] s_{ном}^2}}{1 - 2s_{ном}(M_m - 1)},$$

где $s_{ном}$ — номинальное скольжение двигателя.

Напряжение на шинах нагрузки рассматриваемой группы асинхронных двигателей (точка 2' на рис. 11.7, в)

$$U = I \sqrt{x_s^2 + (R/s)^2} = E \sqrt{(x_s s)^2 + R^2} / \sqrt{(xs)^2 + R^2}$$

или

$$U_* = U/E = \gamma, \quad \text{где } \gamma = \sqrt{(\alpha^2 + s^2) / [\alpha^2 + (1 + \beta)^2 s^2]};$$

$$\alpha = R/x_s; \quad \beta = (x_r + x_c) / x_s. \quad (11.3)$$

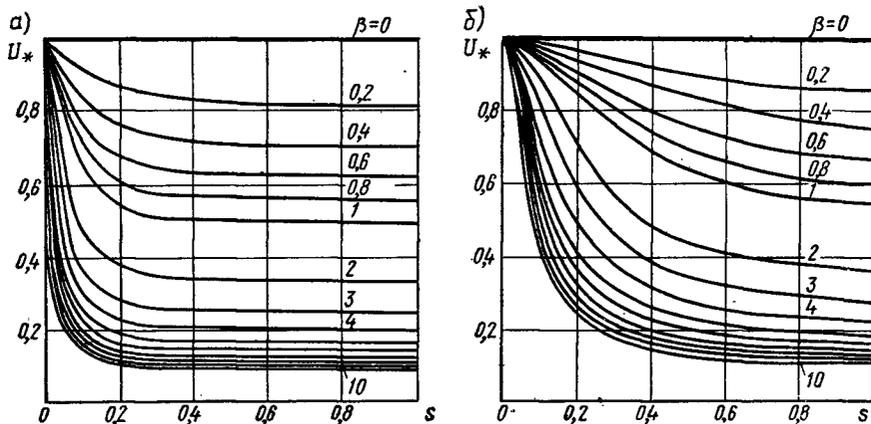


Рис. 11.8. Характер изменения напряжения U_* на шинах двигателя при $E = \text{const}$:

а — при $\alpha = R/x_s = 0,1$; б — при $\alpha = R/x_s = 0,5$

Момент двигателя

$$M_m = P_m = \frac{U^2}{2x_s} = \frac{E^2}{2x_s} \gamma^2,$$

т. е. он будет зависеть от скольжения.

Напряжение на шинах нагрузки не остается постоянным при изменении режима двигателей. Зависимость $U_* = f(s)$, показанная на рис. 11.8, подтверждает соображения о том, что условия работы двигателей в системе иные, чем те, которые были бы при питании от шин неизменного ($U = \text{const}$) напряжения. Реактивная мощность, поступающая из точки 1 (см. рис. 11.7, в), потребляемая двигателями и сетью, состоит из двух слагающих:

$$Q = Q_\mu + Q_s,$$

где $Q_\mu = E^2/x_\mu$ — мощность, потребляемая ветвью намагничивания* x_μ (см. рис. 11.7, в).

* Сопротивление x_μ нелинейное, оно зависит от величины E — уменьшается с ее ростом.

В ветви 1-2 мощность

$$Q_s = I^2 x = [I^2 R_s / (R_s)] x = P (s/R) x = P s / s_{кр}. \quad (11.4)$$

Таким образом, слагающая $Q_s \equiv s$ (при $P = \text{const}$, $s_{кр} = \text{const}$). Пользуясь характеристиками, показанными на рис. 11.7, *з*, можно установить характер зависимости скольжения $s = f(E)$. Очевидно, что точки 0, 1, 2, 3 образуют ветвь

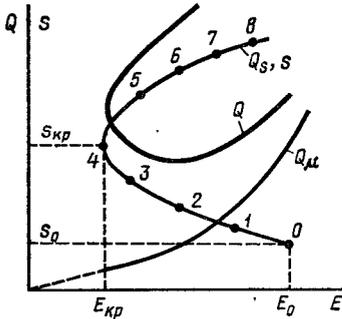


Рис. 11.9. Изменение скольжения s и реактивной мощности Q при изменении э. д. с. E в схеме, представленной на рис. 11.1

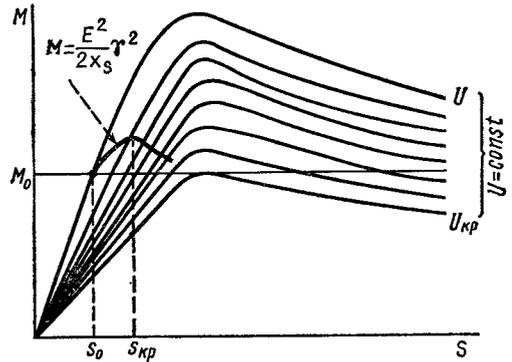


Рис. 11.10. Вращающий момент двигателя: — при $U = \text{const}$; — при $E = \text{const}$ или $U = \text{var}$

характеристики, на которой величина s будет возрастать с уменьшением E , т. е. $ds/dE < 0$ (рис. 11.9). Точка 4 на рис. 11.7, *з*, где $dP/ds = 0$, даст на кривой $s = f(E)$ экстремум, в котором $ds/dE = -\infty$. Точки 5, 6, 7, 8 кривой $P = f(s)$ будут соответствовать ветви характеристики $s = f(E)$, где s будет возрастать с ростом E (рис. 11.9) и $ds/dE > 0$.

Согласно (11.4), величина $Q_s \equiv s$ и, следовательно, зависимость $Q_s = f(E)$ будет отличаться от $s = f(E)$ только масштабом. Зависимость $Q = Q_\mu + Q_s$ будет иметь экстремальное значение ($dQ/dE = -\infty$) при том же значении $E_{кр}$, что и $s = f(E)$, как это показано на рис. 11.9. Заметим, что в точке 2' напряжение $U < E$ и, кроме того, U уменьшается с ростом скольжения (рис. 11.10). Однако если бы напряжение U было постоянным, то момент (мощность) двигателя был бы больше, чем при $E = \text{const}$. На рис. 11.11 показаны примерные характеристики мощности (момента) при постоянстве различных напряжений и э. д. с. в схеме замещения:

$$M_E = \frac{E^2}{2x}; \quad M_{U_\Gamma} = \frac{U_\Gamma^2}{2(x_c + x_s)}; \quad M_U = \frac{U^2}{2x_s}.$$

Здесь $M_U > M_{U_\Gamma} > M_E$, причем момент, определенный из условия постоянства э. д. с. E , больше момента, определенного из условия постоянства E_q :

$$(E')^2 / [2(x'_d + x_c + x_s)] > E_q^2 / (2x).$$

Полученные выражения являются приближенными, отвечающими грубому преобразованию схемы, представленной на рис. 11.7, *б*, в схему, представленную

на рис. 11.7, в. Однако это обстоятельство не меняет общих качественных закономерностей.

Здесь существенно, что критическое скольжение

$$s_{кр} = R/x = R/(x_r + x_c + x_s)$$

оказывается намного меньше, чем критическое скольжение, которое имел бы единственный двигатель, подключенный к шинам неизменного напряжения, т. е. если бы было $U = \text{const}$. В этом случае $s_{кр} = R/x_s$. Из соображений, высказанных относительно характеристик (см. рис. 11.7), следует, что опрокидывание двигателя* (или группы двигателей), питающегося от генератора соизмеримой мощнос-

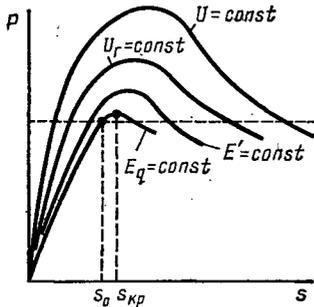


Рис. 11.11. Характеристика мощности при поддержании постоянным напряжения и э. д. с. в различных точках схемы замещения

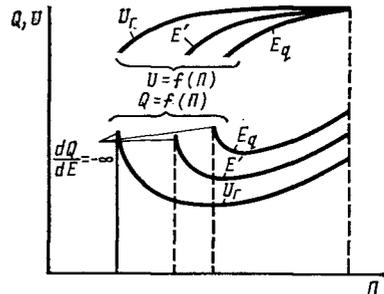


Рис. 11.12. Зависимость реактивной мощности Q и напряжения U от независимо изменяемого параметра ($\Pi = U_r, E', E_q$)

ти, может произойти при сравнительно небольших изменениях скольжения и снижении э. д. с., питающей эквивалентный двигатель, и тем более при небольших изменениях напряжения U , зависящего от режима двигателя (см. рис. 11.8 и 11.11).

Определение критических условий нельзя в этом случае проводить исходя из напряжения на зажимах двигателя, которое не является независимой переменной. Эти условия должны определяться исходя из той э. д. с. генератора E , которую в данной схеме можно считать не зависящей от изменений режима. Э. д. с. E при различных способах регулирования генератора выбирается различной. В случае нерегулируемого генератора это будет э. д. с. E_q ; при АРВ п. д. $E'_q \approx E'$; при АРВ с. д. $E \approx U_r$. Характеристики $U = f(\Pi)$ и $Q = f(\Pi)$, где Π — принятая за независимую переменную величина (E_q, E', U_r или U), показаны на рис. 11.12. Из характеристик видно, что снижение Π , особенно в зоне, где dQ/dE отрицательно, приводит к росту реактивной мощности, соответствующему увеличению токов, потребляемых двигателями нагрузки, и увеличению потерь

* Напомним, что под *опрокидыванием* понимается достижение двигателем критического скольжения $s_{кр}$ (см. рис. 11.7, в) и переход его рабочей точки в неустойчивую область при $dP/ds < 0$.

напряжения в питающей сети, а следовательно, способствует дальнейшему снижению напряжения.

Таким образом, вблизи режима опрокидывания двигателей процесс прогрессирующего снижения напряжения оказывается очень заметным. Персонал станции и системы не может судить непосредственно о росте токов роторов, статоров и скольжениях двигателей, входящих в состав комплексной нагрузки в то время, когда они приближаются к опрокидыванию. Персонал наблюдает только резкое, лавинообразное снижение напряжения. Процесс этот поэтому и получил название *лавины напряжения*. Появлению лавины напряжения обычно предшествуют режимы при недостаточно высоком возбуждении генераторов или увеличении реактивных сопротивлений связи. Наблюдаемое при этом снижение реактивной мощности, приходящей к потребителю, показывает, что причиной лавины напряжения является так называемый *дефицит реактивной мощности* (генерируемая реактивная мощность в системе меньше той, которая соответствует желательному уровню напряжения).

Схема, изображенная на рис. 11.7, а, могла бы отвечать и сложной системе с несколькими генераторами и нагрузками, если только в этой системе все генераторы можно заменить одним эквивалентным генератором с постоянной э. д. с. и объединить все нагрузки в один эквивалентный двигатель. Однако, так как нагрузка электрических систем обычно состоит из потребителей электрической энергии различного рода и асинхронные двигатели составляют в ней только некоторую (хотя и значительную) долю, определить сколько-нибудь надежно параметры эквивалентного двигателя невозможно.

§ 11.5. ПРАКТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ dE/dU

Целесообразно вместо критерия устойчивости $dP/ds = 0$ или полученного выше (рис. 11.13) эквивалентного ему критерия $dQ/dE_0 = -\infty$ пользоваться практическим критерием устойчивости нагрузки* $dE_0/dU = 0$, который *не требует эквивалентирования двигателей нагрузки*; при этом оперируют только с ее внешними характеристиками $P_n = f(U)$; $Q_n = \varphi(U)$. Смысл этого критерия пояснен на рис. 11.13, где в соответствии с данными гл. 4 и 6 показано, что при снижении напряжения на шинах двигателя до значения $U_{кр}$, отвечающего границе устойчивого режима, производная от эквивалентной э. д. с. E_0 по напряжению проходит через нуль. Таким образом, нарушение устойчивости связано с тремя соотношениями:

$$dQ/dE_0 = -\infty; \quad dP/ds = 0; \quad dE_0/dU = 0. \quad (11.5)$$

В справедливости последнего критерия можно убедиться исходя из эквивалентной схемы замещения (см. рис. 11.7, а), если напряжение на шинах комплексной нагрузки рассматривать как величину, зависящую от режима двигателя, а эквивалентную э. д. с. $E = E_0$ — как независимую переменную. При этом условии между напряжением на шинах двигателя и эквивалентной э. д. с. существует очевидное соотношение

* Критерий $dE/dU = 0$ для определения устойчивости комплексной нагрузки был впервые предложен П. С. Ждановым (1938), поэтому его следовало бы называть критерием Жданова.

$$U = \sqrt{(E_0 - Q_0 x_0 / E_0)^2 + (P x_0 / E_0)^2} \approx E_0 - Q_0 x_0 / E_0. \quad (11.6)$$

Здесь значения Q_0 являются значениями внутренней реактивной мощности генератора. Продифференцируем выражение (11.6) по E_0 :

$$dU/dE_0 = 1 - (E_0 dQ_0/dE_0 - Q_0) x_0 / E_0^2. \quad (11.7)$$

Из соотношения (11.7) очевидно, что при $-dQ_0/dE_0 \rightarrow \infty$ величина $dU/dE_0 \rightarrow \infty$ или $dE_0/dU \rightarrow 0$.

Таким образом, подтверждается равноценность критерия $dQ_0/dE = -\infty$ критерию $dE/dU = 0$, а так как известно, что условие $dQ_0/dE = -\infty$ равноценно

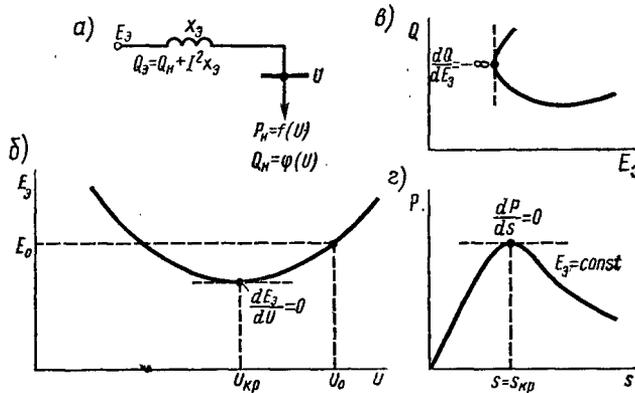


Рис. 11.13. Критерии устойчивости нагрузки:
а — схема замещения; б — зависимость $E_0 = \varphi(U)$; в — зависимость $Q = \varphi(E_0)$; г — зависимость $P = \varphi(s)$

$dP/ds = 0$, то можно считать доказанной равноценность всех трех критериев, показанных на рис. 11.13.

Проверка устойчивости нагрузки по критерию dE/dU . Она начинается с построения зависимости $E_0 = f(U)$. Предварительно задаются рядом значений напряжения U , для каждого из которых по характеристикам нагрузки находят соответствующие значения P_n , Q_n , а затем строят зависимость $E_0 = f(U)$. Запас устойчивости нагрузки определяется как отношение $[(U_0 - U_{кр})/U_0] 100\%$, где U_0 — рабочее напряжение, а $U_{кр}$ — значение критического напряжения, при котором $dE/dU = 0$ (рис. 11.13).

Генераторы без АРВ замещаются э. д. с. E_0 , а генераторы при АРВ — э. д. с. E_x , приложенной за сопротивлением Δx , причем при АРВ с. д. $\Delta x = 0$ и э. д. с. $E_x = U_r$.

Проверка устойчивости нагрузки по критерию $d\Delta Q/dU > 0$. При расчетах устойчивости нагрузки в системе, имеющей нагрузку, сосредоточенную в узловой точке (например, точка 4 на рис. 11.14), удобно воспользоваться практическим критерием: $d\Delta Q/dU > 0$, тогда

$$\Delta Q = \Sigma Q_n - \Sigma Q_r.$$

Задаваясь напряжением на шинах U , можно построить характеристику мощ-

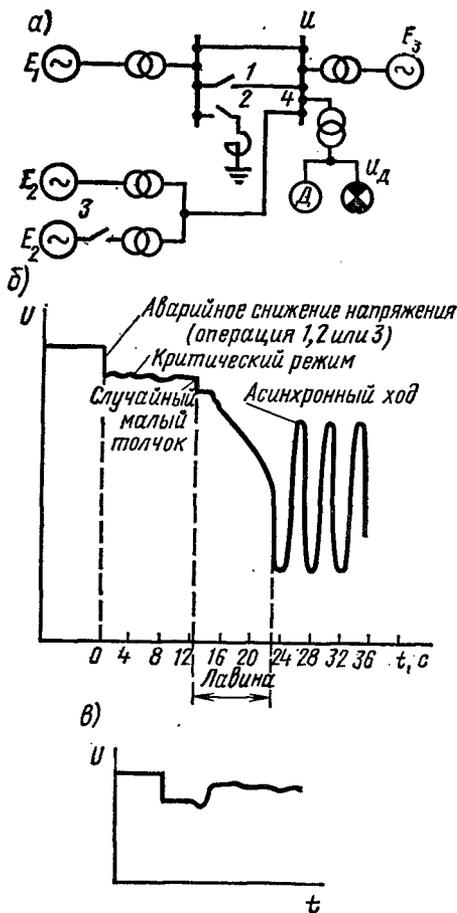


Рис. 11.14. Пример протекания процесса нарушения устойчивости нагрузки, подключенной в точке 4 схемы (лавины напряжения): а — схема системы и изменения, вызывающие лавину напряжения; отключение цепи 1, включение значительной реактивной нагрузки 2, отключение части генераторов 3; б — возникновение и характер протекания процесса при отсутствии АРВ; в — то же, но при форсировании возбуждения регуляторами

ности $\Sigma Q_r = f(U)$, притекающей в узловую точку, и характеристику суммарной мощности нагрузки $\Sigma Q_n = f(U)$.

Разумеется, для схемы, представленной на рис. 11.7, а, также можно применить критерий $d\Delta Q/dU > 0$, рассматривая любую точку схемы как узловую и строя зависимость подходящего к ней потока мощности ΣQ_r и потока мощности, отходящего от нее в нагрузку. Именно построением характеристик $\Delta Q = f(U)$ можно наиболее просто и наглядно выявить факторы, благоприятно или отрицательно влияющие на устойчивость нагрузки.

Влияние регуляторов возбуждения, установленных на генераторах. Представляя группу генераторов станции одним эквивалентным (рис. 11.15, а), отражаем эффект регулирования в характеристике

$$\Sigma Q_p = f(U) = (EU/x_2) \cos \delta - U^2/x_2$$

уменьшением x_2 и э. д. с. E . Эта характеристика при АРВ идет так (рис. 11.15, б), что коэффициент запаса устойчивости

k_2 оказывается больше, чем коэффициент запаса k_1 в нерегулируемой системе:

$$k_2 = |U_{кр2} - U_0| / U_0 > k_1 = |U_{кр1} - U_0| / U_0, \quad (11.8)$$

где $U_{кр1}$, $U_{кр2}$ определены согласно характеристикам критического режима (рис. 11.15, б).

Влияние включения в нагрузку конденсаторов (рис. 11.15, в). Конденсаторы улучшают $\cos \phi$ и обеспечивают поддержание напряжения при изменении режима, что может резко ухудшить устойчивость (рис. 11.15, г, д, где U_c — напряжение на конденсаторах, x_c — их сопротивление). В этом случае в составе мощности нагрузки появилась отрицательная составляющая $\Sigma U_c^2/x_c$ и суммарная кривая $\Sigma Q_n = f(U)$ оказалась пологой. В свою очередь, э. д. с. эквивалентного генератора при включении конденсаторов уменьшается, что приводит к деформации характеристики ΣQ_r . В результате запас устойчивости нагрузки при включении конденсаторов уменьшается от значений k_1, \dots, k_3 , где $k_1 = |U_{кр1} - U_0| / U_0$,

до $k_4 = |U_{кр4} - U_0|/U_0$ или нагрузка становится неустойчивой (кривая 5 на рис. 11.15, б). Исправить это положение можно, применяя одновременно с улучшением $\cos\phi$ статическими конденсаторами регулирование возбуждения на генераторах и увеличивая в составе нагрузки число синхронных двигателей с регулированием возбуждения. При этом характеристики нагрузки становятся более

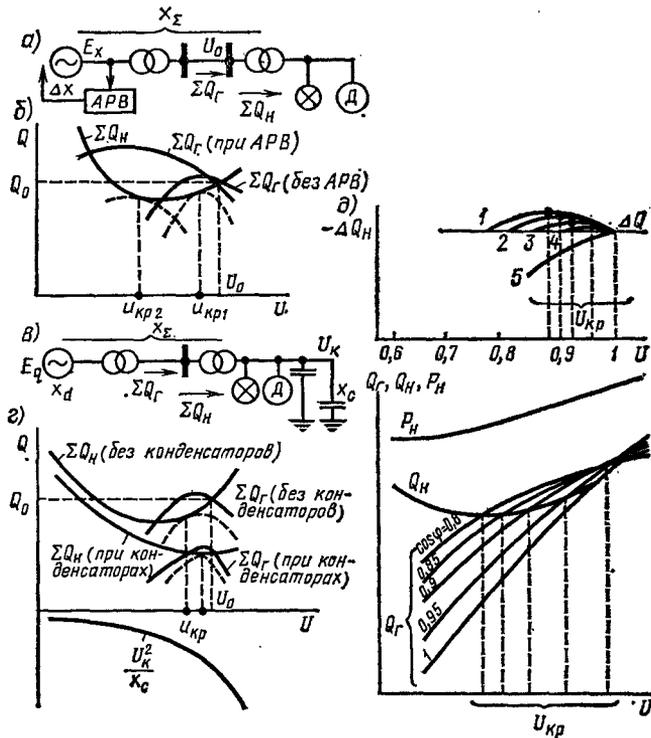


Рис. 11.15. Устойчивость комплексной нагрузки:

а — схема системы; б — влияние АРВ на работу системы; в — схема системы при улучшении $\cos\phi$ нагрузки; г — влияние конденсаторов на устойчивость нагрузки; д — влияние изменений $\cos\phi$ на критическое напряжение

благоприятными в отношении устойчивости.

Возникновение и характер протекания процесса нарушения устойчивости нагрузки показаны на рис. 11.16, а, б, где видно влияние отключения части генераторов и форсирования возбуждения.

При уменьшении сопротивления между генератором и двигателем, применении регуляторов возбуждения, обеспечивающих постоянство э. д. с.

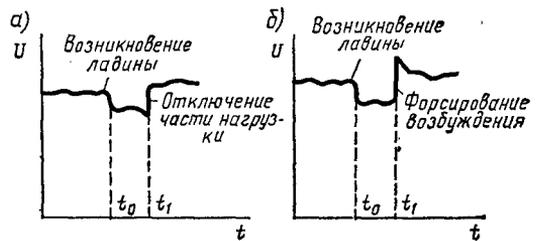


Рис. 11.16. Борьба с лавиной напряжения: а — отключение части нагрузки при возникновении лавины; б — форсирование возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов

E'_q или постоянство напряжения на зажимах генератора, критическое напряжение $U_{кр}$ будет уменьшаться, стремясь к значению критического напряжения, определенному непосредственно на шинах электродвигателя.

Следует иметь в виду, что влияние конденсаторов на устойчивость асинхронных двигателей может быть различным в зависимости от того, изменяется или нет при включении конденсаторов коэффициент трансформации понижающих трансформаторов. В ряде случаев

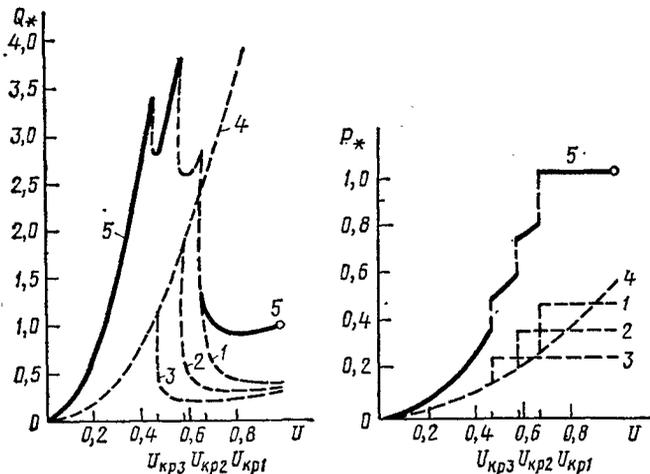


Рис. 11.17. Статические характеристики $Q_*(U)$ и $P_*(U)$ для нагрузки, состоящей из трех двигателей, при $Z_{вн} = 0$: 1—3 — характеристики каждого из двигателей; 4 — то же, для загорюженных двигателя; 5 — характеристики суммарной нагрузки (отрезки, показанные штриховыми линиями, соответствуют процессу торможения)

нагрузки и их характеристики рассматривались как единые. При нескольких группах различных двигателей эквивалентные характеристики Q и P в процессе опрокидывания двигателей нагрузки будут состоять из суммы соответствующих характеристик отдельных групп двигателей.

На рис. 11.17 показаны статические характеристики трех групп двигателей, различающихся коэффициентами загрузки: $K_{з1} = 1$, $K_{з2} = 0,75$; $K_{з3} = 0,5$; остальные параметры одинаковы: $\cos\varphi_{ном} = 0,85$; $m_{макс} = 2,2$; $m_{п} = 1,2$; $I_{п} = 7$; $m_{ст} = 1$. Напряжения $U_{кр1}$, $U_{кр2}$ и $U_{кр3}$ являются критическими: при каждом из этих значений происходит опрокидывание соответствующего двигателя, рост реактивной нагрузки и снижение активной. При $U < U_{кр3}$, когда все двигатели заторможены, суммарная мощность пропорциональна U^2 .

Лавина напряжения с отключениями двигателей. При рассмотрении лавины напряжения предположим, что тормозящиеся двигатели остаются подключенными к сети. Это возможно, если рассматривается небольшой промежуток времени. В зависимости от времени (быстроты) протекания процесса лавины напряжения, темпа его снижения, уставок максимумно-токовых защит двигателей возможны случаи отключения двигателей от сети в процессе опрокидывания до их остановки или сразу же после остановки (при пониженном напряжении двигатель может быть сильно перегружен по току).

Эти факторы могут существенно влиять на процесс нарушения устойчивости группы

целесообразно, разгрузив питающую сеть от потока реактивной мощности, уменьшить потери энергии, но нет надобности повышать напряжение потребителей. В этих случаях при включении конденсаторов исходное значение напряжения восстанавливают, изменяя коэффициент трансформации, что ведет обычно к снижению запаса по статической устойчивости. Однако запас по устойчивости снижается не всегда. Могут быть случаи, когда с помощью регулирования понижающих трансформаторов напряжение увеличивается. Но даже и тогда, когда напряжение на шинах потребителей сохраняется неизменным, в зависимости от соотношений реактивных сопротивлений сети и конденсаторов запас устойчивости может быть сохранен. Для конкретных случаев необходимо проводить отдельный анализ.

Ранее эквивалентные

двигателей*. Кроме того, имеется ряд причин, вызывающих самоотключение двигателей при снижении напряжения, безотносительно к тому, затормозились они или нет. Так как напряжения, при которых происходит самоотключение двигателей, близки значениям критического напряжения, то возможны любые сочетания опрокидывания и отключения двигателей. Признаком самоотключения двигателей без лавины напряжения является снижение и активной и реактивной нагрузок при понижении напряжения до $0,7 U_{ном}$ и ниже.

Расчеты значений $E_{кр}$ и $U_{кр}$ с учетом отключения контактов магнитных пускателей выполняются аналогично тому, как это было показано выше, но при построении эквивалентной характеристики 5 (рис. 11.17) суммируются мощности только тех двигателей, которые остаются включенными в сеть. Для правильного учета действия максимально-токовых защит, отключающих двигатели или питающие линии, следует рассчитывать переходный процесс по общим правилам анализа динамической устойчивости.

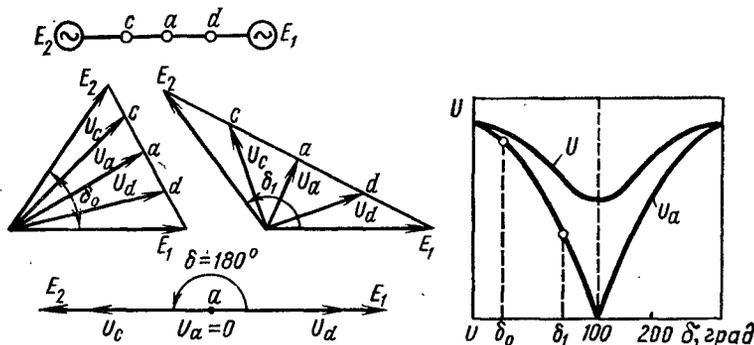


Рис. 11.18. Электрический центр системы

* Роль электрического центра системы. Наибольшая опасность нарушения устойчивости нагрузки может иметь место в случаях, когда нагрузка оказывается в электрическом центре системы или вблизи от него. В связи с этим дадим понятие электрического центра. Во время качаний генераторов или во время асинхронного хода напряжения в различных точках электрических сетей и электропередач, связывающих эти генераторы, изменяются. При этом в каждой системе при данном ее исходном режиме существует точка, где напряжение оказывается минимальным. Эта точка называется *электрическим центром системы*.

Если система полностью симметрична (э. д. с. равны и постоянны, сопротивления однородны, т. е. отношение R/x у всех элементов системы одинаково), то в электрическом центре, находящемся в данном случае в середине передачи (точка a на рис. 11.18), напряжение будет падать до нуля ($U_a = 0$) при расхождении э. д. с. на 180° . Напряжение в других точках (например, c, d) при этом не будет равным нулю. Следовательно, потребители, расположенные в электрическом центре, будут периодически попадать в режим, равносильный короткому замыканию ($U = 0$), а установки релейной защиты, работающие на основе замера эквивалентного сопротивления линии $Z_{л} = U/I$ (дистанционные защиты), будут работать неправильно, отключая неповрежденные участки линии.

В реальной электрической системе при неоднородных элементах системы, а также при не равных и изменяющихся во времени э. д. с. (реакция якоря, дей-

* Подробнее см.: Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Хачатрян Э. А. Устойчивость нагрузок электрических систем. — М.: Энергоиздат, 1981, с. 208.

ствии регуляторов возбуждения), наличии э. д. с. в промежуточных точках и сопротивлений нагрузки, зависящих от подведенного напряжения (асинхронные двигатели), понятие электрического центра менее определено, чем в симметричной схеме (рис. 11.18). Электрический центр может быть расположен ближе к началу или концу линии либо может находиться вне ее (в генераторах, нагрузках и т. п.); место его может изменяться в процессе качаний (см. гл. 14).

§ 11.6. МЕДЛЕННЫЕ ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Длительные медленные понижения напряжения в распределительных и питающих сетях приводят к ряду явлений, с которыми приходится считаться при анализе переходных процессов в системах электроснабжения. Так, понижение напряжения от U_0 до U_1 ведет к снижению запаса статической устойчивости двигателей.

У синхронных и асинхронных двигателей запас снижается

$$\text{от } K_{в1сн} = (EU_0/x - P_0)/P_0 \text{ до } K_{в2сн} = (EU_1/x - P_0)/P_0,$$

$$\text{от } K_{в1ас} = (P_{m1} - P_0)/P_0 \text{ до } K_{в2ас} = (P_{m2} - P_{01})/P_{01},$$

где P_0 не меняется при снижении напряжения.

Здесь, полагая, что $P = M$, примем

$$P_{m1} \equiv U_0^2; \quad P_{m2} \equiv U_1^2.$$

Механический момент нагрузки $M_0 = P_0$ изменяется с изменением скольжения, которое, в свою очередь, зависит от напряжения. Значение P_0 может определяться согласно известному выражению

$$P_0 = c(1 - s_0)^q; \quad P_{01} = c(1 - s_1)^q,$$

где c — постоянный коэффициент; s_0 и s_1 — скольжения в нормальном режиме и режиме сниженного напряжения; q — показатель, характеризующий вид статической характеристики.

Для любого режима двигателя существует соотношение

$$U^2 R_s / [R^2 + (x s)^2] = 2 P_m s_{кр} s / [s^2 + s_{кр}^2] = c(1 - s)^q,$$

где $s_{кр}$ — критическое скольжение.

Следовательно, скольжение s_1 может быть найдено из соотношения

$$U_0^2 / s_0^q [(1 - s_0)^q (s_{кр}^2 + s^2)] = U_1^2 s_1^q [(1 - s_1)^q (s_{кр}^2 + s_1^2)]. \quad (11.9)$$

Для определения s_1 преобразуем (11.9), тогда при $q = 1$ получим уравнение вида

$$s_1^3 - s_1^2 + A s_1 - B = 0. \quad (11.10)$$

Пусть, например, при напряжении U_0 имеются следующие данные: $s_0 = 4\%$; $q = 1$; $s_{кр} = 0,2$; $U_1 = 0,7U_0$. Из (11.9) получаем $A = 0,53$, $B = 0,04$. Решая (11.10), получаем $s_1 = 0,1$, т. е. 10%. Зная s_1 , можно найти $P_{01} = (0,9/0,96)P_0$ и далее определить коэффициент запаса $K_{в2}$.

Рассматривая процессы в двигателях нагрузки при снижении напряжения, необходимо заметить, что происходящий при этом рост тока приводит к более ин-

тенсивному снижению напряжения в питающей сети, что, с одной стороны, неблагоприятно сказывается на работе всей системы, а с другой — приводит к увеличению нагрева оборудования. Особенно это относится к асинхронным двигателям, у которых токи статора I_1 и ротора I_2 резко возрастают со снижением напряжения. На рис. 11.19 показан характер этого возрастания, а на рис. 11.20

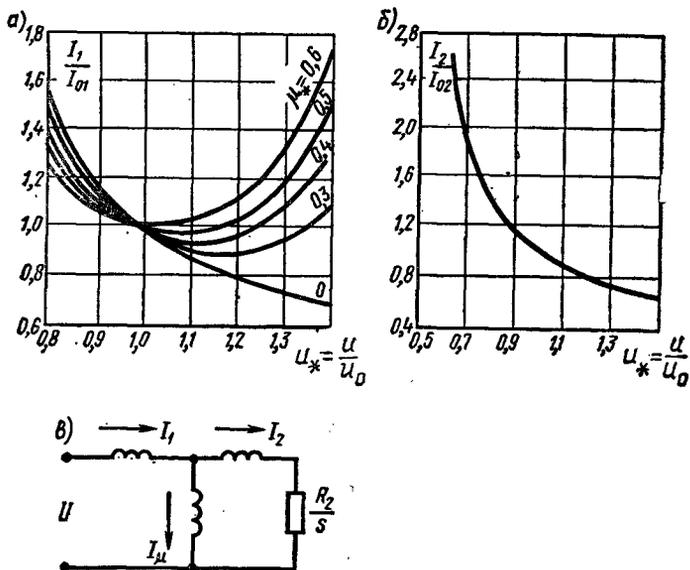


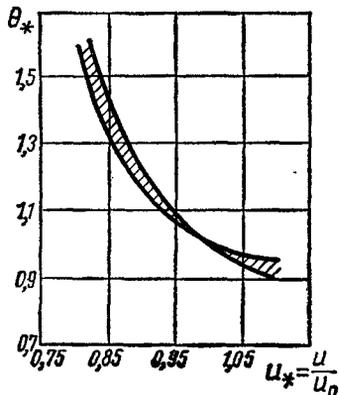
Рис. 11.19. Влияние понижения напряжения на ток асинхронного двигателя при нормальной частоте и номинальной нагрузке:

a — относительный ток статора I_1/I_{01} в зависимости от напряжения U_* при различных значениях намагничивающего тока $\mu_* = I_\mu/I_{01}$; *б* — относительный ток ротора I_2/I_{02} в зависимости от напряжения U_* ; *в* — схема замещения двигателя

приведены примерные зависимости относительных длительных превышений температуры θ_* , показывающие влияние понижения напряжения на нагрев двигателей. Вопросы теплового расчета двигателей не относятся к настоящей дисциплине, и кривые, изображенные на рис. 11.20, приводятся только для иллюстрации.

Рис. 11.20. Зона изменений относительного превышения температуры обмотки статора двигателей единой серии А при номинальной частоте и номинальной нагрузке в зависимости от напряжения $U_* = U_\infty/U_0$:

$\theta_* = \theta \sim / \theta_0$ ($\theta \sim$ — температура при изменившемся напряжении $U \sim$; θ_0 — температура при номинальных условиях работы)



§ 11.7. ПРОЦЕСС ОПРОКИДЫВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

У асинхронного двигателя имеется только одна область устойчивой работы — область, лежащая между синхронной скоростью и скоростью, отвечающей критическому скольжению. Область между критическим скольжением и скольжением, равным единице, оказывается неустойчивой.

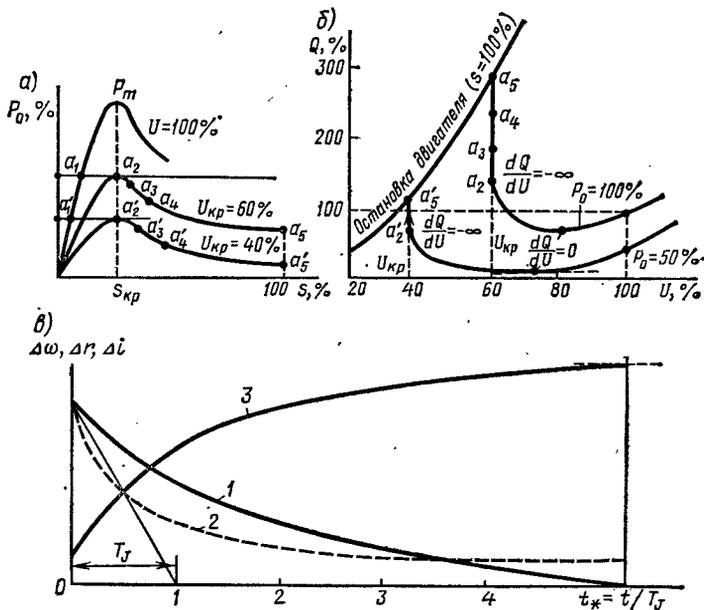


Рис. 11.21. Характеристики асинхронного двигателя при различных значениях питающего напряжения, не зависящего от режима:

a — характеристика $P_0=f(s)$ при $P_0=100\%$ и $P_0=50\%$, когда напряжение не зависит от режима двигателя; $б$ — характеристики $Q=f(U)$ при $P_0=100\%$ и $P_0=50\%$, соответствующие характеристикам $P=f(s)$; $в$ — протекание процесса опрокидывания во времени; 1 — изменения частоты вращения $n/n_0=f(t)$; 2 — изменение сопротивления; 3 — изменение тока

В нормальных условиях двигатель работает на устойчивой части характеристики (участок $0-s_{кр}$ на рис. 11.21, а) при скольжении меньше критического. Однако при снижении напряжения или увеличении механического вращающего момента двигатель может оказаться в критическом режиме (точка a_2). При дальнейшем снижении напряжения точка, характеризующая режим, перейдет на спадающую часть характеристики (участок a_3a_4); двигатель будет тормозиться, ток и реактивная мощность (рис. 11.21, б) будут резко расти, а затем двигатель остановится — «опрокинется» (точка a_5). При неизменном напряжении, равном критическому, процесс остановки идет так, как это показано на рис. 11.21, б, в. Обычно двигатели, подключенные к шинам напряжения, не зависящего от их режима, работают с большим запасом устойчивости, Их рабочее скольжение значительно меньше критического, а максимальный вращающий момент намного больше рабочего: $(1,5 \div 1,7)M_0$. В этих условиях отклонения напряжения на шинах еди-

ничного двигателя не опасны с точки зрения устойчивости двигателей и только очень большие снижения напряжения на их шинах (порядка 20—30%) приводят к опрокидыванию. При питании группы двигателей от источника соизмеримой мощности в результате лавины напряжения может произойти опрокидывание и при малых (2—3%) отклонениях напряжения.

Изменение частоты системы. Изменение активной и реактивной мощностей при изменениях частоты подведенного напряжения влияет на условия опрокидывания двигателей. При неизменных напряжении и механическом моменте $M_{\text{мех}}$ на валу двигателя активная мощность, потребляемая двигателем, меняется пропорционально частоте согласно выражению $P = \omega M$. Снижение частоты приводит к уменьшению скольжения, которое можно найти качественно из выражения

$$M = U^2 R_2 s / \{ [R_2^2 + (x_{s0} \omega s / \omega_0)^2] \omega \}, \quad (11.11)$$

где $x_{s0} = x_s$ при $\omega = \omega_0$.

При $M = \text{const}$ можно грубо заменить зависимость $s = f(\omega)$ прямой, т. е. принять $s \equiv f$. Однако критическое скольжение при снижении частоты оказывается больше, так как $s_{\text{кр}} = R_2 \omega_0 / (\omega x_{s0})$. Это является благоприятным в смысле устойчивости фактором, тем более что и максимальное значение M несколько увеличивается.

Потребляемая двигателем реактивная мощность зависит от изменений частоты: $Q = \varphi(\omega)$. Чтобы установить характер этого изменения, необходимо рас-

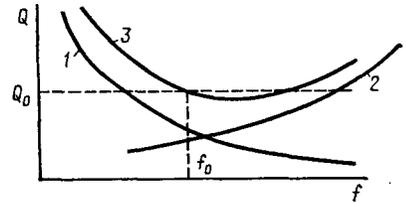


Рис. 11.22. Изменение мощности, потребляемой двигателем, при изменении частоты:

1, 2 — составляющие реактивной мощности [$1 - Q_\mu = \varphi_1(f)$; $2 - Q_s = \varphi_2(f)$];
3 — полная реактивная мощность $Q = Q_s + Q_\mu$.



Рис. 11.23. Изменение вращающего момента, критического скольжения и реактивной мощности при изменении частоты:
а — $M = f(s)$; б — $Q = f(U)$ при $f = f_0$ (кривая 1); $f < f_0$ (кривая 2) и $f \ll f_0$ (кривая 3)

смотреть в отдельности влияние частоты на составляющие Q_s и Q_μ . Если $s = I^2 R_2 / (\omega M)$, то $I^2 \equiv \omega s$; при этом

$$Q_s = I^2 (x_{s0} / \omega_0) \omega, \text{ или } Q_s \equiv \omega^2 s.$$

Таким образом, составляющая Q_s уменьшается со снижением частоты и возрастает с ее увеличением. Составляющая $Q_\mu = U^2 \omega_0 / (x_{\mu 0} \omega) \equiv 1/f$, напротив, возрастает с уменьшением частоты. Соотношение между этими составляющими

(рис. 11.22) в обычных асинхронных двигателях таково, что характер изменения результирующей мощности $Q = Q_p + Q_s$ определяется первой слагающей при малых отклонениях частоты и второй — при значительном ее росте.

Изменение потребления реактивной мощности при медленных отклонениях частоты от ее номинального f_0 значения показано на рис. 11.22, 11.23. Положительное влияние снижения частоты на устойчивость двигателей нагрузки при умеренном ее снижении (см. рис. 11.23) может смениться на отрицательное (при больших снижениях), так как рост потребления реактивной мощности может приводить к уменьшению напряжения в сети, питающей нагрузку*, и стимулировать развитие лавины напряжения. Поэтому, учитывая указанные общие закономерности, необходимо проводить проверку и давать оценку в конкретных случаях.

§ 11.8. РАБОТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ ПРИ НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ПРИЛОЖЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

При несимметрии и несинусоидальности можно заменить несколько асинхронных двигателей или эквивалентный им двигатель группой двигателей, расположенных на общем валу (рис. 11.24). Каждый из этих двигателей должен быть включен на напряжение, отвечающее частоте f_k и чередованию фаз k . Параметры каждого двигателя должны соответствовать определенным частотам. Скольжение ротора каждого (1, 2, ..., m) двигателя, сидящего на общем валу — «объединенного двигателя» — будет определяться выражением

$$s_{об} = (kn_0 \mp n_{об}) / (kn_0),$$

где kn_0 — синхронная частота вращения какой-либо гармоники; n_0 — синхронная частота вращения вектора э. д. с. системы (основной гармоники).

Частота вращения объединенного асинхронного двигателя, обозначенная здесь как $n_{об}$, может быть определена из выражения

$$s_1 = (n_0 - n_{об}) / n_0,$$

где s_1 — скольжение вала объединенного двигателя по отношению к синхронной частоте, т. е. частоте, обусловленной 1-й гармоникой; n_0 — синхронная частота вращения.

Скольжение объединенного вала по отношению к k -й гармонике, выраженное через скольжение 1-й гармоники, будет

$$s_k = 1 \mp (1 - s_1) / k.$$

В приведенных выше выражениях знак «+» соответствует симметричным составляющим гармоник, создающим поля вращения, встречные полю основной гармоники; знак «—» соответствует симметричным составляющим, создающим поля, вращающиеся в ту же сторону, что и основное поле статора.

Ток в каждом k -м двигателе приближенно может быть определен согласно схеме, при-

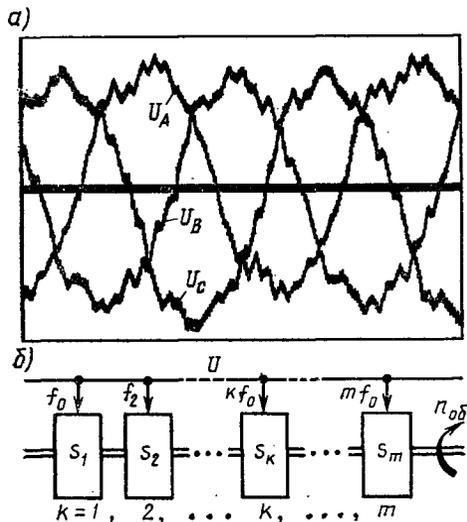


Рис. 11.24. Питание двигателя искаженным напряжением U_A, U_B, U_C :

а — несимметрия, несинусоидальность напряжения в фазах; б — асинхронный двигатель, представленный как сумма двигателей 1, 2, ..., k , ..., m , питаемых напряжениями (гармониками) $f_0, f_2, \dots, kf_0, \dots, mf_0$ и сидящих на одном валу с частотой вращения $n_{об}$

* Обычно считают, что опрокидывающий M_m момент двигателя остается постоянным, если $U/f = \text{const}$ при одновременном изменении частоты и напряжения, а также при условии, что эти параметры не зависят от режима двигателя. При этом $M_{mf} = M_m(U/f)^2$, $s_{крf} = s_{кр} / f$.

веденной на рис. 11.25, где U_k — напряжение соответствующей k -й гармоники. Полное сопротивление двигателя определяется как

$$Z_k = r_k' + jx_k = r_{1k} + r_{2k}'/s_k + j(x_{1k} + x_{2k})$$

Входящие в схему замещения параметры могут быть выражены через известные параметры асинхронного двигателя

$$z_k = K_{zk}z_k; \quad \gamma_k = K_{rk}r_k; \quad x_k = K_{xk}x_k,$$

где z_k, r_k, x_k — параметры асинхронного двигателя при коротком замыкании на 50-периодном токе; K_{rk}, K_{xk} — коэффициенты вытеснения, показывающие увеличение соответствующих сопротивлений для токов высших гармоник по сравнению с сопротивлением току при 50 периодах.

Для рассмотрения электромеханических переходных процессов существенно, что наличие высших гармоник и составляющей обратной последовательности в напряжении приводит к понижению максимального и пускового моментов асинхронного двигателя. При этом снижение основного вращающего момента от встречного действия отдельных высших гармоник, даже если в напряжении их содержится более 10—20%, не имеет значения, так как составляет доли процента. Встречный момент от действия слагающей напряжения обратной последовательности даже при несимметрии напряжения 20% обычно не превышает 5% от максимального. Таким образом, казалось бы, эти влияния не велики. Однако необходимо учесть следующее. Обычные вольтметры реагируют на сумму эффективных значений U основной частоты и ее гармонических, т. е. измеряемое напряжение $U_{изм} = \sqrt{U_1^2 + \Sigma U_k^2}$. При таком определении может оказаться, что напряжение прямой последовательности уменьшилось, хотя измеряемое напряжение и равно номинальному (за счет ΣU_k^2). При этом вращающий момент *будет заметно уменьшаться*.

Так, на рис. 11.26 зависимость 1 показывает характер уменьшения напряжения прямой последовательности U_{*1} , а зависимость 2 — пускового момента M_* от присутствия в напря-

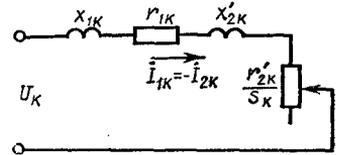


Рис. 11.25. Схема замещения асинхронного двигателя для токов высших гармоник

Рис. 11.26. Зависимость напряжения прямой последовательности U_{*1} пускового вращающего момента асинхронного двигателя $M_{*п}$ и времени его пуска t/T_J , где T_J — постоянная инерции от $\sqrt{\Sigma U_k^2}$ при постоянном номинальном моменте сопротивления на валу и $U = \sqrt{U_1^2 + \Sigma U_k^2} = U_{ном}$

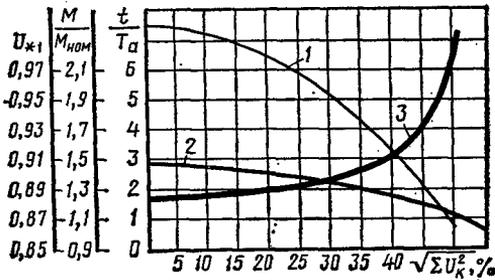


Рис. 11.27. Увеличение теплоты прискаженной кривой напряжения, выделившейся в обмотках статора асинхронного двигателя при пуске, в зависимости от величины $\sqrt{\Sigma U_k^2}$ при $U = \sqrt{U_1^2 + \Sigma U_k^2}$ и при постоянном моменте сопротивления

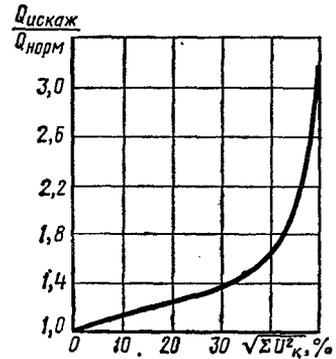


Рис. 11.27. Увеличение теплоты прискаженной кривой напряжения, выделившейся в обмотках статора асинхронного двигателя при пуске, в зависимости от величины $\sqrt{\Sigma U_k^2}$ при $U = \sqrt{U_1^2 + \Sigma U_k^2}$ и при постоянном моменте сопротивления

жении высших гармонических. Из этих соотношений следует, что при $\sqrt{\Sigma U_k^2} = 55 \div 60\%$ двигатель не сможет развернуться из неподвижного состояния, если его вал будет сопряжен с валом механизма, обладающего достаточно большим моментом сопротивления. Зависимость β показывает характер увеличения времени пуска двигателя при моменте сопротивления на валу, постоянном и равном номинальному. Увеличение времени пуска сопровождается дополнительным нагревом двигателя, что на рис. 11.27 примерно показывает увеличение тепловыделения при росте гармонических составляющих.

Несимметрия и несинусоидальность напряжений вызывает, следовательно, дополнительные потери в обмотках статора и ротора. Общие дополнительные потери при

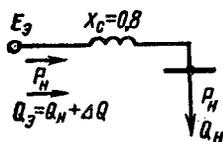


Рис. 11.28. Схема замещения узла нагрузки

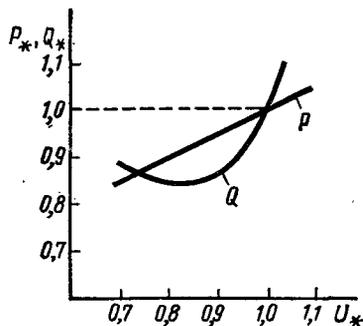


Рис. 11.29. Статические характеристики нагрузки

анализе работы группы двигателей, замененных эквивалентным, при несинусоидальном напряжении могут быть оценены следующим выражением:

$$\Sigma \Delta P_k = \Sigma I_k^2 r_{\theta \text{ ст}} K_{r \text{ ст}} + \Sigma I_k^2 r_{\theta \text{ рот}} K'_{r \text{ рот}},$$

где $K_{r \text{ ст}}$ и $K'_{r \text{ рот}}$ определены экспериментально*. Коэффициент полезного действия двигателя при этом, разумеется, снижается.

Таким образом, влияние несимметрии и несинусоидальности напряжения на вращающий момент и, следовательно, на электромеханические переходные процессы будет невелико, если результирующее значение напряжения будет сохранено. В противном случае с этим влиянием надо считаться. Допустимость несимметрии и несинусоидальности напряжения, питающего двигатель, зависит главным образом от дополнительного его нагрева.

Пример 11.1. Мощный узел нагрузки, представленный схемой замещения, содержит одну эквивалентную станцию и комплексную нагрузку, состоящую из асинхронных двигателей (60%) и осветительной нагрузки (40%) (рис. 11.28). При напряжении на шинах нагрузки, равном номинальному, активная мощность нагрузки $P_{\text{но}} = 0,9$; реактивная мощность $Q_{\text{но}} = 0,7$. Реактивное сопротивление системы $x_c = 0,8$.

Проверить устойчивость нагрузки указанной системы, построив зависимости $E_0 = f(U)$ и $Q_0 = f(E_0)$ и воспользовавшись критериями устойчивости комплексной нагрузки

$$dE_0/dU = 0; \quad dQ_0/dE_0 = -\infty.$$

* Этот вопрос и рассмотренные выше более подробно изложены в кн. *Церазов А. Л., Якименко Н. И.* Информационные материалы № 70. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей. — М.: Госэнергоиздат, 1963, с. 115; *Петров И. И., Мейстель А. М.* Специальные режимы работы асинхронного электропривода. — М.: Энергия, 1968, с. 264.

Статические характеристики комплексной нагрузки $P_* = f(U)$, $Q_* = f(U)$ приведены на рис. 11.29 и в таблице:

U_*	P_*	Q_*	U_*	P_*	Q_*
1,0	1,0	1,0	0,8	0,893	0,844
0,9	0,941	0,885	0,7	0,855	0,880

Решение. Для схемы замещения, изображенной на рис. 11.16,

$$E_0 = U + Q_H x_c / U + j P_H x_c / U,$$

или

$$E_0 = \sqrt{(U + Q_H x_c / U)^2 + (P_H x_c / U)^2}.$$

Реактивная мощность, выдаваемая эквивалентной станцией,

$$Q_0 = Q_H + \Delta Q = Q_H + (P_H^2 + Q_H^2) x_c / U^2,$$

где $P_H = P_* \cdot 0,9$ и $Q_H = Q_* \cdot 0,7$ — соответствующие различным напряжениям на шинах активная и реактивная мощности нагрузки.

Пользуясь таблицей и приведенными выше напряжениями, найдем E_0 и Q_0 в зависимости от U :

U	1,0	0,95	0,90	0,80	0,75	0,70
$P_H = 0,9 P_*$	0,9	0,874	0,848	0,804	0,785	0,77
$Q_H = 0,7 Q_*$	0,7	0,653	0,62	0,591	0,596	0,616
$Q_H x_c / U$	0,56	0,55	0,551	0,591	0,635	0,704
$U + Q_H x_c / U$	1,56	1,50	1,451	1,391	1,385	1,404
$P_H x_c / U$	0,72	0,736	0,755	0,804	0,838	0,88
E_0	1,72	1,67	1,634	1,61	1,62	1,66
$P_H^2 + Q_H^2$	1,3	1,188	1,104	0,997	0,972	0,97
$\frac{P_H^2 + Q_H^2}{U^2} x_c$	1,4	1,05	1,09	1,25	1,382	1,588
$Q_0 = Q_H + \Delta Q$	1,74	1,703	1,71	1,841	1,98	2,204

На рис. 11.30 и 11.31 построены зависимости $E_0 = f(U)$ и $Q_0 = f(E_0)$ и найдено критическое значение $E_{0,кр} = 1,61$.

Пример 11.2. Мощный узел нагрузки (рис. 11.32, а) представлен в виде эквивалентного асинхронного двигателя, схема замещения которого показана на рис. 11.32, б.

В ы а с н и т ь влияние компенсации реактивной мощности нагрузки с помощью статических конденсаторов на устойчивость нагрузки системы, рассмотрев три варианта:

- а) компенсация отсутствует ($\cos \varphi = 0,89$);
- б) компенсация соответствует $\cos \varphi = 0,95$;
- в) реактивная мощность нагрузки скомпенсирована полностью ($\cos \varphi = 1$).

Принять, что потребляемая эквивалентным двигателем при напряжении на его шинах $U = 1$ активная мощность $P = 1$. При решении использовать критерии dE_0/dU и dQ_0/dE .

Решение. Находим скольжение s для различных значений напряжения U на шинах двигателя при постоянной мощности $P = 1$. Далее определяем реактивную мощность Q_s по соответствующим значениям U и s . Результаты вычислений сводим в таблицу:

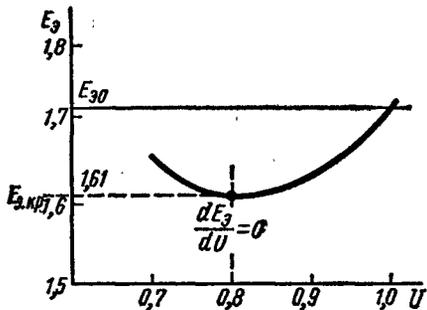


Рис. 11.30. Определение критического напряжения и критической э. д. с.

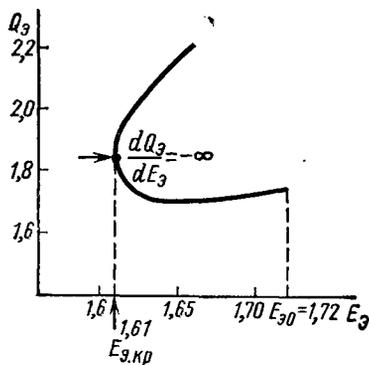


Рис. 11.31. Зависимость $Q_3 = \varphi(E_3)$

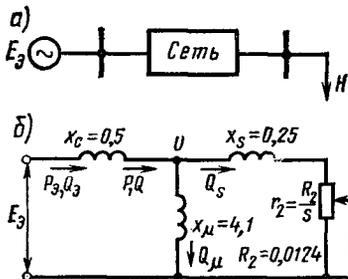


Рис. 11.32. Узел нагрузки (а) и его схема замещения (б)

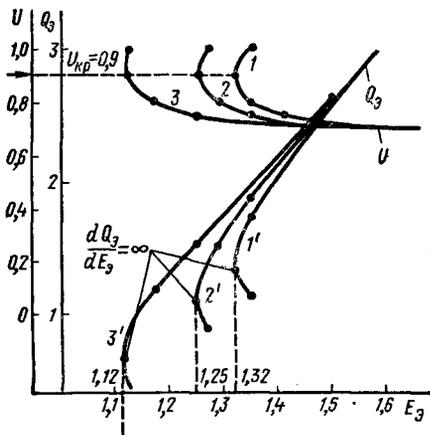


Рис. 11.33. Изменение U и Q_3
Кривые 1, 1' — при $\cos \varphi = 0,89$; 2, 2' — при $\cos \varphi = 0,95$; 3, 3' — при $\cos \varphi = 1$

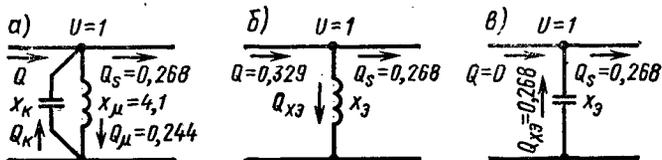


Рис. 11.34. Схема замещения при улучшении коэффициента мощности нагрузки

U	1,00	0,90	0,80	0,75	0,71
$s, \%$	1,34	1,71	2,40	3,03	4,97
Q_s	0,27	0,34	0,48	0,61	1,00

Определяем критические значения:

$$U_{кр} = \sqrt{2P_0x_s} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0,25} = 0,707; \quad s_{кр} = R_2/x_s = 0,0124/0,25 = 0,0496.$$

Результаты расчета режима для варианта «а» (без компенсации) приведены ниже:

U	1,000	0,900	0,800	0,750	0,707
Q_μ	0,244	0,197	0,156	0,137	0,122
Q_s	0,268	0,344	0,485	0,611	1,000
$Q = Q_\mu + Q_s$	0,512	0,541	0,641	0,748	1,120
ΔQ	0,631	0,799	1,100	1,390	2,260
$Q_3 = Q + \Delta Q$	1,140	1,340	1,740	2,140	3,380
E_3	1,350	1,320	1,350	1,410	1,660

По приведенным в таблице числовым значениям построены кривые I и I' на рис. 11.33. Мощность конденсаторной батареи, необходимая для доведения режимом компенсации (вариант «б») коэффициента мощности до 0,95, находится следующим образом (рис. 11.34, а):

$$Q_C = Q_\mu + Q_s - Q = 0,244 + 0,268 - 0,329 = 0,183,$$

$$\text{где } Q = P \operatorname{tg} \arccos 0,95 = 1 \cdot 0,329 = 0,329.$$

Сопротивление батареи

$$x_C = U^2/Q_C = 1/0,183 = 5,47.$$

Согласно рис. 11.34, б, сопротивление эквивалентного шунта

$$jx_3 = jx_\mu (-jx_C)/(jx_\mu - jx_C) = j4,1(-j5,47)/(j4,1 - j5,47) = j16,4.$$

После того как определено сопротивление эквивалентного шунта (рис. 11.34, в), находим Q_3 и E_3 аналогично тому, как это было сделано ранее. По результатам вычислений построены кривые 2 и 2' на рис. 11.33.

При $\cos \varphi = 1$ — полной компенсации реактивной мощности нагрузки (вариант «в») — сопротивление эквивалентного шунта

$$x_3 = 1/0,268 = 3,74$$

и соответствует емкостному сопротивлению.

Результаты расчетов для этого случая представлены кривыми 3 и 3' на рис. 11.33.

Во всех трех случаях критическое напряжение оказывается одинаковым (рис. 11.35). Оно составляет $U_{кр} = 0,9$ вместо $U_{кр} = 0,707$, полученного для условия включения эквивалентного двигателя на шины мощной системы ($x = 0$). Однако в рассматриваемых условиях (соизмеримая мощность генераторов и нагрузки) изменение напряжения на зажимах двигателя при соответствующем ему изменении E_3 не характеризует устойчивости и не может выявить влияния статических конденсаторов на устойчивость. Влияние включения конденсаторов, улучшающих коэффициент мощности

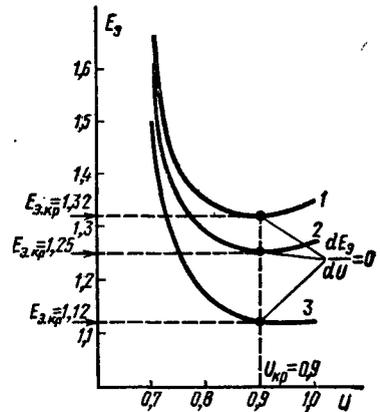


Рис. 11.35. Изменение E_3 и выявление условий неустойчивости нагрузки

Кривые 1 — при $\cos \varphi = 0,89$; 2 — при $\cos \varphi = 0,95$; 3 — при $\cos \varphi = 1$

асинхронных двигателей на устойчивость, можно найти, определив запасы устойчивости нагрузки по исходному и критическому значениям э. д. с. эквивалентного генератора:

$$K_3 = (E_{\Delta 0} - E_{\Delta \text{кр}}) \cdot 100\% / E_{\Delta 0}.$$

Для рассматриваемых вариантов в соответствии с рис. 11.35 находим:

- а) $\cos \varphi = 0,89$; $K_3 = (1,35 - 1,32) 100 / 1,35 = 2,22\%$;
 б) $\cos \varphi = 0,95$; $K_3 = (1,27 - 1,25) 100 / 1,27 = 1,57\%$;
 в) $\cos \varphi = 1,0$; $K_3 = (1,12 - 1,12) 100 / 1,12 = 0\%$.

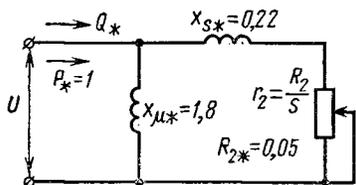


Рис. 11.36. Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя

Компенсация реактивной мощности нагрузки батареями статических конденсаторов может иногда приводить к существенному снижению запасов устойчивости асинхронных двигателей, а при высокой степени компенсации — к «лавине напряжения».

Как следует из приведенных расчетов, в данном случае улучшение $\cos \varphi$ до 0,95 снижает коэффициент запаса устойчивости нагрузки примерно в 1,5 раза; улучшение $\cos \varphi$ до единицы в данной системе практически приведет к неустойчивости узла нагрузки.

Пример 11.3. Асинхронный двигатель, схема замещения и параметры которого представлены на рис. 11.36, подключен к шинам, напряжение которых медленно снижается.

Построить зависимость потребляемой реактивной мощности от напряжения при работе двигателя и его остановке; $P_{\text{мех}} = \text{const} = 1$.

Решение. Находим скольжение двигателя при изменениях напряжения, решая уравнение (11.1) относительно s и полагая $E = U$:

U	1,0	0,9	0,8	0,7
s	0,0525 0,98	0,069 0,766	0,091 0,571	0,142 0,364

Критическое значение скольжения

$$s_{\text{кр}} = 0,05 / 0,22 = 0,227.$$

На основании (11.2)

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{2 \cdot 0,22 \cdot 1} = 0,662.$$

Для получения значений скольжения s при $P_{\text{мех}} = 1$ и соответствующих напряжениях U по выражению (11.4) определяем потребляемую двигателем реактивную мощность:

U	1,0		0,9		0,8		0,7		0,662
s	0,0525	0,98	0,069	0,766	0,091	0,571	0,142	0,364	0,227
Q_{μ}	0,555		0,450		0,356		0,272		0,243
Q_s	0,231	4,40	0,310	3,30	0,403	2,50	0,625	1,59	0,995
$Q = Q_{\mu} + Q_s$	0,786	4,95	0,760	3,75	0,759	2,86	0,897	1,86	1,24

Полученные результаты представлены графически на рис. 11.37 на участках 1-1' и 1'-3.

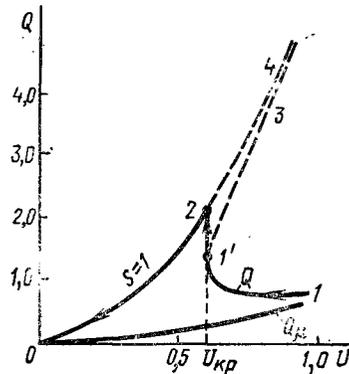
При остановленном двигателе, т. е. при $s = 1$, имеем:

U	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
Q_{μ}	0,555	0,450	0,356	0,272	0,200	0,139	0,089
Q_s	4,32	3,50	2,76	2,11	1,560	1,08	0,69
$Q = Q_{\mu} + Q_s$	4,88	3,95	3,12	2,38	1,76	1,22	0,779

Характеристика $Q = \varphi(U)$ при $s = 1$ показана на рис. 11.37 на участке 0-2-4.

Рис. 11.37. Характеристики реактивной мощности

Участок 1-1' — работа на устойчивой части при понижении напряжения от $U=1$ до $U=U_{кр}$; 1'-3 — то же, при повышении $U > U_{кр}$ на неустойчивой части; 1'-2 — процесс опрокидывания при $U=U_{кр}=0,622$; 2-0 — изменение мощности при остановленном двигателе ($s=1$) при $U < U_{кр}$; 2-4 — то же, при $U > U_{кр}$



Контрольные вопросы

11.1. Как можно получить расчетом и экспериментом статические характеристики комплексной нагрузки?

11.2. Сравните условия устойчивости группы асинхронных двигателей, соизмеримых по мощности с питающей их системой, и устойчивости одиночного двигателя, питающегося от шина неизменного напряжения. Почему в первом случае критическое напряжение оказывается значительно больше, чем во втором?

11.3. Как влияет наличие реактивного сопротивления между источником питания и асинхронным двигателем нагрузки на устойчивость этой системы?

11.4. Что такое лавина напряжения и каковы наиболее существенные причины ее возникновения?

11.5. Какие наиболее эффективные средства и мероприятия режимного характера могут быть применены для борьбы с лавиной напряжения?

11.6. Всегда ли конденсаторы, улучшающие коэффициент мощности нагрузки и ее напряжение в нормальном режиме, оказывают благоприятное действие на устойчивость комплексной нагрузки? Почему?

11.7. Каковы причины опрокидывания асинхронных двигателей нагрузки? Как развивается этот процесс и как он влияет на режим системы?

11.8. Как могут повлиять отклонения напряжения на устойчивость двигателей нагрузки?

11.9. Как могут повлиять повышения (понижения) частоты в системе на устойчивость двигателей нагрузки?

11.10. Что такое электрический центр системы?

Темы рефератов

1. Влияние активного сопротивления сети системы на развитие лавины напряжения.
2. Особенности лавины напряжения в условиях повышенной или пониженной частоты системы.
3. Влияние изменений механического момента на валу двигателя на развитие лавины напряжения.
4. Влияние несинусоидальности и несимметрии напряжения на устойчивость двигателей нагрузки.

ГЛАВА 12

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ БОЛЬШИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

§ 12.1. ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НА ПОВЕДЕНИЕ НАГРУЗКИ

К наиболее характерным переходным процессам, влияющим на режимы узлов нагрузок, прежде всего относятся процессы, происходящие при пуске двигателей. Современные мощные двигатели, особенно асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, имеют большие пусковые токи, поэтому их пусковой режим существенно влияет на режим электрической системы. Одновременный пуск значительного количества двигателей, соизмеримых по суммарной мощности с мощностью остальной системы, может оказать существенное влияние на ее режим. При соизмеримой мощности двигателей и генераторов системы проверка влияния пуска двигателей на режим системы должна производиться в обязательном порядке.

При осуществлении автоматического повторного включения (АПВ) и переключения источников питания возникают переходные процессы, требующие специального рассмотрения. На ЛЭП, питающих ту или иную нагрузку, так же как на мощных высоковольтных линиях, могут происходить так называемые *переходящие короткие замыкания*. Появившись вследствие какой-нибудь случайной причины, такое короткое замыкание самоликвидируется при отключении аварийного участка, который может быть снова включен в нормальную работу. При выходе из строя какого-либо источника питания, например трансформатора, питающиеся от него двигатели и другие потребители могут быть переключены на резервное питание, т. е. подключены к другому трансформатору. Так как электродвигатели и другие виды нагрузки одновременно подключаются к источнику напряжения, то в узле электрической системы появляется ток, значительно больший нормального. Это ведет к понижению напряжения в электрической системе и, в свою очередь, вызывает уменьшение момента вращения двигателей, как тех, которые переключались, так и других, работавших до этого в нормальных условиях. Если не провести соответствующих мероприятий на основе расчета и не оценить возможное понижение напряжения на зажимах двигателей, то может получиться, что при переключении электродвигатели не смогут работать — устойчивость нагрузки нарушится.

Необходимость в аналогичных расчетах возникает при самозапущке двигателей, когда по какой-либо причине происходит кратковременное отключение всей нагрузки, подключенной к данному узлу, а затем напряжение в этом узле восстанавливается. Если двигатели и другие потребители не были при этом отключены, то все они одновременно оказываются подключенными к восстановившемуся напряжению и значительно затормозившиеся или даже остановившиеся двигатели снова самозапускаются. Условия самозапуска опять-таки должны быть рассчитаны так, чтобы самозапуск двигателей мог быть осуществ-

влен и в процессе самозапуска вся остальная система не испытывала бы такого снижения напряжения или частоты, которое могло бы привести к нарушению нормальной работы.

В электрических системах имеются мощные толчкообразные нагрузки, вызывающие резкие толчки тока. К ним, например, относится электрическая тяга, вызывающая не периодические, но регулярные изменения нагрузки и соответственно толчки тока и напряжения в электрической системе. Еще более сильные, обычно периодические, толчки вызывают двигатели прокатных станов и другие нагрузки с периодически изменяющимся моментом. При таких нагрузках в расчетах режимов систем возникают две задачи:

1) определение условий, при которых работа толчкообразных нагрузок не приводит к недопустимым колебаниям напряжения на остальных нагрузках, т. е. не вызывает колебаний скорости других асинхронных двигателей и таких колебаний напряжения, при которых осветительные приборы будут изменять свой световой поток, вызывая недопустимые для глаза человека раздражения;

2) определение устойчивости двигателей при толчкообразных нагрузках, работающих с переменным моментом. Так возникает специальная задача проверки устойчивости синхронных или асинхронных двигателей, приводящих в действие прокатные станы или аналогичные установки. Все эти задачи требуют рассмотрения больших возмущений режима или динамических явлений.

Двигатели, входящие в состав нагрузки, большая часть которых (90—95%) асинхронные, создают в узлах нагрузки сложные электро механические процессы. Эти процессы связаны с технологической необходимостью, колебаниями механической нагрузки, особенностями кинематической системы механизма и системы его электропривода, особенностями переходных режимов в отдельных агрегатах, непостоянством напряжения питающей сети и т. д.

Всякое изменение скорости механизма, который часто является сложной многоэлементной электро механической системой, сопровождается изменениями кинетической энергии. Это обстоятельство существенно и вызывает изменение момента, мощности и угловой скорости электродвигателя. При этом уравнение движения системы, или уравнение моментов, отнесенное к валу двигателя, имеет вид

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad (12.1)$$

где M_d — момент, развиваемый движущими силами; M_c — момент сил сопротивления; J — момент инерции системы, который в общем случае является функцией угла поворота α рабочего органа, т. е. $J = f(\alpha)$; ω — угловая скорость двигателя.

Правая часть уравнения (12.1) представляет собой динамический момент системы $M_{дин}$. При $J = \text{const}$ уравнение (12.1) принимает вид

$$M_d \mp M_c = J d\omega/dt.$$

Момент сопротивления M_c , приведенный к валу двигателя, обусловлен силами сопротивлений. Он может и препятствовать и способствовать движению механизма. В первом случае его знак отрицателен, во втором — положителен. В процессе работы того или иного механизма момент может оставаться постоянным или изменяться.

Моменты M_c могут быть разбиты на две категории: реактивные и активные. К категории реактивных моментов относятся статические моменты, препятствующие движению и меняющие знак при реверсе двигателя, например

силы трения. Активные моменты сохраняют направление действия при реверсе двигателя; следовательно, в одном направлении вращения будут противодействовать, а в противоположном — способствовать движению. К этой категории относится, например, момент, создаваемый грузом на барабане подъемного механизма крана. Активные моменты, противодействующие движению, входят в уравнение со знаком минус, а способствующие — со знаком плюс.

На момент механизмов оказывают влияние особенности технологического процесса и электромеханической и кинематической системы механизма и т. д. В соответствии с этим исполнительные механизмы подразделяются на классы*.

К первому классу относятся механизмы, у которых момент от скорости *практически не изменяется*: $M_c = \text{const}$. Примерами могут служить механизмы подъема, передвижения тележки и моста мостового крана, пассажирский подъемник, транспортные ленты, роликовый транспортер, шахтный подъемник с уравновешенным канатом и другие механизмы.

Механизмы второго класса характеризуются тем, что их момент является *функцией скорости*. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$M_c = M_0 + (M_{c.\text{ном}} - M_0) (\omega / \omega_{\text{ном}})^n,$$

где M_0 — момент холостого хода; $M_{c.\text{ном}}$ — момент сопротивления при номинальной нагрузке; ω — угловая скорость двигателя; $\omega_{\text{ном}}$ — номинальная угловая скорость; n — показатель, зависящий от конструкции механизма; $n = -(1 \div 2)$ и может иметь нулевые и дробные значения. Примерами таких механизмов являются вентиляторы, компрессор, гребной винт.

У механизмов третьего класса момент *зависит от угла поворота вала* двигателя: $M_c = f(\alpha)$. К таким механизмам относятся подъемники, устройства для создания напора, тяги, экскаваторные установки.

К четвертому классу механизмов относятся механизмы, момент которых одновременно зависит от *скорости и углов поворота*. Это, например, электровоз, рулевое устройство.

Пятый класс характеризуется тем, что момент механизма *зависит от времени*, изменяясь по некоторому закону. Это например, пила, механизм вращательного бурения.

Электроприводы при функционировании и соответственно переходные процессы, ими обусловленные, связаны с двумя основными режимами:

1) продолжительным, медленно меняющимся (здесь возникают задачи статической устойчивости);

2) кратковременным и повторно-кратковременным, быстро меняющимся (они вызывают необходимость в решении задач динамической устойчивости).

Моменты сопротивления механизма, так же как и электромеханические моменты двигателя, могут разделяться на статические и динамические. В гл. 11 были пояснены общие особенности этих характеристик применительно к двигателям.

В настоящей главе характеристики двигателей и их особенности будут рассматриваться комплексно с учетом свойств как двигателя, так и механизма, сидящего на его валу. В дальнейшем при установлении принципиальных соотношений будет предполагаться, что динамическая характеристика может заменяться

* См.: Гайдукевич В. И., Титов В. С. Случайные нагрузки силовых электроприводов. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

квазидинамической, а момент сопротивления механизма на валу приниматься постоянным.

Динамические и квазидинамические характеристики. Зависимость параметров режима от времени и изменения других параметров, определенная при столь быстрых изменениях режима, что скорость обязательно должна быть учтена, называется *динамической характеристикой*. Она представляется в виде функциональной связи какого-либо параметра режима, а также ряда других параметров режима и их производных, например

$$P = \varphi(U, f, dU/dt; d^2U/dt^2; d^2f/dt^2; \dots).$$

Здесь динамическая характеристика представлена гиперповерхностью, проходящей в фазовом пространстве.

Простейшим случаем динамической характеристики будет поверхность в пространстве трех измерений, например

$$P = \varphi(U, dU/dt) \text{ или } P = \varphi(s, ds/dt).$$

При заданном характере изменения напряжения, скольжения и т. д. во времени может быть получена квазидинамическая характеристика и представлена в виде серии кривых на плоскости:

$$P = \varphi(U_{t=0}, U_{t=1}, \dots, U_{t=n}), \text{ или } P = \varphi(t).$$

Представление динамических характеристик комплексной нагрузки и пользование ими оказываются сложными, а поэтому в практических расчетах обычно применяют *квазидинамические* характеристики. Комплексные характеристики нагрузки состоят из характеристик отдельных ее элементов, к которым относятся:

1. Характеристики осветительной нагрузки. Активная мощность, потребляемая осветительной установкой, содержащей лампы накаливания, не зависит от частоты и примерно пропорциональна напряжению в степени 1,6. Реактивную мощность осветительная нагрузка не потребляет. Активная мощность осветительной нагрузки, состоящей из люминесцентных ламп, заметно зависит от частоты, уменьшаясь на 0,5—0,8% с изменением частоты на 1%, но мало зависит от напряжения.

Динамические характеристики осветительных установок при анализе большинства электромеханических переходных процессов (расчеты устойчивости, больших качаний) обычно можно принимать совпадающими со статическими. На рис. 12.1 представлены статические характеристики осветительной нагрузки $P = f(U)$, состоящей из ламп накаливания, и соответствующее изменение сопротивления нагрузки $R_n = f(U)$. Однако, как показано на рис. 12.2, изменение потребления этой нагрузкой активной мощности при быстром изменении напряжения будет существенно отличным от приведенного на рис. 12.1.

2. Характеристика двигательной нагрузки. О статических и динамических характеристиках асинхронных и синхронных двигателей было сказано в гл. 4 и § 11.2. Характеристики этого вида нагрузки весьма разнообразны, что обусловлено прежде всего появлением свободных токов, вызванных резкими толчками режима и быстрыми изменениями скольжения ($ds/dt \neq 0$). На рис. 12.3 в качестве примера показаны динамические характеристики $M = \varphi(s, ds/dt)$ асинхронного двигателя, а на рис. 12.4 — характеристики двигателя в различных режимах. Асинхронная машина в переходных процессах может работать не только двигателем, но и тормозом (при $s > -1$) или генератором ($s > 0$). Эти три различных ре-

жима асинхронной машины, соотношения мощностей и моментов, а также скоростей вращающегося поля и ротора и показаны на рис. 12.4.

Если скорость изменения угла (или скольжения) не очень велика, то при анализе различных изменений режима работы синхронного или асинхронного двигателя, например изменений напряжения на его шинах, можно приближенно

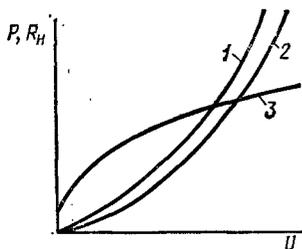


Рис. 12.1. Зависимость активной мощности от напряжения для осветительной нагрузки (при изменении напряжения не быстрее чем за 0,2—0,3 с):

1 — характеристика $P=U^2/R_n$ при $R_n=\text{const}$; 2 — характеристика $P=U^2/R_n$ при $R_n=\varphi(U)$ (лампы накаливания); 3 — характеристика $R_n=\varphi(U)$

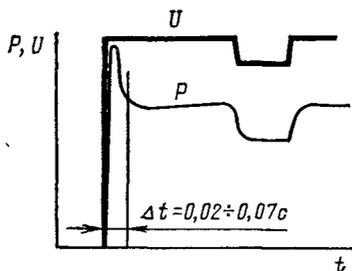


Рис. 12.2. Потребление активной мощности осветительной нагрузкой при быстром изменении напряжения

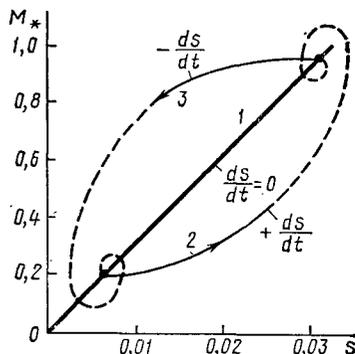


Рис. 12.3. Зависимость момента асинхронного двигателя M от скольжения s и ускорения ds/dt

Штриховой линией показаны характеристики при $ds/dt=\text{const}$

получать динамические характеристики на основе серии статических характеристик (рис. 12.5). Для этого, применяя известную формулу мощности асинхронного двигателя [см. (11.1)] и проводя линеаризацию, заменим характеристики $M = \varphi(s)$ прямыми и предположим, что $M_{\text{max}} = M_0 = \text{const}$. Не будем учитывать при этом электромагнитные процессы, происходящие в обмотках двигателя, и заменим характеристики $M = \varphi(s)$ прямыми 0-1-1, 0-2-2 (рис. 12.6). Тогда уравнение движения будет иметь вид

$$T_J ds/dt = M_0 - Ks,$$

где коэффициент пропорциональности $K = tg\alpha$ (рис. 12.6, а) или

$$\int \frac{ds}{M_0 - Ks} = \int \frac{dt}{T_J}, \quad \text{откуда} \quad \frac{1}{K} \ln(Ks - M_0) + C_1 = -\frac{t}{T_J}.$$

Здесь C_1 — постоянная интегрирования, при $t = 0$

$$C_1 = -\ln(Ks_0 - M_0)/K.$$

Раскрывая значение C_1 , получим

$$\frac{1}{K} \ln \frac{Ks - M_0}{Ks_0 - M_0} = -\frac{t}{T_J}.$$

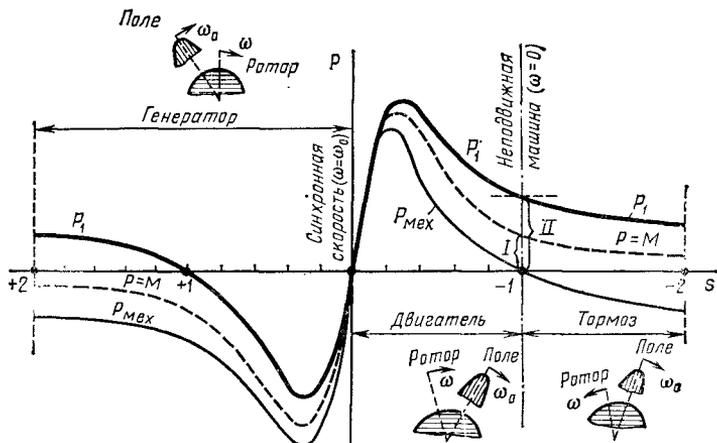


Рис. 12.4. Характеристики режимов асинхронной машины:
 P_1 — потребляемая из сети мощность при сопротивлении статора $R_1 \neq 0$;
 $M = P$ — вращающий момент; $P_{\text{мех}}$ — механическая мощность на валу двигателя; I — пусковой момент; II — мощность, потребляемая при пуске

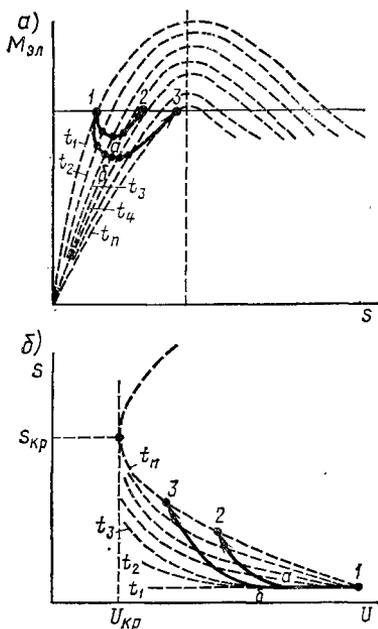


Рис. 12.5. Статические (— — —) и динамические (—) характеристики асинхронного двигателя:
 $a - M_{\text{эл}} = f(s)$; $b - s = \varphi(U)$

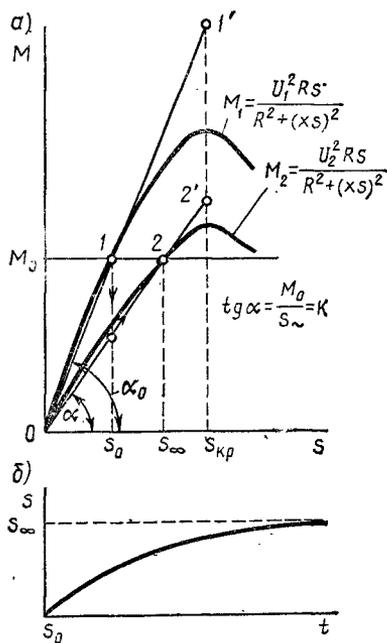


Рис. 12.6. Изменение режима асинхронного двигателя при уменьшении напряжения от U_1 до U_2 :
 a — статические характеристики момента $M = -\varphi(s)$; b — динамическая характеристика $s = f(t)$

Проведя ряд преобразований, найдем скольжение в любой момент времени t (рис. 12.6, б):

$$s = \left[(Ks_0 - M_0) e^{-Kt/T_J} + M_0 \right] / K.$$

В начале процесса при $t = 0$ и в конце процесса при $t = \infty$ имеем соответственно

$$s = s_0; \quad s = s_\infty = M_0/K.$$

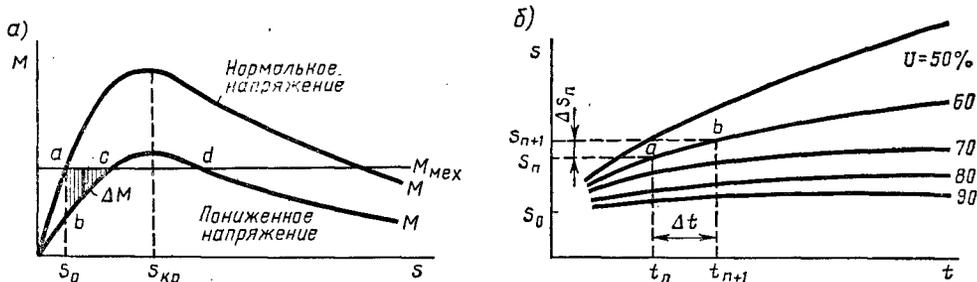


Рис. 12.7. Характеристики изменения скольжения двигателя при изменении напряжения:

$a - M = \varphi(s)$ при нормальном и пониженном напряжении; $b -$ изменение $s = f(t)$ при изменениях напряжения

Кроме того, при $s = s_\infty$

$$M_2 = M_0 = U_2^2 R_2 s_\infty / [R_2^2 + (x s_\infty)^2].$$

Следовательно, при известных R_2 , x , U_2 и M_0 можно найти s_∞ и далее определить $K = M_0/s_\infty$.

При учете электромагнитных переходных процессов в обмотках двигателя решение было бы значительно более сложным.

Еще один подход заключается в следующем. Представляя двигатель формулой (11.1), найдем появляющийся при изменении скольжения избыточный тормозящий момент*: $\Delta M = M_{\text{мех}} - M$. Под его воздействием скольжение двигателя возрастает и в точке c (рис. 12.7, a) устанавливается новый стационарный режим (либо двигатель опрокидывается и останавливается, если $M_m < M_{\text{мех}}$). Уравнение движения ротора двигателя в переходном режиме может быть получено следующим образом.

Избыточный момент ΔM создает ускорение $\Delta M/T_J$, где T_J — постоянная инерции двигателя вместе с вращаемым им механизмом. Это ускорение представляет собой производную от скорости по времени: $d\omega/dt = -ds/dt$ при $s = 1 - \omega$, где ω — угловая скорость, а s — скольжение. Следовательно,

$$-\Delta M/T_J = -ds/dt$$

или

$$\Delta M = M_{\text{мех}} - M = T_J ds/dt,$$

* Предполагается, что в силу допущения о малости $\Delta\omega$ можно считать $\Delta P = \Delta M$.

откуда

$$dt = T_J \frac{ds}{M_{\text{мех}} - M} = T_J \frac{ds}{M_{\text{мех}} - \frac{2M_m}{s/s_{\text{кр}} - s_{\text{кр}}/s}}$$

Решение этого уравнения

$$t = T_J \int_{s_0}^s \frac{ds}{P_T - \frac{2M_m}{s/s_{\text{кр}} - s_{\text{кр}}/s}}$$

дает зависимость $t = f(s)$, что позволяет построить кривую изменения скольжения двигателя во времени при пониженном напряжении на его шинах. На рис. 12.7, б показано семейство таких кривых при различных напряжениях на шинах двигателя (за 100% принято напряжение в нормальном режиме).

Если, например, в некоторый момент времени скольжение двигателя равно s_n при напряжении на шинах двигателя $U = 60\%$ (точка a на рис. 12.7), то, допуская, что в течение небольшого интервала времени Δt напряжение сохраняет свою величину, с помощью кривых можно найти изменение скольжения Δs_n для этого интервала. Обычно кривые (рис. 12.7) перестраивают в виде зависимости $U = f(s)$ для различных t .

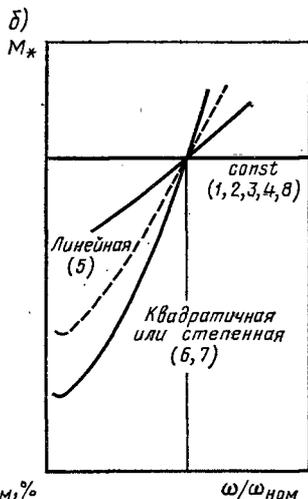
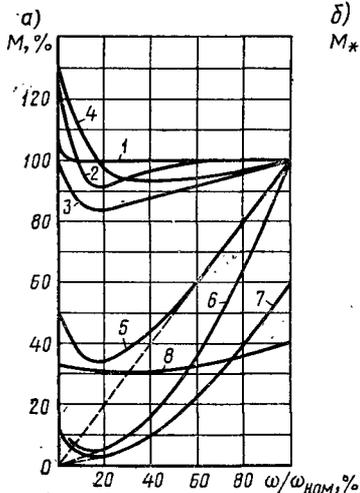


Рис. 12.8. Механические характеристики рабочих машин:

a — типовые характеристики $M = f(\omega/\omega_{\text{ном}})$; $\omega_{\text{ном}}$ — номинальная рабочая угловая скорость машины. Машины с тяжелыми условиями пуска: 1 — подъемные краны и т. п. при малом моменте трения (постоянный момент); 2 — подъемные краны и транспортные механизмы с трением; 3 — нереверсивные прокатные станы; 4 — поршневые компрессоры (пуск под нагрузкой), дробилки, вальцы в резиновой промышленности. Машины с легкими условиями пуска: 5 — каландры (в текстильной промышленности); 6 — центробежные насосы и вентиляторы (пуск при открытой задвижке); 7 — то же, при закрытой; 8 — поршневые компрессоры, турбокомпрессоры, двигателя-генераторы (во всех случаях пуск вхолостую); б — три типа обобщенных характеристики

Характеристики асинхронной активной мощности. Характеристики этой мощности, потребляемой двигательной нагрузкой, и соответственно вращающий электромагнитный момент двигателя в переходных процессах в значительной мере будут определяться мощностью (тормозящим моментом) машин, приводимых во вращение (т. е. рабочих машин), и их характеристиками $M_{\text{мех}} = f(\omega)$. Изменения P, M будут зависеть не только от режима питающей сети, но и от механических характеристик приводимых машин, т. е. зависимостей механического момента от угловой скорости.

Разнообразные механические характеристики рабочих машин, показанные на рис. 12.8, могут быть сведены к трем основным видам зависимостей $M_{\text{мех}} = f(\omega)$:

а) постоянный или мало зависящий от скорости момент:

$$M_{\text{мех}} = \text{const}; \quad P_{\text{мех}} \equiv \omega M_{\text{мех}}$$

К этому виду характеристик относятся зависимости 1, 2, 3, 4, 8;

б) момент, примерно пропорциональный скорости (зависимость 5):

$$M_{\text{мех}} \equiv \omega; \quad P_{\text{мех}} \equiv \omega^2;$$

в) момент, примерно пропорциональный квадрату скорости (характеристики 6, 7):

$$M_{\text{мех}} \equiv \omega^2; \quad P_{\text{мех}} = \omega^3, \quad \text{где } \omega = \omega_0 + \Delta\omega.$$

В общем случае можно считать, что $M_{\text{мех}} = M_0 \omega^n$. Принимая $\omega_0 = 1$, можно записать, что $M_{\text{эл}} = M_0(1 + s)^n = f(s)$. Однако характеристики, представленные на рис. 12.8, и, следовательно, характеристика $M_{\text{эл}} = f(s)$ зависят не только от ω , но в общем случае и от $d\omega/dt$. Все это и приводит к сложным зависимостям.

Из схемы замещения двигателя следует, что реактивная мощность Q , потребляемая им, имеет две составляющие: намагничивающую мощность Q_μ , связанную с намагничивающим током, и мощность рассеяния Q_s , связанную с созданием полей рассеяния в статоре и роторе:

$$Q = Q_\mu + Q_s.$$

При сделанных допущениях мощность рассеяния становится сложной функцией скольжения:

$$Q_s = I^2 x_s,$$

где $I = \sqrt{M_0(1 + s)^n s/R}$.

Мощность намагничивания

$$Q_\mu = U^2/x_\mu = I_\mu U,$$

где I_μ — ток холостого хода.

Значения тока холостого хода при $U = U_0$ зависят от мощности двигателя (чем больше мощность двигателя, тем меньше намагничивающий ток по отношению к номинальному) и от скорости (у тихоходных двигателей намагничивающий ток больше). Примерные значения составляют 20—60% от номинального тока.

При учете уменьшения x_μ с насыщением зависимость Q_μ от напряжения заметно отклоняется от квадратичной параболы, а динамические процессы искажают её еще заметнее в самый начальный период возникновения переходного процесса.

Простейшая динамическая характеристика синхронной нагрузки (синхронных двигателей). На основании выражений для момента и мощности синхронной машины можно получить различного рода динамические характеристики. Так, при изменении напряжения, подведенного к двигателю, его мощность и вращающий момент изменяются (если не учитывать потери в статоре) прямо пропорционально напряжению:

$$P = (UE_q/x_d) \sin \delta; \quad M = P/\omega_0.$$

Изменение частоты подведенного напряжения изменяет вращающий момент:

$$M = (UE_{q0} \omega^{n-1}/x_{d0}) \sin \delta,$$

где x_{d0} — значение сопротивления при $\omega = \omega_0$; $\omega_* = \omega/\omega_0$ — относительная частота; n — показатель, характеризующий систему возбуждения двигателя.

Момент (если не учитывать насыщение) пропорционален току ротора. Синхронный двигатель обычно работает при угле $\delta_0 = 25 \div 30^\circ$ и обладает значительной перегрузочной способностью $K_{\Pi} = M_{\max}/M_0 = 2,0 \div 2,5$; у некоторых специальных машин $K_{\Pi} = 3 \div 4$.

У явнополюсных двигателей имеется еще момент явнополюсности (иногда неудачно называемый реактивным)

$$M_{\text{явн}} = \frac{U^2}{2\omega_*} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta.$$

Этот момент пропорционален квадрату подведенного напряжения и обратно пропорционален частоте.

Реактивная мощность на шинах двигателя, определенная упрощенно без учета потерь в статоре,

$$Q = \frac{UE_{q0} \omega^{n-1}}{x_{d0}} \cos \delta - \frac{U^2}{x_{d0}}.$$

При $\frac{E_{q0} \omega^{n-1}}{x_{d0}} \cos \delta > \frac{U^2}{x_{d0}}$ двигатель выдает реактивную мощность.

Зависимости P и Q от характера переходного процесса, например от скорости изменения напряжения на шинах двигателя, будут следующими:

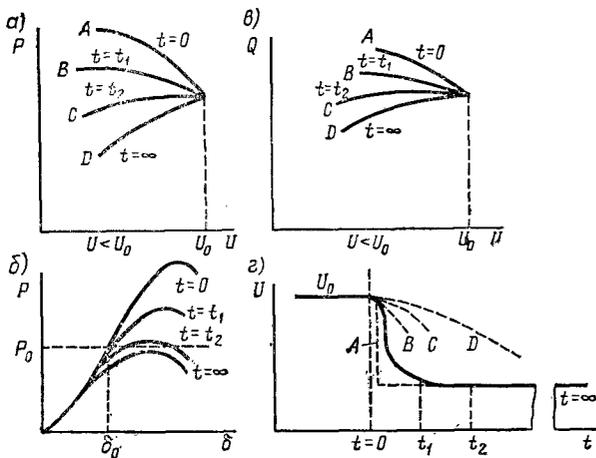


Рис. 12.9. Изменение активной и реактивной мощности асинхронного двигателя при понижении напряжения:

A — очень быстрое (почти мгновенное) понижение напряжения (или момент начального изменения, $t=0$), D — очень медленное понижение напряжения (или окончание процесса, $t=\infty$); B, C — понижение напряжения со средней скоростью (промежуточные точки процесса $t=t_1, t=t_2$); a — изменение активной мощности при снижении напряжения [$P=f(U)$] с разными скоростями (A, B, C, D) или на разных стадиях процесса, показанного на рис. $з$; $б$ — то же, $P=f(\delta)$; $в$ — изменение реактивной мощности при тех же условиях; $г$ — характер изменения напряжения

— при очень медленном изменении напряжения зависимости $Q = f(U)$ и $P = f(U)$ определяются статическими характеристиками D , показанными на рис. 12.9. Эти характеристики построены при $E_q = \text{const}$;

— при резком изменении напряжения динамические характеристики A , т. е. $Q = f(U)$, $P = f(U)$, строятся при $x' = \text{const}$ и приложенной за ним $E'_q = \text{const}$;

— при изменении напряжения с конечной скоростью графики $Q = f(U)$, $P = f(U)$ располагаются между D и A (т. е. B и C).

Характеристики преобразовательной (выпрямительной и инверторной) нагрузки. Эти характеристики, дающие зависимость активной и реактивной мощностей (потребляемых или выдаваемых пре-

образователем) от подведенного к нему напряжения, обусловлены регулированием преобразователя. Подобное регулирование является быстрым, поэтому в первом приближении можно считать совпадающими статические и динамические характеристики. Не проводя здесь подробного анализа работы преобразователей и не выводя соответствующих аналитических выражений*, приведем основные характеристики выпрямителя и инвертора.

Мощность выпрямителя и инвертора зависит от подведенного напряжения, параметров системы постоянного тока, углов зажигания выпрямителя и инвертора (рис. 12.10). В электропередачах постоянного тока обычно производится совместное регулирование углов зажигания на обеих преобразовательных подстанциях.

На рис. 12.10, а, б показаны типичные характеристики мощных преобразователей. Различие этих характеристик прежде всего обусловлено действием регулятора тока и регулятора минимального тока. Регулятор тока (РТ) изменяет угол зажигания выпрямителя соответственно значению тока. Если угол зажигания

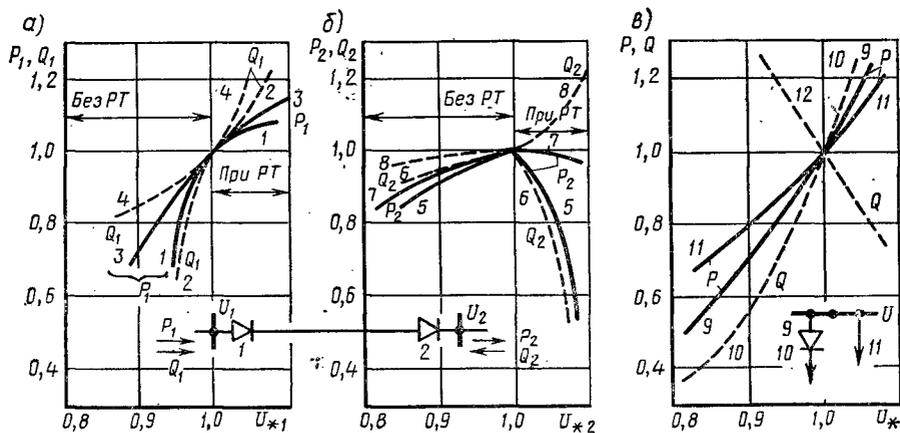


Рис. 12.10. Характеристики выпрямительной и инверторной нагрузок:

- активная мощность; - - - - - реактивная мощность;
- а — выпрямительный конец:
 - 1 — $P_1 = \varphi(U_{*1})$; } без регулятора минимального тока;
 - 2 — $Q_1 = \varphi(U_{*1})$; }
 - 3 — $P_1 = \varphi(U_{*1})$; } то же, с регулятором;
 - 4 — $Q_1 = \varphi(U_{*1})$; }
- б — инверторный конец:
 - 5 — $P_2 = \varphi(U_{*2})$; } без регулятора минимального тока;
 - 6 — $Q_2 = \varphi(U_{*2})$; }
 - 7 — $P_2 = \varphi(U_{*2})$; } то же, с регулятором;
 - 8 — $Q_2 = \varphi(U_{*2})$; }
- в — установки электролиза и печи:
 - 9 — $P = \varphi(U_{*2})$; } для ртутно-выпрямительного агрегата;
 - 10 — $Q = \varphi(U_{*2})$; }
 - 11 — $P = \varphi(U_{*})$; } электропечь сопротивления;
 - 12 — $Q = \varphi(U_{*})$; } карборундовая печь.

* Подробный анализ и получение соответствующих выражений производятся в курсах промышленной электроники и передачи энергии постоянным током. См., например: Электрические системы: Передача энергии переменным и постоянным током. /Под ред. В. А. Веникова — М.: Высшая школа, 1972.

выпрямителя становится равным нулю, то регулятор тока не может далее поддерживать заданное значение тока при уменьшении тока. В этом случае ток нагрузки поддерживается регулятором минимального тока на инверторе, который уменьшает угол зажигания при снижении тока. Обычно регулятор минимального тока вступает в работу тогда, когда регулятор тока не в состоянии предотвратить снижение тока нагрузки на выпрямителе. В регуляторах тока ток нагрузки сравнивается с заданным током уставки. Регулятор тока осуществляет регулирование тока на выпрямителе только тогда, когда ток в нагрузке больше заданного тока уставки. Регулятор минимального тока осуществляет регулирование тока тогда, когда ток становится меньше заданного тока уставки.

На рис. 12.10, в приведены характеристики печных и ртутно-преобразовательных установок, питающих электролизную нагрузку. Их характеристики сходны с характеристиками асинхронного двигателя. Печная нагрузка имеет различные характеристики в зависимости от типа печи. Дуговые печи и печи сопротивления всех типов (от мощных до малых, бытовых) потребляют чисто активную мощность, примерно пропорциональную квадрату напряжения. Таким образом, характеристика печных установок $P = f(U)$ близка к характеристике осветительной нагрузки. Характеристики реактивной мощности карборундовых печей имеют специфический характер (см. рис. 12.10, кривые 11, 12).

Динамические характеристики комплексной нагрузки электрических систем. Комплексная нагрузка состоит из осветительной и бытовой нагрузок, нагрузок двигателей, инверторов и выпрямителей, а также потерь в трансформаторах и кабелях. Ее динамические характеристики могут быть приближенно получены из серии статических характеристик (аналогично тому, как это делалось при получении простейших динамических характеристик асинхронных двигателей).

Изменения мощности, потребляемой нагрузкой, с изменением напряжения и частоты могут быть при небольших медленных и быстрых их отклонениях представлены выражениями

$$\Delta P = (\partial P / \partial U) \Delta U + (\partial P / \partial f) \Delta f;$$

$$\Delta Q = (\partial Q / \partial U) \Delta U + (\partial Q / \partial f) \Delta f.$$

При изменении только U или только f величины $dP/dU = a_U$; $dQ/dU = b_U$; $dP/df = a_f$; $dQ/df = b_f$, взятые от статических или динамических характеристик соответственно, называются *регулирующими эффектами активной и реактивной мощностей нагрузки по напряжению и частоте*. Регулирующий эффект комплексной нагрузки имеет следующие значения (отн. ед.):

— при медленном изменении (статическая характеристика) напряжения вблизи его нормального значения обычно составляет 1,5—3,5 для реактивной мощности и 0,3—0,95 для активной мощности;

— при изменении частоты вблизи ее нормального значения составляет 1,5—3,0 для активной мощности и 1—6 для реактивной (статическая характеристика);

— при быстрых изменениях меняется (и весьма значительно) в зависимости от скорости изменения напряжения или частоты.

Обычно для отдельных слагающих нагрузки диапазон изменения регулирующего эффекта больше, чем для комплексной нагрузки.

Комплексная нагрузка при значительном изменении частоты и напряжения. Выше предполагалось, что изменения частоты и напряжения настолько невелики, что можно линеаризовать характеристики нагрузки и применять их для определе-

ния ΔP и ΔQ . Однако в электрических системах бывают значительные изменения частоты и напряжения. Обычно изменения частоты обусловлены появлением небаланса между электрической мощностью, отдаваемой генераторами в сеть, и механической мощностью их первичных двигателей. Эти изменения приводят, как было показано в гл. 11, к отклонениям потребления реактивной мощности, напряжения и потерь активной мощности. При быстрых изменениях все расчеты должны проводиться с помощью динамических характеристик.

§ 12.2. ПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ

Общая характеристика условий пуска синхронных и асинхронных двигателей. Пуск двигателей в ход, или пусковой режим электропривода, входящего в состав комплексной нагрузки, — это процесс перехода двигателей и соответственно рабочих механизмов из неподвижного состояния ($\omega = 0$) в состояние вращения с нормальной скоростью ($\omega = \omega_0$). Пуск двигателей, являющийся существенной частью режима работы двигателей, относится к числу **н о р м а л ь н ы х п е р е х о д н ы х п р о ц е с с о в**.

При проектировании электропривода и выборе соответствующего двигателя устанавливают, сможет ли данный двигатель «развернуть» (от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_0$) присоединенный к нему механизм, для чего:

- выясняют время пуска двигателя;
- устанавливают, насколько допустима данная продолжительность процесса пуска;
- проверяют плавность пуска (что особенно важно, например, для подъемных кранов и печатных машин);
- определяют нагрев двигателя при пуске;
- находят ускорение и условия его постоянства при пуске (что желательно для ряда механизмов, например для пассажирских лифтов).

Перечисленные вопросы решаются при проектировании электропривода и поэтому не рассматриваются при изучении переходных процессов в узле нагрузки, где внимание сосредоточивается на **с и с т е м н ы х з а д а ч а х**, в число которых входит определение тока двигателей при пуске, допустимость пусковых токов с точки зрения **р а б о т ы с и с т е м ы и с е т и**.

Большие токи могут вызвать понижение напряжения, создать неблагоприятное влияние на другие двигатели и другие виды нагрузки и привести к тому, что данный двигатель будет фактически разгоняться медленнее, чем это предполагалось при неизменном напряжении на его зажимах. В этих условиях требуется определение времени пуска двигателей и зависимости пускового тока от времени. Вследствие снижения напряжения в сети вращающий момент двигателя может оказаться либо меньше момента сопротивления механической нагрузки, либо ненамного больше и разгон двигателя будет соответственно или невозможен, или недопустимо затянут.

Во время пуска двигатель должен развивать вращающий момент, необходимый, во-первых, для преодоления момента сопротивления механизма, и, во-вторых, для создания определенной кинетической энергии вращающихся масс агрегата. При пуске двигатель потребляет от источника повышенное количество энергии, что и отражается в увеличении пускового тока. Кратность пускового тока по отношению к номинальному составляет у асинхронных двигателей 1,5—2 при рео-

статном пуске (для двигателей с фазным ротором) и 5—8 при пуске двигателя с короткозамкнутым ротором.

Повышенный нагрев при пуске накладывает определенные ограничения на электроприводы, применяющиеся там, где требуются частые пуски в ход. В этих условиях используют двигатели специальных конструкций, а также проводят различные мероприятия, облегчающие пуск.

У с л о в и я п у с к а обычно разделяют на легкие, нормальные и тяжелые.

При легких условиях требуемый момент в начале вращения двигателя составляет 10—40% от номинального.

К нормальным условиям пуска относятся такие, при которых механизм требует пускового момента, равного 50—75% от номинального.

К тяжелым условиям относятся такие, при которых требуемый начальный момент составляет 100% номинального и выше. К последним относятся условия пуска таких механизмов, как компрессоры, дробильные барабаны, различные устройства для перемешивания, а также насосы с открытой задвижкой, приводы со значительным моментом инерции. В некоторых специальных случаях, например при использовании однофазных двигателей и синхронных двигателей, у которых не предусмотрен самозапуск, *электрический пуск агрегата в ход заменяется механическим* с помощью разгонных устройств. Такие случаи, однако, становятся все более и более редкими и не будут рассматриваться в данной книге.

Для облегчения тяжелых условий пуска в некоторых приводах применяются специальные механические средства: центробежные, сцепные ферромагнитные или гидравлические муфты, с помощью которых двигатель принимает нагрузку лишь после того, как он достиг нужной скорости и стал развивать надлежащий вращающий момент.

Схемы пуска. Для управления пуском и ограничения пускового тока могут применяться пускорегулирующая аппаратура и специальные схемы пуска. В основном используются три схемы пуска, которые рассмотрены применительно к синхронным двигателям; пуск асинхронных двигателей отличается лишь тем, что в нем отсутствует последняя стадия — подача возбуждения и втягивание в синхронизм.

Автотрансформаторный пуск осуществляется по схеме, показанной на рис. 12.11, а. При пуске сначала включается нулевой выключатель 1, затем выключатель 2, присоединяющий автотрансформатор к сети. Так как двигатель подключен к пониженному (через автотрансформатор) напряжению, то он разгоняется, потребляя сравнительно небольшой ток. После того как двигатель достигает подсинхронной скорости, включается возбуждение и двигатель входит в синхронизм; выключатель 1 отключается и включается шунтирующий выключатель 3, который подает на двигатель нормальное напряжение.

У синхронных двигателей при легком пуске возбуждение на двигатель подается до включения выключателя 3; при тяжелом пуске возбуждение подключается после включения шунтирующего выключателя, т. е. после подачи на двигатель полного напряжения сети.

Если напряжение сети снижается с помощью автотрансформатора в k раз, то ток, потребляемый из сети при пуске, снижается пропорционально квадрату напряжения в k^2 раз. Однако автотрансформатор довольно дорог и обладает недостатками в эксплуатации, так как создает толчки тока при переключении и иногда служит причиной аварий. Все это привело к тому, что от автотрансформаторного пуска отказываются и в настоящее время он применяется крайне редко.

Реакторный пуск осуществляется согласно схеме, приведенной на рис. 12.11, б. Пусковой реактор ограничивает пусковой ток и снижает напряжение на двигателе при пуске за счет падения напряжения в реакторе. В начале пуска шунтирующий выключатель 2 отключен. С помощью выключателя 1 двигатель подключается к сети через реактор. По мере разгона двигателя ток снижается, что приводит к уменьшению падения напряжения в реакторе и, следовательно, к

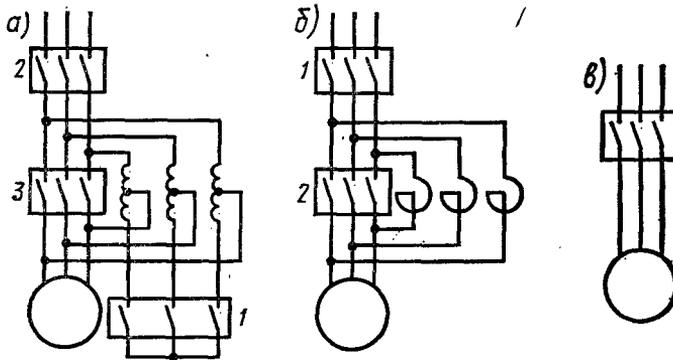


Рис. 12.11. Схемы пуска двигателей:
а — автотрансформаторного; б — реакторного; в — прямого

увеличению напряжения на двигателе. При подсинхронной скорости двигатель получает возбуждение и входит в синхронизм, после чего включается шунтирующий выключатель 2, выключая пусковой реактор. При этом двигатель оказывается подключенным непосредственно к сети.

Сопротивление реактора обычно определяется согласно выражению*

$$x_p = U_{\text{ном}} (1/I_{\text{пуск.мин}} - 1/I_{\text{пуск.макс}}),$$

где $I_{\text{пуск.мин}}$ — величина, до которой необходимо ограничить пусковой ток с помощью реактора; $I_{\text{пуск.макс}}$ — пусковой ток двигателя при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$ на его шинах.

При напряжении сети U_c , отличным в общем случае от $U_{\text{ном}}$, напряжение, подводимое к двигателю при пуске,

$$U_d = U_c \frac{1}{1 + (I_{\text{пуск.макс}}/U_{\text{ном}})x_p}.$$

При этом пусковой ток двигателя

$$I_{\text{пуск.д}} = U_c \frac{1}{(U_{\text{ном}}/I_{\text{пуск.макс}}) + x_p}.$$

* Данная формула и три последующие получены при допущении, что сопротивление двигателя чисто реактивное. Для неподвижного двигателя такое упрощение не вносит большой погрешности, поскольку при $s = 1$

$$(r'_d + r_1)/x \approx 1/3 \div 1/6.$$

Пусковой момент при реакторном пуске снижается:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}U_{\text{ном}}} (U_{\text{п}}/U_{\text{ном}})^2.$$

Пуск через реактор имеет недостаток — необходимость дополнительного оборудования (пускового реактора и шунтирующего выключателя).

Рассмотренную схему обычно применяют при необходимости значительного снижения тока в сети и достаточности для пуска небольшого превышения пускового момента над статическим моментом механизма.

Прямой пуск осуществляется согласно схеме, приведенной на рис. 12.11, в. Двигатель включается на полное напряжение сети с помощью выключателя. С помощью вращающего асинхронного момента двигателя достигает подсинхронной скорости, после чего подается возбуждение и он входит в синхронизм.

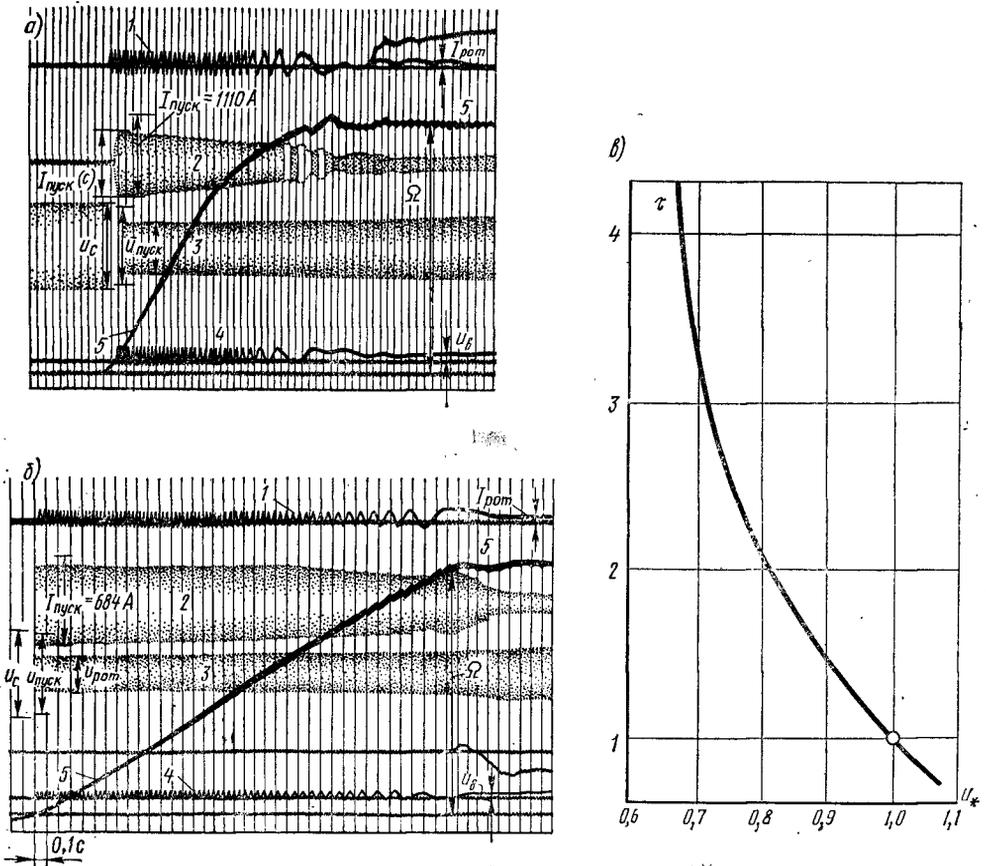


Рис. 12.12. Осциллограммы пуска синхронного двигателя:

а — прямой пуск с присоединенным насосом; б — пуск через реактор или автотрансформатор с отсоединенным насосом; в — время разгона $\tau = t/t_0$ синхронного двигателя в зависимости от напряжения $U_* = U/U_0$, $t_0 = t$ при $U = U_0$; 1 — ток ротора; 2 — ток статора; 3 — напряжение сети и двигателя; 4 — напряжение возбудителя; 5 — скорость двигателя

Значительные преимущества прямого пуска — отсутствие сложных пусковых устройств, простота схемы и большое сокращение времени пуска.

Для иллюстрации характера переходных процессов при пуске на рис. 12.12 приведены осциллограммы прямого и реакторного пуска синхронного двигателя.

Уравнение движения при пуске и его интегрирование. Процесс движения двигателя описывается уравнением (12.1)

$$\Delta M = M - M_{\text{мех}} = T_J ds'/dt,$$

где M — электромагнитный момент двигателя; $M_{\text{мех}}$ — момент сопротивления рабочего механизма; T_J — постоянная инерции агрегата.

При синхронном двигателе $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 = -(1/\omega_0)(d\delta/dt)$. Постоянная инерции T_J определяется суммой маховых моментов двигателя и механизма (нагрузки):

$$GD_{\Sigma}^2 = GD_{\text{д}}^2 + GD_{\text{мех}}^2.$$

Определение времени разбега при пуске или остановке требует выяснения зависимости вращающего момента двигателя M и момента сопротивления механизма $M_{\text{мех}}$ от скольжения, причем при определении зависимости $M = f(s)$ необходимо учитывать влияние сопротивления, через которое двигатель подключается к сети.

Для упрощения анализа переходных режимов часто при определении зависимости $M = f(s)$ пользуются только статическими характеристиками, хотя при резком изменении напряжения питания двигателя (включении двигателя в сеть, переключении на резервный источник питания, понижении напряжения в случае короткого замыкания в сети и т. д.) следовало бы пользоваться динамическими характеристиками. Переходные слагающие токов в цепях статора и ротора двигателя, которые создают дополнительные динамические составляющие момента, изменяющиеся во времени даже при постоянном скольжении, не учитывают. Обычно влияние дополнительных моментов на время пуска или выбега невелико и им пренебрегают (учитывая только при определении наибольших механических усилий).

При решении уравнения (12.1) необходимо учитывать характер зависимостей $M = f(s)$ и $M_{\text{мех}} = f(s)$. Здесь могут быть применены аналитические методы решения уравнения движения синхронных генераторов и способ последовательных интервалов. Возможны упрощенные решения при аппроксимации зависимостей $M = f(s)$ и $M_{\text{мех}} = f(s)$ прямыми или некоторыми кривыми, при которых интегрирование (12.1) оказывается возможным.

Не останавливаясь на упрощенных приемах, рассмотрим непосредственно способ последовательных интервалов как универсальный, обеспечивающий решение при любых зависимостях моментов M . Техника расчета пусковых режимов двигателей при этом несколько отличается от техники расчета устойчивости. Однако общие положения всех способов, изложенных в гл. 7 не изменяются и ниже приводятся только некоторые особенности.

Пуск асинхронных двигателей. Здесь можно рассмотреть два случая — общий и частный.

Общий случай: $M_{\text{мех}} = f(s)$. Предполагая, что M и $M_{\text{мех}}$ не зависят ни от времени, ни от ускорения и полностью определяются скольжением s , построим ста-

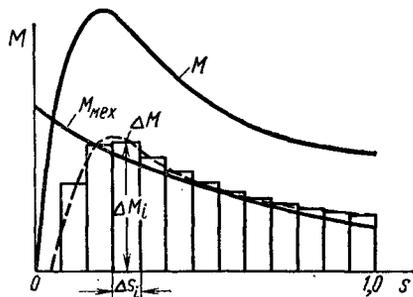


Рис. 12.13. К графоаналитическому решению уравнения движения

тические характеристики $M = \varphi(s)$ и, как разность их, зависимость $\Delta M = \varphi(s)$. Разобьем $\Delta M(s)$ на ряд равных интервалов (рис. 12.13) по скольжению:

$$\Delta s_1 = \Delta s_2 = \dots = \Delta s_i.$$

Тогда уравнение движения (12.1) на любом интервале будет иметь вид

$$\Delta M_i = T_J \Delta s_i / \Delta t_i \text{ или } \Delta s_i = (\Delta M_i / T_J) \Delta t_i.$$

Аналогично можно выразить и приращение частоты вращения (оборотов):

$$\Delta n_i = K (\Delta M_i / T_J) \Delta t_i, \quad (12.2a)$$

где ΔM_i — среднее значение избыточного момента на данном интервале.

Время от момента пуска до конца любого i -го интервала

$$t = T_J \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i}. \quad (12.2b)$$

Точность решения возрастает с уменьшением величины Δs и соответственно с увеличением числа интервалов (см. П2).

Частный случай: $M_{\text{мех}} = \text{const}$. Аналитическое решение уравнения (12.1) можно получить, если принять, что $M_{\text{мех}} = \text{const}$ в течение всего процесса разбега (или выбега); пусть при этом M определяется выражением, соответствующим упрощенной схеме замещения двигателя:

$$M = \frac{U^2 R_s}{r^2 + (xs)^2} = \frac{2b}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s}, \quad (12.3)$$

где $b = M_m U^2 f_0^2 / (M_{\text{ном}} U_0^2 f^2)$; $s_{\text{кр}} = r/x$.

В этом случае избыточный момент определится из выражения (12.1) с учетом (12.3):

$$\Delta M = M_{\text{мех}} \left[\frac{2b_c s_{\text{кр}} s}{2b_c s_{\text{кр}} s - (s^2 + s_{\text{кр}}^2)} - 1 \right], \quad (12.4)$$

причем $b_c = b/M_{\text{мех}}$.

В общем случае, согласно (12.1), время разбега (или выбега) от s_1 до s_2

$$t = \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{\Delta M} T_J,$$

или после подстановки (12.4)

$$\begin{aligned} t &= \frac{T_J}{M_{\text{мех}}} \int_{s_1}^{s_2} \left(1 + \frac{2b_c s_{\text{кр}} s}{s^2 - 2b_c s_{\text{кр}} s + s_{\text{кр}}^2} \right) ds = \\ &= \frac{T_J}{M_{\text{мех}}} \left[(s_2 - s_1) + 2b_c s_{\text{кр}} \int_{s_1}^{s_2} \frac{s ds}{s^2 - 2b_c s_{\text{кр}} s + s_{\text{кр}}^2} \right]. \end{aligned} \quad (12.5)$$

Время разбега t_p от угловой скорости $\omega_1 = (1 - s_1)\omega_0$ до $\omega_2 = (1 - s_2)\omega_0 > \omega_1$ определяется решением (12.5) при $b_c > 1$:

$$t_p = \frac{T_J}{M_{\text{мех}}} \left[\frac{b_c}{\sqrt{b_c^2 - 1}} \left(s_\Phi \ln \frac{s_\Phi - s_2}{s_\Phi - s_1} + s_{\text{уст}} \ln \frac{s_1 - s_{\text{уст}}}{s_2 - s_{\text{уст}}} \right) + (s_2 - s_1) \right], \quad (12.6)$$

где $s_\Phi = s_{\text{кр}}(b_c + \sqrt{b_c^2 - 1})$; $s_{\text{уст}} = s_{\text{кр}}/(b_c + \sqrt{b_c^2 - 1})$ — установившееся скольжение по окончании разбега.

При разбеге без нагрузки ($M_{\text{мех}} = 0$)

$$t_p = \frac{T_J}{b} \left(\frac{1 - s^2}{4s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}^2}{2} \ln \frac{1}{s} \right).$$

Из (12.6) для полного времени пуска ($s_1 = 1$, $s_2 = s_{\text{уст}}$) получаем $t = \infty$. Это означает асимптотическое приближение скорости к ее установившемуся значению.

Приблизненно время пуска $t_{\text{пуск}}$ можно найти, принимая (на основании расчетов или опытов) $s_2 = s_{\text{уст}} + 0,01$:

$$t_{\text{пуск}} = \frac{T_J}{M_{\text{мех}}} \left[\frac{b_c}{\sqrt{b_c^2 - 1}} \left(s_\Phi \ln \frac{s_\Phi - s_{\text{уст}} - 0,01}{s_\Phi - 1} \right) + s_{\text{уст}} \ln 100(1 - s_{\text{уст}}) + (s_2 - s_1) \right]. \quad (12.6a)$$

Время выбега от угловой скорости $\omega_1 = (1 - s_1)\omega_0$ до $\omega_2 = (1 - s_2)\omega_0 < \omega_1$ определяется решением (12.5) при $b_c < 1$:

$$t_B = \frac{T_J}{M_{\text{мех}}} \left[s_2 - s_1 + b_c s_{\text{кр}} \left(\ln \frac{s_2^2 - 2b_c s_{\text{кр}} s_2 + s_{\text{кр}}^2}{s_1^2 - 2b_c s_{\text{кр}} s_1 + s_{\text{кр}}^2} + \frac{2b_c(\varphi_2 - \varphi_1)}{\sqrt{1 - b_c^2}} \right) \right], \quad (12.6б)$$

где

$$\varphi_1 = \arctg \frac{s_1/s_{\text{кр}} - b_c}{\sqrt{1 - b_c^2}}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{s_2/s_{\text{кр}} - b_c}{\sqrt{1 - b_c^2}}.$$

Время выбега от предшествующего установившегося режима до полной остановки определяется подстановкой величин $s_2 = 1$; $s_1 = s_{\text{уст}}$ в равенство (12.6б). В частном случае при отключении одиночного двигателя от сети время выбега

$$t_B = T_J (s - s_{\text{уст}})/M_{\text{мех}}, \quad (12.7)$$

откуда скольжение двигателя в любой момент времени и угловая скорость будут

$$s = M_{\text{мех}} t / T_J + s_{\text{уст}}, \quad (12.8)$$

$$\omega_* = \omega/\omega_0 = \omega_{* \text{уст}} - M_{\text{мех}} t / T_J, \quad (12.9)$$

где скорость до отключения двигателя $\omega_{* \text{уст}} = 1 - s_{\text{уст}}$.

В соответствии с равенством (12.9) можно заключить, что кривая выбега (зависимость угловой скорости агрегата от времени) отключенного от сети двигателя с постоянным момен-

том сопротивления на валу представляет собой прямую линию. На основании (12.7) время полной остановки агрегата

$$t = (1 - s_{уст}) T_J / M_{мех}. \quad (12.10a)$$

При моменте сопротивления на валу, равном номинальному, время остановки примерно равно постоянной инерции:

$$t = (1 - s_{уст}) T_J. \quad (12.10б)$$

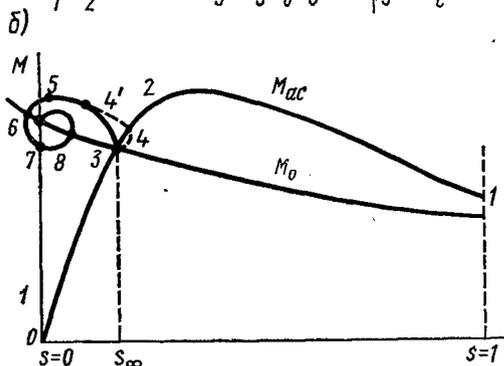
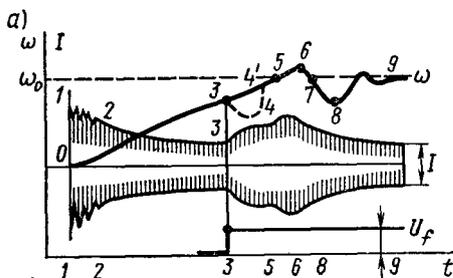


Рис. 12.14. Характер процесса при асинхронном пуске синхронного двигателя:

а — примерная осциллограмма $\omega=f(t)$ и $I=f(t)$; б — изменение $M=f(s)$; 1 — момент включения; 2 — изменение $M=f(s)$; 3 — момент включения; 4 — изменение $M=f(s)$; 5 — момент включения; 6 — изменение $M=f(s)$; 7 — момент включения; 8 — изменение $M=f(s)$; 9 — синхронная работа

подсинхронной скорости. Начальный толчок периодической слагающей тока статора

$$I \approx U/x_{дз}^*$$

где U — напряжение сети в той точке, где оно может быть принято не зависящим от режима двигателя; $x_{дз}^* = x_d + x_{ст}$, причем $x_{ст}$ — внешнее сопротивление цепи статора между точкой с напряжением U и выводами статора данного двигателя.

По времени остановки агрегата с не зависящим от скорости моментом сопротивления на валу экспериментально определяется постоянная инерции:

$$T_J = M_{мех} t (1 - s_{уст}). \quad (12.10в)$$

Пуск синхронных двигателей. Синхронные двигатели при пуске подключаются сначала к сети невозбужденными. Их обмотки возбуждения при этом короткозамкнуты или замкнуты на сопротивление $\Delta R = (5 \div 10)R_f$, где R_f — сопротивление обмотки возбуждения. Разгоняясь как асинхронные, они достигают скорости, близкой к синхронной (подсинхронная скорость). После этого двигателям подается возбуждение и они, приобретая свойства синхронного двигателя, входят в синхронизм. Таким образом, процесс пуска синхронного двигателя можно разбить условно на два этапа (рис. 12.14): 1) разгон до подсинхронной скорости ($s \approx 0,1$) под действием среднего асинхронного момента; 2) вхождение в синхронизм под влиянием моментов, обусловленных возбуждением и зависящих от угла между осью ротора и вектором вращающегося поля статора.

На первом этапе пуска существенны начальный толчок тока статора и длительность разгона до

Длительность разгона до подсинхронной скорости можно определять так же, как и для асинхронных двигателей. Однако при проектировании эту скорость обычно находят графоаналитическими методами. Более точное изменение токов статора и ротора в процессе разгона двигателя может быть получено с помощью уравнений Парка — Горева.

На втором этапе пуска на несинхронно вращающийся ротор синхронного двигателя кроме асинхронного момента действует синхронный момент, зависящий от угла δ и обусловленный возбуждением, а также момент сопротивления механизма.

Практически вхождение в синхронизм может произойти только после подачи возбуждения, за счет которого у двигателя будет создан дополнительный момент, меняющийся по знаку (знакопеременный). Угловая скорость двигателя под воздействием знакопеременного момента будет колебаться около среднего значения с двойной частотой скольжения. Заметим, что так как на ротор действуют и другие знакопеременные моменты, а именно момент явнополюсности

$$M_{\text{явн}} = (U^2/2) [(x_d - x'_d)/(x_d x'_d)]$$

и переменная составляющая асинхронного момента, то иногда втягивание в синхронизм может произойти и без подачи возбуждения. Для этого, однако, необходимо, чтобы втягивающий момент был больше механического: $M_{\text{явн}} > M_{\text{мех}}$, что можно получить сравнительно редко. Характер процесса вхождения в синхронизм зависит от взаиморасположения ротора и магнитного потока статора в момент подачи возбуждения. Но положение ротора в момент подачи возбуждения обычно оказывает сравнительно малое влияние, поэтому можно не предусматривать специальных устройств для подачи возбуждения в наивыгоднейший момент.

Успешность синхронизации можно приближенно оценить по значению критического скольжения установившегося асинхронного режима без возбуждения, при котором возможно вхождение в синхронизм*:

$$s_{\text{кр}} = \sqrt{(M_{\text{сн}} - 0,6M_{\text{мех}})/T_J}, \quad (12.11)$$

где $M_{\text{сн}}$ — максимальный электромагнитный синхронный момент при номинальном возбуждении.

Если скольжение $s_{\text{уст}}$ синхронного двигателя, определенное точкой пересечения кривых среднего асинхронного момента и момента сопротивления, будет равно или меньше $s_{\text{кр}}$, то втягивание в синхронизм обеспечено.

Однако при изменении скольжения во время втягивания в синхронизм динамические характеристики асинхронного момента могут отличаться от статических. Средний динамический асинхронный момент при $s = 0$ не равен нулю, вследствие чего угловая скорость может оказаться выше синхронной и вхождение двигателей в синхронизм облегчится. Синхронные двигатели часто втягиваются в синхронизм при скольжениях, больших $s_{\text{кр}}$. Поэтому при $s_{\text{уст}} > s_{\text{кр}}$ следует или вводить корректировку скольжения [найденного по (12.11)] на основании экспериментальных данных, полученных для аналогичных установок, или проводить точные расчеты.

Чтобы получить экспериментальные данные, следует проводить испытания, определяя условия синхронизации. За время испытаний, которые проводятся при различных нагрузках, возбуждение снимается и вновь восстанавливается. Возбуждение подается после того, как

* Предполагается, что вхождение в синхронизм происходит не более чем через два цикла после подачи возбуждения, электромагнитный момент принимается для установившегося скольжения, включение возбуждения происходит в наиболее неблагоприятный момент, и нарастание его происходит практически мгновенно (быстрее, чем переходный механический процесс).

двигатель будет иметь установившееся значение скольжения. Скольжение проще всего можно определить по частоте колебаний стрелки амперметра в цепи возбуждения. При этом если удвоенное число полных колебаний n тока возбуждения за некоторое время разделить на $t(c)$, то получится значение скольжения (%):

$$s = 2n/t.$$

Учитывая, что ток статора при асинхронном режиме обычно выше номинального в 1,5—3,0 раза, следует сразу же после установления скольжения производить отсчет по приборам во избежание перегрева обмоток. Для измерения обычно требуется время порядка 10 с.

* § 12.3. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ МОЩНОСТЬ, СОИЗМЕРИМУЮ С МОЩНОСТЬЮ ИСТОЧНИКА

В мощных электрических системах нарушения устойчивости наиболее вероятны в аварийных или послеаварийных режимах. В системах, у которых мощности отдельных нагрузок соизмеримы с мощностью системы*, устойчивость может

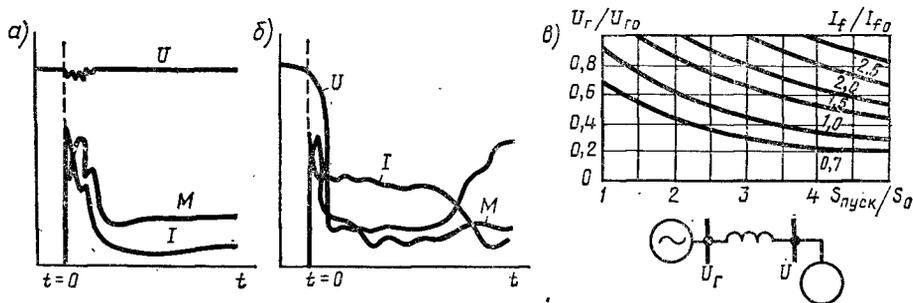


Рис. 12.15. Пуск двигателя от источника соизмеримой с ним мощности:

а — пуск от системы большой мощности; б — пуск от источника соизмеримой мощности; в — зависимость относительного напряжения генератора в установившемся режиме U_r/U_{r0} от условной пусковой мощности $S_{пуск}/S_0$ и тока возбуждения I_f/I_{f0} , где индекс 0 означает условия пуска при такой мощности генератора, когда напряжение U_r уменьшается на 5—7% ($S_{пуск}/S_0=1$). Здесь $S_{пуск}$ — полная мощность, потребляемая двигателем в момент включения

нарушаться и при нормальных (с точки зрения эксплуатации) режимах. Наиболее опасным в этом смысле является прямой пуск короткозамкнутых асинхронных двигателей, обычно составляющих основную часть нагрузки. Большой пусковой ток этих двигателей вызывает резкое снижение напряжения в системе, что приводит к увеличению скольжения остальных работающих двигателей. Соотношение загрузки двигателей и снижения напряжения в сети обычно бывает таково, что реактивная мощность, потребляемая двигателями, возрастает. Это вызывает дальнейшее понижение напряжения и может привести к опрокидыванию работающих двигателей и возникновению лавины напряжения. Происходящее нарушение устойчивости параллельно работающих станций ведет к длительному перерыву электроснабжения потребителей. Поэтому устойчивость таких систем должна особо проверяться по условиям пуска короткозамкнутых двигателей. Весьма опас-

* Примерами таких систем могут служить электрические системы для сельского хозяйства, передвижные электростанции для снабжения строительства, лесозаготовок и т. п.; корабельные и самолетные системы.

ным является неудачный пуск двигателей, мощность которых соизмерима с мощностью генератора (см. пример 12.1 и рис. 12.15).

Анализ процессов пуска двигателей и устойчивости узлов нагрузки довольно сложен, и в инженерной практике часто пользуются упрощенными методами. Рассмотрим сначала процессы при пуске асинхронного двигателя, питаемого от генератора соизмеримой мощности. Изменение напряжения во время пуска двигателя в этом случае происходит примерно следующим образом: в первый момент после включения двигателя напряжение на шинах генератора уменьшается вследствие падения напряжения в переходном реактивном сопротивлении генератора при протекании в нем пускового тока двигателя. Далее (см. пример 12.1) при отсутствии на генераторе автоматического регулирования возбуждения напряжение на шинах генератора начнет уменьшаться, поскольку пусковые токи, являясь практически реактивными до $\approx 0,1$, будут размагничивать генератор. Если время пуска больше времени электромагнитного переходного процесса в генераторе, то к окончанию переходного процесса на генераторе значение напряжения будет ниже, чем начальное значение напряжения в момент пуска двигателя. На последнем этапе разгона пусковой ток резко уменьшится и одновременно повысится коэффициент мощности. Все это приведет к увеличению напряжения генератора.

Понижение напряжения на шинах генератора в процессе пуска резко изменяет пусковые характеристики двигателя (рис. 12.15), увеличивает длительность пуска, уменьшает момент двигателя, что может привести к невозможности осуществления пуска (рис. 12.15, б). Условия пуска могут быть облегчены либо выбором двигателя с меньшим пусковым током, либо автоматическим регулированием возбуждения генератора. Во втором случае напряжение генератора после затухания переходного электромагнитного процесса может быть выше, чем начальное напряжение генератора в момент пуска двигателя; при определенном токе возбуждения напряжение может быть равно номинальному напряжению генератора (см. пример 12.1).

Запуск одиночного (эквивалентного) двигателя. Если пренебречь переходными процессами возбудителя и считать, что э. д. с. E_{qe} при снижении напряжения меняется скачком до нового установившегося значения или при отсутствии регулирования остается постоянной, то изменение напряжения на генераторе от начального значения U_0 до установившегося U будет происходить практически по экспоненциальному закону:

$$U_t = U - (U - U_0)e^{-t/T_d'} \quad (12.12)$$

Начальное значение напряжения в момент включения двигателя U_0 определяется переходной э. д. с., которая при холостом ходе принимается равной $E_q' = 1$.

В момент пуска двигатель можно заменить постоянной нагрузкой, представленной сопротивлением $z_H = r_H + jx_H$, где

$$z_H = z_d = \frac{\eta_d}{K_i} \frac{\cos \varphi_d P_r}{\cos \varphi_r P_d} \left(\frac{U_d}{U_r} \right)^2 = \sqrt{x_H^2 + r_H^2} \quad (12.13)$$

Здесь η_d — к. п. д. двигателя; K_i — кратность пускового тока; $\cos \varphi_r$, $\cos \varphi_d$ — номинальное значение коэффициента мощности генератора и пусковое значение коэффициента мощности двигателя соответственно; P_r , P_d — номинальные ак-

тивные мощности соответственно на шинах генератора и на валу двигателя; U_{Γ} , $U_{\text{д}}$ — напряжение на шинах генератора и двигателя.

Примем, что $E'_q = E'_{q0} = \text{const}$. При сделанных допущениях, согласно векторной диаграмме, можно определить напряжение на генераторе:

$$U_0 = \left[z_{\text{н}} \sqrt{x_{\Gamma\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} / (x_{\Gamma\Sigma} x'_{\Gamma\Sigma} + r_{\Sigma}^2) \right] E'_{q0} = K'_0 E'_{q0}. \quad (12.14)$$

Здесь $x_{\Gamma\Sigma}$ — полное сопротивление цепи ($x_{\Gamma\Sigma} = x_{\Gamma} + x_{\Sigma}$); аналогично находятся r_{Σ} и $x'_{\Gamma\Sigma}$, причем сопротивление сети x_{Σ} , связывающей генератор и двигатель, введено в x_{Σ} (соответственно сопротивление r_{Σ} в r_{Σ}). В случае явнополюсного генератора $x_0 = x_q$, в случае неявнополюсного $x_{\Gamma} = x_d$.

При более упрощенном подходе установившееся значение напряжения может быть определено по формуле

$$U_0 = x_{\text{н}} E'_q / (x_{\text{н}} + x'_d)$$

при подстановке в нее установившегося значения э. д. с. E'_q и сопротивления x'_d . Однако практически проще найти напряжение с помощью заранее рассчитанных кривых типа показанных на рис. 12.15, в. Зная допустимое снижение напряжения на шинах нагрузки при пуске ($U_{\text{доп}}$), можно определить предельно допустимую мощность пускаемых двигателей, при которой напряжение в первый момент* пуска имеет допустимое значение ($U_0 = U_{\text{нач}} = U_{\text{доп}}$):

$$P_{\text{д.доп}} = S_{\Gamma.\text{ном}} \eta_{\text{д.ном}} \cos \varphi_{\text{д.ном}} / [x_{\text{пуск}} (U_{\Gamma.\text{ном}} / U_{\text{д.ном}})^2 k_3],$$

где $\eta_{\text{д.ном}}$ — к. п. д. двигателя; $\cos \varphi_{\text{д.ном}}$ — коэффициент мощности; k_3 — коэффициент загрузки; $x_{\text{пуск}}$ — пусковое сопротивление, определяемое при $U_0 = U_{\text{доп}}$:

$$x_{\text{пуск}} = x'_d / (E'_{q0} / U_{\text{доп}} - 1).$$

Зная допустимый уровень напряжения на шинах генератора, можно найти ток возбуждения, необходимый для поддержания установившегося значения напряжения не меньше $U_{\text{доп}}$. Для этого, полагая $U_{\Gamma} / U_{\Gamma 0} = U_{\text{доп}} / U_{\Gamma.\text{ном}}$ и $s_{\text{пуск}} / s_0 = 1 / x_{\text{пуск}}$, определяем по кривым (рис. 12.15, в), соответствующую величину $I_{\text{в}} / I_{\text{в.ном}} = I_{\text{в}} / I_{\text{в0}}$. Если ток возбуждения будет меньше найденного значения, то напряжение на генераторе после включения двигателей будет меньше допустимого и запуск двигателей недопустимо затянется.

Если генератор, от которого пускается двигатель, работает с нагрузкой, то в этом случае допустимое снижение напряжения при пуске двигателя будет определяться не только с учетом условия возможности пуска двигателя, но и с учетом допустимого снижения на других приемниках электроэнергии, подключенных к генератору. Существенное влияние на процесс пуска может оказать изменение угловой скорости агрегата (генератора и первичного двигателя), которую во время переходного процесса можно представить выражением**

* Под установившимся напряжением в данном случае подразумевается значение напряжения в процессе пуска после затухания электромагнитного переходного процесса.

Если сопротивление сети x_{Σ} введено в x_{Γ} , то на двигателе будет напряжение U_0 . Аналогично, для установившегося режима

$$U_0 = [z_{\text{н}} \sqrt{x_{\Gamma\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} / (x_{\Gamma\Sigma} x_{d\Gamma\Sigma} + r_{\Sigma}^2)] E_q = K_0 E_q,$$

где $x_{\Gamma\Sigma}$ — сопротивление цепи, включающее x_q в случае явнополюсного генератора и x_d — в случае неявнополюсного. Разумеется, справедливо и обратное соотношение $E_q = U_0 / K_0$, а также $E'_q / E_q = K'_0 / K_0$.

** Предполагается, что в агрегат входит двигатель внутреннего сгорания (дизель). См.: Мелешкин Г. А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем. — Л.: Судостроение, 1971.

$$\omega = 1 - \Omega_{\text{макс}} (1 - e^{-t/T_\psi}). \quad (12.15)$$

Здесь $\Omega_{\text{макс}}$ — максимальное отклонение скорости:

$$\Omega_{\text{макс}} = \rho K_\lambda K_\delta \left[e^{-\frac{\alpha}{\beta} (\frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0)} \sin \psi_0 + \cos \psi \right];$$

постоянная времени первичного двигателя с учетом регулирования (с)

$$T_\psi = 0,4 (\pi/2 - \psi + \psi_0)/\beta,$$

причем

$$\rho = \sqrt{[(1 - \alpha\alpha_0)/(\beta\alpha_0)]^2 + 1} \quad (\text{где } \alpha_0 = K_\delta T_J);$$

K_λ — коэффициент наброса нагрузки;

$$P_{\text{д*}}/P_{\text{г*}} = \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos \varphi_{\text{н}}}{z_{\text{н}} r_{\text{г}} \cos \varphi_{\text{г}}} \frac{P_{\text{г}}}{P_{\text{н.д}}};$$

K_δ — степень неравномерности регулятора (статизм);

$$\alpha = K_\delta T_J (1 - \tau)/(2T_{\text{мех}}T_J); \quad \beta = \sqrt{1/(T_{\text{мех}}T_J) - \alpha^2};$$

T_J — постоянная времени агрегата (генератора и двигателя); τ — время запаздывания регулирующего импульса; $T_{\text{мех}}$ — постоянная времени регулятора скорости;

$$\psi = \text{arctg} [(1 - \alpha\alpha_0)/(\beta\alpha_0)]; \quad \psi_0 = \text{arctg} (\beta/\alpha).$$

Чтобы определить изменение напряжения во времени $U = f(t)$, необходимо объединить эффект электромагнитных процессов в генераторе [см. (12.12)] и влияние изменения угловой скорости [см. (12.15)], которое существенно в случае, если $\Omega_{\text{макс}} > 0,05$. Опуская промежуточные преобразования, получим

$$U(t) = (1 - \Omega_{\text{макс}}) + \left[U_0 - (1 - \Omega_{\text{макс}}) + \frac{K'_0 \Omega_{\text{макс}} T_\psi}{K_0 T_{d0} - K'_0 T_\psi} \right] e^{-\frac{t}{T_{d0} K_0 / K'_0}} - \frac{K'_0 \Omega_{\text{макс}} T_\psi}{K_0 T_{d0} - K'_0 T_\psi} e^{-t/T_\psi}. \quad (12.16)$$

Применение выражений (12.14) и (12.15) проиллюстрировано примерами 12.2, 12.3.

Запуск нескольких двигателей. В узле нагрузки может быть несколько (n) двигателей, часть которых (k) будет запускаться одновременно в течение заданного времени Δt ; эти двигатели могут быть заменены одним эквивалентным двигателем.

Наиболее вероятное число включений определяется формулой математического ожидания (среднего значения) случайной величины:

$$N = \sum_{i=1}^q x_i P(x_i), \quad (12.17)$$

где x_i — число включений на данном (i -м) интервале времени; $P(x)$ — вероятность числа включений x на этом интервале.

Вероятное число включений за Δt числа k двигателей из всех (n) находящихся в работе вычисляется по формуле математического ожидания числа появления события при n независимых испытаниях, в каждом из которых вероятность появления одного события равна p :

$$k = pn.$$

Здесь p определяется по графику закона распределения включений.

Число совместно включаемых двигателей, при котором значение вероятности будет максимальным,

$$k_0 = (n + 1) p. \quad (12.18)$$

При общем числе работающих электродвигателей n у числа k_0 из них повторится одно включение в течение Δt с вероятностью

$$P(n, k_0) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k}. \quad (12.19)$$

Вероятность, с которой будет происходить включение большего (k'') или меньшего (k'), чем k_0 , числа двигателей, находится согласно интегральной теореме Лапласа:

$$P(k' \leq k_0 \leq k'') \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z'}^{z''} e^{-\frac{V^2}{2}} dV = \Phi(z'') - \Phi(z'), \quad (12.20)$$

где

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-0,5V^2} dV$$

функция Лапласа, числовые значения которой табулированы в зависимости от значения z . Для конкретных расчетов значения z принимаются равными

$$z' = \frac{k' - pn}{\sqrt{p(1-p)n}}; \quad z'' = \frac{k'' - pn}{\sqrt{p(1-p)n}}.$$

Значения $\Phi(z')$ и $\Phi(z'')$ определяются значениями z' и z'' по таблицам $\Phi(z)$.

§ 12.4. РЕЗКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Резкие изменения режима обычно происходят в трех случаях:

1) авария (короткое замыкание) или перегрузка в распределительной или питающей сети и последующее ее устранение. Напряжение в момент $t = 0$ уменьшается от значения U_0 до U_1 , а затем, по истечении времени t_1 , вновь восстанавливается до U_0 , причем режим двигателей нагрузки не влияет на характер изменения U ;

2) отключение двигателей (узла нагрузки) от напряжения (перерыв питания) и подключение его через время t_1 . В этом случае $U_1 = 0$;

3) изменение момента сопротивления в связи с увеличением нагрузки на приводимом двигателем механизме ($M_1 > M_0$) или уменьшением ее ($M_1 < M_0$) с последующим восстановлением (через t_1) прежнего момента M_0 .

Рассмотрим все эти случаи сначала упрощенно, с тем чтобы выяснить основную физическую картину процесса и особенности поведения синхронных и асинхронных двигателей. В соответствии с этим будем считать, что механический момент нагрузки двигателей $M_{\text{мех}}$ изменяется скачком в моменты времени $t = 0, t = t_1$, что электромагнитический момент M может быть определен согласно статической характеристике, а электромагнитные переходные процессы в двигателях не учитываются, так как они в большинстве случаев сравнительно мало влияют на изучаемые процессы.

Предположим, что или напряжение изменяется так, как это представлено на рис. 12.16, а, или момент сопротивления $M_{\text{мех}}$ — как на рис. 12.16, б. В любом случае происходит наброс нагрузки, который может вызвать неустойчивость.

Наброс нагрузки на синхронный двигатель. Рассмотрим два характерных случая, показанных на рис. 12.17.

Предположим, что произошло снижение напряжений* от U_0 до U_1 и соответственно изменение характеристик от $M_0 = f(\delta)$ до $M_1 = f(\delta)$ (рис. 12.17, а). Процесс будет определяться характеристиками, приведенными на рис. 12.17. При снижении напряжения до U_1 систе-

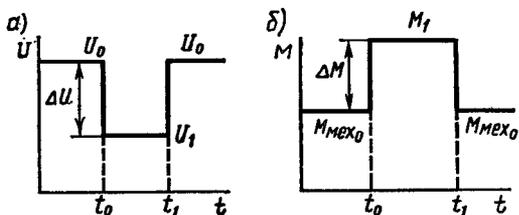


Рис. 12.16. Изменения режима — наброс нагрузки:

а — снижение («посадка») напряжения на $\Delta U = U_0 - U_1$; б — увеличение момента $\Delta M = M_1 - M_{\text{мех}0}$

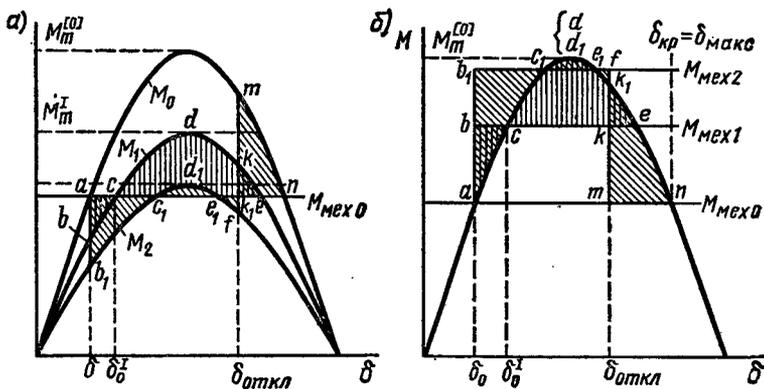


Рис. 12.17. Наброс нагрузки на синхронный двигатель:

а — уменьшение напряжения от U_0 до U_1 и изменение момента от M_0 до M_1 или снижение напряжения до U_2 (момент M_2); б — увеличение механического момента от $M_{\text{мех}0}$ до $M_{\text{мех}1}$ или $M_{\text{мех}2}$. В начальном режиме $\delta = \delta_0$

* При исследовании устойчивости синхронных двигателей напряжение на их шинах можно принимать в качестве независимой переменной только при условии $\Sigma P_r \gg \Sigma P_d$ и соответственно $x_c \ll x_d$. При построении характеристик $M = f(\delta)$, представленных на рис. 12.17, в общем случае необходимо оперировать с той э. д. с., которую в данных условиях (при принятом способе регулирования возбуждения) можно считать постоянной (см. также гл. 11). Для нерегулируемого генератора следует принимать квазидинамическую характеристику $M = f(E_q, \delta)$.

ма остается устойчивой, как бы долго ни продолжалось это снижение. Новый установившийся режим (точка c) наступает после цикла качаний. Аналогично происходит процесс при увеличении момента нагрузки от $M_{\text{мех}0}$ до $M_{\text{мех}1}$ (рис. 12.17, б). Такое увеличение может продолжаться сколь угодно долго. В обоих (a , б) случаях площадка ускорения $abca$ меньше площадки торможения $cdec$. При снижении напряжения до U_2 (рис. 12.17, а) или увеличении механического момента до $M_{\text{мех}2}$ (рис. 12.17, б) система оказывается неустойчивой. В обоих случаях площадка ускорения ab_1c_1a больше площадки торможения $c_1d_1e_1c_1$.

Чтобы сохранить устойчивость, при угле $\delta_{\text{откл}}$ (точка k_1) надо восстановить исходные условия (поднять напряжение до U_0 в случае a , снизить слишком большой механический момент $M_{\text{мех}}$, в данном случае $M_{\text{мех}2}$, до $M_{\text{мех}0}$ в случае б). Угол $\delta_{\text{откл}}$ надо подобрать так, чтобы сумма площадок ускорения и торможения была равна нулю. Например, в случае a (пл. ab_1c_1a + пл. $e_1fk_1e_1$) — (пл. $c_1d_1e_1c_1$ + пл. k_1mnk_1) = 0.

Определение угла $\delta_{\text{откл}}$, при котором (или меньшем) надо восстановить напряжение (случай, показанный на рис. 12.17, а), производится с помощью известной приближенной формулы (4.19 б), где надо принять $P_m^{II} = M_m^{[0]}$, $P_m^{III} = M_m^I$, $P_0 = M_{\text{мех}0}$. Тогда

$$\cos \delta_{\text{откл}} = \frac{(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) M_{\text{мех}0} + M_m^{[0]} \cos \delta_{\text{кр}} - M_m^I \cos \delta_0}{M_m^{[0]} - M_m^I}.$$

Для случая, приводящего к неустойчивости наброса момента от $M_{\text{мех}0}$ до некоторого $M_{\text{мех}}$ при неизменном напряжении, согласно рис. 12.17, б, имеем

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} (M_{\text{мех}} - M_m^{[0]} \sin \delta) d\delta = - \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} (M_{\text{мех}0} - M_m^{[0]} \sin \delta) d\delta,$$

откуда, обозначив $M_{\text{мех}0} = M_0$, получим

$$\delta_{\text{откл}} = [M_{\text{мех}} \delta_0 - M_0 \delta_{\text{кр}} - M_m^{[0]} (\cos \delta_{\text{кр}} - \cos \delta_0)] / (M_{\text{мех}} - M_0). \quad (12.21)$$

Время соответствующего наброса, т. е. время, в течение которого допустимо понижение напряжения или увеличение механического момента, определяется методом последовательных интервалов или упрощенно (см. гл. 7) при аппроксимации синусоиды прямой, проходящей через точки, соответствующие углам δ_0^I и $\delta_{\text{откл}}^I$. Тогда время

$$t_1 = \sqrt{\frac{T_J (\delta_{\text{откл}}^I - \delta_0^I)}{M_m^I (\sin \delta_{\text{откл}}^I - \sin \delta_0^I)}} \arccos \left(\frac{M_0 / M_m^I - \sin \delta_{\text{откл}}^I}{M_0 / M_m^I - \sin \delta_0^I} \right). \quad (12.22)$$

В частном случае при периодически меняющейся нагрузке, график которой изображен на рис. 12.18, а, и при $\delta_0 = 0$ будем иметь $M_0 = 0$, $M_0^I = P_0 = P_m$. Предельный угол (при котором сохраняется устойчивость) снятия наброса, найденный согласно (12.21),

$$\delta_1 = 2M_m^{[0]} / M_0^I = 2.$$

Следовательно, при $P_0 = P_m$ предельный угол $\delta_1 = 114^\circ$, а при $P_0 = 2P_m$

(рис. 12.18, б) угол $\delta_1 = 1$, т. е. 57° . Время, на которое может быть разрешен наброс нагрузки на двигатель, работавший до этого вхолостую, может быть определено или способом последовательных интервалов, или опять-таки упрощенно, например согласно выражению (12.22), на надлежащим образом модифицированному.

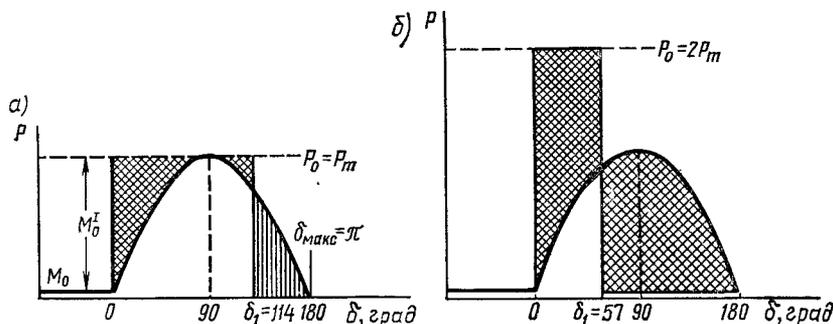


Рис. 12.18. Периодические набросы нагрузки на синхронный ненагруженный двигатель и определение предельного угла снятия нагрузки

Если учесть, что в действительности э. д. с., принятая постоянной при построении квазидинамической характеристики, в действительности будет изменяться, то необходимо иметь в виду, что определение предельного угла (и соответственно времени) может давать, согласно рис. 12.18, б и формулам (12.21), (12.22), завышенные значения.

При учете динамических характеристик синхронного двигателя наиболее характерно то обстоятельство, что резкие изменения режима вызывают свободные токи, поддерживающие результирующее потокосцепление обмотки возбуждения неизменным, и развиваемый двигателем максимальный момент (мощность) определяется при $t = 0$ характеристикой I , построенной при $E'_q = \text{const}$ (рис. 12.19). Эта характеристика, правильно отражающая динамику в начале процесса, далее переходит в статическую (II при $E'_{q\infty}$). Поскольку по мере затухания свободных токов величина E_q изменяется, стремясь к E_{q0} , вращающий момент двигателя приближается к моменту, определенному при $E_q = E_{q0}$ или соответственно при $E'_{q\infty} < E'_{q0}$. При этом двигатель может оказаться неустойчивым, хотя при $E'_{q0} = \text{const}$ он оценивался как устойчивый. Происходящий переходный электромагнитный процесс меняет характер качаний и задерживает выпадение из синхронизма до момента времени t_2 , когда (рис. 12.19, а, г, д) характеристика I изменяется на II , построенную при $E'_q \approx E'_{q1}$, где E'_{q1} — значение, предельное по условиям устойчивости.

Рассмотрим процессы, изображенные на рис. 12.19, подробнее. Пусть при δ_0 происходит мгновенный наброс мощности (рассуждения справедливы и при снижении напряжения) от P_0 до P_0^I (рис. 12.19, а). Если принять $E'_{q0} = \text{const}$ (рис. 12.19, б), то процесс будет идти согласно характеристике I (рис. 12.19, а); качания машины будут определяться участком характеристики ad и соответствующими (заштрихованными) площадками ускорения и торможения. Процесс во времени в этом случае изображается кривой, представленной на рис. 12.19, в.

При наличии затухания э. д. с. E'_q процесс будет определяться не характеристикой ad , а характеристикой ad_1 (рис. 12.19, а), которая соответствует зависимости $E'_q = f(t)$, изображенной на рис. 12.19, г.

Процесс изменения угла во времени будет иметь характер, показанный на рис. 12.19, д. Таким образом, следует иметь в виду, что допущение $E'_q = \text{const}$ справедливо только в течение короткого времени ($\Delta t < T'_{d0}$, $\Delta t < T_J$) и может привести к ошибкам в оценке характера

процесса. Если э. д. с. E'_q в процессе затухания уменьшится так, что при E'_{q1} максимальное значение $P_m^{I,II}$ (характеристика II, точка e на рис. 12.19, а, б) будет меньше P'_0 , то устойчивость двигателя через время t_2 нарушится.

Наброс нагрузки на асинхронный двигатель. Изменение напряжения питающей сети или механической нагрузки на валу двигателя одинаково вызывает изменение скольжения. С уменьшением напряжения или ротором момента скольжение

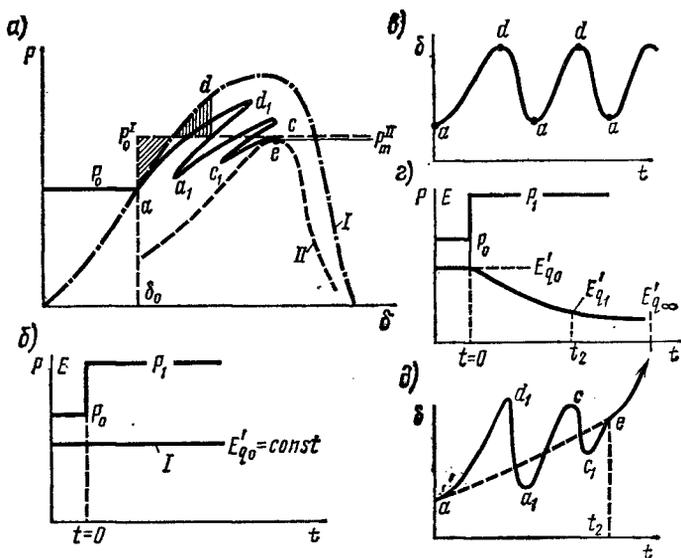


Рис. 12.19. Влияние динамических свойств синхронного двигателя

увеличивается. Если при этом механический момент $M_{\text{мех}}$ окажется больше максимального ($M_{\text{мех}} > M_m$), то двигатель будет увеличивать скольжение до $s = 1$, т. е. до остановки. Во избежание этого надо своевременно восстановить напряжение (или уменьшить механический момент на валу).

Рассмотрим сначала устойчивость асинхронного двигателя, работающего при нагрузке, создающей на валу момент $M_{\text{мех}} = M_{\text{мех}0} = \text{const}$ (рис. 12.20). Пусть при этом моменте двигатель находится в установившемся состоянии (точка a на рис. 12.20, а) и работает со скольжением s_0 . Предположим, что по каким-либо причинам напряжение на зажимах двигателя уменьшилось от U_0 до U_1 . При этом электромагнитный момент двигателя снизится в $(U_0/U_1)^2$ раз:

$$M_1 = M_0 \left(\frac{U_1}{U_0} \right)^2 = \frac{2M_m}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s} \left(\frac{U_1}{U_0} \right)^2. \quad (12.23a)$$

Более точное решение при $M_{\text{мех}0} = f(s)$ может быть получено численным интегрированием.

Разумеется, допустимость тех или иных набросов мощности или понижений напряжения будет определяться не только устойчивостью двигателя, но и значе-

нием тока, возрастающим при резком толчке, так как увеличение тока ведет к недопустимому нагреву двигателя.

Уравнение движения при этом будет иметь вид

$$M_{\text{мех}0} - M_1 = T_J ds/dt. \quad (12.236)$$

При снижении электромагнитного момента с M_0 до M_1 двигатель будет тормозиться и остановится. Время, в течение которого двигатель будет останавливаться, и изменение скольжения во времени можно найти, интегрируя уравнение движения. Обычно возникает задача: найти наибольшее время, на которое можно понизить напряжение с U_0 до U_1 , с тем чтобы после восстановления напряжения двигателя не останавливаясь, мог продолжать нормальную работу. При этом скольжение (точка b на рис. 12.20, a) не должно увеличиваться до значения, большего s_1 , так как при $s > s_1$ двигатель попадает на неустойчивую часть характеристики и восстановление напряжения уже не сможет прекратить его торможения и остановки.

Из (12.23а) и (12.23б) получим

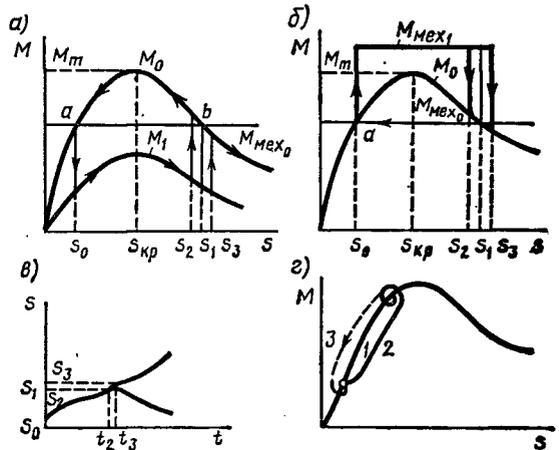


Рис. 12.20. Наброс нагрузки на асинхронный двигатель:

a — понижение напряжения от U_0 до U_1 и соответственно уменьшение момента от M_0 до M_1 . Скольжение, при котором возможно восстановление исходного режима при восстановлении напряжения (от U_1 до U_0), $s < s_1$, при $s_2 < s_1$ восстанавливается исходный режим, при $s_3 > s_1$ двигатель «опрокидывается» — останавливается; b — увеличение («наброс») механического момента от $M_{\text{мех}0}$ до $M_{\text{мех}1}$; θ — зависимость $s=f(t)$; ε — сопоставление статической и динамической характеристик: 1 — статическая характеристика; 2 — характеристика при набросе нагрузки (динамическая); 3 — то же, что 2, но при сбросе

$$\begin{aligned} dt &= \frac{T_J}{M_m} \frac{(s/s_{\text{KP}} + s_{\text{KP}}/s) ds}{(M_{\text{мех}0}/M_m)(s/s_{\text{KP}} + s_{\text{KP}}/s) - 2(U_1/U_0)^2} = \\ &= \frac{T_J s_{\text{KP}} (s_* + 1/s_*) ds_*}{M_m [(M_{\text{мех}0}/M_m)(s_* + 1/s_*) - 2(U_1/U_0)^2]} \end{aligned}$$

После интегрирования левой части от $t = 0$ до $t = t_1$, а правой — от $s_{*0} = s_0/s_{\text{KP}}$ до $s_{*1} = s_1/s_{\text{KP}}$ найдем время, при котором двигатель достигает скольжения s_{*1} :

$$t_1 = \frac{s_{\text{KP}} T_J}{M_{\text{мех}0}} \left[s_* + k \ln(s_*^2 - 2ks_* + 1) + \frac{2k^2}{\sqrt{1-k^2}} \arctg \frac{s_* - k}{\sqrt{1-k^2}} \right] \Big|_{s_{*0}}^{s_{*1}}, \quad (12.24)$$

где $k = (M_m/M_{\text{мех}0})(U_1/U_0)^2$.

Выражением (12.24) лучше всего пользоваться в числовом виде, раскрывая его при значениях s_{*0} и s_{*1} , которые находятся из выражения

$$M_{\text{мех}0} = 2M_m/(s_* + 1/s_*),$$

откуда

$$s_* = M_m / M_{\text{мех}0} \pm \sqrt{(M_m / M_{\text{мех}0})^2 - 1}. \quad (12.25)$$

Знак плюс в последнем соотношении соответствует s_{*1} , а знак минус — s_{*0} .

Поведение двигателя при толчке нагрузки будет полностью аналогично его поведению при понижении напряжения. Это достаточно очевидно из рис. 12.20, б, показывающего также, что при расчете по формуле (12.24) $M_{\text{мех}0}$ надо заменить на $M_{\text{мех}1}$.

Уравнение (12.24) можно представить в обобщенной форме, легко поддающейся номографированию:

$$\tau_1 = [t_J / (T_J s_{\text{кр}})] M_{\text{мех}0} = \varphi(M_0 / M_m; U_1 / U_0). \quad (12.26)$$

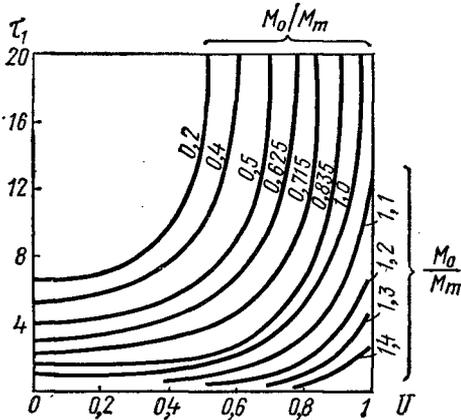


Рис. 12.21. Характер изменения τ_1 при изменении M_0/M_m , $U = U_1/U_0$ и $M_{\text{мех}0} = \text{const}$

Примерные значения времени τ_1 , выраженного в относительных единицах предельного по устойчивости времени, т. е. времени, в течение которого можно допустить понижение напряжения или наброс нагрузки, показаны на рис. 12.21.

При рассмотрении набросов на синхронный двигатель использовалась статическая характеристика $M = f(s)$, которая принималась за квазидинамическую. Между тем известно, что для асинхронного двигателя изменение скорости (скольжения) приводит к резкому изменению его эквивалентного сопротивления. Это вызывает изменение токов статора и ротора, а также соответственно перераспределение той части электромагнитной энергии, которая при установившемся скольжении преобразовывалась в механическую. Часть ее пойдет на изменение запаса энергии в индук-

тивностях двигателя, что приведет к запаздыванию в изменениях моментных характеристик (динамических) по отношению к характеристикам при медленных изменениях режима (статических). Примерный вид динамической характеристики асинхронного двигателя показан на рис. 12.20, в. Из приведенных зависимостей следует, что электромагнитный момент в динамике изменяется с некоторым запаздыванием по отношению к статической характеристике. Соответственно величины, характеризующие скольжение двигателя, изменение его тока, условия его устойчивости, будут отличаться от величин, определенных применительно к статической характеристике.

Погрешность в изменении скольжения можно грубо оценить как величину, обратно пропорциональную механической постоянной инерции двигателя T_J и пропорциональную квадрату сброса (или наброса) напряжения (или момента) ΔU (ΔP). Погрешность возрастает с течением времени. Так, например, при легких двигателях ($T_J = 0,5 \div 1$ с) погрешность в определении s достигает 10—30% через 0,1—0,3 с. При тяжелых двигателях ($T_J = 8 \div 10$ с) погрешность находится в пределах точности расчетов. Расчет электромеханических и электромагнитных переходных процессов при учете их взаимного влияния должен вестись по

полным дифференциальным уравнениям (уравнениям Парка—Горева) переходных процессов. Сопоставление результатов расчетов по полным и упрощенным уравнениям приводилось в гл. 7, § 7.2 и далее на рис. 12.31, 12.33.

* § 12.5. ТОЛЧКООБРАЗНЫЕ НАГРУЗКИ

Влияние толчкообразной нагрузки на работу системы электроснабжения. Толчкообразные электрические нагрузки, иначе называемые *набросами*, существенно влияют на функционирование систем электроснабжения. В основном они вызываются резкопеременными нагрузками на валах синхронных и асинхронных двигателей (прокатные станы, подъемные краны, дуговые плавильные печи). Толчок (наброс) нагрузки, сказываясь на всей системе электроснабжения и на питающей системе, приводит к снижению напряжения в узле нагрузки и изменению фазы этого напряжения по отношению к источнику питания. Достаточно большая (по сравнению с мощностью системы) толчкообразная нагрузка будет вызывать в системе изменения напряжения и более или менее длительные колебания частоты. Поэтому при такой нагрузке оказывается необходимой проверка колебаний напряжения и частоты в системе и их влияния на работу остальных (не толчкообразных) потребителей системы. В тех случаях, когда изменения параметров режима, характеризующие качество энергии, отдаваемой потребителю, оказываются заметными, необходимо на основе анализа характера переходных процессов разработать специальные мероприятия, позволяющие избежать неблагоприятного влияния толчкообразной нагрузки на работу системы. Особенно остро, разумеется, стоит вопрос о влиянии периодически изменяющейся (толчкообразной) нагрузки при питании электродвигателя от генератора соизмеримой с ним мощности. В этом случае особое значение имеют специальные мероприятия, одним из которых может быть применение регуляторов возбуждения, устанавливаемых на генераторах, синхронных компенсаторах и двигателях. Весьма эффективны, в частности, регулирование сильного действия, специальное регулирование скорости, позволяющее уменьшать колебания частоты, и ряд других мероприятий.

Методика анализа. Переходные процессы системы, содержащей синхронные и асинхронные двигатели с переменной нагрузкой на валу, можно исследовать различными методами. В любом случае исследование сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих колебания роторов двигателей и генераторов, изменений токов и напряжений как в двигателях, получивших наброс, так и на тех шинах, от которых питается ряд нагрузок.

Универсальным способом решения нелинейных дифференциальных уравнений может быть численное интегрирование. При толчках нагрузки, когда изменения относительных углов синхронных машин сравнительно невелики, можно упростить расчеты, применив линеаризацию, т. е. заменив нелинейную зависимость момента (мощности) от угла или скольжения линейной.

Обычно методика расчета режима системы основывается на дополнительных упрощающих предположениях:

1) изменение нагрузки на валу двигателей известно (рис. 12.22, а, б, в): оно происходит или строго периодически, или циклически, или в наиболее сложном случае каким-либо случайным образом соответственно;

2) переходный процесс обычно рассматривается при представлении генераторов постоянной э. д. с. за переходным сопротивлением ($E_q' \approx E' = \text{const}$);

3) сопротивление асинхронных двигателей и остальных нагрузок принимается в момент коммутации постоянным;

4) действие демпферного момента синхронного двигателя и регуляторов скорости первичных двигателей (турбин на электрических станциях) обычно не учитывается, исключение составляют случаи, когда запуск производится от генератора, вращаемого первичным двигателем, по мощности соизмеримым с мощностью набрасываемой нагрузки.

Анализ влияния толчков на асинхронных двигателях. Любые набросы нагрузки по физике происходящих явлений и эффекту, который они оказывают на

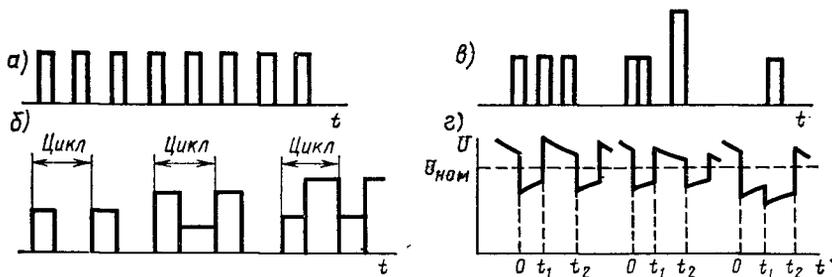


Рис. 12.22. Графики изменения нагрузки двигателя и подведенного напряжения:

а — строго периодическое изменение нагрузки; б — циклическое изменение нагрузки; в — то же, случайное; г — примерный характер изменения напряжения при питании от генератора соизмеримой мощности

питающую их систему (или отдельный генератор), аналогичны запуску асинхронного двигателя. В методике расчетов изменения напряжения на двигателе и шинах, питающих нагрузку системы, необходимо учитывать, что запуски (в данном случае набросы) непрерывно повторяются и что следующая коммутация (запуск, наброс) может произойти до того, как закончится переходный процесс, обусловленный предшествующей коммутацией. Допустим, что при следующих друг за другом включениях и отключениях нагрузки P_H напряжение U на питающих шинах генератора ($P_T \gg P_H$) будет изменяться в соответствии с соотношением $E' - I_H x'_{sd} = U$, где I_H — ток нагрузки, x'_{sd} — суммарное эквивалентное сопротивление участка «генератор — шины». В случае питания нагрузки от генератора соизмеримой с ней мощности последовательные коммутации приводят к тому, что напряжение генератора изменяется по возрастающему и убывающему экспоненциальным законам. График изменения напряжения на генераторе приобретает вид пилообразной кривой (рис. 12.22, г), которая выявляется рядом последовательных расчетов. Определение начальных условий коммутации всегда основывается на предположении постоянства э. д. с. E'_q , которая, однако, в случае учета действия регулятора может изменяться по закону, определяемому условиями регулирования*.

При анализе процессов методом численного интегрирования, который, как правило, проводится с помощью ЦВМ, в алгоритме расчета может быть учтено

* См.: Мелешкин Г. А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем. Л.: Судостроение, 1971.

большое количество предположительно влияющих факторов [например, входящих в уравнения Парка—Горева моментов от переходной (быстро затухающей) слагающей тока статора, влияния насыщения и т. д.]. Однако, выявив такого рода факторы, следует в процессе исследований отбросить факторы мало влияющие, чтобы не затемнять общей картины явления, нужной инженеру для его практических действий (см. гл. 3). Для примера рассмотрим без детализации общий алгоритм анализа переходных процессов в системе, питаемой одним генератором (рис. 12.23). Этот алгоритм позволяет рассчитать переходные процессы, вызванные переключениями, набросами и сбросами (отключениями) нагрузки, короткими замыканиями и их отключениями*. При этом расчеты могут проводиться в любой последовательности коммутации как с учетом, так и без учета различного рода факторов: насыщения, свободных составляющих токов и э. д. с., изменения скоростей генератора, двигателя и т. д. В табл. 12.1 перечислены такого рода факторы и даны их обозначения, принятые в структурной схеме алгоритма (рис. 12.24).

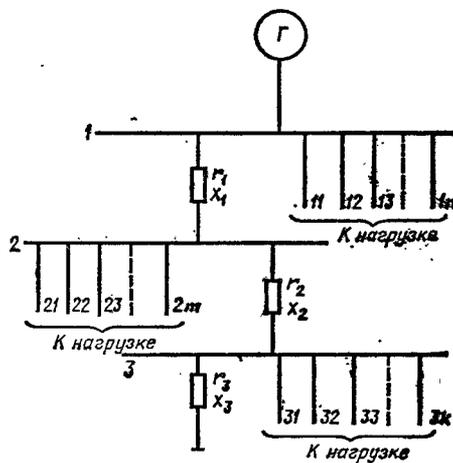


Рис. 12.23. Схема системы

Порядок расчета сводится к следующему. Выбирается вариант, которому соответствует определенная последовательность расчета отдельных процессов. После этого назначаются моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n , определяющие концы расчетов каких-либо процессов и начало следующих расчетов. Каждый из вариантов имеет свой признак, запись которого в исходной

Таблица 12.1

Наименование факторов	Обозначение	Учет факторов	Неучет факторов
Насыщение магнитопроводов машин	η	$\eta \neq 1,0$	$\eta = 1$
Переходные колебания	ρ	$\rho \neq 0$	$\rho = 0$
Изменение скорости генератора	s_1	$s_1 \neq 0$	$s_1 = 0$
Изменение скорости k -го асинхронного двигателя	s_k	$s_k \neq s_{кн}$	$s_k = s_{кн}$
Регулирование возбуждения генератора	u_f	$u_f \neq \text{const}$	$u_f = \text{const}$
Изменение частоты тока в роторе асинхронного двигателя	f_r	$f_r \neq \text{const}$	$f_r = \text{const}$

информации вместе с моментами времени t_i ($i = 1, 2, \dots$) является основанием для подготовки программы к расчету именно этого варианта. В схеме алгоритма подготовка определенного варианта условно показана связанными между собой операторами P_1, \dots, P_{16} . После выбора последовательности расчета решается вопрос о числе элементов нагрузки на каждой

* См.: Веретенников Л. П. и Яковлев В. П. Вопросы алгоритмизации переходных процессов в автономных электроэнергетических системах. — Электричество, 1967, № 12; Веретенников Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. — Л.: Судостроение, 1975.

ступени (n, m, k) и их составе (статическая нагрузка, асинхронные двигатели). Оператором P_2 задаются признаки присутствия тех или иных элементов в схеме, а оператором P_7 производится анализ заданных признаков, на основе которого и принимается решение об устранении из расчета того или иного фактора. Оператором P_3 задается учет отдельных факторов, а оператором P_4 — учет признаков распределения элементов в схеме. Оператором P_{16} задаются номера конкретных элементов нагрузки, которые будут участвовать в коммутациях выбранного варианта (включение, отключение, повторное включение и т. д.). Оператором P_5 зада-

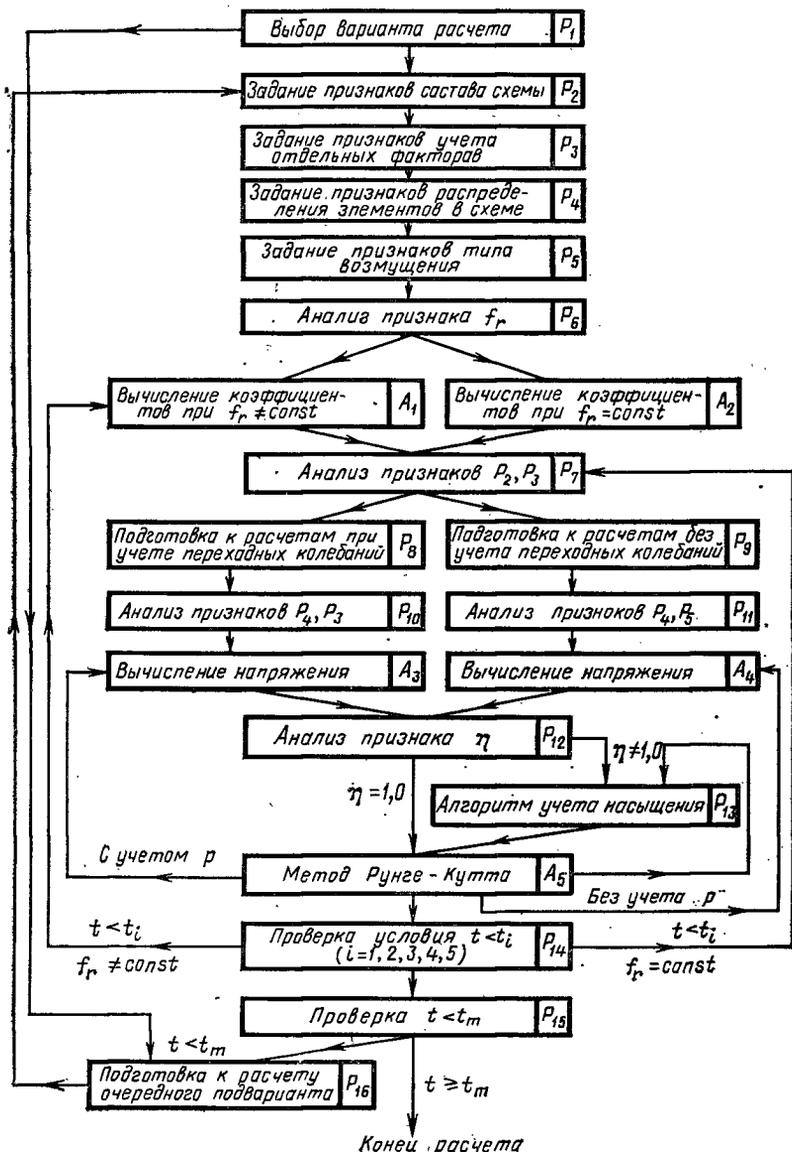


Рис. 12.24. Алгоритм расчета пуска двигателей

ются признаки типа возмущений: наброс нагрузки, короткое замыкание, отключение его и т. д. Каждый из заданных признаков анализируется соответствующим оператором, в результате чего принимается решение о том или ином порядке расчета. В соответствии с заданием рассчитываются коэффициенты (операторы A_1 или A_2) и напряжения в узловых точках (A_3 или A_4). Далее на основе метода Рунге — Кутты (A_5) вычисляются значения параметров режима (потокосцепления в машине и т. д.) на конце интервала. Задание признака учета насыщения (P_{12}) приводит к тому, что внутри каждого интервала методом последовательных приближений вычисляются насыщенные значения потокосцеплений в машине. По значениям потокосцеплений на каждом шаге интегрирования находятся токи, напряжения (в осях d, q и фазные величины), а также скольжения асинхронных двигателей и другие параметры режима. При достижении времени t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) происходит переход к расчету очередного процесса в соответствии с заданным оператором P_i . По достижении времени t_m расчет заканчивается.

Реализация алгоритма в виде программы оказывается довольно простой. На рис. 12.25 для иллюстрации показаны процессы (изменение U, I_r, s_1, s_2) при последовательном пуске двух асинхронных двигателей от генератора соизмеримой мощности (см. рис. 12.23).

Таким образом, алгоритм рассмотренного типа позволяет рассчитывать любые переходные процессы при набросах нагрузок. При этом параметры режима определяются не только для сети, подключенной к генератору, но и для части системы, отключенной от него в результате срабатывания автомата при коротком замыкании, и т. д.

Реализация алгоритма свидетельствует о возможности не только производить с достаточной достоверностью расчеты параметров режима (токи к. з., провалы напряжения и т. д.) при любых коммутациях, но и выполнять анализ процессов, выявляя влияющие факторы.

Анализ влияния толчков в системе «две станции — нагрузка». Необходимость в расчетах режимов при толчках нагрузки обычно возникает в системах, в которых мощность нагрузки соизмерима с мощностью электрических станций. При этом в большинстве случаев оказывается возможным преобразовать расчетную схему системы к схеме, состоящей из двух станций и нагрузки (рис. 12.26). Одна из станций представляет собой эквивалентный синхронный генератор, другая — синхронный двигатель.

Уравнения движения роторов станций могут быть записаны в таком виде:

$$T_{J1} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + \frac{E_1'^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1' E_2'}{z_{12}} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) = F_1(t); \quad (12.27)$$

$$T_{J2} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + \frac{E_2'^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E_1' E_2'}{z_{12}} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}) = F_2(t), \quad (12.28)$$

где $F_1(t), F_2(t)$ — механические мощности на валу синхронного генератора и двигателя (рис. 12.27).

Далее решение проводится с помощью ЦВМ или каких-либо приближенных методов, требующих дальнейших упрощений.

Сглаживание колебаний напряжения. Для этой цели может служить установка синхронных компенсаторов вблизи места присоединения быстропеременной

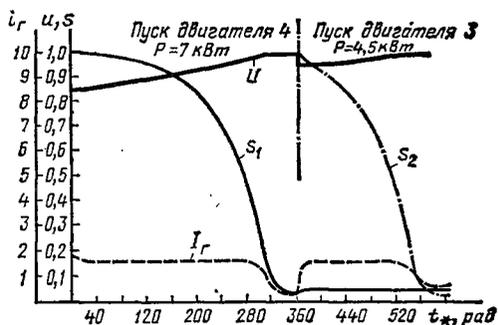


Рис. 12.25. Результаты расчета на ЦВМ двух последовательных запусков асинхронных двигателей

нагрузки. Чем больше установленная мощность синхронных компенсаторов по отношению к мощности системы, тем больший может быть получен эффект сглаживания колебаний напряжения.

Чтобы увеличить эффективность синхронного компенсатора, предназначенного для сглаживания колебаний напряжения, иногда целесообразно включать последовательно с ним емкость, в той или иной степени компенсирующую его ре-

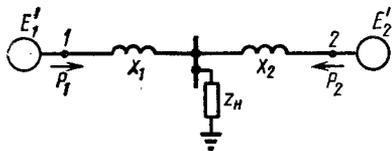


Рис. 12.26. Схема исследуемой системы

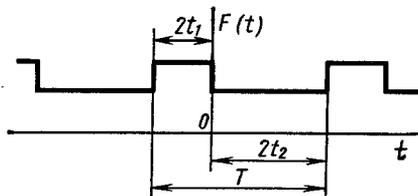


Рис. 12.27. Типичный прямоугольный график нагрузки

активное сопротивление. Эффект сглаживания колебаний напряжения можно получить и без установки дополнительных синхронных компенсаторов, включая емкость последовательно в цепь синхронных двигателей (рис. 12.28). Применение регулирования возбуждения сильного действия дает еще больший эффект.

Можно до некоторой степени сгладить колебания напряжения специальным программированным подъемом возбуждения синхронных двигателей, синхронных компенсаторов или генераторов. Однако, как показали теоретические и экспериментальные исследования, наибольший эффект сглаживания колебаний напряже-

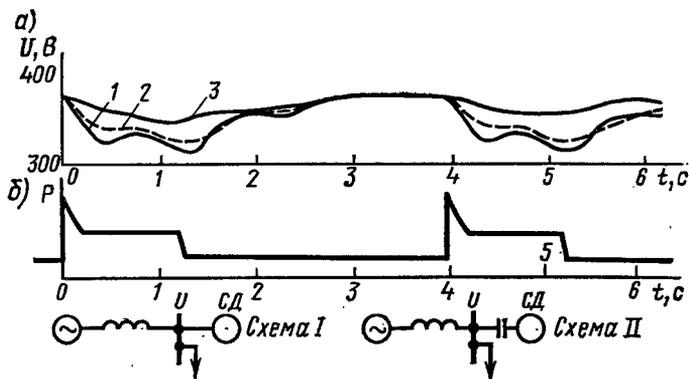


Рис. 12.28. Изменение напряжения на шинах синхронного двигателя (а) и нагрузки (б) во времени:

1 — в схеме I без сильного регулирования; 2 — в схеме II без сильного регулирования возбуждения; 3 — в схеме I при сильном регулировании возбуждения

ния может быть получен при использовании в системах, содержащих ударную нагрузку, регуляторов возбуждения сильного действия, т. е. регуляторов, реагирующих не только на отклонение заданного режимного параметра, но и на его производные. При правильно выбранном законе регулирования и надлежащей

настройке регулятора возможно практически совершенно устранить колебания напряжения (рис. 12.29).

Регулирование возбуждения сильного действия эффективно устраняет колебания напряжения. Однако только регулирования возбуждения часто недостаточно и целесообразным может оказаться одновременное регулирование возбуждения и первичного двигателя генератора, например регулирование момента турбин одной из станций системы. Такое регулирование можно осуществить по значению и знаку относительно скольжения, учитывающего изменение скорости турбины по отношению к скорости предшествующего режима.

Для устранения влияния толчкообразной нагрузки на режим системы можно применять новые источники реактивной мощности, заменяющие синхронные компенсаторы. К таким источникам относятся статические конденсаторы, включаемые в сочетании с реакторами, имеющими автоматическое управление. При этом управление должно быть плавным, быстродействующим, без зоны нечувствительности. Установки для получения быстрорегулируемой реактивной мощности могут выполняться с помощью выпрямительно-инверторных схем — так называемых ИРМ — источников реактивной мощности (рис. 12.30).

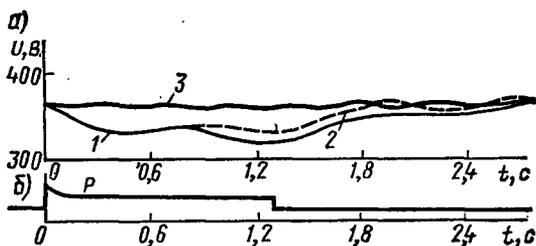


Рис. 12.29. Влияние сильного регулирования возбуждения на колебания напряжения в системе:

а — изменение напряжения: 1 — без автоматического регулирования возбуждения; 2 — с пропорциональным автоматическим регулированием возбуждения; 3 — с сильным автоматическим регулированием возбуждения; б — изменение нагрузки

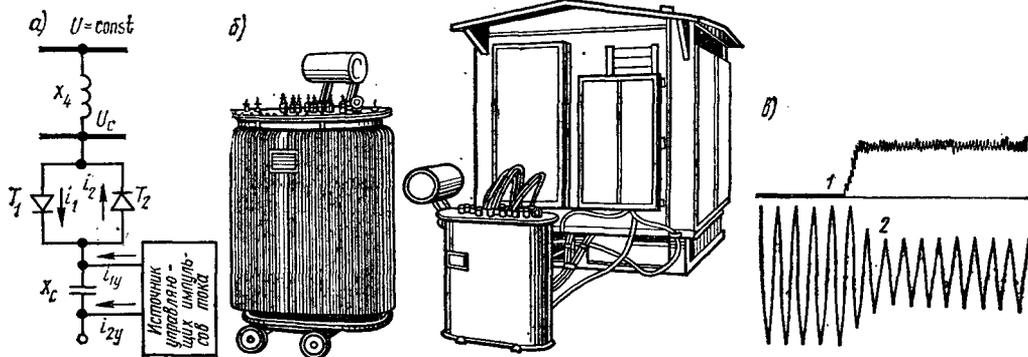


Рис. 12.30. ИРМ МЭИ:

а — схема ИРМ; б — общий вид опытно-промышленного ИРМ и питающих его трансформаторов; в — изменение выходного тока (2) ИРМ под управляющим воздействием (1) регулятора

Схема и принцип действия ИРМ. Быстродействие и возможность управления моментом включения и выключения конденсаторов (x_C на рис. 12.30, а) делают тиристорный выключатель надежным коммутационным аппаратом не только приступенчатом, но и при плавном регулировании реактивной мощности конденсаторной батареи:

$$Q = I_C^2 / (\omega C). \quad (12.29)$$

Изменяя ток, протекающий через конденсатор, можно изменять и мощность, генерируемую им. Изменение тока конденсаторов, управляемых тиристорным выключателем, осуществляется изменением угла проводимости тиристоров T_1 и T_2 . Угол проводимости, или время, в течение которого тиристор остается открытым и пропускает ток, очевидно, не может быть больше половины периода. При этом конденсатор генерирует максимальную реактивную мощность. Допустим, что угол проводимости уменьшился и стал равным четверти периода. Это означает, что станет меньше и эффективнее значение первой гармоники тока, протекающего через конденсатор, а следовательно, и мощность, отдаваемая в сеть.

При таком регулировании ток в конденсаторе содержит кроме первой гармоники определенную часть и гармоник более высокого порядка. Доля этих гармоник растет с уменьшением угла проводимости тиристоров, т. е. с уменьшением реактивной мощности, отдаваемой в сеть. Поэтому при создании ИРМ* с плавным регулированием одновременно предусматривают меры, направленные на компенсацию высших гармоник.

Основным достоинством рассматриваемого ИРМ (общий вид показан на рис. 12.30, б) и других аналогичных устройств с вентиляльным управлением является их быстродействие. Экспериментами (рис. 12.30, в) установлено, что время, необходимое для изменения режима ИРМ, не превышает одного-двух периодов промышленной частоты (0,02—0,04 с).

Потери активной мощности в ИРМ определяются потерями в конденсаторах, трансформаторе, источнике управляющих импульсов тока и системе управления тиристорами. В процессе регулирования с изменением генерируемой ИРМ реактивной мощности изменяются и потери активной мощности.

§ 12.6. САМОЗАПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ

Самозапуском называют процесс восстановления нормальной работы двигателей после ее кратковременного нарушения, вызванного исчезновением питания (отключением источника напряжения и последующим переключением на другой источник) или коротким замыканием, приводящим к временному понижению или исчезновению напряжения на шинах нагрузки. Очевидно, что задача исследования процесса самозапуска имеет много общего с задачей исследования процессов при сбросах — набросах нагрузки или понижении напряжения. Практическая задача самозапуска состоит в том, чтобы не допустить массового отключения электродвигателей и обеспечить бесперебойную работу потребителей. Без автоматически осуществляемого самозапуска возможно массовое отключение электродвигателей и соответствующее нарушение производственного процесса.

Электромеханический переходный процесс при перерывах питания двигателей. Этот процесс может быть вызван как эксплуатационными переключениями на резервный источник, так и аварийными процессами, требующими таких переключений. Рассматриваемый переходный процесс может быть разбит на три периода:

I — **г р у п п о в о й в ы б е г**, характеризующийся тем, что между затормаживающимися двигателями, подключенными к общим шинам, за счет запасенной кинетической и электромагнитной энергии происходит переток мощностей. В результате этого вращение двигателей становится совместным и они могут быть приближенно заменены одним двигателем;

II — **и н д и в и д у а л ь н ы й в ы б е г**, наступающий после того, как напряжение на общих шинах снизится до 50—60% от номинального или даже станет равным нулю. Двигатели при этом затормаживаются в соответствии с индивидуальными характеристиками.

* ИРМ является отечественным изобретением (кафедра электрических систем МЭИ), однако его в настоящее время широко применяют за рубежом (Швеция, США и др.), не делая надлежащих ссылок.

дуальными механическими характеристиками. Однако если токи в контурах двигателей полностью не затухли, то они будут оказывать влияние на параллельно включенные двигатели и выравнять их движение;

III — с а м о з а п у с к — период, наступающий после восстановления напряжения на общих шинах.

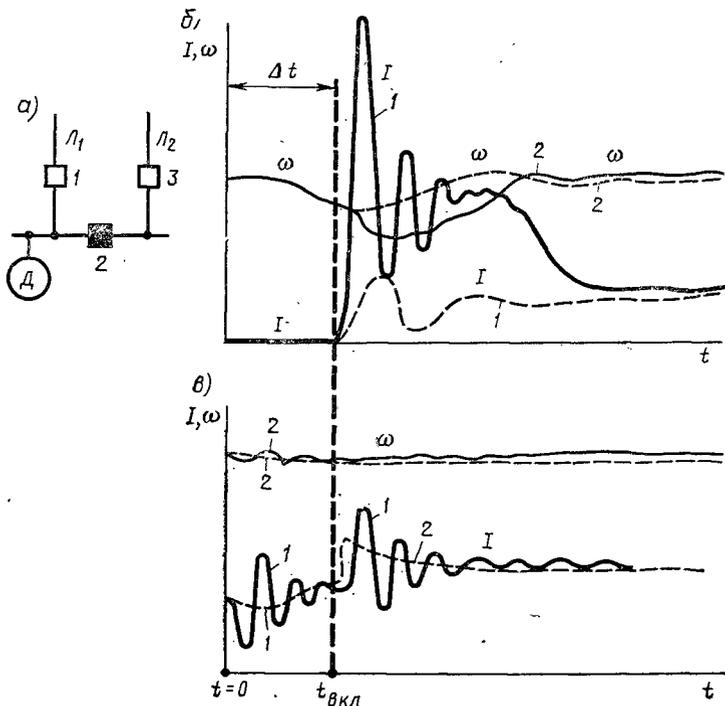


Рис. 12.31. Процессы при переключении питания асинхронного двигателя:

a — схема питания (1, 3 включены, 2 отключен); *b* — процесс при отключении 1 ($t=0$) и включении 2 через Δt . Здесь — включение в противофазу; — — — то же, в фазу; *I* — ток, 2 — скорость; *v* — процесс при удаленном коротком замыкании на линии (1), отключении через Δt и одновременном включении (2); — — — ток (*I*), скорость (2) по полным уравнениям; — — — то же, по упрощенным

Для анализа переходных процессов, наступающих при перерывах питания (группового выбега), в качестве расчетного метода следует применять метод численного интегрирования. В зависимости от параметров исследуемой схемы и тяжести аварии могут быть использованы как полные, так и упрощенные уравнения. Разница в результатах может быть иногда — в тяжелых случаях — очень значительной. На рис. 12.31, *a* показана система, при изменениях которой исследуются параметры режима*. Так, при отключении линии 1 происходит отклю-

* См.: Кетнер К. К., Козлова И. А., Сендюров В. М. Алгоритмизация расчетов переходных процессов автономных электроэнергетических систем. — Рига: Зинатне, 1981, с. 166.

чение выключателя 1 и последующее восстановление напряжения включением выключателя 2, бросок тока i достигнет 5—8-кратного значения в случае включения в противофазу (рис. 12.31, б, кривая 1). Включение при совпадении фаз дает бросок тока намного меньше (кривая 2). Соответственно для этого случая и изменения угловой скорости ω будут значительно меньше. На рис. 12.31, в показаны процессы в случае удаленного короткого замыкания на линии 1. В этом случае ток i и угловая скорость ω меняются, разумеется, меньше.

На этом же рисунке дано сопоставление расчета по полным уравнениям (кривые 1) и уравнениям упрощенным (2), применение которых, очевидно, вполне допустимо.

Оценивая точность расчетов, необходимо иметь в виду, что при отключениях и переключениях на происходящие процессы сильно влияет дуга, возникающая между разрываемыми контактами. Дуга может быть учтена только очень приближенно, и в связи с этим и расчеты при включениях — переключениях имеют в основном ориентировочный характер.

При расчетах по полным или упрощенным уравнениям переходного процесса на каждом шаге интегрирования скорость принимается обычно постоянной. При расчете самозапуска асинхронных двигателей согласно упрощенным уравнениям можно пользоваться статической характеристикой, приближенно определяя момент в зависимости от скольжения. Для нахождения напряжения на каждом расчетном шаге асинхронные двигатели могут быть представлены активными и реактивными проводимостями, определяемыми из обычной схемы замещения асинхронного двигателя.

При известных сопротивлениях системы и напряжении источника питания можно вычислить остаточное напряжение на шинах и далее по значению остаточного напряжения найти электромагнитный момент двигателя, определяя вращающий момент механизма в зависимости от скольжения. Далее расчет скольжения и остаточного напряжения в начале следующего интервала позволяет последовательными шагами определить время самозапуска эквивалентного двигателя.

Физика процессов при перерывах питания и переключениях. Приведенные выше соображения о выборе метода расчета процесса переключений при перерывах питания подчеркивают неоднократно высказывавшееся обстоятельство, что выбор этот должен производиться на основании физических и практических соображений. При изучаемых процессах могут возникнуть большие всплески токов и кратковременные механические усилия ударного характера. Эти явления можно объяснить тем, что после отключения асинхронного двигателя от сети ток в статоре исчезнет, но магнитный поток машины сохранится за счет изменения тока в замкнутой обмотке ротора*. Магнитный поток, неподвижный относительно ротора и вращающийся вместе с ним, будет индуцировать э. д. с. в обмотке статора. Перед отключением двигателя от сети э. д. с. \dot{E}_1 , индуцируемая потоком взаимной индукции Φ_m , и напряжение сети \dot{U} находились почти в противофазе, были близки друг к другу по значению (рис. 12.32) и вращались в пространстве с синхронной скоростью, а в синхронной системе координат — неподвижны.

В течение перерыва питания вектор э. д. с. вращается в пространстве со скоростью ротора, т. е. в режиме двигателя со скоростью ниже синхронной на зна-

* См.: Трещев И. И. Методы исследования машин переменного тока. — Л.: Энергия, 1969, с. 234.

чение скольжения s . В синхронно вращающейся системе координат вектор E_1 вращается при том же скольжении в отрицательном направлении и уменьшается по мере затухания магнитного потока. Поэтому при включении двигателя на тот же источник электроэнергии, но через другое распределительное устройство, вектор э. д. с. будет сдвинут по фазе относительно вектора напряжения сети на угол, определяемый временем перерыва питания и скольжением двигателя; этот угол прежде всего и определяет характер процесса. Если сдвиг по фазе между векторами U и E_1 равен нулю, то векторы следует сложить, что равносильно подключению двигателя к сети с почти удвоенным напряжением. При сдвиге по фазе на 180° напряжение и э. д. с. будут вычитаться, что соответствует подключению двигателя к сети с напряжением, близким к нулю. Соответственно в первом случае следует ожидать наибольших всплесков токов, а во втором случае — незначительных.

Если питание переключается на другой источник, не синхронизированный с первым, то кроме продолжительности перерыва важны будут и соотношения между напряжениями обоих источников по значению и разности фаз между ними. Момент вращения при быстром переключении питания может быть определен следующим выражением:

$$M = \frac{x_M U^2}{x_r x_s} [\sin(\alpha_0 + st) + \sin(t - \alpha_0 - st) - \sin(t - st)],$$

где α_0 — угол перемещения вектора э. д. с. \dot{E}_1 относительно первоначального положения (рис. 12.32).

Если питание переключается на тот же источник, то

$$\alpha_0 = st_{\Pi}.$$

При переключении питания на другой источник, не связанный с первым, фаза напряжения может быть принята любой. При этом вместо α_0 следует подставить значение

$$\beta = \alpha_0 + \varphi_0,$$

где φ_0 — разность фаз между напряжениями первого и второго источников питания, которая в общем случае является величиной случайной и может быть выбрана произвольно. Угол β также случайная величина, и соответственно время перерыва питания t_0 выбирается тоже произвольно, например равным времени срабатывания контактора переключения питания.

При быстром переключении питания на тот же источник момент M является функцией двух независимых переменных: времени t и угла α_0 . Находим условия максимума M , полагая $s \approx 0$:

$$\partial M / \partial t = 0, \quad \partial M / \partial \alpha_0 = 0,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= 2\pi/3; & \alpha_{01} &= 4\pi/3; \\ t_2 &= 4\pi/3; & \alpha_{02} &= 2\pi/3. \end{aligned} \right\}$$

Следовательно, максимальное значение M наступает при условии, что при подключении питания напряжение U и остаточная э. д. с. E_1 оказываются сдвинутыми по фазе примерно на $\pm 60^\circ$; при этом

$$M_{\max} = \mp 2,60U^2 / x_s'.$$

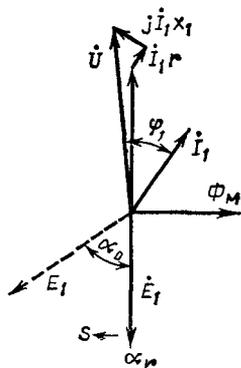


Рис. 12.32. Векторная диаграмма двигателя при отключении питания

Например, для двигателя мощностью 5—40 кВт момент

$$M_{\text{макс}} = \mp 2,6 \cdot 1/0,23 = \mp 11,3.$$

Более точный расчет показывает, что для этого двигателя

$$M_{\text{макс}} = \mp 13,3M_{\text{ном}}.$$

Самозапуск, при котором одновременно пускается группа электродвигателей характерен тем, что в момент восстановления электроснабжения и начала самозапуска часть двигателей или все двигатели вращаются с некоторой скоростью, т. е. происходит он, как правило, под нагрузкой.

Самозапуск можно считать обеспеченным, если при пониженном напряжении избыточный момент электродвигателей достаточен для доведения механизмов до номинальной скорости и если за это время нагрев обмоток электродвигателей не достигнет недопустимого значения.

По условиям самозапуска рабочие механизмы делятся на две группы. К первой группе относятся шаровые мельницы, транспортеры, прокатные станы и другие механизмы, которые имеют постоянный момент сопротивления, вследствие чего при кратковременном перерыве электроснабжения быстро теряют скорость и медленно разгоняются. Для обеспечения самозапуска этой группы приводов необходимо, чтобы электродвигатель имел при восстановлении напряжения момент, равный примерно номинальному [или с учетом фактической нагрузки электродвигателя равный $(0,8 \div 0,9)M_{\text{ном}}$]. Кроме того, следует по возможности сокращать время перерыва электроснабжения, с тем чтобы электродвигатели не успевали значительно снизить скорость.

Механизмы, относящиеся ко второй группе, — центробежные насосы, вентиляторы, дымососы, газодувки, центрифуги и ряд других — имеют вентиляторные моментные характеристики. Самозапуск для этой группы обеспечивается легче, чем для механизмов первой группы, так как момент сопротивления для них снижается с уменьшением скорости.

Самозапуск иногда бывает трудноосуществим. Так, например, при сравнительно небольшой резервной мощности трансформаторов или линий самозапуск удастся осуществить только для ответственных механизмов. При этом механизмы менее ответственные, т. е. такие, остановка которых не вызывает повреждения оборудования и не связана со значительной недовыработкой или браком основной продукции, отключаются.

Самозапуск большого числа асинхронных двигателей может быть облегчен, если в узле нагрузки имеются и синхронные двигатели. Регулирование или форсировка возбуждения этих двигателей позволяет иметь более высокое напряжение при самозапуске. Секционирование распределительных устройств и уменьшение мощности двигателей, участвующих в самозапуске, также облегчают его.

Приближенный расчет самозапуска асинхронных двигателей. Для выявления возможности самозапуска асинхронных двигателей необходимо проверить, достаточен ли момент вращения электродвигателя для самозапуска (при пониженном напряжении), и установить значение дополнительного нагрева двигателя, вызванного удлинением времени разгона. При расчете самозапуска необходимо определять: выбег за время нарушения электроснабжения; напряжение и избыточный момент электродвигателей; время самозапуска и дополнительный нагрев. Допустимое время и скольжение к моменту самозапуска может быть найдено по (12.24) или путем численного интегрирования. Определение напряжения на двигателях производится на основании схем замещения.

Самозапуск двигателей может осуществляться либо от источника питания соизмеримой с самозапускающимися двигателями мощности, либо от источника, мощность которого во много раз больше мощности двигателей. В этом случае можно считать, что напряжение на шинах или питающей подстанции постоянно во время процесса самозапуска.

Наиболее характерные схемы питания нагрузки, при которых осуществляется самозапуск, показаны на рис. 12.33.

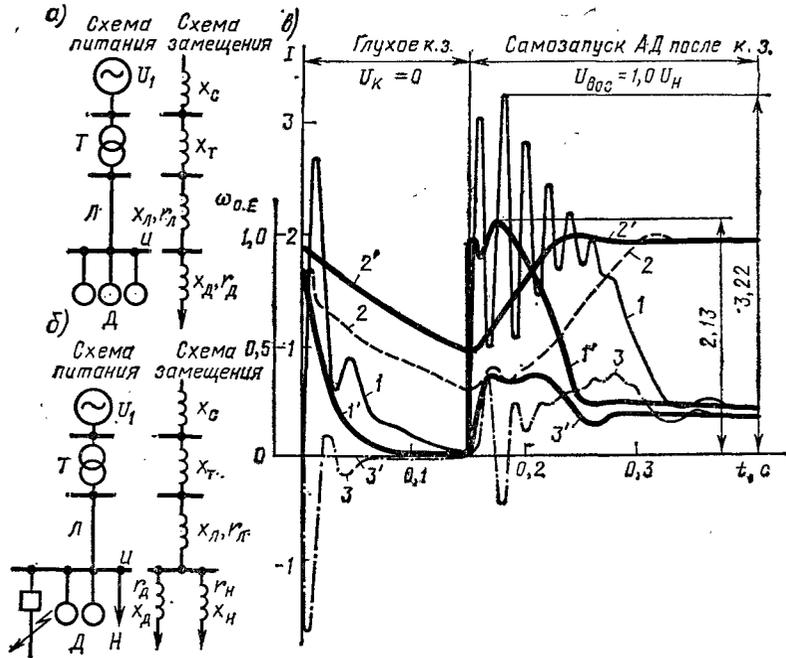


Рис. 12.33. Самозапуск двигателей после короткого замыкания:

a — схема питания нагрузки при самозапуске; *б* — схема самозапуска после короткого замыкания; *в* — сопоставления характера изменения тока статора i (I, I'), угловой скорости ω (Z, Z') и электромагнитного момента $M_{эм}$ на зажимах АД в режиме к.з. продолжительностью 0,15 с; 1, 2, 3 — по полным уравнениям; I', Z', ω' — по упрощенным уравнениям для случая самозапуска согласно схеме *б*

Для схемы, изображенной на рис. 12.33, *a*, напряжение на зажимах электродвигателей при самозапуске

$$U = U_1 z_{д} / \sqrt{(r_{л} + r_{д})^2 + (x + x_{д})^2}, \quad (12.30)$$

где $z_{д} = \sqrt{r_{д}^2 + x_{д}^2}$; $x = x_{с} + x_{тр} + x_{л}$; $r_{д}$ и $x_{д}$ — соответственно эквивалентные активное и реактивное сопротивления двигателей, определенные при значении скольжения, соответствующем началу самозапуска, по схемам замещения двигателей.

Для схемы питания (рис. 12.33, *б*), в которой нагрузка представлена двигателями и постоянным сопротивлением $z_{н}$, напряжение при самозапуске

$$U = U_1 z_{д.н} / \sqrt{(r_{д.н} + r_{д.н})^2 + (x + x_{д.н})^2}, \quad (12.31)$$

где

$$z_{д.н} = z_{д.н} / (z_{д.н} + z_{н.н}) = z_{д.н} e^{j\psi}; \quad r_{д.н} = z_{д.н} \cos \psi; \quad x_{д.н} = z_{д.н} \sin \psi.$$

Приближенно можно считать, что напряжение при самозапуске должно быть

$$U \geq U_1 z_{д.н} / (z_{д.н} + x). \quad (12.32)$$

При известном минимально допустимом напряжении самозапуска можно определить допустимое значение неотключаемой мощности двигателей.

Сопrotивление двигателя в момент самозапуска

$$z_{д.н} = s_6 U_{ном}^2 / (S_{сз} U_6^2),$$

где S_6 — базисная мощность; $U_{ном}$ — номинальное напряжение электродвигателя; $S_{сз}$ — расчетная мощность электродвигателя при номинальном напряжении и скольжении, соответствующем моменту самозапуска; U_6 — базисное напряжение.

Подставляя значение $z_{д.н}$ в (12.32), найдем мощность:

$$S_{сз} = \left(\frac{U_{ном}}{U_6} \right)^2 \frac{S_6}{x} \left(\frac{U_1}{U} - 1 \right). \quad (12.33)$$

Величина $S_{сз}$ связана с номинальной мощностью двигателя соотношением

$$S_{сз} = P_{ном} k_s / (\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}), \quad (12.34)$$

где k_s — кратность тока двигателя при скольжении $S_{сз}$, соответствующем началу самозапуска:

$$k_s = \left[\sqrt{1 + s_{кр}^2} / \sqrt{1 + (s_{кр}/s_{сз})^2} \right] k.$$

Здесь k — кратность пускового тока.

Приравняв правые части выражений (12.33) и (12.34), после преобразования получим приближенное выражение для определения допустимого значения неотключаемой мощности двигателей. Для схемы, изображенной на рис. 12.33, а,

$$P_{но} = \left(\frac{U_{ном}}{U_6} \right)^2 \frac{S_6 \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}}{x k_s} \left(\frac{U_1}{U} - 1 \right).$$

Для схемы, представленной на рис. 12.33, б,

$$P_{но} = \frac{\cos \varphi_{ном} \eta_{ном}}{k_s} \left[\left(\frac{U_{ном}}{U_6} \right)^2 \frac{S_6}{x} \left(\frac{U_1}{U} - 1 \right) - \frac{U^2}{z_{н.н}} \right], \quad (12.35)$$

где $\cos \varphi_{ном}$ и $\eta_{ном}$ — номинальные коэффициенты мощности и к. п. д. двигателя.

Минимально допустимое напряжение на зажимах двигателей определяется из условия возможности осуществления самозапуска следующим образом:

— для механизмов с постоянным моментом сопротивления

$$U^2 M_{д.мин} \geq 1,1 M_{мех};$$

— для механизмов с вентиляторной характеристикой момента сопротивления

$$U^2 M_{д. макс} \geq 1,1 M_{мех},$$

где $M_{д. мин}$ и $M_{д. макс}$ — минимальный и максимальный моменты вращения двигателя* соответственно.

Самозапуск синхронных двигателей. Если при понижении напряжения или его полном кратковременном исчезновении двигатели не были отключены и не выпали из синхронизма, то при восстановлении напряжения происходит процесс самозапуска. Если двигатель выпадает из синхронизма и к моменту восстановления напряжения работает как асинхронный со скольжением s_1 , то процесс самозапуска надо рассматривать как пуск асинхронного двигателя, но осуществляемый от той промежуточной скорости, до которой успели затормозиться двигатели за время перерыва питания. Самозапуск отличается от пуска еще и тем, что возбужденный двигатель включается прямо на шины нагрузки без дополнительных сопротивлений в цепи статора.

В задачу расчета самозапуска входит:

- 1) проверка влияния самозапуска на нормальную работу потребителей, подсоединенных к шинам нагрузки, и на перегрузку элементов сети;
- 2) определение необходимого для разворачивания агрегатов значения остаточного напряжения на выводах двигателей;
- 3) установление момента двигателя, необходимого для надежного втягивания в синхронизм;
- 4) определение времени пуска и перегрева двигателя.

Во время перерыва питания напряжение на выводах двигателя зависит от его э. д. с., которая уменьшается по мере выбега. Уменьшение скорости до 80% от синхронной приводит к значительному (до 60—70%) понижению напряжения. При форсировке возбуждения, которая обычно включается при снижении напряжения на 20—25%, этого не происходит и напряжение остается в пределах нормального.

Сопротивление двигателя в зависимости от скольжения можно грубо оценить кривыми, представленными на рис. 12.34. При значительной остаточной э. д. с. двигателя напряжение на шинах нагрузки будет пульсировать с частотой скольжения. Допустимое снижение напряжения на шинах нагрузки во время самозапуска приблизительно определяется следующими требованиями:

- 1) при совместном питании двигателей и освещения $U \geq 0,9$ при частых и длительных пусках; $U \geq 0,8 \div 0,85$ при редких и кратковременных пусках и самозапущах;

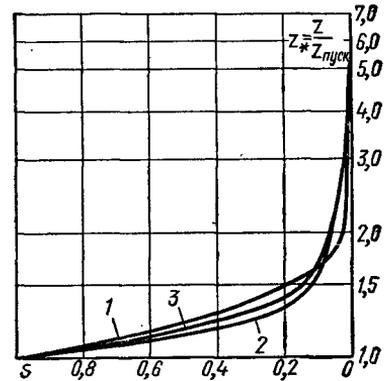


Рис. 12.34. Изменение сопротивления синхронных двигателей в процессе пуска $Z_* = \varphi(s)$:

1 — двигатели с явно выраженными полюсами; 2, 3 — двигатели с гладким ротором соответственно со специальной демпферной системой и без нее

* Для двигателей, параметры схемы замещения которых можно считать не зависящими от скольжения, $M_{д. мин}$ равен пусковому моменту. Для двигателей, имеющих ротор с глубокими пазами, моментная характеристика которых может иметь провал, $M_{д. мин}$ должно определяться по этой характеристике.

2) при раздельном питании двигателей и освещения $U \geq 0,75 \div 0,8$ независимо от частоты и длительности пусков и самозапусков;

3) при люминесцентном освещении $U \geq 0,9$;

4) при питании двигателей через блок-трансформаторы напряжение U ограничивается минимальным значением момента, требуемого для разгона агрегата.

Для проверки возможности самозапуска необходимо сопоставить средний асинхронный момент с моментом сопротивления механизма. Характеристику асинхронного момента рекомендуют рассчитывать с помощью известного для электрических машин выражения

$$M_{ac} = \frac{U^2}{2 \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{sT''_d}{1 + (sT''_d)^2} + \left(\frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{sT''_q}{1 + (sT''_q)^2} \right].$$

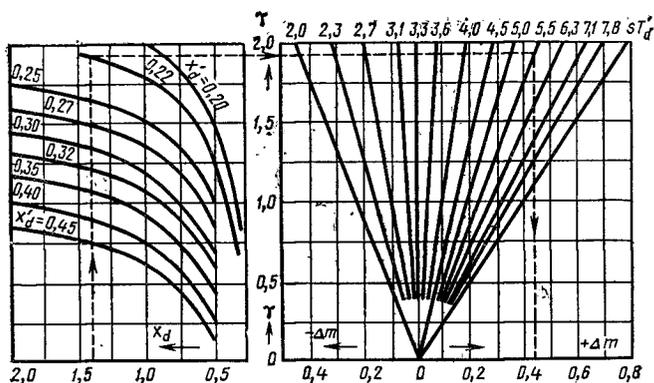


Рис. 12.35. Номограмма для определения $\Delta m = \varphi(x_d, x'_d, sT'_d)$:

Δm — изменение асинхронного момента синхронного двигателя при пуске с непосредственно присоединенным возбудителем; $\gamma = 0,5(1/x'_d - 1/x_d)$; s — скольжение; T'_d — постоянная времени (по данным завода)

$$\Delta M_{ac} = - \frac{U^2}{2 \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}} \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \left[\frac{0,09 sT'_d}{1 + 0,0081 (sT'_d)^2} - \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2} \right].$$

Для определения изменения момента при непосредственном присоединении возбудителя можно пользоваться номограммой (рис. 12.35). С ее помощью по величине T'_d и значению скольжения s , при котором определяется момент, находится величина Δm . При непосредственном присоединении возбудителя асинхронный момент

$$M_{ac} = U^2 [M_{ac0} - \Delta m / (\cos \varphi_{ном} \eta_{ном})], \quad (12.36)$$

Обычно заводом задается кривая асинхронного момента двигателя для условий пуска при включении в цепь ротора разрядного сопротивления $r_{разр}$ на которое замкнута обмотка ротора до тех пор, пока не подключен возбудитель. Однако в условиях самозапуска обмотка ротора, имеющая сопротивление r_f , обычно присоединена непосредственно к возбудителю. Это меняет величину T'_d обратно пропорционально величине $r_{разр}/r_f + 1$. При непосредственном присоединении возбудителя асинхронный момент уменьшается на величину

где $M_{\text{ас0}}$ — момент, определяемый по заданной заводом кривой асинхронного момента (при номинальном напряжении).

Наиболее тяжелыми оказываются условия самозапуска при скольжении 0,02—0,08. Если в этой зоне самозапуск обеспечивается, то в большинстве случаев он будет обеспечен по условию необходимого момента и при других скольжениях.

Момент, необходимый для подведения двигателя к критическому скольжению с учетом пониженного при самозапуске напряжения, можно приближенно определить выражением

$$M \geq 0,055 M_{\text{мех}} / (U^2 s_{\text{кр}}). \quad (12.37)$$

Момент M задается заводом с учетом включения в цепь ротора разрядного сопротивления. При расчете самозапуска с глухо подсоединенным возбудителем в (12.37) следует подставить момент, подсчитанный согласно формуле (12.36). Время перерыва питания, при котором двигатель после восстановления питания сразу же втягивается в синхронизм, можно оценить приближенно, упрощая (12.7):

$$t_1 \leq T_J s_{\text{кр}} / M_{\text{мех0}} = 0,06 \sqrt{T_J (M - 0,6 M_{\text{мех0}})} / M_{\text{мех0}}. \quad (12.38)$$

Такие расчеты дают примерно двукратный запас и должны быть уточнены аналитически или экспериментально. В тех случаях, когда самозапуск неосуществим, можно применять автоматическую ресинхронизацию двигателя. Вхождение в синхронизм должно обеспечиваться действием форсировки возбуждения, повышающей максимальный синхронный момент. Облегчение синхронизации двигателя может быть достигнуто отключением обмотки возбуждения и кратковременным замыканием ее на разрядное сопротивление с последующим (через 2—3 с) включением форсированного возбуждения (на 1 с). Обеспечить ресинхронизацию иногда помогает разгрузка привода (механизма).

§ 12.7. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПИТАНИЯ

Короткие замыкания, происходящие в линиях, на шинах трансформаторов и в других точках системы, могут быть неустойчивыми—преходящими. В этих случаях включение устройств автоматического повторного включения — АПВ (одно-, двух- и многократного действия) может сохранить работу узла нагрузки.

Для обеспечения самозапуска электродвигателей и сохранения устойчивости генераторов время действия АПВ должно быть минимальным. В зависимости от схем электроснабжения и коммутационной аппаратуры выдержка времени при действии АПВ принимается различной. Выдержка времени необходима для того, чтобы выключатель мог возвратиться в исходное положение, и для того, чтобы среда в месте короткого замыкания успела деионизироваться. Практически в сети с напряжением до 35 кВ выдержка АПВ принимается равной 0,2—0,5 с. Собственное время отключения у выключателей иногда больше времени деионизации (например, в сетях напряжением 6—10 кВ время деионизации составляет 0,07—0,09 с, а собственное время выключателей — 0,25—0,3 с). Поэтому в сетях напряжением 6—10 кВ обычно допустимо АПВ без дополнительной выдержки времени.

Рассмотрим характер переходных процессов при различных автоматических повторных включениях и переключениях.

Автоматическое повторное включение линий. Применение АПВ на воздушных и кабельно-воздушных линиях позволяет восстановить электроснабжение в 60—90% всех аварийных отключений воздушных линий. Проверка возможностей АПВ линий передачи требует расчета режима системы: проверки ее устойчивости и устойчивости асинхронных двигателей при перерыве электроснабжения, выяснения возможности самозапуска двигателей.

Автоматическое повторное включение трансформаторов и шин. Для трансформаторов, подключенных к сетям напряжением 10—35 и 110 кВ, питающим сети напряжением 10 и 6,3 кВ, целесообразно применять АПВ. При этом АПВ действует при отключении выключателя низшего напряжения от максимальной защиты трансформатора. Защита в этом случае содержит два реле времени, из которых первое, с меньшей выдержкой времени, осуществляет АПВ, а второе, с большей выдержкой времени, осуществляет отключение трансформатора без последующего АПВ. В схеме АПВ трансформатора обычно предусматривается блокировка, запрещающая работу АПВ, если отключение выключателя произошло от действия защиты, реагирующей на неисправность внутри трансформатора (обычно газовой или дифференциальной).

Устройство АПВ шин выполняется на подстанциях, где имеется специальная защита шин; его осуществляют обычно простейшим способом в виде автоматического опробования состояния сети.

Автоматическое повторное включение электродвигателей. АПВ предусматривается для ответственных электродвигателей после их автоматического отключения. АПВ электродвигателей в сетях 3—10 кВ обеспечивает самозапуск тех электродвигателей, у которых из-за плохих пусковых характеристик нормальный самозапуск не осуществляется.

Эффективным средством предотвращения развития аварий типа лавины напряжения (см. гл. 11) при понижении напряжения оказывается применение аварийной разгрузки узла путем отключения части потребителей. Расчеты, проведенные при аварийных разгрузках узла, показывают, что при уменьшении э. д. с., которой представлена эквивалентная система, обычно происходит устойчивый переход от одного состояния к другому, если э. д. с. Е снижается не более чем до 0,75 или соответственно увеличивается сопротивление. Далее осуществляется самозапуск отключенных двигателей.

Разумеется, необходимая мощность отключаемых потребителей для предотвращения развития аварии зависит от промежутка времени между ее возникновением и началом процесса разгрузки, а также от внешнего сопротивления сети.

Автоматическое включение резервного питания. АВР является эффективным мероприятием, повышающим надежность электроснабжения и позволяющим практически мгновенно восстановить электроснабжение. Устройства АВР, сначала применявшиеся только для собственных нужд электрических станций, широко внедряются и в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Схемы питания с устройством АВР показаны на рис. 12.36. Они имеют одностороннее (рис. 12.36, а) или двустороннее действие (рис. 12.36, б). АВР двустороннего действия часто устанавливается на перемычках между двумя (1 и 2) подстанциями, взаимно резервирующими друг друга (рис. 12.36, в). Резервирование четырехсекционной подстанции осуществляется по схеме, изображенной на рис. 12.36, г. Трансформатор резервируется так же, как и линия, хотя в системе электроснабжения промышленных предприятий чисто резервные трансформаторы

обычно не предусматриваются и устройства АВР для трансформаторов в большинстве случаев выполняются на секционном выключателе.

Действие устройств АВР должно осуществляться при исчезновении напряжения на резервном участке, вызванном любой причиной, включая и короткое замыкание на нем. Время действия устройств АВР зависит от схемы электроснабжения, для его определения необходимо знать условия самозапуска электродвигателей и

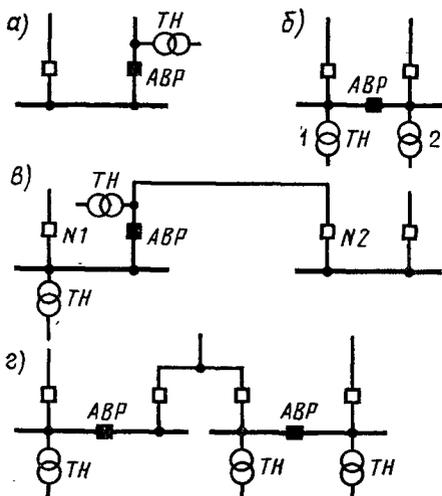


Рис. 12.36. Схемы питания с устройством АВР:

а — АВР на вводе; б — АВР на секционном выключателе; в — АВР переемычки; г — АВР на четырехсекционной подстанции; залитый квадрат — выключатель, отключенный при нормальном режиме; светлый квадрат — выключатель, включенный при нормальном режиме; ТН — трансформатор напряжения

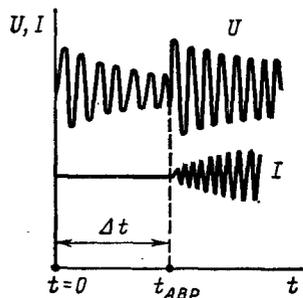


Рис. 12.37. Нарушение электроснабжения нагрузки и восстановление его АВР:

$t=0$ — момент нарушения; t_{ABP} — момент восстановления; Δt — время обесточивания нагрузки; U — напряжение на шинах; I — ток питания

время срабатывания релейной защиты при коротких замыканиях на отходящих линиях. По условию самозапуска время действия АВР, как правило, должно быть минимальным. Устройства АВР не должны действовать при коротких замыканиях на отходящих линиях резервируемого участка. Это обеспечивается дополнительной выдержкой времени или специальной блокировкой.

При проектировании и эксплуатации АВР обычно нет необходимости в специальных расчетах переходных процессов, так как эти процессы быстро затухают, и, как правило, не могут привести к каким-либо неприятным последствиям.

Примерный характер процесса (при отключении питания и последующем АВР) показан на рис. 12.37. При отключении от питающего источника нагрузки, содержащей группу асинхронных и синхронных двигателей, происходит постепенная остановка этих двигателей. В процессе уменьшения скорости ($\omega \rightarrow 0$, $s \rightarrow 1$) напряжение на группе двигателей не исчезает сразу; оно поддерживается за счет энергии, запасенной в двигателях, и уменьшается в некотором соответствии с изменением их угловой скорости (рис. 12.37). Значение этого напряжения находится из условия

$$\sum_{k=1}^n Q_k = 0; \quad \sum_{k=1}^n P_k = 0,$$

где Q_k и P_k — реактивная и соответственно активная мощности синхронного или асинхронного двигателя, входящего в состав группы.

Численное интегрирование уравнения электромеханического переходного процесса, проведенное применительно к каждому двигателю, позволяет найти изменения его угловой скорости $\omega_0 = f(t)$. Однако обычно большая часть наиболее мощных двигателей (k, n) имеют примерно одинаковую инерцию и загрузку ($M_{номk}/S_{номk} \approx M_{номi}/S_{номi}$). В этих условиях выбег всех двигателей нагрузки происходит с одинаковой скоростью, определяемой согласно выражению

$$\omega_0(t) = \frac{\sum_{k=1}^n T_{Jk} S_k \omega_z}{\sum_{k=1}^n T_{Jk} S_k},$$

здесь T_{Jk} — постоянная инерции k -го двигателя; $S_{ном.k}$ — его номинальная мощность.

Значение ω_0 , показывающее среднюю скорость, к которой «подтягиваются» все двигатели группы, взаимодействующие между собой в процессе выбега, можно считать скоростью некоторого эквивалентного двигателя. Для существования такого двигателя (т. е. выбег всех двигателей группы происходил бы с единой скоростью ω_0) необходимо, чтобы момент, развиваемый каждым (достаточно мощным) двигателем при частоте ω_0 , не превосходил максимального возможного момента этого двигателя.

АВР с фазовым управлением. Повышение устойчивости синхронных двигателей и уменьшение тока самозапуска достигаются изменением фазы напряжения питания с помощью циклического переключения фаз (в сторону отставания), осуществляемого во время паузы АВР. Изменение фазы (до 240°) производится с помощью дополнительного выключателя и специальной кабельной вставки. Это мероприятие пока еще не получило широкого применения.

§ 12.8. ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА РЕЖИМ И УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗОК

Влияние автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных двигателей на процессы в узлах нагрузок рассматривается с учетом особенностей работы нагрузок, находящихся в этих узлах. Узлы нагрузки могут характеризоваться следующими условиями:

- равномерным графиком нагрузки;
- работой при дефиците реактивной мощности;
- неравномерным графиком загрузки электропотребителей;
- большой удаленностью от источника питания.

Синхронные электроприводы могут иметь нагрузки, разделяющиеся на два основных вида:

- 1) медленно меняющиеся (насосные и вентиляторные установки, компрессорные турбомашин и др.);
- 2) пульсирующие (мощные поршневые компрессоры) и резкопеременные (прокатные станы, дробильные машины, резиносмесители).

Анализ переходных процессов и устойчивости узлов нагрузок обычно ведется согласно упрощенному представлению системы в виде двух синхронных машин, одна из которых эквивалентна системе, а другая — узлу нагрузки.

На АРВ синхронных двигателей возлагается ряд функций, к главнейшим из которых относятся:

- повышение статической и динамической устойчивости узлов нагрузок за счет поддержания заданного уровня напряжения при росте нагрузок;
- экономия электроэнергии в периоды максимумов нагрузки за счет снижения потерь в сетях и уменьшение необходимой полной мощности трансформаторов;
- повышение экономичности режимов работы синхронных электроприводов и других потребителей, присоединенных к шинам подстанций с синхронными двигателями, за счет снижения активных потерь в синхронных двигателях и лучшего поддержания уровня напряжения;
- повышение статической и динамической устойчивости электроприводов при снижении напряжения в сети и резких изменениях нагрузки на валу;
- улучшение демпфирования электрических и механических колебаний, возникающих при пульсирующей нагрузке.

В зависимости от схемы системы, схемы узла нагрузки и режимов работы синхронных двигателей регулирование их возбуждения может осуществляться в функции изменения:

- напряжения в узле нагрузки ($U_{уз} = \text{const}$);
- тока статора или внутреннего угла δ и их производных;
- нескольких параметров при одновременном (или селективном по времени) воздействии сигналов управления на обмотку возбуждения двигателей;
- реактивной мощности Q_d , отдаваемой двигателем, с поддержанием $Q_d \approx \text{const}$ (постоянство отдачи Q_d);
- коэффициента мощности ($\cos \varphi = \text{const}$).

Рекомендации* относительно выбора закона АРВ синхронных двигателей могут быть даны на основе тщательного технико-экономического сопоставления режимов работы не только одного двигателя и его привода, но и узла нагрузки в целом с учетом питающей его системы. АРВ синхронных двигателей совместно со статическими регулирующими компенсирующими устройствами может обеспечить наиболее надежную и экономичную эксплуатацию двигателей и благоприятные режимы узлов нагрузок. При предварительном выборе АРВ синхронных двигателей часто исходят из следующих соображений:

1. Для узлов с равномерной нагрузкой и устойчивым уровнем напряжения в некоторых случаях целесообразно, чтобы синхронные двигатели работали с неизменным током возбуждения, выбранным по условиям оптимального режима электропотребления и устойчивости электроприводов. Необходимо при этом предусматривать форсировку возбуждения при аварийном снижении напряжения ниже установленного значения для данного узла нагрузки.

2. В некоторых системах с равномерной нагрузкой и изменяющимся уровнем напряжения вследствие дефицита реактивной мощности, ограниченной пропускной способностью питающих линий и т. д., иногда целесообразно регулировать возбуждение синхронных двигателей так, чтобы обеспечивать постоянство напряжения на шинах питающей подстанции с ограничением по максимальному и минимальному значениям тока ротора. Такое регулирование дает эффект у синхронных двигателей большой мощности. Рекомендация не является общей, напротив, во многих случаях регулирование по условию $U = \text{const}$ нерацionalmente.

3. В системах с неравномерной нагрузкой в качестве закона АРВ синхронных двигателей может быть принято регулирование на поддержание оптимального напряжения узла нагрузки. Это напряжение зависит от значения и характера суммарной нагрузки узла и условий работы системы.

4. Для синхронных электроприводов большой мощности (несколько тысяч и десятков тысяч киловатт), работающих на резкопеременную нагрузку, иногда рекомендуют осуществлять регулирование, сохраняя постоянство отдачи реактивной мощности. Однако рациональная область такого регулирования ограничена и должна выявляться расчетами, напри-

* Единых рекомендаций, подтвержденных анализом и опытом, пока нет. В литературе приводятся данные, к которым следует относиться весьма осторожно.

мер регулирование возбуждения на постоянство отдачи реактивной мощности явно неблагоприятно для двигателей с высоким ОКЗ (больше единицы), так как при этом не используется их компенсирующая способность.

5. Для синхронных двигателей при резкопеременной нагрузке может быть целесообразным регулирование возбуждения по току статора и его составляющим, внутреннему углу δ и их производным с выявлением в каждом конкретном случае наилучших комбинаций.

6. Синхронные двигатели средней мощности, работающие с медленно меняющейся нагрузкой, могут регулироваться исходя из условия поддержания постоянства их коэффициента мощности, выбранного на основе технико-экономического анализа работы электроснабжающей системы.

В большинстве случаев целесообразно осуществлять регулирование возбуждения по сложным законам, включающим в управление два параметра режима и более. Например, для некоторых металлургических синхронных электроприводов целесообразно регулирование по активной составляющей тока статора и заданному коэффициенту мощности, для синхронных приводов переменной нагрузки — по напряжению, току статора (фазовое компандирование), реактивной мощности и напряжению.

* § 12.9. САМОВОЗБУЖДЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ПУСКА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В СЕТИ

Одним из эффективных средств уменьшения потерь напряжения в сети, питающей двигателя, является применение последовательной емкостной компенсации реактивного сопротивления сети. При включении конденсаторов C последовательной компенсации могут возникнуть некоторые необычные с точки зрения нормальной эксплуатации явления: качания синхронных машин, «застывание» асинхронных двигателей на скоростях, меньших нормальной, самовозбуждение при пуске асинхронного двигателя или при асинхронном пуске синхронного двигателя, появление субгармонических токов*. Последние для местных сетей существенного значения не имеют и поэтому в настоящем разделе не рассматриваются. Условия самовозбуждения асинхронного двигателя при пуске можно физически оценить на основе тех же соотношений, которые были получены при исследовании самовозбуждения синхронных машин. Не претендуя на строгость анализа и точность количественных соотношений, будем считать, что асинхронный двигатель, так же как и турбогенератор, характеризуется реактивными сопротивлениями x'_d . При изменении угловой скорости ω (частоты вращения) двигателя его индуктивные сопротивления изменяются (кривые 1 и 2 на рис. 12.38). Емкостное сопротивление $x_c = 1/(\omega C)$ также изменяется, причем зависимости $x_c = \varphi(\omega)$ (кривые 3, 4, 5) различно располагаются относительно области $x'_d - x_d$, показанной на рис. 12.38. В случае, соответствующем кривой 3, самовозбуждения во время пуска не будет; в случае, соответствующем

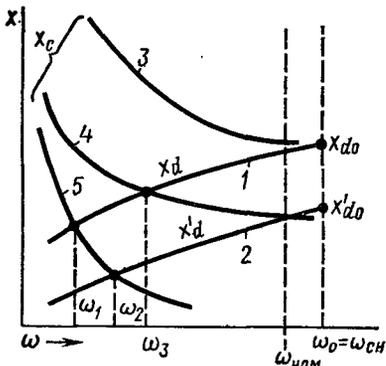


Рис. 12.38. Качественная характеристика условий самовозбуждения:

1, 2 — изменение x_d и x'_d соответственно; 3, 4, 5 — изменение $x_c = 1/(\omega C)$; ω_1 , ω_2 — угловые скорости, отвечающие границе зоны самовозбуждения; ω_3 — угловая скорость начала возбуждения

1 и 2 на рис. 12.38). Емкостное сопротивление $x_c = 1/(\omega C)$ также изменяется, причем зависимости $x_c = \varphi(\omega)$ (кривые 3, 4, 5) различно располагаются относительно области $x'_d - x_d$, показанной на рис. 12.38. В случае, соответствующем кривой 3, самовозбуждения во время пуска не будет; в случае, соответствующем

* Возникновение резонанса на частотах ниже нормальной приводит к появлению токов и напряжений, называемых *субгармоническими*.

ющем кривой 4, оно должно быть вплоть до нормального режима; в случае, соответствующем кривой 5, во время пуска на интервале скорости от ω_1 до ω_2 появится самовозбуждение, которое может исчезнуть, не развившись полностью, если двигатель быстро «проскочит» зону самовозбуждения.

Напомним, что количественное рассмотрение требует более полного и сложного анализа*.

Самовозбуждение является нежелательным явлением по следующим причинам:

1) ток статора и мощность, потребляемая от сети, могут при этом в несколько раз превышать номинальные значения, вследствие чего появляется сильный перегрев двигателя, снижение напряжения на его шинах, уменьшение вращающего момента;

2) двигатель во время пуска может «застрывать», не достигнув нормальной скорости (в связи с уменьшением вращающего момента в процессе разгона);

3) при «застревании» двигателя появляются биения тока и момента и, как следствие, качания ротора машины.

Выявив условия, указывающие на возможность возникновения самовозбуждения, необходимо принять меры для его устранения. Эти меры и их эффективность устанавливаются из анализа основных факторов, влияющих на процесс самовозбуждения. Так, необходимо учесть, что во время разбега двигателя замещающее его *сопротивление по мере увеличения угловой скорости возрастает* от минимального значения до максимального. Во время разбега двигателя при некотором значении скольжения ротора индуктивность двигателя может резонировать с емкостью последовательной компенсации, т. е. создать контур самовозбуждения с собственной частотой, которая будет ниже промышленной. Двигатель при этом вращается с частотой, соответствующей собственной частоте колебательного контура, т. е. с числом оборотов ниже нормального. Длительная работа двигателя с такой частотой при наличии активных потерь (которые неизбежны) возможна при источнике энергии достаточной мощности, поддерживающем колебательный процесс контура самовозбуждения. Таким источником и является асинхронный двигатель. Во время разгона двигателя частота вращения ротора достигает значения, соответствующего частоте собственных колебаний контура, и превышает его. При этом создается отрицательное скольжение ротора по отношению к резонансной частоте и, таким образом, асинхронный двигатель переходит в режим генератора по отношению к контуру самовозбуждения. Частота вращения зависит от потерь в контуре ротора, определенных с учетом насыщения стали двигателя; при равенстве потерь и генерируемой мощности создается возможность устойчивой работы двигателей в этом режиме. Если потери превышают генерируемую мощность асинхронного генератора, то самовозбуждение либо не возникает, либо становится неустойчивым, позволяя, однако, двигателю разворачиваться до нормальной скорости.

Частота резонирующего контура зависит от параметров сети, емкостного сопротивления устройства последовательной компенсации и сопротивлений двигателя.

Самовозбуждение может быть устранено либо выбором соответствующей

* См.: Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах/Анисимова Н. Д., Веников В. А., Долгинов А. И., Федоров Д. А. — М.: Высшая школа, 1964.

емкости продольной компенсации, либо последовательным или параллельным включением с емкостью активного сопротивления.

Анализ процесса пуска асинхронного двигателя. При последовательной компенсации в зависимости от соотношения сопротивления x_C и параметров двигателя могут быть три характерных режима, приблизительно определяемых следующими условиями.

1. Режим, при котором $x_C \geq x_{\mu 0}$, где $x_{\mu 0}$ — реактивное сопротивление ветви намагничивания.

Из схемы замещения следует, что при этих условиях вся зона самовозбуждения лежит

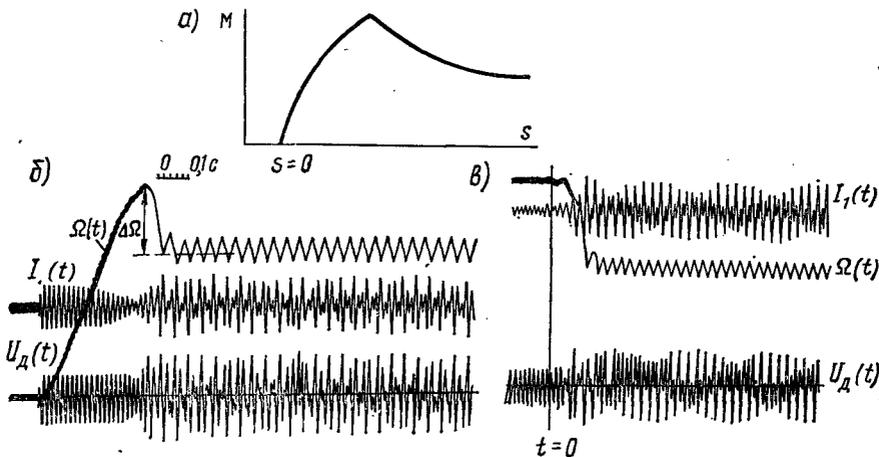


Рис. 12.39. Самовозбуждение асинхронного двигателя: а — $M=f(s)$; б — пуск при включенном x_C ; в — включение x_C

в диапазоне скорости больше синхронной, причем в пределах изменения скорости от нуля до синхронной самовозбуждения не происходит.

2. Режим, при котором $x_s / (1 + r_2' / r_1)^2 \leq x_C \leq x_{\mu 0}$, где x_s — сопротивление рассеяния обмотки статора; r_1 и r_2' — активные сопротивления обмоток статора и ротора двигателя.

Одна часть зоны самовозбуждения лежит в диапазоне изменения скорости от нуля до синхронной, а другая — выходит за пределы синхронной скорости (кривая 2 на рис. 12.38).

Зависимость вращающего момента двигателя от скольжения в этом случае имеет вид, показанный на рис. 12.39, а. Как следует из рассмотрения этой характеристики, самовозбуждение двигателя наступает как при пуске двигателя с включенной емкостью (рис. 12.39, б), так и при включении емкости в цепь вращающегося двигателя (рис. 12.39, в). Эффект самовозбуждения здесь сказывается в уменьшении скорости двигателя на величину $\Delta\Omega$, которая может составить 0,35—0,40 от номинальной (рис. 12.39, б, в).

3. Если включенная емкость настолько велика, что удовлетворяется условие

$$x_C \leq x_s / (1 + r_2' / r_1)^2,$$

Рис. 12.40. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения при разбеге (случай б, рис. 12.39)

то самовозбуждение начинается при небольшой скорости ($\omega_1 \approx 0$) и зона его находится в диапазоне изменения скорости от нуля до синхронной. При этом механические характеристики принимают вид представле-

ных на рис. 12.40. Если в этом случае двигатель после подключения к сети разгоняется настолько медленно, что процесс самовозбуждения успевает закончиться за время прохождения зоны самовозбуждения, то двигатель «застревает» на пониженной скорости (рис. 12.41), испытывая при этом качания. В этом же случае, но при малых моменте инерции и моменте сопротивления механизма, а также большом подводимом напряжении двигатель может разогнаться настолько быстро, что самовозбуждение не сможет полностью развиваться. Тогда, быстро пройдя («проскочив») зону самовозбуждения, двигатель разгонится до нормальной скорости (рис. 12.42).

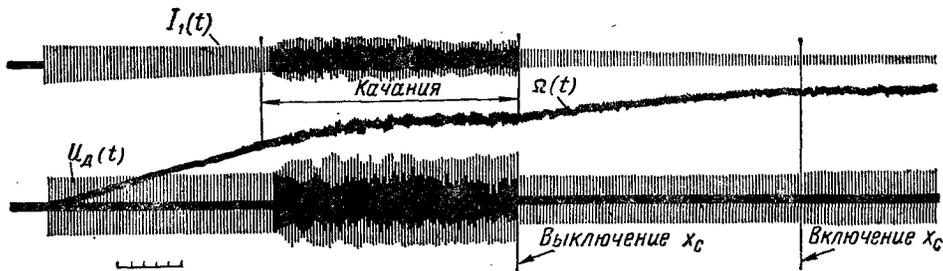


Рис. 12.41. Осциллограмма пуска асинхронного двигателя

На представленных характеристиках $x_C = f(\omega)$, $x_d - x'_d = \varphi(\omega)$. Этому случаю отвечает кривая 3 на рис. 12.38.

В рассматриваемом случае при включении емкости последовательно с двигателем, имеющим нормальную скорость, самовозбуждение практически не проявляется, так как не наблюдается изменений ни скорости двигателя (биений), ни тока и напряжения в сети, питающей двигатель.

Расчет условий самовозбуждения. При пуске двигателей могут быть рассчитаны условия самовозбуждения с помощью характеристического уравнения, получаемого из основного уравнения системы (источник напряжения $U = \text{const}$, емкость x_C включена последовательно с асинхронным двигателем). Предполагая, что цепь линейна, а начальные условия — нулевые, можно записать простейшее уравнение эквивалентной цепи, имеющей кроме упомянутых элементов активное сопротивление R :

$$U = RI + x_C(p)I + \Psi(p)(p + j\omega_d).$$

Здесь $\Psi(p)$ — потокосцепление в асинхронном двигателе, одинаковое как в продольной, так и поперечной осях: $\Psi(p) = I(x + pTx')/(pT + 1)$; $x_C(p) = x_C / (p + j\omega_d)$, где ω_d — угловая скорость двигателя.

Характеристическое уравнение имеет вид

$$D(p) = Tx'p^3 + (TR + x)p^2 + j2\omega_dTx_Cp^2 + (R + Tx_C - T\omega_d^2x')p + j\omega_d(TR + 2x)p + x_C - \omega_d^2x + j\omega_dR = 0.$$

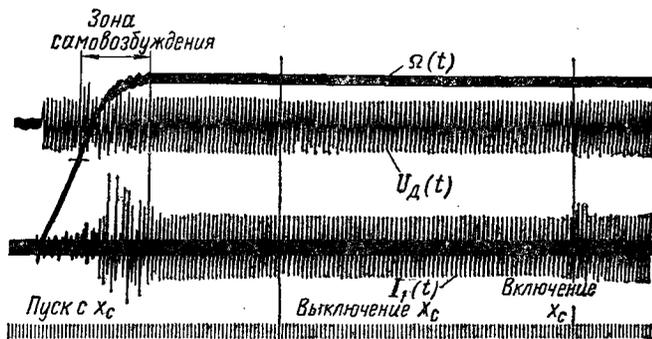


Рис. 12.42. Осциллограмма пуска асинхронного двигателя при прохождении зоны самовозбуждения

Граница возникновения колебаний. В соответствии с методом D -разбиения, разделяя уравнение на два и заменяя p на $j\omega$, где ω — частота свободных колебаний, будем иметь уравнение границы самовозбуждения:

$$[x_C / (\omega_d - \omega)^2 - (x + x')/2]^2 + [R / (\omega_d - \omega)]^2 = [(x - x')/2]^2.$$

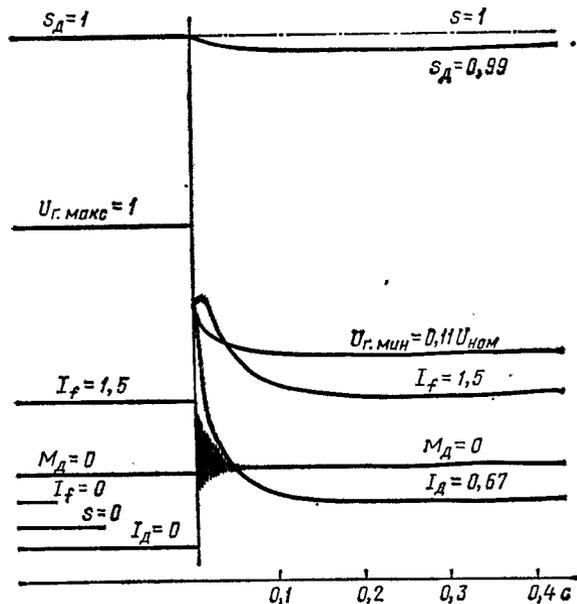


Рис. 12.43. Неудачный пуск двигателя от генератора соизмеримой мощности

Пример 12.1. Асинхронный двигатель мощностью 35 кВт, находящийся в неподвижном ($s = 1$) состоянии, запускается от генератора мощностью 40 кВт.

Выяснить, как при соизмеримой ($k_{\text{соиз}} = P_{\text{д}}/P_{\text{г}} = 0,88$) мощности двигателя и генератора будет изменяться характер переходного процесса в зависимости от момента сопротивления на валу двигателя и способа регулирования возбуждения генератора.

Решение. Проведем серию экспериментов: 1) при ненагруженном двигателе и нагрузке (момент сопротивления M_c), составляющей примерно 50% от номинальной, когда генератор работает без АРВ (рис. 12.43); 2) при пуске от шин неизменного напряжения (рис. 12.44); 3) при трех различных типах АРВ (рис. 12.45, 12.46, 12.47). В каждом случае найдем время пуска $t_{\text{пуск}}$ и характерные значения напряжения генератора ($U_{\text{макс}}$, $U_{\text{мин}}$). Результаты опытов сведем в таблицу:

Номер рисунка		Источник и закон регулирования	$t_{\text{пуск}}, \text{с}$		$U_{*г. \text{мин}}$		$U_{*г. \text{макс}}$		$M_{* \text{макс}}$	
$M_{*c} = 0$	$M_{*c} = 0,54$		$M_c = 0$	$M_c = 0,54$	$M_c = 0$	$M_c = 0,54$	$M_c = 0$	$M_c = 0,54$	$M_c = 0$	$M_c = 0,54$
12.43		СГ без АРВ	—	—	0,11	—	—	—	—	—
12.44	a	Шины, $U_{\text{г}} = \text{const}$	0,20	0,23	—	—	—	—	3,63	3,63
12.45	a	СГ с АРВ I	0,54	2,93	0,24	0,24	1,19	1,19	2,14	2,14
12.46	a	СГ с АРВ II	0,48	1,62	0,50	0,50	1,03	1,03	2,05	2,05
12.47	a	СГ с АРВ III	0,37	0,68	0,50	0,50	1,08	1,03	2,51	2,59

В таблице приняты следующие обозначения: M_* , U_* — величины, выраженные в долях от номинальных значений, отн. ед.; $t_{\text{пуск}}$ — время пуска, с; АРВ I — по отклонению напряжения — пропорциональное регулирование; АРВ II — по отклонению напряжения и первой производной тока генератора; АРВ III — по отклонению напряжения, первой производной тока генератора и увеличенному в 1,4 раза потолочному значению тока возбуждения.

Из рассмотрения таблицы и осциллограмм (рис. 12.43 — 12.47) можно сделать следующие выводы.

При пуске асинхронного двигателя напряжение генератора соизмеримой мощности в первый момент после включения двигателя резко уменьшается вследствие падения напряжения в переходном реактивном сопротивлении генератора и последующем его размагничивании. Далее, как видно из осциллограммы, приведенной на рис. 12.43, при тяжелом пуске двигатель не может быть пущен. Условия пуска могут быть облегчены выбором двигателя с

меньшим пусковым током, повышением мощности генератора или установкой регуляторов возбуждения с оптимальным для данных условий законом регулирования возбуждения.

Наличие на генераторе АРВ пропорционального типа (АРВІ) позволяет произвести запуск ненагруженного двигателя (см. рис. 12.45, а). Пуск нагруженного двигателя ($M_c = 0,54 M$) происходит за более длительное время $t_{\text{пуск}}$ (см. рис. 12.45, б).

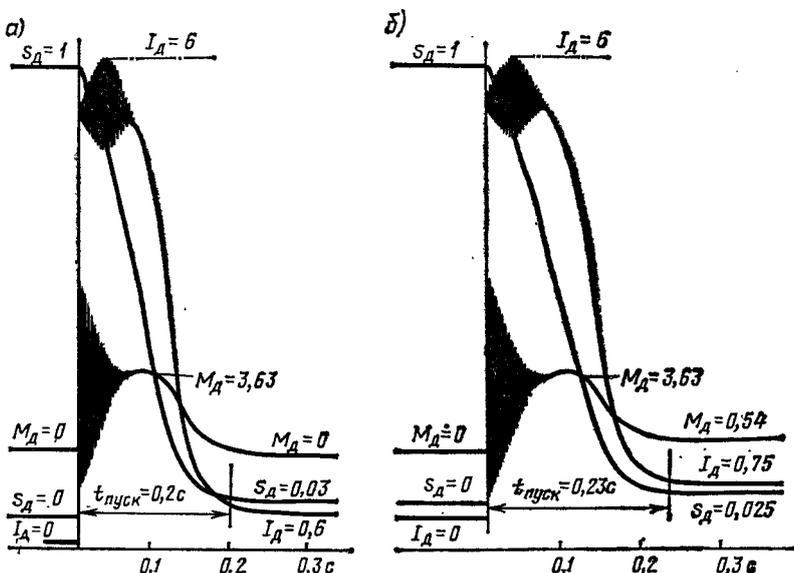


Рис. 12.44. Пуск двигателя от шин ($U_{\Gamma} = \text{const}$)

Введение в закон регулирования возбуждения первой производной по току генератора (АРВІІ) позволяет снизить провал напряжения и максимальный выброс напряжения ($U_{\text{п. макс}}$) в момент резкого уменьшения пускового тока на последнем этапе разгона двигателя (см. рис. 12.46).

Время пуска можно уменьшить за счет лучшего поддержания напряжения генератора в процессе пуска после затухания электромагнитного переходного процесса. Это достигается при АРВІІІ, превышающем потолочное значение тока возбуждения (рис. 12.47).

Для сравнения на осциллограммах (см. рис. 12.44, а, б) показан процесс пуска нагруженного ($M_c = 0,54$) и ненагруженного ($M_c = 0$) асинхронного двигателя от шин бесконечной мощности ($U_{\Gamma} = \text{const}$).

Пример 12.2. К явнополюсному генератору, имеющему параметры $x_d = 0,96$; $x'_d = 0,575$; $x''_d = 0,2$; $r = 0,014$, подключается нагрузка $z_H = 1$, $\cos \varphi = 0,8$.

Определить снижение напряжения в момент включения.

Решение. Полное сопротивление генератора и нагрузки $x_{d\Sigma} = 1,56$; $x_{q\Sigma} = 1,175$, $x'_{d\Sigma} = 0,8$, $r_{\Sigma} = 0,81$. Согласно (12.14), находим $U_0 = \sqrt{1,175^2 + 0,81^2} / (1,56 \cdot 1,175 + 0,81^2) = 0,57$.

Пример 12.3. От явнополюсного генератора пускается асинхронный двигатель. Параметры генератора: $P_{\Gamma} = 100$ кВт; $U_{\Gamma} = 230$ В; $\cos \varphi_{\Gamma} = 0,8$; $\eta_{\Gamma} = 0,907$; $x_d = 1,25$; $x'_d = 0,1$; $x''_d = 0,701$; $r = 0,02$; $T_{d0} = 1,63$ с; $GD_{\Gamma}^2 = 19$ кг·м². Возбуждение электромагнитное. Сопротивление сети: $x_c = 0,05$, $r_c = 0,04$. Генератор вращается первичным двигателем (дизель) мощностью $P_{\text{н.д}} = 121$ кВт с частотой вращения $n = 1500$ об/мин. Параметры регулирования: $T_K = 0,0175$ с; $\alpha_0 = 0,436$ рад; $K_{\text{с}} = 0,02$; $\tau = 0,186$. Параметры двигателя:

$P_{д} = 41$ кВт; $U_{д} = 220$ В; $\cos\varphi = 0,875$; $GD_{д}^2 = 25,2$ кг·м²; $s_0 = 0,02$; $\eta_{д} = 0,87$; $k_l = 6,5$; при пуске $\cos\varphi = 0,32$; сопротивление сети $r_c = 0,03$.

О п р е д е л и т ь изменение угловой скорости (частоты вращения) генератора и изменения напряжения при прямом пуске двигателя.

Решение. Согласно (12.13), находим:

$$z_{н} = \frac{0,87 \cdot 0,875 \cdot 100}{6,5 \cdot 0,8 \cdot 41} \left(\frac{220}{230} \right)^2 = 0,33;$$

$$x_{н} = z_{н} \sin \varphi_{н} + x_c = 0,36; \quad r_{н} = z_{н} \cos \varphi_{н} + r_c = 0,145; \quad x_{д\Sigma} = x_d + x_{н} = 1,61;$$

$$x'_{д\Sigma} = x'_d + x_{н} = 0,46; \quad x_{q\Sigma} = x_q + x_{н} = 1,06; \quad r_{\Sigma} = 0,165; \quad z_{н\Sigma} = \sqrt{x^2 + r^2} = 0,39;$$

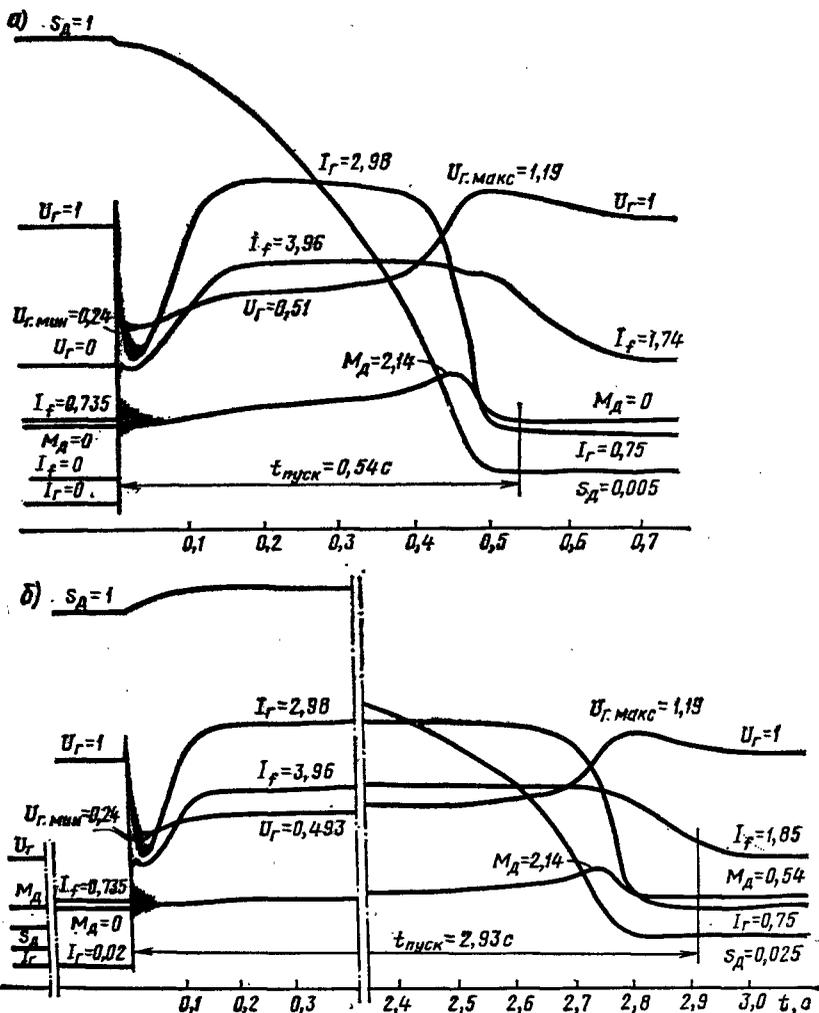


Рис. 12.45. Пуск от регулируемого генератора (АРВИ)

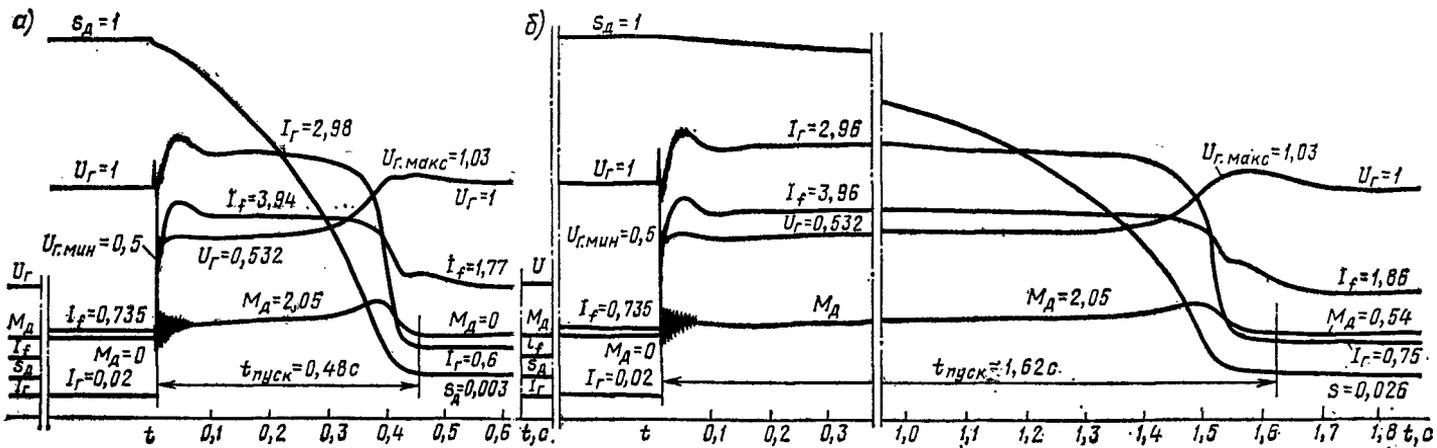


Рис. 12.46. Пуск от регулируемого генератора (АВРП)

$$\cos \varphi_H = r_H / z_H = 0,425; \quad K'_0 = 0,81; \quad K_0 = 0,24.$$

Напряжение генератора в момент включения двигателя [согласно (12.14)] $U_0 = K'_0 E'_0 = 0,81 \cdot 1 = 0,81$. Коэффициент нагрузки, набрасываемой на агрегат,

$$K_\lambda = \frac{U_{\text{НОМ}}^2 \cos \varphi_H}{z_H \eta_{\Gamma} \cos \varphi_{\Gamma}} \frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{н.д}}} = \frac{1 \cdot 0,425 \cdot 100}{0,39 \cdot 0,907 \cdot 0,8 \cdot 121} = 1,25.$$

Постоянная инерции

$$T_J = \frac{2,74GD^2 n^2}{P_{\text{н.д}} \cdot 1000^2} = \frac{2 \cdot 74 \cdot 25,2}{121 \cdot 1000^2} 1500^2 = 2,24 \text{ с.}$$

Для вычисления по формуле (12.15) находим: $\rho = 4,47$; $\beta = 5$; $\alpha = 0,465$; $\alpha_0 = 0,0448$;

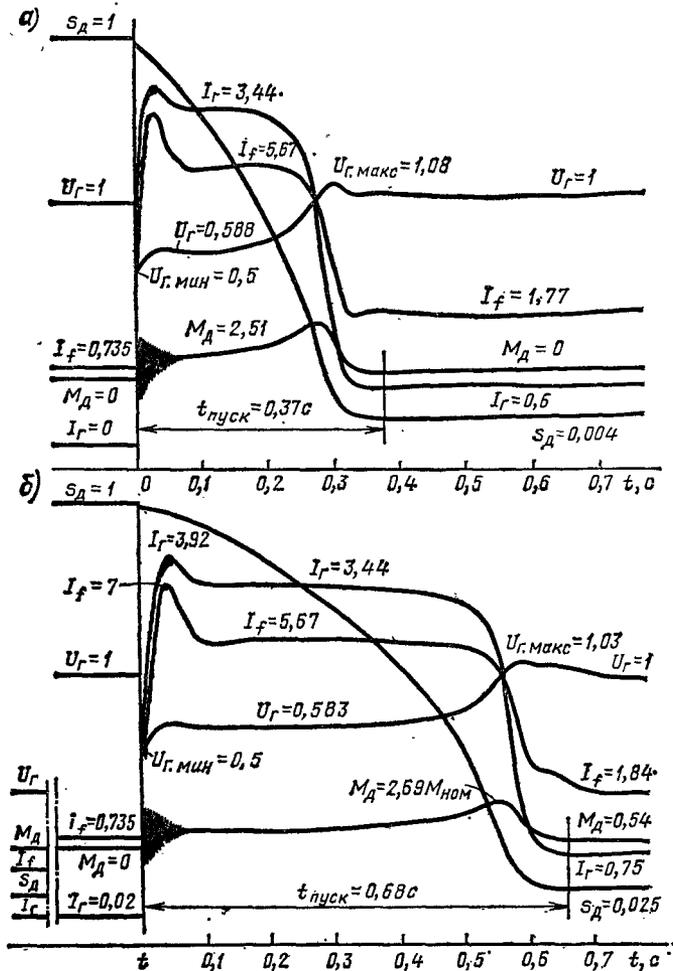


Рис. 12.47. Пуск от регулируемого генератора (АРВIII)

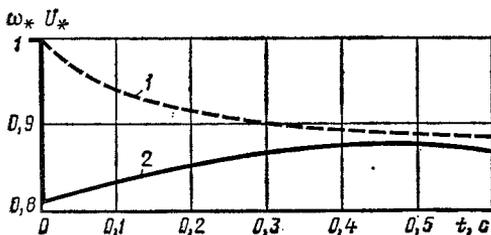
$\Psi = 1,35$ рад; $T_{\Psi_0} = 1,5$ рад; $T_{\Psi} = 0,135$. Подставляя найденные значения, получим $\Omega_{\text{макс}} = 0,12$; $\omega = 1 - 0,12 + 0,12 e^{-t/0,135} = 0,88 + 0,12 e^{-7,4t}$.

Изменение $\omega = f(t)$ показано на рис. 12.48 (кривая 1).

Найдем далее изменение напряжения согласно (12.16), т. е. с учетом влияния изменения скорости, что необходимо, так как $\Omega_{\text{макс}} = 0,12 > 0,05$:

$$U = (1 - 0,12) + \left(0,81 - 0,88 + \frac{0,81 \cdot 0,12 \cdot 0,135}{0,24 \cdot 1,63 - 0,135 \cdot 0,81} \right) e^{-\frac{t}{1,63 \cdot 0,24 / 0,81}} - \frac{0,81 \cdot 0,12 \cdot 0,135}{0,24 \cdot 1,63 - 0,135 \cdot 0,81} e^{-\frac{t}{0,135}} = 0,88 - 0,2e^{-2,1t} - 0,05e^{-7,4t}$$

Рис. 12.48. Изменение скорости и напряжения в относительных единицах



По данным этого расчета построена кривая 2 на рис. 12.48.

Пример 12.4. В узлах нагрузки имеется 20 двигателей. Закон распределения $P(x)$ включений x в течение 10 с можно представить следующим образом:

x	0	1	2	3	4
$P(x)$	0,06	0,39	0,39	0,14	0,02

Найти наиболее вероятное число двигателей, включаемых одновременно.

Решение. Из приведенных данных видно, что вероятность одного или двух включений $p = 0,39$. Согласно (12.17), наиболее вероятное число включений за 10 с

$$N = 0 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,39 + 2 \cdot 0,39 + 3 \cdot 0,14 + 4 \cdot 0,02 = 1,67.$$

Одно включение будет наступать с вероятностью

$$p = 0,39 \text{ — за } \Delta t = 10/1,67 = 6 \text{ с.}$$

Максимальное вероятное количество количество наибольшего числа совместно включаемых двигателей k_0 можно найти согласно (12.18):

$$k_0 = (20 + 1) \cdot 0,39 = 21 \cdot 0,39 = 8,19, \text{ или } k_0 \approx 8.$$

При общем числе работающих двигателей $n = 20$ и вероятности одного включения $P = 0,39$ найдем, согласно (12.19), вероятность того, что у 8 двигателей из 20 повторится в течение 6 с одно включение:

$$P(20, 8) = \frac{20!}{8! 12!} \cdot 0,39^8 (1 - 0,39)^{12} = 0,178.$$

Вероятность того, что произойдет одновременное включение меньшего (k') или большего (k'') числа электродвигателей (чем $k_0 = 8$), находится согласно (12.20).

При $k' = 7$ имеем

$$z' = (7 - 0,39 \cdot 20) / \sqrt{0,39 (1 - 0,39) 20} = -0,367.$$

Аналогично при $k'' = 9$ имеем $z'' = 0,55$. По найденным значениям z' и z'' с помощью таблиц, имеющих вид

z''	0,36	0,37	0,55
$\Phi(z)$	0,1406	0,1443	0,2088

находим после экстраполяции $p(7 < 8 < 9) = \Phi(z'') - \Phi(z') = 0,2088 - 0,1443 = 0,0645$, откуда следует, что включение числа двигателей, меньшего 9 и большего 7, наиболее вероятно.

Пример 12.5. Узел нагрузки, представленный эквивалентным асинхронным двигателем, получает питание от шин мощной системы U_c через компенсированную емкостью одноцепную линию передачи (рис. 12.49).

Параметры линии ($U = 110$ кВ; $x_d = 0,30$; $r_d = 0,1$; $x_c = 0,15$); трансформатора ($K_T = 110/11$ кВ; $x_T = 0,1$; $r_T = 0$); двигателя ($S = 0,5$; $x_d = 1,9$; $x'_d = 0,6$; $T = 200$ рад)

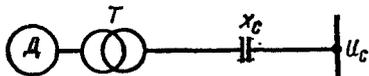


Рис. 12.49. Схема включения эквивалентного асинхронного двигателя

выражены в относительных единицах. Напряжение на шинах системы $U_c = 1$. За базисные величины приняты $S_B = 121$ МВ·А и $U_B = 110$ кВ.

Проверить, возможно ли самовозбуждение асинхронного двигателя при угловой скорости $\omega_d = 0,97$.

Решение. Уравнение границы самовозбуждения асинхронного двигателя имеет вид

$$[x_c/(\omega_d - \omega)^2 - (x + x')/2]^2 + [R/(\omega_d - \omega)]^2 = [(x - x')/2]^2.$$

Здесь ω_d — угловая скорость ротора, отн. ед.; ω — частота свободных колебаний; $x = x_d + x_T + x_{d1} = 1,9 + 0,1 + 0,3 = 2,3$; $x' = x'_d + x_T + x_{d1} = 0,6 + 0,1 + 0,3 = 1$.

В координатах $R/(\omega_d - \omega)$; $x_c/(\omega_d - \omega)^2$ граница зоны представляет собой полуокружность радиусом, равным $(x - x')/2 = (2,3 - 1)/2 = 0,65$, с центром на оси ординат на расстоянии от начала координат, равном $(x + x')/2 = (2,3 + 1)/2 = 1,65$. Зона самовозбуждения асинхронного двигателя построена на рис. 12.50 (кривая 1).

Для определения возможности самовозбуждения асинхронного двигателя нанесем на рис. 12.50 характеристику внешней сети, которой соответствуют уравнения

$$x_{c.вн} = x_c/(\omega_d - \omega)^2 = 0,15/(\omega_d - \omega)^2;$$

$$R_{вн} = r_d/(\omega_d - \omega) = 0,1(\omega_d - \omega).$$

Изменяя $(\omega_d - \omega)$ от 0 до 1, получим следующие результаты:

Рис. 12.50. Зоны самовозбуждения:

$$x_c/(\omega_d - \omega)^2 - \Phi[R/(\omega_d - \omega)].$$

$\omega_d - \omega$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25
$R_{вн}$	0,1	0,11	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,33	0,40
$(\omega_d - \omega)^2$	1	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09	0,06
$x_{c.вн}$	0,15	0,185	0,23	0,36	0,42	0,60	0,94	1,67	2,40

На рис. 12.50 нанесена характеристика внешней сети (кривая 2). Пересечение характеристики внешней сети и границы зоны самовозбуждения возможно при $\omega_d - \omega = 0,377$ (точка a ; $x_c = 1,06$) и $\omega_d - \omega = 0,263$ (точка b ; $x_c = 2,17$).

Чтобы решить вопрос о возможности самовозбуждения асинхронного двигателя, надо найти частоту свободных колебаний ω . Это можно сделать, рассмотрев условия резонанса в схеме (см. рис. 12.49), при представлении двигателя его частотными характеристиками.

Условием резонанса соответствует уравнение

$$x_c/(\omega_d - \omega)^2 = (x + \omega^2 T^2 x')/(1 + \omega^2 T^2).$$

Для точки b имеем:

$$2,17 = (2,3 + \omega^2 \cdot 200^2 \cdot 1) / (1 + \omega^2 \cdot 200^2); \quad 2,17 + 2,17 \cdot 200^2 \omega^2 = 2,3 + 200^2 \omega^2;$$

$$1,17 \cdot 200^2 \omega^2 = 0,13; \quad \omega = \pm 0,005 \sqrt{0,13/1,17} = \pm 0,00167.$$

В точке a частота свободных колебаний равна 0,072.

Так как угловая скорость двигателя $\omega_d = 0,97$, то действительное значение $\omega_d - \omega$ в рассматриваемых условиях больше, чем разность частот (0,377 и 0,263), при которых возможно возникновение самовозбуждения асинхронного двигателя.

Пример 12.6. Рассматривается схема и условия применения предыдущего примера.

Проверить возможность возникновения самовозбуждения асинхронного двигателя в условиях пуска.

Решение. Уравнение границы самовозбуждения, приведенное в предыдущем примере, можно упростить так, что граница явится полуэллипсом, описываемым уравнением

$$(x_c - \omega_d^2 x) (x_c - \omega_d^2 x') + \omega_d^2 R^2 = 0.$$

Каждому принятому значению ω_d соответствует зона самовозбуждения.

Максимальное значение активного сопротивления, при котором возможно самовозбуждение двигателя, работающего со скоростью ω_d ,

$$R_{\max} = \omega_d (x - x') / 2.$$

Для определения условий самовозбуждения асинхронного двигателя во время пуска построим параболу, ограничивающую все зоны самовозбуждения его:

$$x_c = 2 [(x + x') / (x - x')] R_{\max}^2.$$

Принимаем $\omega_d = 1$. Граница зоны самовозбуждения определяется уравнением

$$(x_c - 1 \cdot 2,3) (x_c - 1 \cdot 1) + R^2 = 0.$$

Определим координаты граничных точек при $\omega_d = 1$:

$$R_{\max} = 1 (2,3 - 1) / 2 = 0,65; \quad x_c = 2 (2,3 + 1) \cdot 0,65^2 / (2,3 - 1)^2 = 1,65.$$

Результаты расчетов для других значений ω_d приведены ниже:

ω_d	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
R_{\max}	0,65	0,59	0,52	0,46	0,39	0,33	0,26	0,20	0,13	0,07
x_c	1,65	1,33	1,05	0,81	0,59	0,41	0,25	0,148	0,066	0,017

На рис. 12.51 показаны зоны самовозбуждения при скорости двигателя $\omega_d = 1,0$ (кривая 1); 0,9 (кривая 2); 0,5 (кривая 3), а также кривая 4, ограничивающая зоны в процессе пуска. Из рисунка видно, что в процессе пуска при изменении скорости от 0 до $\approx 0,4$ возможно возникновение самовозбуждения.

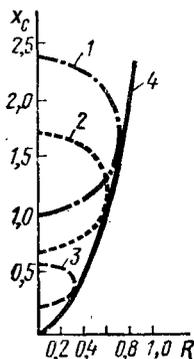


Рис. 12.51. Зоны самовозбуждения при переменной угловой скорости двигателя

Контрольные вопросы

12.1. Что такое узлы нагрузки и в каких двух наиболее существенных аспектах могут рассматриваться происходящие в них переходные процессы?

12.2. Какие переходные процессы представляют наибольший интерес при исследовании режимов узлов нагрузки?

12.3. В чем особенность пуска синхронных и асинхронных двигателей? В каких случаях необходимо применять специальные пусковые устройства?

12.4. Каковы причины появления резких изменений режима в системах электроснаб-

жения. Каковы условия устойчивости при набросе нагрузки на синхронный двигатель? на асинхронный двигатель?

12.5. Чем отличаются процессы в узле нагрузки по условиям их протекания при набросе нагрузки на валу двигателя (увеличения механического момента на валу)? при понижении напряжения на шинах?

12.6. Перечислите особенности учета динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей при изменении напряжения в узлах нагрузки.

12.7. Для чего применяется самозапуск? Что нужно определить для установления допустимости самозапуска и ограничения его возможностей?

12.8. В каких случаях и при каких условиях может применяться АПВ отдельных элементов системы электроснабжения линий, трансформаторов и шин резервного питания отдельных двигателей и их групп? Нарисуйте примерные схемы АПВ для различных подстанций.

12.9. Каково влияние толчкообразных изменений нагрузки на работу систем различной мощности? Какими мерами его можно уменьшить?

12.10. Как составляются основные уравнения для исследования режима системы при толчкообразной нагрузке и какие пути решения этих уравнений известны?

12.11. Как надо проводить регулирование возбуждения синхронных двигателей в различных условиях работы?

12.12. Как определить вероятность одновременного запуска нескольких двигателей и как подойти к определению влияния их запуска на напряжение в узле нагрузки, питаемого от генератора?

12.13. Какие характеристики $[P = \varphi(U), Q = \varphi(U)]$ имеют основные элементы нагрузки электрических систем? В чем разница между статическими и динамическими характеристиками нагрузки?

12.14. Как представить асинхронный двигатель упрощенной схемой замещения при анализе происходящих в узле нагрузки динамических процессов?

12.15. Как влияет намагничивающий ток трансформаторов и асинхронных двигателей на зависимость реактивной мощности, потребляемой нагрузкой, от напряжения?

12.16. Что такое критическое скольжение, как его определить и как сказывается его значение на характере переходного процесса?

12.17. Как изменяется ток асинхронного двигателя при снижении напряжения? при остановке двигателя?

12.18. Как влияет понижение частоты в системе на устойчивость асинхронного двигателя?

12.19. Что такое перегрузочная способность синхронного и асинхронного двигателей?

12.20. При каком напряжении на шинах двигателя наступает его неустойчивость? От каких факторов зависит это значение?

12.21. Как влияет на устойчивость синхронных и асинхронных двигателей, входящих в состав нагрузки, одновременное снижение напряжения и частоты?

Темы рефератов

1. Порядок подключения к сети мощных синхронных и асинхронных двигателей.
2. Толчкообразные нагрузки и борьба с их влиянием на систему.
3. Автоматическое включение резерва.
4. Самовозбуждение синхронных и асинхронных двигателей нагрузок.

ГЛАВА 13

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

§ 13.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Существует два способа включения в сеть синхронных генераторов — *синхронизация* и *самосинхронизация*, разновидностью которой является *повторное включение с самосинхронизацией*. Эти способы могут быть, вообще говоря, как автоматическими, так и ручными, хотя практически в последнее время широко применяются автоматические, а не ручные операции.

При синхронизации и для подключаемого генератора и сети требуется соблюдение следующих условий:

- а) равенства амплитуд напряжений;
- б) равенства частот;
- в) совпадения фаз.

При этом подключение генератора к сети не вызывает уравнивающих токов, толчков мощности и изменения напряжения в системе.

Синхронизация (ее иногда называют «точной») требует времени для уравнивания напряжений и частот генератора и сети, аппаратура для синхронизации бывает довольно сложна. В аварийных условиях, когда напряжение и частота сети могут значительно отклоняться от нормальных значений и быстро изменяться, аппаратура точной автоматической синхронизации, как правило, задерживает (до 5 мин и более) процесс синхронизации.

При повреждении устройств точной автоматической синхронизации или погрешностях во время ручной синхронизации возможно несинхронное включение генератора в сеть с опасными для него толчками уравнивающего тока и активной мощности. При несовпадении векторов напряжений синхронизируемого генератора и сети по фазе ударный ток включения приблизительно определяется выражением

$$i_{уд}'' = \sqrt{2} \cdot 1,8 \Delta E / (x_d'' + x_c), \quad (13.1)$$

где ΔE — геометрическая разность между э. д. с. генератора E_q^* за сверхпереходным индуктивным сопротивлением в продольной оси и напряжением сети U_c ; x_d'' , x_c — сопротивление генератора и эквивалентное сопротивление системы.

При $\delta = \pi$ и $x_c = 0$ ударный ток несинхронного включения, имея наибольшее значение $i_{уд.макс}'' = 2i_{уд.к.}$, может вызвать повреждение обмоток генератора. Нарушение условия равенства частот генератора и сети может также повлечь за собой нежелательные последствия: генератор будет втягиваться медленно, испытывая качания, создавая толчки тока и активной мощности в системе. Если расхождение частот при этом большое (3—5%), то генератор при жесткой связи может перейти в асинхронный режим.

Процесс синхронизации может быть рассчитан способом площадей или по полным уравнениям.

Самосинхронизация генераторов обладает рядом существенных преимуществ. К ним относятся: простота схемы и аппаратуры; надежность работы устройств; быстрота включения генератора в сеть, что особенно важно при появлении дефицита мощности в энергосистеме в аварийных условиях. При

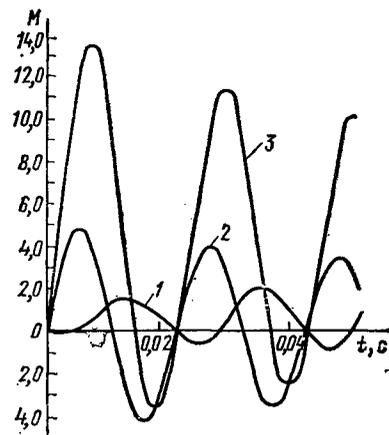


Рис. 13.1. Переходный момент генераторов с успокоительными обмотками при различных режимах: 1 — при самосинхронизации ($s=0$, $\delta_0=135^\circ$); 2 — при коротком замыкании; 3 — при несинхронном включении ($s=0$, $\delta_0=135^\circ$)

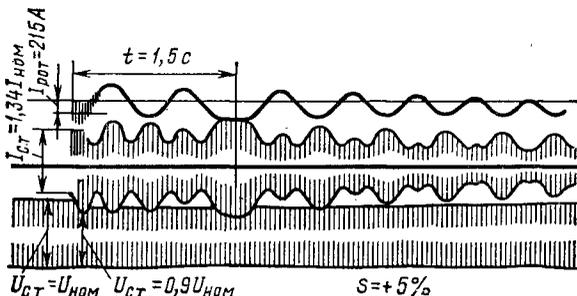


Рис. 13.2. Изменения тока статора, напряжения и тока ротора гидрогенератора при самосинхронизации

1 — при самосинхронизации ($s=0$, $\delta_0=135^\circ$);
2 — при коротком замыкании; 3 — при несинхронном включении ($s=0$, $\delta_0=135^\circ$)

самосинхронизации включение в сеть генераторов происходит при снятом возбуждении. При этом в момент включения значительных толчков активной мощности и опасных механических усилий не возникает. В самом деле, как видно из рис. 13.1, момент при самосинхронизации меньше, чем при коротком замыкании. Свободный ток в обмотке статора и периодические токи во всех контурах генератора затухают с большой скоростью (практически за 2—3 периода качания ротора).

Максимальные значения аperiodической и периодической составляющих тока статора при самосинхронизации всегда меньше того тока короткого замыкания (на выводах генератора), на который рассчитывают генераторы.

На рис. 13.2 приведена осциллограмма, показывающая характер изменения тока статора, тока ротора и напряжения на шинах гидрогенератора при самосинхронизации. Напряжение на шинах невозбужденного генератора при включении его в сеть может быть приближенно найдено согласно выражению

$$U_p = U_c [1 - x_c / (x_r + x_c)], \quad (13.2)$$

где $x_p = x_d'$ для начала процесса синхронизации и $x_r = x_c$ при подходе к синхронизму.

Если от шин станции питается особо ответственный потребитель, требующий постоянства напряжения, то необходимо проверить допустимость самосинхронизации. Если по условиям понижения напряжения в сети самосинхронизация оказывается неприемлемой, то при-

~~меняют точную автоматическую синхронизацию.~~ Несмотря на недостатки, точная автоматическая синхронизация должна применяться также в тех случаях, когда генераторы могут временно работать на выделенную нагрузку. Синхронизация таких генераторов с остальной частью энергосистемы производится без перерыва энергоснабжения потребителей, что возможно только при точной синхронизации.

Надежность и успешность осуществления самосинхронизации повышается в тех случаях, когда после включения генератора в сеть асинхронный момент, создаваемый генератором, больше момента турбины. Практически для надежного втягивания в синхронизм включение, как правило, производится при угловой скорости, меньшей синхронной, и избыточный момент сообщает вращающимся массам ротора ускорение, необходимое для того, чтобы «дотянуть» ротор до синхронной скорости. Можно связать избыточный момент с сообщаемым ротору ускорением и получить простой критерий самосинхронизации. Так, для конкретных условий можно экспериментально установить, что в момент включения значение ускорения, обеспечивающее успешную синхронизацию,

$$\alpha = \omega_0 \Delta M / T_J,$$

где T_J выражено в секундах, ΔM — в относительных единицах, α — в радианах в секунду в квадрате.

Если принять $\Delta M \leq 0,8M_{ac}$ и выразить α в герцах в секунду ($\Gamma\text{ц}$), то

$$\alpha = 0,8M_{ac}f / T_J,$$

где $f = 50$ Гц.

При определении M_{ac} должно учитываться наличие включенного в обмотку ротора гасительного сопротивления, так что фактическое

$$T'_{d\text{ ср}} = KT_d \alpha'_{d'} / \alpha_d,$$

где $K = r_f / (r_f + r_p)$ (r_f — сопротивление обмотки возбуждения; r_p — гасительное сопротивление).

Для гидрогенераторов с успокоительными обмотками и турбогенераторов с массивным ротором требования в отношении допустимого значения ускорения обычно не имеют практического значения в связи с большим асинхронным моментом.

Выше указывалось, что гидрогенераторы входят в синхронизм и при отсутствии тока возбуждения за счет момента явнополюсности. Но при этом возможно вхождение генераторов в синхронизм с неправильной полярностью, т. е. полярностью, не соответствующей той, которая будет после включения возбуждения. В этом случае после включения возбуждения ротор генератора проворачивается на 180° . Этот процесс сопровождается довольно значительными качаниями и иногда может привести к нарушению синхронизма. Поэтому в случае включения машины в сеть с относительно малой скоростью следует подавать возбуждение немедленно после включения генератора.

При включении генератора в сеть с большим скольжением, например при автоматическом повторном включении с самосинхронизацией (АПВС), напротив, желательно задерживать включение возбуждения, так как при слишком быстром включении ток возбуждения может возрасти до номинального значения еще тогда, когда скольжение не успело уменьшиться.

В асинхронном режиме возбужденной машины могут быть большие токи, значительные колебания напряжения в системе и связанные с этим явления, опасные и для системы, и для синхронизируемого генератора. При установлении возможности самосинхронизации необходимо убедиться, что защита, установленная на двигателях и отдельных линиях, будет работать правильно и не отключит их при кратковременном понижении напряжения во время самосинхронизации. Необходимо также проверить работу АРЧВ турбин, которые при неправильной настройке могут вызвать качания машин после самосинхронизации.

§ 13.2. ПРОЦЕССЫ ПРИ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ

Введение в синхронизм синхронной машины имеет несколько этапов. Сначала невозбужденная машина первичным двигателем приводится во вращение и доводится до скорости, близкой к синхронной, после чего подключается к сети. Подключение к сети обычно проводится при скольжении $\pm(2-3)\%$, хотя и включение

при больших скольжениях не представляет какой-либо опасности. Иногда даже оказывается целесообразным подключать машину к сети при неподвижном роторе и одновременно начинать разгонять ее первичным двигателем (так называемый электромеханический пуск). Во время пуска и подключения машины к сети обмотка возбуждения замкнута на гасительное сопротивление, или автомат гашения поля (АГП), или якорь невозбужденного возбудителя. Если машина подключается к сети со скольжением, меньшим 3—5%, то возбуждение подается одновременно с включением выключателя. Если подключение к сети производится при больших скольжениях, то машина некоторое время работает без возбуждения. Только после того, как она «подтянется», к скорости, близкой к синхронной [до $s = \pm(2-3)\%$], подается возбуждение. Появляющийся синхронный момент увеличивает колебания скольжения и обеспечивает вхождение в синхронизм обычно независимо от угла включения, хотя его значение играет определенную роль.

Вхождение в синхронизм может происходить только за счет синхронного (знакопеременного) момента, создающего пульсации скорости, в процессе которых ротор достигает синхронной скорости ($s = 0$). Асинхронные и механические моменты, действующие встречно или согласно (табл. 13.1), не могли бы обеспечить вхождения в синхронизм. Они или только подводили бы ротор к синхронной скорости, или заставляли бы его «проскакивать» синхронизм и вновь переходить на синхронную работу при скольжении другого знака.

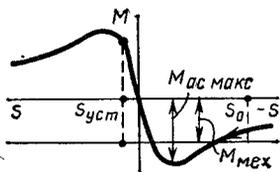
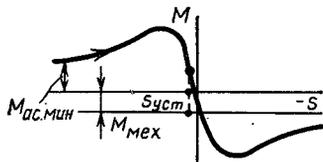
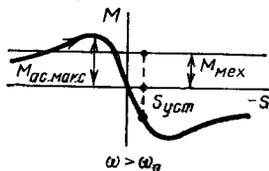
Таблица 13.1

А. Одинаковое направление моментов

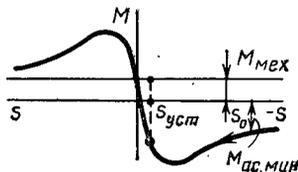
Б. Разное направление моментов

Пуск и самосинхронизация синхронных генераторов: $\omega < \omega_0$

Пуск синхронных двигателей: $\omega < \omega_0$



Автоматическое повторное включение с самосинхронизацией: $\omega > \omega_0$



При проведении самосинхронизации существенное значение имеют характеристики первичных двигателей. Они должны способствовать быстрому разгону агрегата. Механический момент, развиваемый в процессе синхронизации, должен находиться в определенном соотношении с асинхронным моментом и не должен быть слишком большим по сравнению с ним. Соотношения эти таковы: механичес-

кий момент должен быть меньше максимального значения среднего асинхронного момента, если в процессе самосинхронизации асинхронный и механический моменты направлены одинаково. Если же эти моменты имеют разные знаки, то необходимо, чтобы результирующий механический момент был меньше минимального значения среднего асинхронного момента. Математически это формулируется следующим образом:

$$M_{\text{мех}} \leq K_1 M_{\text{ас. макс}} \quad (13.3)$$

$$M_{\text{мех}} \leq K_2 M_{\text{ас. мин}} \quad (13.4)$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты запаса, меньшие единицы*.

Для иллюстрации приведенных соотношений рассмотрим табл. 13.1, где показаны случаи, когда знаки асинхронного и механического моментов оказываются

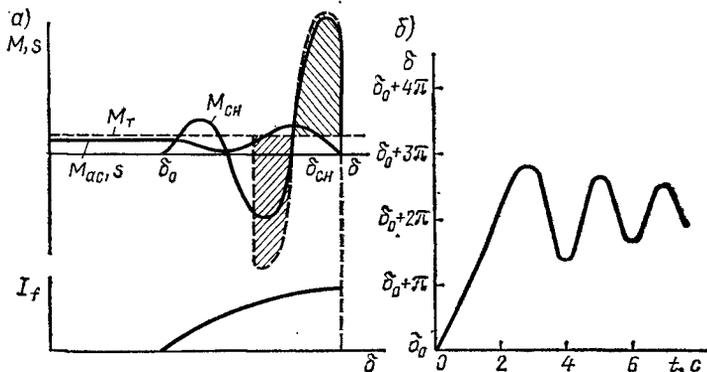


Рис. 13.3. Самосинхронизация машины, работающей при скорости, большей синхронной:

а — изменение момента и скольжения при изменении тока возбуждения;
 б — изменение угла $\delta = f(t)$ в процессе самосинхронизации

одинаковыми (А) или различными (Б). Очевидно, что несоблюдение требования (13.3) в случае А приведет к «проскакиванию» ротора через возможный установившийся асинхронный режим (при $s_{уст}$) и через синхронный режим. Это, в свою очередь, приведет к выпадению из синхронизма со скольжением другого знака. Несоблюдение требования (13.4) в случае Б приведет к «застреванию» ротора при большом скольжении (при $M_{ac} = M_{мин}$) и к невозможности осуществления синхронизации.

На рис. 13.3, а показаны изменения тока возбуждения I_f и получающееся при этом соотношение площадок ускорения и торможения, определяющих характер процесса самосинхронизации машины, работавшей при скорости, большей синхронной, а на рис. 13.3, б — протекание процесса во времени. Как следует из рисунков, после подачи возбуждения в момент $t = 0$ ротор под действием появившегося синхронного момента затормаживается, при этом скольжение s и асинхронный момент $M_{ac} = P_{ас}s$ уменьшаются, достигая нуля при $\delta = \delta_{сн}$.

Далее угол δ начинает уменьшаться уже в синхронном режиме (при среднем

* У коэффициентов K_1 имеется некоторая зависимость от угла включения.

значении скольжения, равном нулю) и процесс качаний определяется соотношением площадок ускорения и торможения (рис. 13.3, б). При значительных вращающем моменте турбины и начальном скольжении процесс вхождения в синхронизм затягивается, сопровождаясь большими качаниями, причем установившийся угол может оказаться равным 2π , 4π , 6π , т. е. ротор может, как это показано на рис. 13.4, 2—3 раза провернуться, прежде чем войдет в синхронизм.

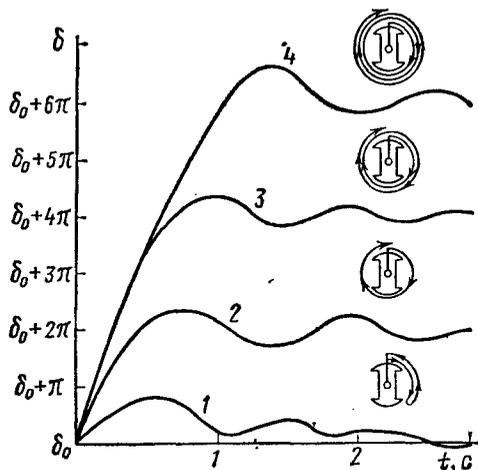


Рис. 13.4. Влияние начального скольжения s_0 на условия вхождения в синхронизм генератора, имеющего $T_J = 6$ с и $M_T = 0,2$ при $\delta_0 = 0$ и подаче возбуждения одновременно с включением генератора в сеть:

1 — $s_0 = -2,5\%$; 2 — $s_0 = -6\%$; 3 — $s_0 = -8\%$; 4 — $s_0 = -11\%$

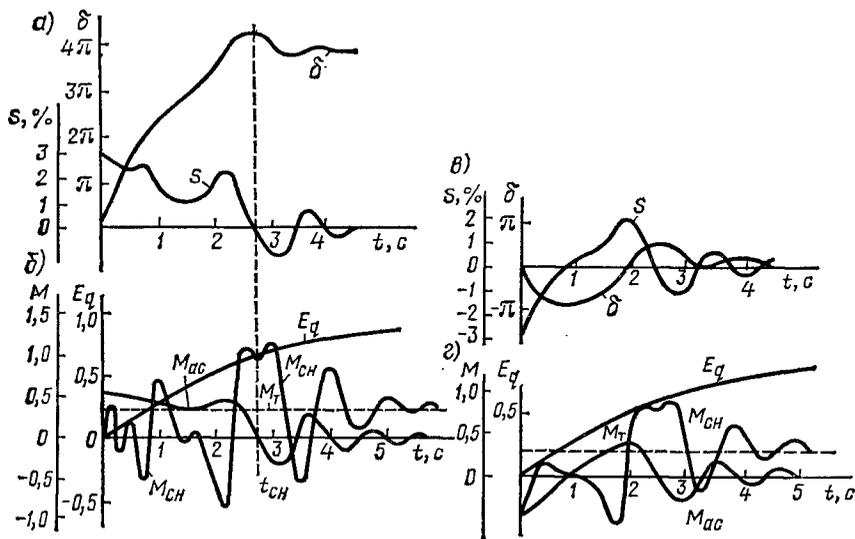


Рис. 13.5. Характер процесса самосинхронизации генератора $T_J = 15$ с; $M_T = 0,25$):

а — изменение угла и скольжения при включении со скоростью, большей синхронной ($s_0 = -3\%$, $\delta_0 \approx 45^\circ$); б — изменения M_{ac} , M_T , $M_{св}$, E_q в случае а; в — изменения угла и скольжения при включении со скоростью, меньшей синхронной ($s \approx +3\%$, $\delta_0 = 0$); г — изменения M_{ac} , M_T , $M_{св}$, E_q

Более полный анализ процесса втягивания в синхронизм, а также определение условий успешной синхронизации можно провести путем решения уравнений Парка — Горева. Это решение при тех или иных начальных условиях позволяет найти изменение угла ε . д. с. вращающего момента и тока при вхождении машины в синхронизм при самосинхронизации или ресинхронизации.

На рис. 13.5 приведены результаты решения указанных уравнений при исследовании процесса вхождения в синхронизм мощного синхронного генератора. Кривые, изображенные на рис. 13.5, *а*, *б*, относятся к случаю включения в сеть генератора при скольжении $s_0 \approx -3\%$, $\delta_0 \approx 45^\circ$ и подаче возбуждения одновременно с подключением машины к сети.

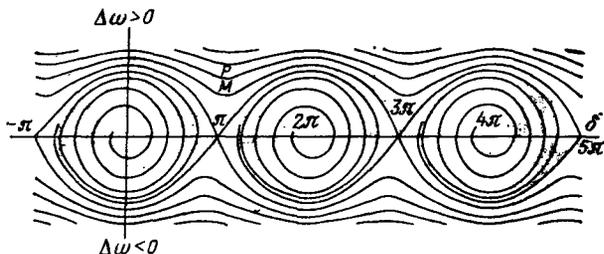
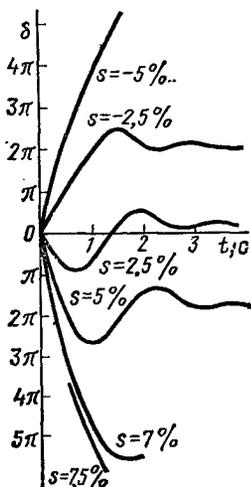


Рис. 13.7. Фазовый портрет синхронизации генератора с сетью

Рис. 13.6. Влияние знака и значения начального скольжения на процесс ресинхронизации генератора, имеющего $T_J = 16$ с, $M_T = 0,2$, $\delta_0 = 0$

Асинхронный момент при включении оказывается несколько больше механического, но ротор продолжает движение за счет избытка кинетической энергии, накопленной при вращении со скольжением s_0 . При анализе вхождения в синхронизм предполагалось, что после прохождения скольжения через нуль наступает синхронный режим и дальнейший анализ можно производить способом площадей. Аналитическое исследование вхождения в синхронизм показывает допустимость такого предположения, так как после прохождения скольжения через нуль асинхронный момент, не учитываемый в методе площадей, способствует удержанию машины в синхронизме, увеличивая затухание колебаний.

Обычно $M_T > 0$ и процесс при включении машины с положительным скольжением (скорость меньше синхронной) и одинаковыми по знаку механическим и асинхронным моментами имеет вид, показанный на рис. 13.5, *в*, *г*. Влияние начального скольжения иллюстрируется приведенными на рис. 13.6 характеристиками.

Сопоставление процесса синхронизации при включении с отрицательными и положительными скольжениями показывает, что более спокойное вхождение в синхронизм, сопровождающееся меньшим числом проворотов ротора, имеет место при включении со скоростью, меньшей синхронной.

Анализ вхождения в синхронизм можно также проводить с помощью рассмотрения процесса на фазовой поверхности (цилиндре) или на фазовой плоскости (δ , $\Delta\omega$). Рассмотрим случай синхронизации генератора, подключаемого к сети бесконечной мощности через сопротивление сети x_d . Если через $\Delta\omega$ обозначить относительную угловую скорость ротора генератора, то тангенс угла наклона траектории движения ротора на фазовой плоскости определится выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\Delta\omega}{d\delta} = \frac{1}{\Delta\omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{1}{T_J \Delta\omega} \left(-\frac{E'_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{U^2 (x_q - x'_d)}{2x_q x'_d} \sin 2\delta \right) - \frac{M_{ac}}{T_J \Delta\omega} \quad (13.5)$$

Таким образом, выражение (13.5) представляет собой уравнение касательной к фазовой кривой, построенной на фазовой плоскости. В (13.5) к реактивностям генератора должно добавляться индуктивное сопротивление сети.

Согласно принятой методике, расчет координат точек фазовых траекторий (рис. 13.7) ведется в определенной последовательности:

1) выбирается какая-либо точка с координатами $\delta_0, \Delta\omega_0$ и по формуле (13.5) определяется $\text{tg}\alpha_0$;

2) путь, проходимый ротором, разбивается на отрезки $\Delta\delta = 0,1$; тогда для следующей точки в верхней фазовой полуплоскости, в которой движение происходит только вправо, получаем

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta; \quad \Delta\omega_1 = \Delta\omega_0 + \Delta\delta \text{ tg}\alpha_0;$$

3) по δ_1 и $\Delta\omega_1$ находится $\text{tg}\alpha_1$, после чего определяются δ_2 и $\Delta\omega_2$ для следующей точки:

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta; \quad \Delta\omega_2 = \Delta\omega_1 + \Delta\delta \text{ tg}\alpha_1,$$

и т. д. Аналогично ведется расчет и для нижней фазовой полуплоскости, причем имеется в виду, что движение в ней происходит только влево.

§ 13.3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПУСК СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Разновидностью способа самосинхронизации является так называемый *электромеханический пуск*, при котором генератор в неподвижном состоянии подключают к сети, одновременно пуская первичный двигатель. При этом возбудитель генератора может быть наглухо присоединен к ротору, а устройства регулирования возбуждения должны находиться в таком состоянии, чтобы при скоростной, близкой к синхронной, генератор был возбужден и смог войти в синхронизм. В этом случае весь агрегат (турбина, генератор, возбудитель) развернется быстрее, так как на него кроме момента турбины будет действовать еще ускоряющий асинхронный момент генератора.

Ускорение пуска будет особенно заметным у генераторов, имеющих успокоительные контуры на роторе. Схема автоматики агрегата при таком пуске упрощается.

Явления, происходящие в генераторе при электромеханическом пуске, аналогичны явлениям при

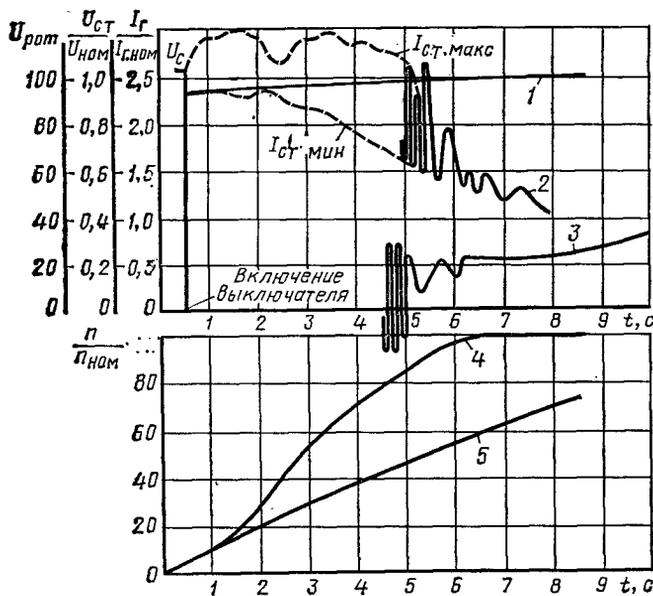


Рис. 13.8. Процессы при электромеханическом пуске гидрогенератора:

1 — напряжение сети U_c ; 2 — ток статора $I_{ст}$ и огибающие его максимальных $I_{ст, макс}$ и минимальных $I_{ст, мин}$ значений (штриховые); 3 — напряжение ротора $U_{рот}$; 4 — частота вращения $n/n_{ном}$ при электромеханическом пуске; 5 — то же, при нормальном пуске

асинхронном пуске синхронных двигателей с подключенным возбудителем. Электромеханический пуск пока применялся только на небольших необслуживаемых гидростанциях, так как быстрый пуск паротурбинных агрегатов не может быть допущен по режиму работы турбины. На рис. 13.8 приведены результаты обработки осциллограммы пуска гидравлического генератора мощностью 3,5 МВ·А.

§ 13.4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ С САМОСИНХРОНИЗАЦИЕЙ

При АПВ генератор отключался от сети на такое время, при котором изменение угла и скорости не могли быть настолько большими, чтобы произошло выпадение из синхронизма после обратного включения генератора в сеть. Это условие аналитически проверялось с помощью способа площадей. Кроме этого вида АПВ в эксплуатации вполне успешно применяются и другие. К ним относятся АПВ с самосинхронизацией (АПВС) и АПВ без контроля синхронизма (АПВБС), или несинхронное АПВ.

Для повторного включения отключившейся линии или части системы (рис. 13.9) обычно производится АПВС. Осуществляется оно в следующем порядке. При отключении ЛЭП на генераторах гасится поле; при этом генераторы могут отключаться от шин станции или оставаться присоединенными к ним. Спустя некоторое время, определяемое условиями работы системы, линия автоматически включается. Если за время, когда генераторы были отключены, повреждение самоликвидировалось, то начинается процесс восстановления нормальной работы: на шинах станции появляется напряжение, включаются выключатели генераторов, если они отключались, и после автоматического возбуждения (действия АГП) генераторы входят в синхронизм, т. е. после АПВ осуществляется самосинхронизация. В тех случаях, когда у станции, отключающейся от сети, имеется местная нагрузка, перерыв питания которой недопустим, необходимо часть генераторов станции выделить для питания нагрузки, а на другой части генератора провести восстановление связи с системой.

Порядок проведения АПВС устанавливается в зависимости от условий работы, наличия или отсутствия местной нагрузки, ее характера, схемы станции и т. п.

Возможны другие, не рассматриваемые здесь, более сложные операции по проведению АПВС, связанные с автоматическим переключением нагрузки, и т. д.

Анализ процесса может приближенно-качественно проводиться способом площадей, распространенным на случай больших изменений скорости.

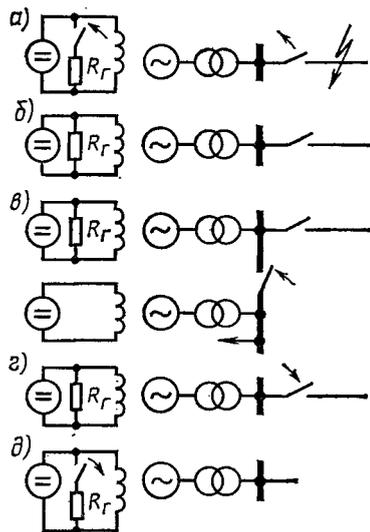


Рис. 13.9. Осуществление АПВС: а — режим при аварийном отключении ЛЭП при разомкнутом гасительном сопротивлении R_r ; б — гашение поля генератора, автоматически производится замыканием R_r при отключении линии; в — то же, что и б, но при выделении части генераторов для питания местной нагрузки; г — повторное включение генератора с погашенным полем, т. е. при $E_q \approx 0$ (без синхронного момента), и асинхронный ход; д — подача возбуждения (размыкание гасительного сопротивления) и входение в синхронизм

Связь станции с системой при АПВС проверяется на время, в течение которого угловая скорость генераторов, пройдя после сброса нагрузки через максимальное значение, снизится в связи с действием регулятора скорости до значения, близкого к первоначальному (точка 1 на рис. 13.10). Для гидростанций это время обычно составляет 15—30 с. Однако восстановление нормального режима можно ускорить повторным включением, проводимым при снижении напряжения на генераторах до 20—25% от номинального. Генераторы включаются при этом в сеть при довольно большом скольжении, иногда еще до достижения максимального значения скорости (точка 2 на рис. 13.10).

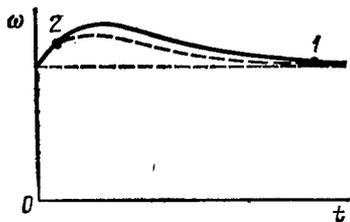


Рис. 13.10. Изменение угловой скорости гидрогенератора при сбросе нагрузки в результате воздействия регулятора скорости (сплошная кривая), регулятора и асинхронного момента (штриховая кривая)

даже установившегося значения быстрее, чем скольжение уменьшится до значений, при которых будет происходить вхождение генератора в синхронизм; между тем асинхронный ход генератора при включенном возбуждении допускать без надобности нежелательно по указанным ранее причинам.

АПВС проводится исходя из допустимой длительности перерыва связи гидростанции с системой, при этом учитываются местные условия, схема автоматизации, конструкции генераторов, наличие в них успокоительных контуров и т. д.

Для турбогенераторов АПВ без контроля скольжения обычно рекомендуется проводить сразу же, как только под действием гашения поля напряжение генератора уменьшится до значения, при котором токи в момент включения не будут опасны.

Обычно изменения скорости турбогенераторов бывают небольшими, а асинхрон-

При вращении со скоростью выше синхронной генераторы, отдавая асинхронную мощность, будут тормозиться быстрее, особенно если они имеют успокоительные обмотки. Время восстановления нормального режима, таким образом, резко сокращается.

Возбуждение на гидрогенераторах восстанавливают при небольшом скольжении (1—2%), когда скорость подходит к синхронной. Включать возбуждение раньше, например одновременно с включением генератора в сеть, не рекомендуется: ток возбуждения успеет увеличиться до большого или

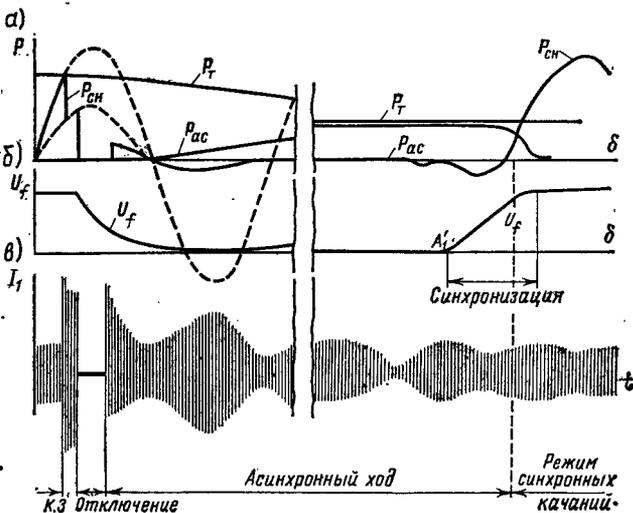


Рис. 13.11. Характер протекания процесса АПВС: а — изменение мощности в зависимости от изменения угла $P=f(\delta)$; б — изменение напряжения на обмотке возбуждения $U_f=f(\delta)$; в — изменение тока статора во времени; $I_1=f(t)$

ный момент достаточно велик. При этом после включения турбогенераторов в большинстве случаев не требуется вводить задержку включения возбуждения, хотя иногда и вводят небольшую выдержку времени (1—1,5 с).

Протекание процесса при АПВС показано на рис. 13.11. После короткого замыкания станция отключается и происходит выбег под действием мощности турбины P_T , постепенно уменьшающейся регуляторами скорости. В это время поле гасится, напряжение на генераторе уменьшается до малых значений. Затем генератор подключается к сети и работает как асинхронный. Рост асинхронной мощности и уменьшение мощности турбины приводят к тому, что скольжение падает и после подачи возбуждения (точка А) генератор входит в синхронизм.

§ 13.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ БЕЗ КОНТРОЛЯ СИНХРОНИЗМА

Дальнейшим упрощением повторного включения является применение АПВ без контроля синхронизма (АПВБС), которое в отличие от АПВС осуществляется без предварительного гашения поля. Благодаря этому АПВБС обладает рядом преимуществ: 1) дает возможность упростить устройства автоматики; 2) может применяться на станциях с местной нагрузкой, где гашение поля недопустимо по условиям работы нагрузки; 3) позволяет сократить время перерыва связи, так как во многих случаях по условиям вхождения в синхронизм нет необходимости дожидаться снижения угловой скорости выпавших генераторов до подсинхронной. Этот вид повторного включения появился на основе изучения опыта эксплуатации энергосистем и специальных аналитических и экспериментальных исследований, показавших, что включения несинхронно работающих станций или частей энергосистем не вызывают каких-либо аварий.

Применение несинхронных включений допускается, если возникающие максимальные моменты не превышают моментов, которые могут быть в машине при внезапном трехфазном коротком замыкании на ее зажимах и напряжении на 5% выше номинального. Такие моменты машина заведомо должна выдерживать. Возможность несинхронного включения можно проверить не только по значению возникающего вращающего момента. В качестве показателя допустимости этого включения можно принять возникающий при этом несинхронный ток $I_{нс}$. Для турбогенераторов допустимым является ток $I_{нс} = (0,625/x_d'')I_{ном}$, а для гидрогенераторов $I_{нс} = 3I_{ном}$, где $I_{ном}$ — номинальное значение. Определение $I_{нс}$ производится по сверхпереходному реактивному сопротивлению для случая включения при э. д. с. $E = 1,05$; $I_{нс. макс} \approx 2,1/x_{d\tau}''$.

В сложной системе кроме тока, протекающего через линию при несинхронном включении, необходимо определить распределение тока между станциями. Допустимость включения по приведенным выше условиям проверяется для каждой из станций.

Соотношение между моментами при несинхронном включении и коротком замыкании сильно зависит от соотношения между сопротивлением генератора x_d'' и сопротивлением сети x_c , к которой подключается генератор (внешнее сопротивление). Максимальные электромагнитные моменты обычно возникают у гидрогенераторов при включении с углом $\delta \approx 120 \div 135^\circ$, у турбогенераторов при включении с углом $\delta \approx 110 \div 120^\circ$. Несинхронные включения могут вызвать ложные действия некоторых видов защит, поэтому следует принимать меры для

предотвращения ложных отключений. Однако ложные действия защиты часто не вносят каких-либо расстройств в работу системы, если их погрешности могут устраняться действием АПВ на отключенных участках сети.

Пример 13.1. Генератор включается на параллельную работу с мощной электрической системой методом точной синхронизации.

Найти допустимые значения угловой скорости генератора при его включении из условий синхронизации в первом цикле качаний. Потери мощности холостого хода принять равными нулю.

Решение. Воспользуемся способом площадей. Так как синхронная машина возбуждена, то в момент включения она начинает или выдавать (генераторный режим), или потреблять

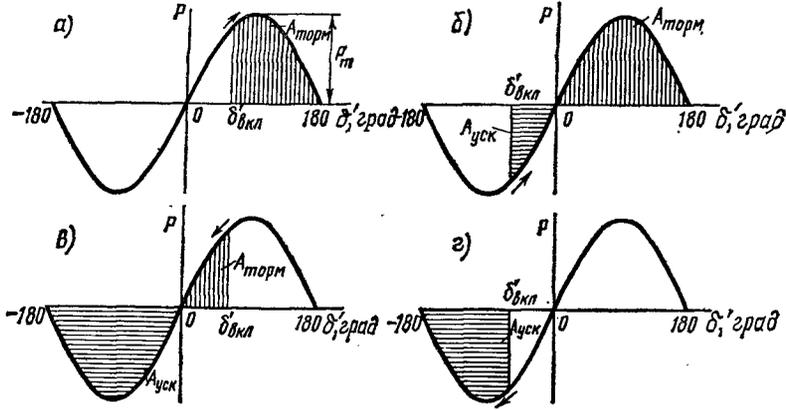


Рис. 13.12. Характеристики мощности синхронной машины

(двигательный режим) активную мощность. Характеристики мощности включаемой синхронной машины показаны на рис. 13.12. Для определения зависимости между угловой скоростью генератора и углом его включения рассмотрим четыре возможных случая:

1. $\Delta\omega > 0; 0^\circ < \delta'_{\text{вкл}} < 180^\circ$ (рис. 13.12, а).

При углах включения от 0 до 180° синхронная машина в момент включения начинает работать в режиме генератора. Для успешного включения необходимо, чтобы энергия торможения, пропорциональная площадке $A_{\text{торм}}$, была больше кинетической энергии, накопленной ротором в относительном движении, т. е. $A_{\text{торм}} \geq T_J \Delta\omega^2/2$;

$$A_{\text{торм}} = \int_{\delta'_{\text{вкл}}}^{180^\circ} P_m \sin \delta' d\delta' = P_m (1 + \cos \delta'_{\text{вкл}})$$

или

$$P_m (1 + \cos \delta'_{\text{вкл}}) \geq T_J \Delta\omega^2/2,$$

откуда

$$\Delta\omega = \sqrt{2P_m (1 + \cos \delta'_{\text{вкл}}) / T_J}.$$

2. $\Delta\omega > 0; -180^\circ < \delta'_{\text{вкл}} < 0^\circ$ (рис. 13.12, б).

При углах включения от -180° до 0° синхронная машина в момент включения начинает работать двигателем с потребляемой мощностью $P = P_m \sin \delta'_{\text{вкл}}$. Мощность, потребляемая синхронной машиной, расходуется на ускорение ротора. Таким образом, для успешной синхронизации энергия торможения, определяемая площадкой торможения $A_{\text{торм}}$, должна быть больше суммы кинетической энергии ротора синхронной машины перед включением и энергии, определяемой площадкой ускорения $A_{\text{уск}}$.

Связь между углом включения и предельной угловой скоростью ротора может быть получена из выражения

$$T_J \Delta \omega^2 / 2 + A_{\text{уск}} \leq A_{\text{торм}}$$

3. $\Delta \omega < 0$; $0^\circ < \delta'_{\text{вкл}} < 180^\circ$ (рис. 13.12, в).

При углах включения от 0 до 180° синхронная машина в момент включения начинает работать генератором и выдавать активную мощность $P = P_m \sin \delta'_{\text{вкл}}$. Связь между углом включения и предельной угловой скоростью ротора может быть получена из выражения

$$T_J \Delta \omega^2 / 2 + A_{\text{торм}} \leq A_{\text{уск}}$$

4. $\Delta \omega < 0$; $-180^\circ < \delta'_{\text{вкл}} < 0$ (рис. 13.12, з).

При углах включения от -180° до 0° синхронная машина в момент включения начинает работать двигателем и потреблять активную мощность $P = P_m \sin \delta'_{\text{вкл}}$. Связь между углом включения и предельной угловой скоростью ротора может быть получена из выражения

$$T_J \Delta \omega^2 / 2 \leq A_{\text{уск}}$$

В качестве примера рассмотрим включение синхронной машины при $\Delta \omega > 0$. Угол включения меняется от 0 до 180° (случай 1). Параметры электропередачи:

$x_c = 2,49$; $U_c = 1$; $E' = 1$; $T_J = 10$ с. Максимум угловой характеристики синхронной машины

$$P_m = E' U_c / x_c = 1 \cdot 1 / 2,49 = 0,402.$$

При $\delta'_{\text{вкл}} = 0^\circ$

$$\Delta \omega = \sqrt{2 \cdot 0,402 (1 + \cos 0^\circ) / (10 \cdot 314)} = 0,023.$$

Допустимое скольжение синхронной машины $s = +2,3\%$. Для других углов включения имеем:

$\delta'_{\text{вкл}}$, град	45	90	135	180
s , %	2,1	1,6	1,0	0,0

На рис. 13.13 приведена кривая допустимых скольжений в функции углов включения.

Исследуем процессы синхронизации по полным уравнениям. Расчеты, проведенные с начальными условиями, соответствующими моменту синхронизации, с учетом действия регулятора скорости дают следующий результат: при включении генератора в сеть со скольжением, составляющим 5% (рис. 13.14, а), происходят изменения кривых статорного тока $I_{с.г}$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$, угла рассогласования δ , скольжения $s = \omega_0 - \omega_{с.г}$, момента M_T , развиваемого турбиной. Анализ характера изменения угла рассогласования δ показывает, что процесс синхронизации будет успешным, хотя после включения синхронного генератора в сеть из-за наличия скольжения угол δ растет до значения 2,47 рад, но далее убывает, что и приводит в дальнейшем к втягиванию генератора в синхронизм. Так как в момент включения $\delta = 0$, а напряжения сети и генератора равны по модулю, то после включения броска тока не возникает.

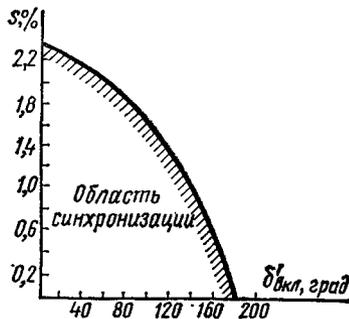


Рис. 13.13. Кривая допустимых скольжений в функции углов включения

На рисунке приведены результаты расчета синхронизации при включении в сеть генератора с углом рассогласования 1,57 рад при равенстве скоростей ω_0 и $\omega_{с.р.}$. Такое включение приводит к возникновению электромагнитных переходных процессов, что сказывается на характере изменения тока I и электромагнитного момента $M_{эм}$.

Приближенную оценку опасности процесса синхронизации можно дать, предполагая,

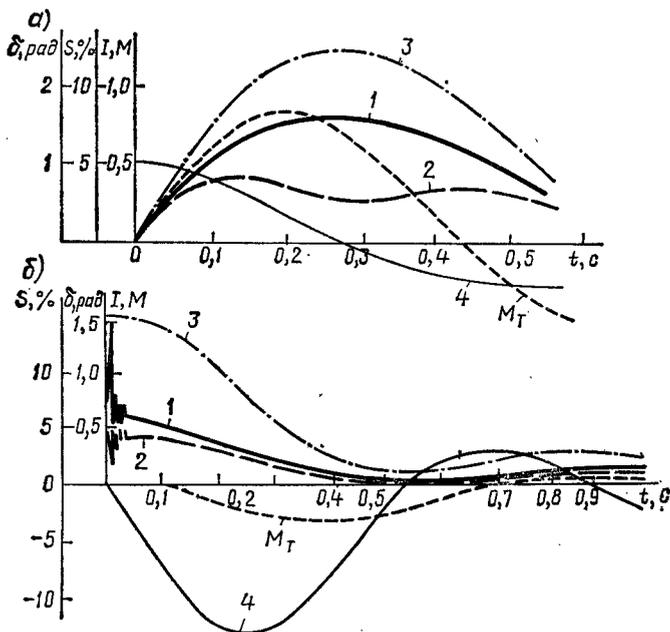


Рис. 13.14. Характер изменения кривых статорного тока I_r (1), электромагнитного момента $M_{эм}$ (2), угла рассогласования δ (3) и скольжения s (4) при включении $СГ$ в сеть бесконечной мощности:

а — при $\delta=0$, $s=5\%$; б — при $\delta=1,57$ рад, $s=0$

что включение происходит при расхождении векторов напряжения сети и генератора на величину ΔU . Тогда ток в момент включения определится как

$$I = \Delta U / z,$$

где z — сопротивление машины.

Учитывая, что активное сопротивление обычно мало, в знаменатель приведенного выше выражения вместо z подставим x_d'' (сверхпереходное сопротивление). При отсутствии демпферной обмотки сопротивление машины следует считать равным переходному сопротивлению x_d' . Из такой приближенной оценки можно сделать заключение, что при внезапном коротком замыкании

$$I = U / x_d''.$$

Используя систему относительных единиц и полагая, что $U = 1$ для генератора с параметрами $x_d'' = 0,131$, будем иметь $I = 1/0,131 = 7,637$. В предельном случае ошибочный синхронизации при $\Delta U = 2U$ ток в два раза будет превышать полученное значение. Электродинамические силы в обмотке, пропорциональные квадрату тока, будут в четыре раза больше, чем при внезапном коротком замыкании, что может привести к разрушению обмотки статора.

Пример 13.2. ЛЭП напряжением 110 кВ связывает станцию с приемной системой большой мощности (рис. 13.15, а). На шинах 110 кВ станции включена нагрузка H . Параметры генератора $\Gamma_1: S = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $x_d'' = 0,125$; генератора $\Gamma_2: S = 7,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $x_d'' = 0,125$; трансформатора $T_1: S = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $u_{\text{к}} = 10,5\%$; трансформатора $T_2: S = 7,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $u_{\text{к}} = 7,5\%$; ЛЭП: $l = 200 \text{ км}$, $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$; нагрузки $H: P_{\text{н}} = 35 \text{ МВт}$, $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,85$.
 Определить возможность применения несинхронного АПВ на выключателе B .

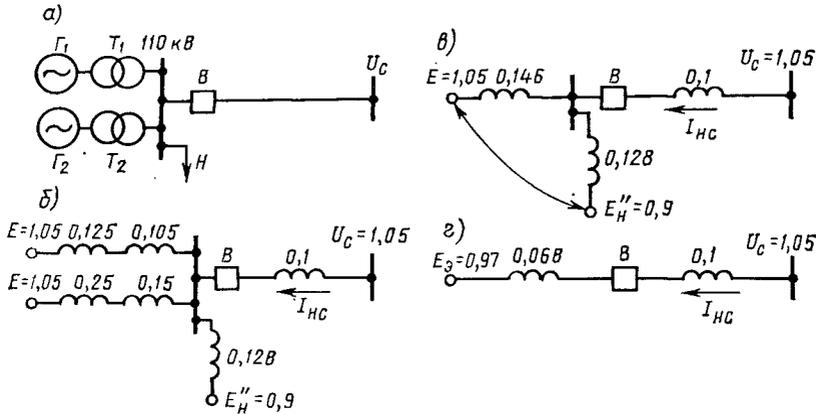


Рис. 13.15. Система и ее схемы замещения:
 а — исходная схема; б, в — схемы преобразования; г — расчетная

Решение. На рис. 13.15, б изображена схема замещения системы с указанием параметров отдельных элементов, приведенных к одной ступени по номинальным напряжениям и отнесенных к базисной мощности $S_{\text{б}} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. При этом нагрузка введена сопротивлением $x_{\text{н}} = 0,128$ и э. д. с. $E_{\text{н}}'' = 0,9$.

Первоначально определим ток несинхронного включения без учета нагрузки. Максимальное значение периодической слагающей тока несинхронного включения (рис. 13.15, в)

$$I_{\text{НС}} = (E + U) / x_{\Sigma} = 2,1 / 0,246 = 8,55,$$

где

$$x_{\Sigma} = \frac{(0,125 + 0,105)(0,25 + 0,15)}{0,125 + 0,105 + 0,25 + 0,15} + 0,1 = 0,146 + 0,1 = 0,246.$$

Токи несинхронного включения в генераторах Γ_1 и Γ_2 :

$$I_{\text{НС1}} = 8,55 (0,4 / 0,63) I_{\text{НОМ}} = 5,45 I_{\text{НОМ}}; \quad I_{\text{НС2}} = 8,55 (0,23 / 0,63) (15 / 7,5) I_{\text{НОМ}} = 6,3 I_{\text{НОМ}}.$$

Токи несинхронного включения в трансформаторах T_1 и T_2 имеют те же значения, что и для генераторов Γ_1 и Γ_2 . Допускаемые токи в генераторах и трансформаторах:

$$I_{\Gamma \text{ доп}} = (0,625 / 0,125) I_{\text{НОМ}} = 5 I_{\text{НОМ}}; \quad I_{T_1 \text{ доп}} = (100 / 10,5) I_{\text{НОМ}} = 9,5 I_{\text{НОМ}};$$

$$I_{T_2 \text{ доп}} = (100 / 7,5) I_{\text{НОМ}} = 13,3 I_{\text{НОМ}}.$$

Таким образом, токи несинхронного включения в генераторах Γ_1 и Γ_2 превышают допустимые. Уточним решение, проводя дополнительный расчет с учетом нагрузки. Найдем эквивалентное сопротивление ветвей генераторов и нагрузки, а также соответствующую э. д. с. (рис. 13.15, г):

$$x_{\text{э}} = 0,128 \cdot 0,146 / 0,274 = 0,068; \quad E_{\text{э}} = 1,05 \cdot 0,068 / 0,146 + 0,9 \cdot 0,068 / 0,128 = 0,97.$$

$$x_{\Sigma} = 0,068 + 0,1 = 0,168.$$

Ток несинхронного включения

$$I_{\text{НС}} = (0,97 + 1,05)/0,168 = 12.$$

Ток в цепи генераторов при $\Delta E = E - E_{\text{н}}'' = 0,15$

$$I_{\Gamma} = (I_{\text{НС}} x_{\text{н}} + \Delta E) / (x_{\text{н}} + x_{\text{дГ}}'') = (12 \cdot 0,128 + 0,15) / (0,128 + 0,146) = 6,15.$$

Распределение тока $I_{\text{НС}}$ в ветвях генераторов:

$$I_{\text{НС Г1}} = 6,15 (0,4/0,63) \quad I_{\text{НОМ}} = 3,9 / I_{\text{НОМ}}; \quad I_{\text{НС Г2}} = 6,15 (0,23/0,63) (15/7,5) \quad I_{\text{НОМ}} = 4,5 / I_{\text{НОМ}}.$$

Таким образом, уточненный расчет с учетом влияния нагрузки показывает, что несинхронное АПВ в данном случае допустимо.

Пример 13.3*. Генератор включается на мощную сеть несинхронно.

О п р е д е л и т ь значения моментов.

Решение. Выражение электромагнитного момента при несинхронном включении имеет [4, 6, 17] следующий вид:

$$M_{\text{НС}} = U^2 \frac{x_q'' - x_d''}{x_q'' x_d''} \left\{ \sin(2\delta_0 + t) - \frac{1}{2} \sin 2(\delta_0 + t) - \frac{1}{2} \sin 2\delta_0 \right\} + \\ + E^2 \left\{ \frac{1}{x_q''} \sin t - \frac{1}{2} \frac{x_q'' - x_d''}{x_q'' x_d''} \sin 2t \right\} + UE \left\{ \frac{1}{x_d''} [\sin \delta_0 - \sin(\delta_0 + t)] - \right. \\ \left. - \frac{x_q'' - x_d''}{x_q'' x_d''} [\sin(\delta_0 + t) - \sin(\delta_0 + 2t)] \right\}. \quad (13.6)$$

Для оценки моментов и определения влияния различных факторов на характер изменения моментов при несинхронных включениях по выражению (13.6) проведем расчеты для гидрогенераторов с успокоительными и без успокоительных контуров. Результаты расчетов для гидрогенераторов с успокоительными контурами при включениях с различными начальными углами ($\delta_0 = 90, 135$ и 180°) и при $x_{\text{вн}} = 0, U = 1,0$ и $E = 1,5$ представлены на рис. 13.16. Очевидно, что наибольшего значения момент достигает при несинхронном включении с углом $\delta_0 = 135^\circ$ и составляет для рассмотренного гидрогенератора $M_{\text{НС}}/M_{\text{НОМ}} = 23$. При включении с углом $\delta_0 = 180^\circ$ максимальная кратность момента составляет $M_{\text{НС}}/M_{\text{НОМ}} = 20$.

Наличие внешнего сопротивления в цепи статора резко снижает момент. Рис. 13.17 показывает изменения электромагнитного момента того же гидрогенератора с успокоительными контурами при наиболее неблагоприятных условиях несинхронного включения ($\delta_0 = 135^\circ, U = 1; E = 1,5$) и при различных значениях внешнего реактивного сопротивления ($x_{\text{вн}} = 0,2, 0,4, 0,6$). Как видно из рис. 13.17, при $x_{\text{вн}} = 0,2$ максимальная кратность момента при несинхронном включении снижается более чем на 50%, т. е. с величины $M_{\text{НС}}/M_{\text{НОМ}} = 23$ при $x_{\text{вн}} = 0$ до $M_{\text{НС}}/M_{\text{НОМ}} = 11$ при $x_{\text{вн}} = 0,2$. При дальнейшем увеличении $x_{\text{вн}}$ кратность момента также снижается, но не так резко. Так, например, при $x_{\text{вн}} = 0,4$ значение $M_{\text{НС}}/M_{\text{НОМ}} = 7,5$.

На рис. 13.18 приведены результаты расчетов максимальных моментов, возникающих в гидрогенераторах, при включениях с различными начальными углами от $\delta_0 = 30^\circ$ до $\delta_0 = 360^\circ$ и при различных внешних сопротивлениях связи с системой, выполненных по выражению (13.6). Рис. 13.19 представляет результаты аналогичных расчетов для гидрогенера-

* См.: Хачатуров А. А. Несинхронное АПВ, асинхронный режим и ресинхронизация в энергетических системах. — М.: ВЭПИ, 1966, с. 147.

тора и турбогенератора при включениях с малыми углами от $\delta_0 = 0$ до $\delta_0 = 40^\circ$. Как видно из рис. 13.19, даже при включениях с $\delta_0 = 0$ моменты в генераторе могут достигать больших значений, чем номинальный момент. Последнее вызвано тем, что включение генераторов происходит при значениях $E > 1$.

Штриховой линией на рис. 13.18 и 13.19 показаны максимальные значения моментов при коротком замыкании на шинах генераторов ($M_K/M_{ном}$), определенные на основании из-

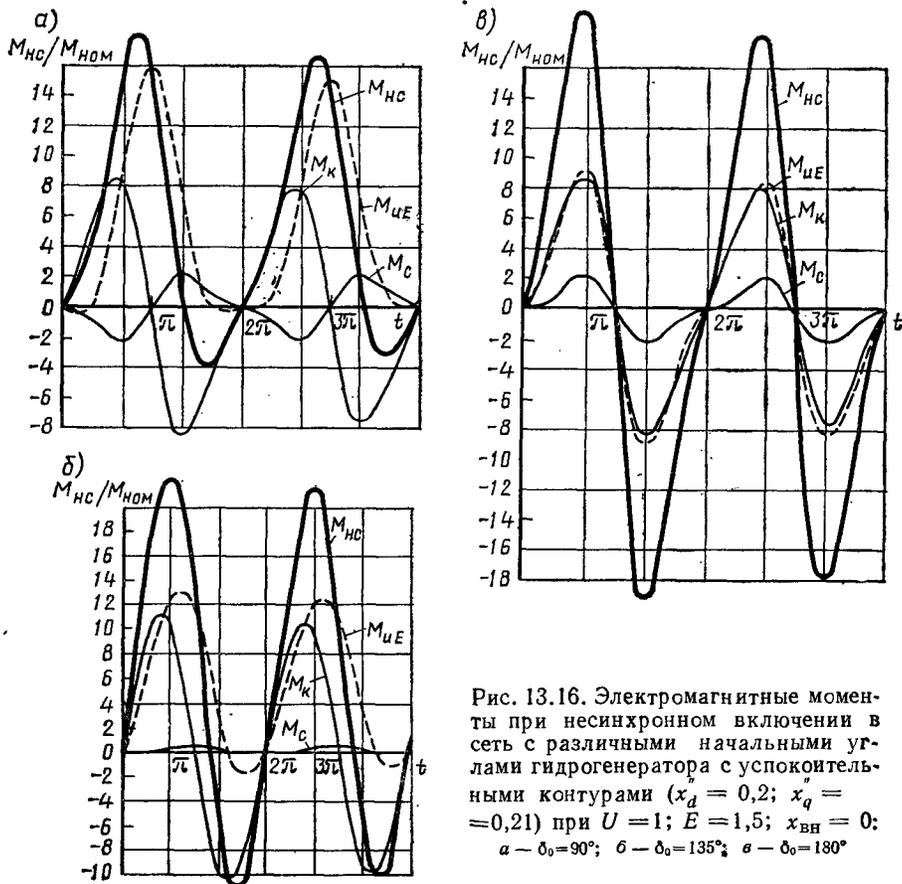


Рис. 13.16. Электромагнитные моменты при несинхронном включении в сеть с различными начальными углами гидрогенератора с успокоительными контурами ($x_d = 0,2$; $x_q = 0,21$) при $U = 1$; $E = 1,5$; $x_{вн} = 0$:
 а - $\delta_0 = 90^\circ$; б - $\delta_0 = 135^\circ$; в - $\delta_0 = 180^\circ$

вестного выражения электромагнитного момента, возникающего при трехфазном коротком замыкании на шинах генератора с успокоительными контурами, без учета затухания свободных токов:

$$M_K = E_d^{*2} \left(\frac{1}{x_d''} \sin t - \frac{1}{2} \frac{x_q'' - x_d''}{x_q'' x_d''} \sin 2t \right).$$

Расчеты электромагнитных моментов выполнялись без учета затухания аperiodической слагающей тока статора. Исследования показали, что при несинхронном включении на момент существенно влияет учет затухания аperiodической слагающей тока в статоре [17]. При учете активного сопротивления внешней цепи генератора $r = r_r + r_{вн}$ постоянная времени затухания аperiodической слагающей тока в статоре T_a уменьшается примерно в 10—

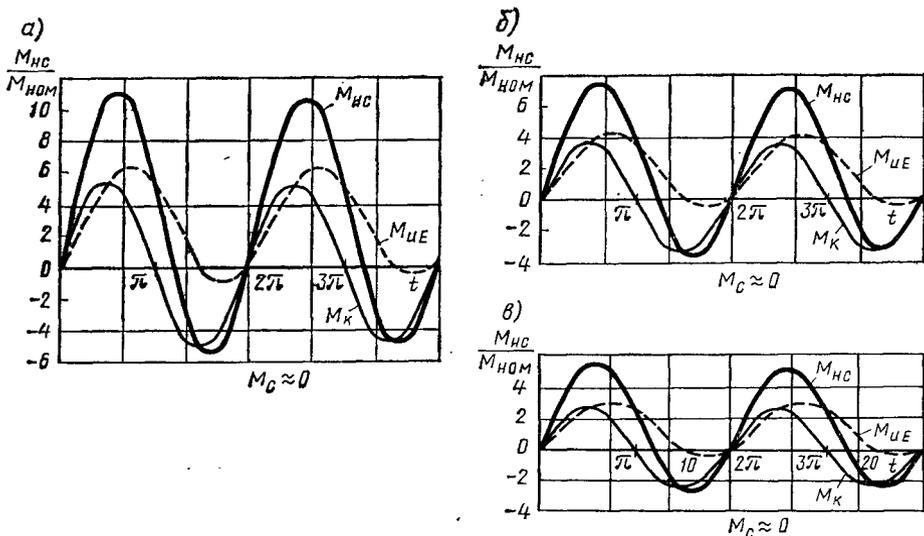


Рис. 13.17. Электромагнитные моменты при несинхронном включении в сеть с начальным углом $\delta_0 = 135^\circ$ гидрогенератора с успокоительными контурами ($x'_d = 0,2$; $x''_d = 0,21$) при $U = 1$, $E = 1,5$:

а — $x_{вн} = 0,2$; б — $x_{вн} = 0,4$; в — $x_{вн} = 0,6$

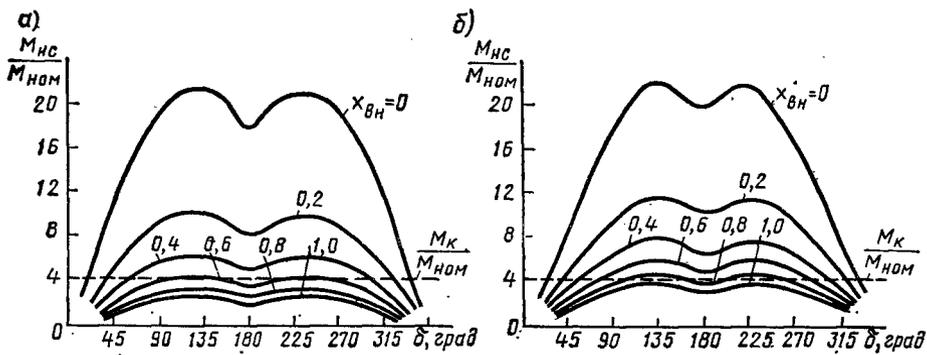


Рис. 13.18. Изменение максимальных электромагнитных моментов гидрогенераторов при включениях с различными начальными углами и внешними реактивными сопротивлениями ($U = 1,0$; $E = 1,5$):

а — гидрогенератор с успокоительными контурами $x'_d = 0,2$; $x''_d = 0,21$; б — гидрогенератор без успокоительных контуров $x'_d = 0,282$; $x''_d = 0,585$

20 раз. В связи с этим заметно уменьшается максимальное значение электромагнитного момента генератора.

Примечание. В настоящем примере кроме общепринятых употребляются обозначения: $M_{НС}$ — электромагнитный момент несинхронного включения; M_C — электромагнитный момент, возникающий при включении в сеть неизбужденного генератора; $M_{К}$ — электромагнитный момент, возникающий при коротком замыкании; $M_{УЕ}$ — электромагнитный момент,

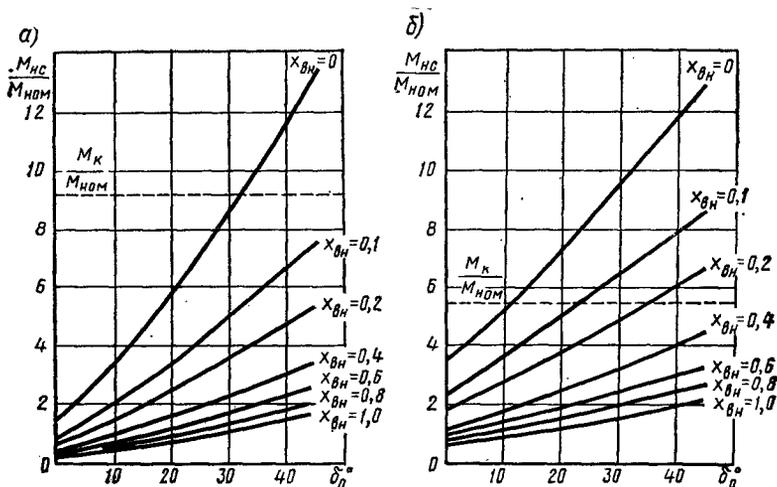


Рис. 13.19. Максимальные электромагнитные моменты, возникающие при включениях с малыми углами при различных $x_{вн}$:

а — гидрогенератор с успокоительными контурами $x''_d=0,2$; $x''_q=0,21$; $U=1,0$; $E=1,5$;

б — турбогенератор $x''_d=0,125$; $x''_q=0,18$; $U=1,0$; $E=1,2$

обусловленный напряжением сети U и возбуждением генератора E ; T_a — постоянная времени затухания аperiodической слагающей тока статора.

Контрольные вопросы

- 13.1. Назовите основные способы подключения генератора к сети.
 - 13.2. В чем заключаются общие требования при подключении генератора?
 - 13.3. Перечислите особенности точной синхронизации и самосинхронизации. Условия их проведения.
 - 13.4. В чем преимуществна самосинхронизации?
 - 13.5. Каковы физические процессы при самосинхронизации?
- Как устранить возможность неудачной самосинхронизации?
- 13.6. Назовите методы расчета и исследования условий самосинхронизации.
 - 13.7. Как производится электромеханический пуск синхронных генераторов и двигателей?
 - 13.8. В каких случаях самосинхронизация нежелательна и предпочтительнее точная синхронизация?
 - 13.9. Каково назначение несинхронного автоматического повторного включения?
 - 13.10. Каков порядок проведения операций при автоматическом повторном включении самосинхронизацией?
 - 13.11. Характер процесса автоматического повторного включения самосинхронизацией.
 - 13.12. Назовите возможности и условия целесообразного применения автоматического повторного включения без контроля синхронизма.

Темы рефератов

1. Исследование синхронизации по полным уравнениям.
2. Исследование самосинхронизации.
3. Опасность процессов синхронизации и самосинхронизации.

УЛУЧШЕНИЕ РЕЖИМОВ. АСИНХРОННЫЕ РЕЖИМЫ,
РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

§ 14.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Практически важное значение имеют режимы работы электрических систем при больших отклонениях угловой скорости роторов генераторов или двигателей от синхронной. К таким режимам, например, относятся: работа синхронной машины на шины, где скорость ω_0 отлична от скорости ω этой машины; ресинхронизация после нарушения устойчивости; самосинхронизация генераторов, автоматическое повторное включение с самосинхронизацией (АПВС) или без контроля синхронизма (АПВБС); асинхронный пуск двигателей и компенсаторов; самозапуск двигателей. Все эти режимы, по различным причинам возникающие в системе, называются *асинхронными*. Для асинхронных режимов характерно периодическое изменение вектора э. д. в. хотя бы одной станции системы* на угол, больший 360° . Эта станция называется *работающей* или *идущей асинхронно* (асинхронный ход или асинхронный режим).

На рис. 14.1, а показано, как меняется положение вектора э. д. с. E одной из станций системы при больших качаниях, когда вектор перемещается из положения 1 в положение 2, и при асинхронном ходе этой станции, когда из положения 1 вектор перемещается в положение 3, «обогнав» вектор напряжения U . На рис. 14.1, б, в показано, что мощность синхронной машины, обусловленная ее возбуждением (синхронная мощность), меняется в зависимости от угла δ и времени примерно по синусоидальному закону. Для больших качаний (в отличие от асин-

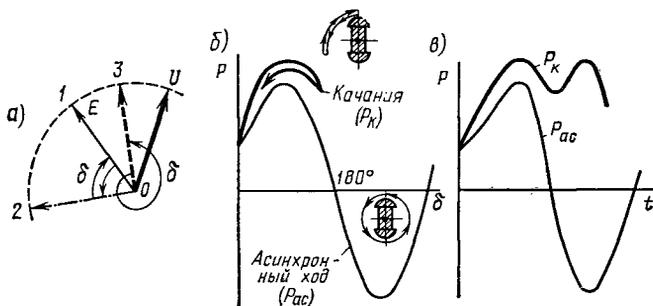


Рис. 14.1. К определению асинхронного хода

* В сложных системах, содержащих несколько станций, признаком асинхронного хода будет изменение угла какой-либо станции (k) по отношению к любой другой станции (n) на угол $\delta_{kn} > \pm 360^\circ$.

хронного хода) характерен провал в зависимости $P = f(t)$, появляющийся при переходе угла δ за 90° . Для асинхронного хода характерно именно периодическое изменение знака синхронной мощности (рис. 14.1, в).

При асинхронном ходе и скорости больше синхронной генератор, работая как асинхронный, выдает активную мощность, называемую *асинхронной*.

Если бы генератор был идеально симметричен, то асинхронная мощность при данном скольжении была бы постоянной. Наличие несимметрии (явнополус-

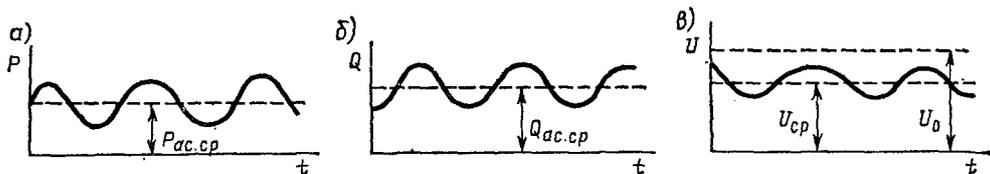


Рис. 14.2. Изменение активной (а) и реактивной (б) асинхронной мощности и напряжения (в) при постоянном среднем скольжении

ность, одноосная обмотка возбуждения и т. д.) приводит к тому, что асинхронная мощность пульсирует около некоторого среднего значения — средней асинхронной мощности (рис. 14.2). Средняя асинхронная мощность* (средний асинхронный момент) зависит от типа, конструкции генератора и от среднего скольжения. Типовые зависимости среднего момента от скольжения показаны на рис. 14.3. Во время асинхронного хода изменяется не только мощность P , но и токи статора I и ротора $I_r = E_q$, а также результирующее потокоцепление обмотки возбуждения — э. д. с. E'_q . Э. д. с. E_q и E'_q пульсируют около некоторого среднего значения (рис. 14.4).

В первом приближении можно считать, что в начале установившегося асинхронного режима ток, активная и реактивная мощности определяются значением э. д. с. E_q исходного режима, если выпадение из синхронизма генератора, не имеющего регулятора возбуждения, происходило медленно. Если генератор имеет регулятор возбуждения, поддерживающий постоянство результирующего потокоцепления с обмоткой возбуждения, или выпадение произошло в результате резкого возмущения (например, короткого замыкания), то можно грубо полагать, что параметры установившегося асинхронного режима определяются э. д. с. E'_{q0} , отвечающей исходному режиму. Указанные рекомендации очень приближены, и с их помощью можно получить только ориентировочные результаты. Достаточно простой, обоснованной и точной в смысле совпадения с экспериментом методики пока нет.

Все рассуждения относились к асинхронному режиму одного генератора. Однако в сложных электрических системах могут быть два случая, когда из синхронизма на станции одновременно выходят несколько генераторов или несколько станций. При анализе эта группа генераторов заменяется одним эквивалентным. Разумеется, такая замена может быть сделана довольно приближенно при соблюдении ряда условий и прежде всего при условии, что пара-

* Асинхронные моменты и мощность принимаются равными, если частота сети $\omega \approx \omega_0$. Внутренняя мощность и момент асинхронно работающего синхронного генератора различаются.

метры всех объединяемых генераторов и их удаленность от узловой точки примерно одинаковы. Постоянная инерции эквивалентного генератора в этом случае находится, как обычно, суммированием приведенных к базисной мощности постоянных инерции отдельных генераторов ($T_{Jэ} = \Sigma T_J$). Момент эквивалентного генератора принимается равным сумме моментов объединяемых генераторов ($Mэ = \Sigma M$). Существенное влияние на асинхронный ход оказывает регулятор ско-

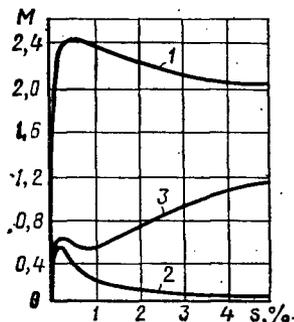
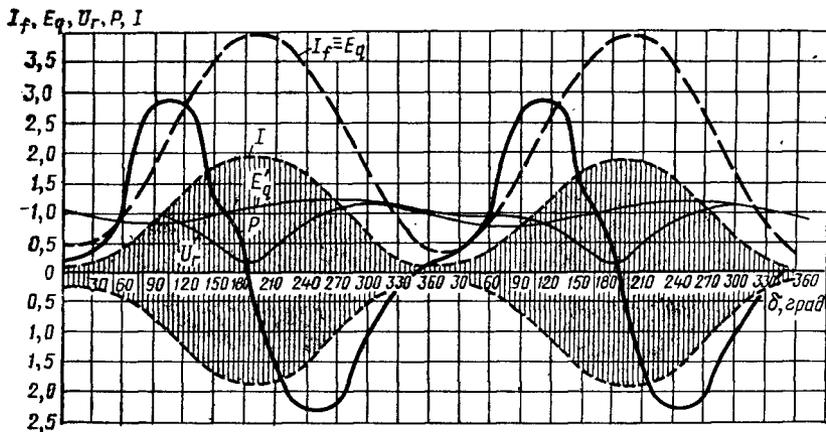


Рис. 14.3. Средние асинхронные моменты синхронных генераторов различных типов: 1 — турбогенератора; 2 — гидрогенератора без успокоительных обмоток; 3 — гидрогенератора с успокоительными обмотками

Рис. 14.4. Изменение параметров режима генератора при асинхронном ходе:

E_q — э. д. с., пропорциональная току возбуждения; E'_q — переходная э. д. с.; P — активная мощность; I — огибающие тока статора; U_r — напряжение на шинах генератора



рости. Для регулятора скорости эквивалентного генератора рекомендуется принять средневзвешенное значение соответствующих параметров серводвигателей и регуляторов, установленных на эквивалентируемых генераторах: эквивалентная постоянная серводвигателей

$$T_{эз} = (T_{s1}P_1 + T_{s2}P_2 + T_{s3}P_3 + \dots + T_{sn}P_n) / \sum_1^n P; \quad (14.1)$$

эквивалентный коэффициент неравномерности

$$\sigma_э = (\sigma_1P_1 + \sigma_2P_2 + \dots + \sigma_nP_n) / \sum_1^n P. \quad (14.2)$$

Ряд проведенных исследований показал, что эквивалентирование для расчетов первого приближения дает практически удовлетворительные результаты. Так, например, для двух генераторов, замененных одним эквивалентным, на рис. 14.5 показано, что погрешность, получающаяся из-за эквивалентирования, невелика даже при довольно большом несовпадении параметров (T_s и σ) объединяемых генераторов.

§ 14.2. ВОЗНИКНОВЕНИЕ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА

Причины появления асинхронного режима генератора или части системы (группы генераторов) могут быть различными. Его может вызвать исчезновение (потеря) возбуждения (рис. 14.6), нарушение динамической устойчивости после резкого возмущения — толчка (рис. 14.7) или нарушение статической устойчивости сильно перегруженной системы при малом возмущении (рис. 14.8).

В сложной системе могут быть случаи, когда асинхронный ход, возникший в одной части системы, может привести к выпадению из синхронизма какого-либо генератора или группы генераторов (рис. 14.9). В первом случае генератор работает только как асинхронный, во втором, третьем и четвертом случаях при возбуждении генератор наряду с асинхронной мощностью выдает также пульсирующую асинхронную мощность.

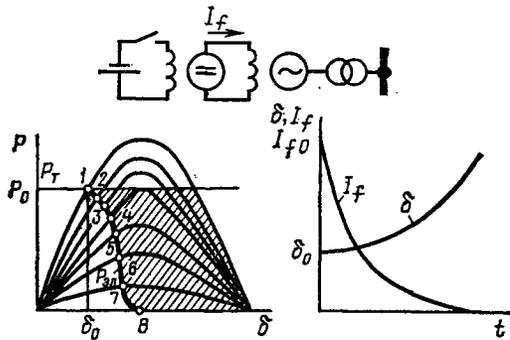


Рис. 14.6. Потеря возбуждения и переход на асинхронный режим:

1—8 — постепенно уменьшающаяся характеристика мощности с уменьшением тока возбуждения I_f при отключении возбудителя

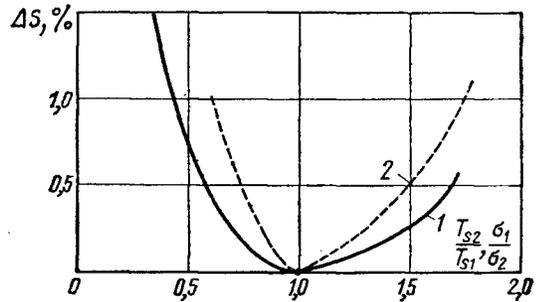
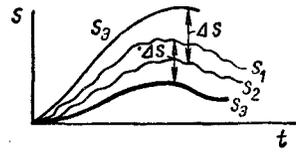


Рис. 14.5. Погрешность (по абсолютному значению) в скольжении при эквивалентировании двух асинхронно работающих генераторов с одинаковыми параметрами, отличающимися значениями σ (кривая 1) или T_s (кривая 2)

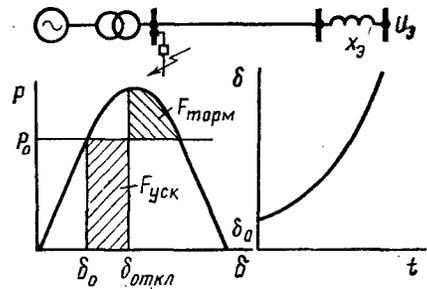


Рис. 14.7. Переход на несинхронный режим в результате нарушения динамической устойчивости (площадка ускорения больше площадки торможения)

Для большинства синхронных машин асинхронный ход не представляет опасности. Турбогенераторы в асинхронном режиме могут развивать мощность, измеримую с номинальной. При скольжениях порядка десятых долей процента, при которых устанавливается асинхронный режим турбогенераторов, токи, как правило, не представляют какой-либо опасности для машины*.

Допустимость асинхронного режима может вызывать сомнения в связи с опасностью нарушения устойчивости остальной части системы, в которой мощ-

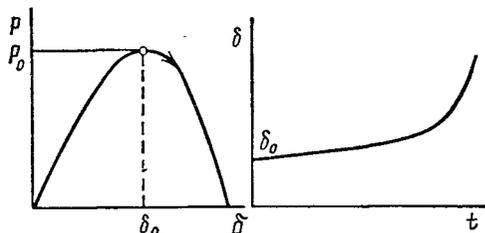


Рис. 14.8. Переход на асинхронный режим в результате нарушения статической устойчивости при $P_0 = P_{\max}$

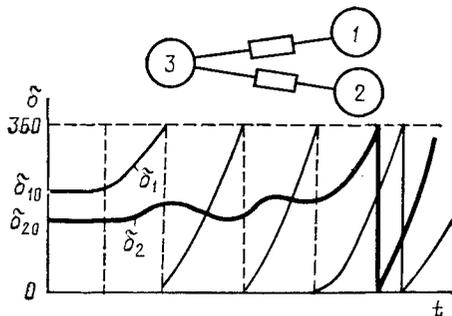


Рис. 14.9. Выпадение из синхронизма станции 1 и последующее раскачивание станции 2 с выпадением ее из синхронизма

ный генератор или группа генераторов работает асинхронно. В этом режиме генератор обычно поглощает из системы значительную реактивную мощность, что может приводить к снижению напряжения во всей системе, создавая опасность нарушения устойчивости остальных генераторов и двигателей. Однако правильным выбором источников реактивной мощности и регулирующих устройств можно добиться такого положения, когда опасность аварии такого рода станет маловероятной.

Можно восстанавливать нормальную работу системы, не отключая от сети выпавший из синхронизма генератор, но оставляя его на некоторое время в асинхронном режиме и затем заставляя снова войти в синхронизм. При этом система сохраняет устойчивость, так как в конечном счете нормальный синхронный режим восстанавливается и нарушения энергоснабжения потребителей не происходит. Однако асинхронный режим, не являющийся для системы нормальным, не должен осуществляться без проверки.

В сущности, все инженерные исследования асинхронного режима и направлены на выяснение его допустимости, его длительности и путей ликвидации, т. е. ускорения вхождения в синхронизм. Исходная схема системы, применительно к которой будет рассматриваться асинхронный режим, показана на рис. 14.10, а, векторная диаграмма — на рис. 14.10, б. Здесь предполагается, что при некотором значении угла $\delta = \delta_0$ угловая скорость вектора E изменяется и становится

* Имеется в виду работа турбогенератора через малое сопротивление $x_{вн}$ на шины неизменного напряжения. При больших $x_{вн}$ и больших скольжениях требуется дополнительная проверка.

равной ω (вместо ω_0). Модуль вектора $E_\omega = E(\omega)$, угол $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$. Здесь $\Delta\delta = st$, где s — скольжение:

$$s = (1/\omega_0)(d\delta/dt) = (\omega - \omega_0)/\omega_0 = \omega_* - 1. \quad (14.3)$$

В возникающем при нарушении устойчивости переходном процессе можно выделить три этапа: 1) выпадение из синхронизма; синхронные качания; 2) переход к асинхронному режиму; 3) установившийся асинхронный режим и набор нагрузки с восстановлением нормального режима.

Последний этап определяется в основном тем, как турбина принимает нагрузку, или, иначе, «приемистостью турбины». При этом давление пара после промежуточного перегрева может быть либо близким к исходному, либо пониженным в зависимости от характера протекания двух предыдущих этапов, их длительности и регулирования турбины.

Длительность асинхронного режима зависит от ряда факторов: скольжения к концу аварийного процесса, обусловившего нарушение устойчивости, характера изменения момента турбины на первой и последующих стадиях асинхронного режима, асинхронного момента генератора и мощности местной нагрузки в послеаварийном режиме.

Обычно при выпадении крупного генератора из синхронизма его электромагнитный момент становится меньше вращающего момента турбины. Это приводит к повышению скорости, т. е. работе с положительным скольжением. При увеличении скорости под действием регуляторов турбины происходит уменьшение впуска энергоносителя в турбину и мощность, отдаваемая в сеть при асинхронном ходе, всегда будет меньше, чем мощность до выпадения.

Реактивная мощность, необходимая для создания электромагнитных полей в асинхронно работающей машине, поступает из сети. Ток статора, возрастающий в связи с увеличившейся реактивной мощностью, во время асинхронного режима колеблется около среднего значения с частотой, приблизительно равной $2(f - f_0)$. В условиях эксплуатации асинхронный ход легко заметить по колебаниям стрелки амперметра. Число ее отклонений α (в одну сторону) в секунду численно равно скольжению (%):

$$|s| = \left| \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right| 100 = \left| \frac{f - f_0}{f_0} \right| 100 = \frac{\alpha}{2.50} 100 = \alpha',$$

где f_0 , ω_0 — частота и угловая скорость в синхронном режиме.

Режим несинхронно работающей машины определяет знак скольжения: «+» — генераторный режим ($\omega > \omega_0$); «-» — двигательный режим ($\omega < \omega_0$).

Амплитуда колебаний тока статора будет минимальной при разомкнутой обмотке возбуждения, а скольжение — при замкнутой обмотке возбуждения.

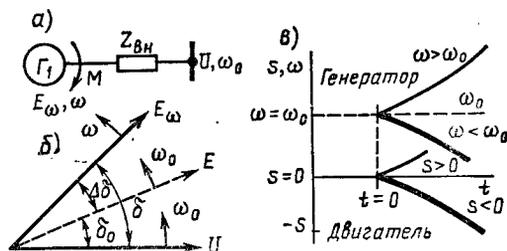


Рис. 14.10. Асинхронный ход в системе: а — схема системы; б — векторная диаграмма системы; в — характер изменения угловой скорости ω и скольжения (s)

В асинхронном режиме предельная активная мощность, которую может отдавать турбогенератор, обычно ограничивается 50—70% от номинальной мощности из-за возрастания тока статора, а мощность, которую может отдавать современный крупный гидрогенератор, — 30—50%. Кратковременно ее можно повысить, допустив перегрузку по току статора. Возможность асинхронного хода и его длительность зависят от типа генератора и условий работы системы. Турбогенератору при потере возбуждения разрешается работать в асинхронном режиме до 15—30 мин, без потери возбуждения — несколько меньше. Если за это время восстановить синхронную работу не удается, то турбогенератор должен быть отключен от сети. Немедленное отключение от сети турбогенератора, выпавшего из синхронизма, должно производиться только в случаях появления опасности повреждения машины. Длительность работы гидрогенераторов в асинхронном режиме, разрешаемая только при возбуждении, более кратковременна (3—4 мин). Асинхронный ход, как правило, недопустим в тех случаях, когда при его появлении потери в роторе оказываются больше номинальных, а ток статора — больше $1,1I_{ном}$.

§ 14.3. ЗАДАЧИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ

Допуская в системе асинхронные режимы, инженер прежде всего должен проверить поведение машин, работающих асинхронно. Здесь важно выяснить те механические усилия, которые возникнут при асинхронном ходе, проверить нагрев ротора и статора. Кроме того, надо вычислить активные и реактивные мощности машины. Асинхронный ход одной или нескольких машин может оказать влияние на поведение всей системы. В связи с этим необходимо проверить режим части системы, продолжающей нормальную синхронную работу: выяснить, не перегрузятся ли генераторы, не будет ли недопустимо большого снижения напряжения и не окажут ли его пульсации вредного действия на работу нагрузки. Существенным в ряде случаев является вопрос о поведении устройств автоматики и релейной защиты, иногда могущих при наличии асинхронного хода работать неправильно.

Для анализа их работы необходимо тщательное рассмотрение асинхронных режимов. При этом выделяют процесс выпадения из синхронизма, заканчивающийся установившимся асинхронным ходом. Отдельно рассматриваются режимы обратного вхождения в синхронизм машины: а) подключенной к сети, несущей нагрузку, временно перешедшей на асинхронный режим — ресинхронизации; б) ненагруженной и подключаемой к сети (вновь или после временного отключения) — самосинхронизации.

Эти два режима применяются на практике и в различных комбинациях с другими режимами: автоматическое повторное включение с одновременной самосинхронизацией (АПВС), несинхронные включения частей системы и т. д.

Кратковременный асинхронный режим в энергосистеме допустим при выполнении следующих условий: нет опасности повреждения асинхронно работающих генераторов; в результате действия автоматики возможна синхронизация; возмущение, создаваемое асинхронным режимом в энергосистеме, не приводит к дальнейшему развитию аварии. Однако в ряде случаев инженеры, не имея возможности качественно и количественно оценить допустимость асинхронного режима в конкретной системе, опасаются развития аварии при асинхронном ходе.

Они устанавливают делительную автоматику мгновенного действия, разделяющую систему на несинхронно работающие подсистемы. При этом возникает необходимость действия АЧР и отключения в дефицитной подсистеме части потребителей, а в избыточной — генераторов. Таким образом, проблема выбора — асинхронный режим или разделение системы на части — представляется актуальной задачей, особенно для слабых межсистемных связей, где вероятность возникновения асинхронного хода очень высока.

При определении допустимости кратковременного хода по межсистемной связи возникает ряд задач. Асинхронный ход по передаче представляет собой периодическое возмущение для генераторов синхронно работающих частей системы. Это может вызвать нарушение устойчивости работы генераторов в связанных подсистемах.

Первая задача (задача исследования) — оценка амплитуды возмущения, создаваемого асинхронным ходом по передаче, и частот связываемых передачей подсистем, которые могут привести к развитию аварии.

Вторая задача — расчет квазиустановившихся послеаварийных режимов, когда после изменения частоты в одной или в обеих подсистемах на межсистемной передаче появится установившийся асинхронный режим. При этом нужно определить баланс мощностей, уровни напряжений и частоты связываемых подсистем.

Третья задача — оценка устойчивости узлов нагрузки, подсоединенных к межсистемной связи, работающей асинхронно. Опасное развитие аварии в виде нарушения устойчивости узлов нагрузки здесь может возникнуть при понижении уровня напряжения в различных точках передачи, к которым подсоединены промежуточные узлы нагрузки; опасность для узлов комплексной нагрузки могут создавать также периодические колебания напряжения в узле, подключенном к передаче, по которой осуществляется связь между двумя несинхронно работающими частями системы.

* § 14.4. ПАРАМЕТРЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМАХ

Генераторы. При больших изменениях скорости электромагнитный вращающий момент и мощность, отдаваемая синхронными машинами в генераторном режиме и соответственно получаемая в двигательном режиме, будут зависеть не только от угла, но и от скорости его изменения. В этом случае упрощенно представляют полный электромагнитный момент M синхронной машины двумя составляющими: синхронной $M_{сн}$ и асинхронной $M_{ас}$, причем $M_{сн} + M_{ас} = M$. Соответственно мощность $P_{сн} + P_{ас} = P$. При этом приближенно можно считать, что наличие возбуждения не оказывает влияния на составляющую $P_{ас}$, т. е. что при расчетах можно провести наложение синхронных и асинхронных моментов и соответственно мощностей. Составляющая $M_{сн}$ зависит от параметров машины, тока возбуждения, приложенного напряжения и угла δ , а составляющая $M_{ас}$ — от параметров машины, приложенного напряжения, угла δ и скорости его изменения, т. е. скольжения ($s = d\delta/dt$).

Природу синхронной составляющей момента $M_{сн}$ и соответственно мощности $P_{сн}$, а также их определение при различных условиях работы рассмотрим далее (см. § 14.5). Здесь подчеркнем то обстоятельство, что при больших скольжениях выраженный в относительных единицах синхронный вращающий момент на

валу генератора не будет равен его внутренней мощности и должен определяться как $M_{сн} = P_{сн}/(1 + s)$. Кроме того, необходимо учесть, что при непрерывном изменении угла δ значения $M_{сн}$ и $P_{сн}$ не будут постоянными, как при синхронном режиме, а будут изменяться, меняя и знак, поэтому их иногда называют знакопеременными составляющими.

Асинхронную составляющую момента $M_{ас}$ и соответственно мощности можно определить при упрощающих предположениях, принимая, что машина симметрична в электрическом и магнитном отношениях и ее параметры по продольной и поперечной осям одинаковы:

$$T'_q = T'_d; \quad x_q = x_d; \quad x''_q = x''_d.$$

При отрицательных значениях скольжения s синхронный генератор, работая как асинхронный двигатель, потребляет мощность, а при положительных, работая как асинхронный генератор, выдает ее в сеть.

Существенные затруднения возникают при осуществлении асинхронных режимов у современных турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток, характеризующихся повышенным удельным использованием активных материалов, большим объемом тока в пазу, существенным уменьшением инерционных постоянных и т. п. Переход в асинхронный режим такого высокоиспользованного турбогенератора при потере возбуждения сопровождается большими колебаниями его активной мощности. Амплитуда колебаний ее может превосходить амплитуду мощности турбогенератора. Возможны значительное понижение напряжения на шинах собственных нужд энергоблока и недопустимая перегрузка по току обмоток турбогенератора при быстром нарастании температуры пакетов сердечника статора и металлических конструктивных элементов.

Асинхронные характеристики высокоиспользованных мощных турбогенераторов, как правило, хуже характеристик машин меньшей мощности. Максимальное значение среднего асинхронного момента у них ниже. Хотя при одних и тех же скольжениях они потребляют относительно меньшую реактивную мощность, фактически потребляемая реактивная мощность на единицу активной мощности у высокоиспользованных выше из-за больших скольжений.

Длительность работы высокоиспользованных турбогенераторов при потере возбуждения, определяемая из условия сохранения устойчивости электрически близко расположенных турбогенераторов, ограничивается допустимой длительностью форсировки возбуждения, составляя около 20 с. Даже такой кратковременный асинхронный режим требует разгрузки турбины через электрогидравлический преобразователь (ЭГП) или механизм изменения частоты вращения (МИЧВ).

Для ручного перевода на резервное возбуждение время порядка 20 с недостаточно, поэтому в современной практике блоки 200 МВт и выше при потере возбуждения отключаются с минимальной выдержкой времени, необходимой для выявления асинхронного режима и отстройки от синхронных качаний.

Асинхронный режим при включении АРВ. В связи с участвовавшей необходимостью длительной работы турбогенераторов с недовозбуждением увеличилась вероятность выпадения отдельных турбогенераторов из синхронизма с большой нагрузкой при сохранении возбуждения на определенном уровне и включенном автоматическом регуляторе возбуждения. В этом случае в возбудителе кроме индуцированного тока протекает и вынужденный ток возбудителя, значение которого не остается неизменным, а зависит от характера изменения параметров, на которые реагирует АРВ.

Если составляющая тока возбуждения недостаточна для удержания машины в синхронизме при данной нагрузке, то при возникновении асинхронных вращений ротора относительно поля статора ток возбуждения обязательно проходит через нуль. Асинхронный режим турбогенератора с включенным АРВ при боль-

шой нагрузке оказывается чрезвычайно тяжелым и не должен допускаться. Персоналу нельзя пытаться ресинхронизировать турбогенератор без снижения нагрузки по меньшей мере до 60% от номинальной. Однако при разгрузке турбогенератора до этого уровня указанных выше явлений не происходит и машина успешно ресинхронизируется без опасности ее повреждения.

В связи со значительным уменьшением перегрузочной способности высокоиспользованных турбогенераторов по сравнению с машинами обычного исполнения необходимы мероприятия для предотвращения повреждения мощных турбогенераторов и сохранения их в работе в случае потери возбуждения, когда это допустимо по условиям энергосистемы.

Специальная защита от асинхронного режима для обычных турбогенераторов с косвенным охлаждением, как правило, не требовалась, и при переходе такого турбогенератора в асинхронный режим персонал мог разгружать его, сохраняя 60—70% номинальной нагрузки. При этом не появлялось опасности ни для турбогенератора, ни для энергосистемы. Асинхронный режим мощного высокоиспользованного турбогенератора требует специальных мероприятий и в том числе защиты для немедленной его разгрузки до допустимого уровня или отключения от сети. В противном случае турбогенератор может быть поврежден. Кроме того, может быть нарушена работа механизмов собственных нужд энергоблока. Большие периодические колебания мощности в условиях пониженного напряжения в сети из-за потребления перешедшим в асинхронный режим турбогенератором большой реактивной мощности вызывают качания соседних машин и создают опасность их выпадения из синхронизма, особенно при слабых связях или работе у предела устойчивости.

Перенапряжения на роторе в асинхронных режимах. В выпрямительных системах возбуждения (ионных, полупроводниковых) возможно появление перенапряжений, опасных для целостности оборудования. Перенапряжения на роторе могут возникать при внезапном обрыве тока возбуждения, асинхронном ходе генератора, коротких замыканиях и других неисправностях или нарушениях режима.

При асинхронных режимах гидрогенераторов могут возникать значительные напряжения на выпрямителе, которые превышают (с учетом экранирующего действия успокоительной обмотки) в 8—10 раз номинальное значение напряжения возбуждения. Поэтому необходимо в цепях возбуждения применять защитные устройства (нелинейные сопротивления, разрядники многократного действия и т. п.).

В связи с большой механической инерцией ротор гидрогенератора, замкнутый на выпрямитель, движется в асинхронном режиме так, что $r\delta \approx 0$, и практически дополнительной э. д. с. в обмотке ротора за счет увеличения скольжения не возникает. Это позволяет упростить расчетные методы. Общепринято, что для снижения перенапряжений ротор генератора (обмотка) замыкается на активное сопротивление. В схемах возбуждения малых генераторов и синхронных двигателей используются постоянно включенные параллельно ротору нелинейные сопротивления. Для крупных генераторов применяется постоянное активное сопротивление, которое подключается к ротору через разрядник по схеме, приведенной на рис. 14.11. Напряжение пробоя разрядника определяется классом изоляции ротора. В нормальных режимах работы сопротивление отключено. При возникновении перенапряжений разрядник пробивается и ротор оказывается замкнутым на сопротивление.

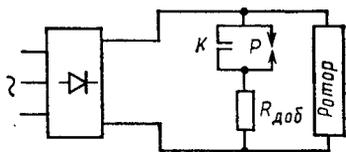


Рис. 14.11. Схема включения добавочного сопротивления и разрядника ротора

Максимальные (амплитудные) значения напряжений*, которые возникают в асинхронном режиме на роторе полностью разгруженного по активной мощности и развозбужденного генератора, работающего через индуктивное сопротивление (трансформатор, линию) на шины бесконечно большой мощности, определяются без учета процессов в поперечной оси генератора. Тогда упрощенные уравнения Парка — Горена будут иметь вид

$$U_q = \Psi_d;$$
$$U_f = d\Psi_f/dt - I_f r_f;$$
$$d\Psi_f/dt = d\Psi_f/dt + \Psi_f d\delta/dt.$$

Их решение позволяет найти напряжения на роторе.

Основными направлениями в разработке необходимых по обеспечению мероприятий, улучшающих работу системы при появлении асинхронного хода, являются:

1) совершенствование и установка специальных устройств, выявляющих возникновение асинхронного режима турбогенератора и надежно отличающих этот режим от других аварийных режимов в энергосистеме (коротких замыканиях, синхронных качаниях, асинхронного хода в системе и т. д.);

2) осуществление быстрой автоматической разгрузки агрегата до заданного уровня, допустимого по условиям работы турбогенератора без возбуждения, а в случае необходимости — автоматического отключения его от сети;

3) осуществление автоматического переключения обмотки возбуждения *ОВ* (при потере возбуждения по любой причине) на 5—10-кратное гасительное сопротивление;

4) обеспечение сохранения в работе механизмов собственных нужд энергоблока;

5) осуществление мероприятий, сокращающих случаи потери возбуждения или позволяющих ускорить его восстановление;

6) быстрая разгрузка генератора до 40% от номинальной мощности.

Быстрая разгрузка турбоагрегата не до 40%, а до 60% от номинальной оказалась бы легче и практически исключила бы вероятность аварийного отключения энергоблока. Однако работа высокоиспользованных турбогенераторов в течение 15 мин с нагрузкой 60% от номинальной не может быть разрешена из-за недопустимого увеличения температуры стали сердечника и металлических конструктивных элементов.

В настоящее время, как правило, в цепях возбуждения турбогенераторов устанавливаются дистанционно управляемые автоматы, что дает возможность выполнить схему, осуществляющую все операции по переводу турбогенератора на возбуждение от резервного возбуждителя (включая его пуск в аварийных условиях), за 2—3 мин. При этом появляется целесообразность разрешения работы высокоиспользованных турбогенераторов в асинхронном режиме с нагрузкой не выше 60% от номинальной в течение 3—4 мин. За это время температура статора турбогенератора не превысит допустимую. Работа мощного турбогенератора с такой нагрузкой целесообразнее и для энергосистемы, а ресинхронизация происходит безболезненно. Устройства автоматизации разгрузки турбогенератора при

* Излагается по исследованиям Гессе Б. А. См., например: Гессе Б. А. Защита ротора от перенапряжений. Сб. рефератов, докладов конференции «Системы возбуждения и регулирования мощных электрических машин переменного и постоянного тока», Л.: Ин-т электро-механики, 1967, с. 10—16.

его переходе в асинхронный режим дополняются реле времени, обеспечивающим отключение турбогенератора от сети, если через 3—4 мин он не был ресинхронизирован.

Асинхронный режим синхронных машин * изучается не только с целью его практического использования, но и для анализа сложных явлений при асинхронном ходе в энергосистеме.

Первичные двигатели. Характеристики и параметры первичного двигателя имеют существенное значение при анализе асинхронных режимов. При этом важно знать зависимость момента (или мощности) от скорости и ускорения агрегата. Под *моментом* (или мощностью) *первичного двигателя* при рассмотрении асинхронных режимов следует понимать результирующий момент, т. е. собственно момент (или мощность), развиваемый турбиной и уменьшенный на потери, имеющиеся как в механической части турбины, так и непосредственно в генераторе. В отдельных случаях момент, соответствующий потерям в турбине и генераторе, оказываясь больше момента, развиваемого турбиной, играет существенное значение в движении агрегата. В этих случаях результирующий вращающий момент первичного двигателя окажется тормозящим, хотя турбина и будет давать ускоряющий момент. Следует иметь в виду, что в процессах, протекающих при угловой скорости ротора, отличной от синхронной, результирующий момент, создаваемый первичным двигателем, может быть направлен как согласно с асинхронным моментом, например при разгоне со скоростью $\omega < \omega_0$, так и встречно с ним — при разгоне со скоростью $\omega > \omega_0$.

При полном закрытии направляющего аппарата или клапанов турбины результирующий момент первичного двигателя может существенно отличаться от нуля за счет наличия момента, обусловленного потерями. При замене нескольких агрегатов, генераторы которых работают асинхронно, одним эквивалентным большим значение имеют параметры систем регулирования T_s , σ . При асинхронном ходе приходится оперировать с динамическими характеристиками первичных двигателей, рассматривая их в больших диапазонах времени и изменений скорости, при учете переходных гидравлических процессов и автоматического изменения угла разворота лопастей рабочего колеса у гидравлических турбин, при учете возможности регулирования на различных ступенях давления и учете регенеративных и сетевых подогревателей пара у паровых турбин. В связи с этим динамические характеристики будут отличны от приведенных в гл. 6.

Для иллюстрации влияния факторов, делающих динамическую характеристику весьма причудливой, рассмотрим рис. 14.12. Здесь показаны** экспериментально полученные статическая 1 и динамическая 2 характеристики турбин (агрегатов) Волжской ГЭС имени Ленина, т. е. зависимости момента M_T от хода поршня сервомотора: $M_T = f(m)$. На том же рисунке приведены изменение угла разворота рабочего колеса φ и относительное изменение частоты вращения генератора $\Delta n/n_{ном}$ в переходном процессе. Из сопоставления видно значительное различие между статической характеристикой и динамической характеристикой, зависящей не только от свойств системы регулирования, но и от сбрасываемой мощности.

Из рис. 14.12 видно влияние изменения частоты вращения ротора в начале процесса, проявляющееся в уменьшении момента турбины при неизменном положении направляющего аппарата (участок *ab*), а также влияние гидравлического удара, приводящего к задержке уменьшения момента турбины при начавшемся закрытии направляющего аппарата. Момент

* См.: Коган Ф. Л., Мамиконянц Л. Г. Асинхронный режим мощных турбогенераторов. — Электричество, 1977, № 4.

** См.: Савалов С. А. Режимы электропередачи 400—500 кВ. — М.: Энергия, 1967, с. 268.

турбины достигает нулевого значения примерно через 6 с после начала процесса, далее начинается торможение турбины, а еще через 6 с при минимальном открытии направляющего аппарата тормозной момент достигает максимального значения, равного 45% от номинального момента турбины. В рассматриваемом процессе направляющий аппарат турбины не закрылся полностью. Свертывание лопастей рабочего колеса от максимального (+16°) до минимального (-12°) значения длится около 1 мин, и при моменте $M_{\text{мин}}$ лопасти свернулись только до 9°. Резкое торможение турбины, являющееся следствием не учитываемых в расче-

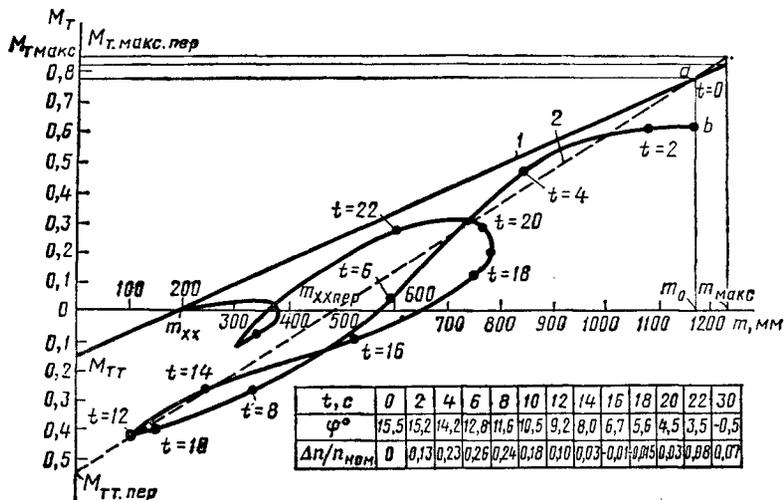


Рис. 14.12. Зависимость момента турбины от открытия направляющего аппарата:

1 — в статическом режиме; 2 — в переходном процессе

тах особенностей процесса изменения момента, проявилось внешне как «перерегулирование» турбины. На ход процесса ресинхронизации благоприятное влияние должно оказывать также уменьшение скорости изменения положения направляющего аппарата в зоне малого открытия; такое замедление приводит к уменьшению минимального скольжения и снижению скорости увеличения момента турбины.

Как видно из рис. 14.12, влияние рассматриваемых факторов приближенно может быть оценено заменой действительной статической характеристики 1 при расчетах процесса ресинхронизации условной переходной характеристикой 2, показанной штриховой линией. Более крутой наклон переходной характеристики (по сравнению со статической) приводит к уменьшению максимального и минимального скольжения и сокращению длительности асинхронного хода, облегчая условия ресинхронизации.

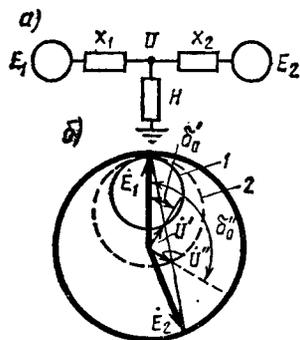


Рис. 14.13. Схема подключения (а) и график изменения напряжения в узле нагрузки (б):

1 — при $x_1 < x_2$; 2 — при $x_1 > x_2$

Нагрузка. Поведение нагрузки в системе (рис. 14.13) имеет большое значение для определения допустимости асинхронного хода. Понижение напряжения при асинхронных режимах может вызвать опрокидывание двигателей нагрузки (лавину напряжения). Колебания напряжения на шинах нагрузки, происходящие во время асинхронного хода крупного ге-

нератора или группы генераторов, могут привести к колебаниям светового потока осветительных установок.

При асинхронном режиме в составе напряжения, подведенного к нагрузке, будет несколько (по меньшей мере две) различных частот переменного тока, отличных от нормальной частоты f_0 . Асинхронные двигатели нагрузки будут реагировать на это изменение частоты, так же как и на изменение напряжения (которое, как правило, будет пониженным), и, следовательно, будут изменять свою мощность и скорость. Однако расчеты по определению мощности двигателей и их поведения при асинхронном ходе части генераторов системы могут в первом приближении производиться без учета появления нескольких составляющих в мгновенных значениях частоты. Эти расчеты можно проводить исходя только из понижения напряжения и изменений его огибающих с частотой асинхронных колебаний, принимая, что частота мгновенных изменений тока и напряжения равна f_0 .

Рассмотрим, как изменяется напряжение в узле нагрузки при асинхронном режиме в системе со скольжением s :

$$s = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_1.$$

Принимая

$$\dot{E}_1 = E_1, \quad \dot{E}_2 = E_2 e^{jst}$$

и применяя принцип наложения к схеме, изображенной на рис. 14.13, а, получаем [15]

$$\dot{U} = (E_2 e^{jst} x_1 + E_1 x_2)/(x_1 + x_2),$$

где x_1 и x_2 — сопротивления от точки подключения узла нагрузки до источников э. д. с. E_1 и E_2 (рис. 14.13, б).

Обозначая

$$\epsilon_1 = E_1 x_2/(x_1 + x_2); \quad \epsilon_2 = E_2 x_1/(x_1 + x_2),$$

получаем закон изменения напряжения в узле нагрузки:

$$\dot{U} = \epsilon_1 + \epsilon_2 e^{jst} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \cos st + j\epsilon_2 \sin st. \quad (14.4)$$

Построенные годографы изменения э. д. с. и напряжения за один цикл асинхронного хода для различных удалений узла нагрузки от источников э. д. с. показаны на рис. 14.14, а. Построение выполнено при $E_1 = E_2$ для случаев: А) $x_1 < x_2$; Б) $x_1 > x_2$. Как видно из рис. 14.13, годографами вектора U являются окружности U' в случае А и U'' в случае Б, причем в случае А, т. е. когда узел нагрузки ближе к э. д. с. E_1 , напряжение U изменяется по фазе от 0 до $\delta_0 < 90^\circ$. В случае Б фаза напряжения U (угол δ_0) непрерывно возрастает и вектор U совершает проворот относительно вектора E_1 .

Для исследования влияния на устойчивость модуля и фазы напряжения U двигателей выразим закон изменения их во времени, а также зависимость от параметров схемы. Согласно (14.4), выражения для модуля

$$U = \sqrt{(\epsilon_1 + \epsilon_2 \cos st)^2 + (\epsilon_2 \sin st)^2} = \sqrt{\epsilon_1^2 + 2\epsilon_1\epsilon_2 \cos st + \epsilon_2^2}; \quad (14.4a)$$

$$\delta_0 = \arg \dot{U} = \arctg \frac{\epsilon_2 \sin st}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \cos st}.$$

График изменения этих величин, построенный по выражениям (14.4 а), показан на рис. 14.14, б. Напряжение в узле изменяется по периодическому закону, близкому к синусоиде. Минимум напряжения имеет место при $st = 180^\circ$. При $x_1 = x_2$ (узел нагрузки в центре качаний) и $st = 180^\circ$ напряжение становится равным нулю.

Зависимость U_{\min} от места подключения двигателя получим из (14.4), приняв $st = 180^\circ$:

$$U_{\text{мин}} = \sqrt{\epsilon_1^2 - 2\epsilon_1\epsilon_2 + \epsilon_2^2} = \epsilon_1 - \epsilon_2.$$

При $E_1 = E_2 = 1$ получим

$$U_{\text{мин}} = (x_2 - x_1)/(x_2 + x_1).$$

Фаза напряжения, как видно из рис. 14.14, а, также изменяется нелинейно. С уменьшением ϵ_1 от 1,0 до 0,5 узел нагрузки перемещается от генератора 1 в сторону генератора 2, приближаясь к центру качаний. Фаза напряжения при этом колеблется около нуля. После перехода за центр качаний и при приближении узла нагрузки к генератору 2, что соответствует уменьшению ϵ_1 от 0,5 до 0, средняя угловая скорость в узле нагрузки становится равной ω_2 и колебания фазы происходят относительно st .

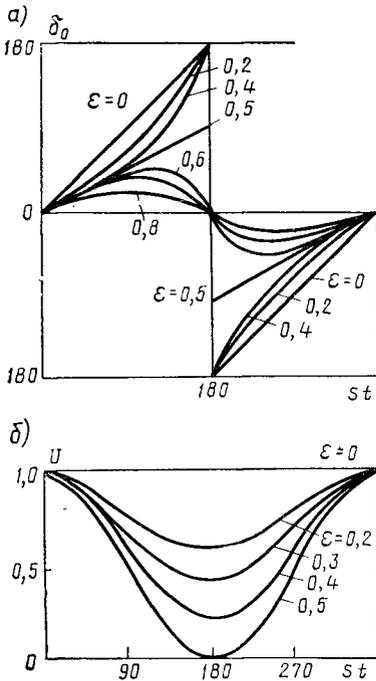


Рис. 14.14. Изменение фазы (а) и модуля (б) напряжения в узле нагрузки в зависимости от текущего угла $\delta = st$

Линии электропередачи, сеть. Схемы замещения ЛЭП, трансформаторов и других неподвижных элементов системы при асинхронном ходе одного генератора или части ее генераторов, не влияющих на систему настолько сильно, чтобы вызвать в ней заметное отклонение частоты, не изменяются.

При выявлении в процессе анализа значительных изменений угловой скорости следует уточнять расчеты, изменяя индуктивные сопротивления в ω/ω_0 раз и емкостные сопротивления в ω_0/ω раз. Расчеты при этом усложняются, так как при использовании способа последовательных интервалов изменяются все сопротивления в каждом интервале.

Расчеты асинхронных режимов систем в связи с некоторой неопределенностью параметров, входящих в расчетные уравнения, целесообразно выполнять приближенно при вариации параметров. Сложная система при асинхронном ходе одного из ее генераторов (или станции) обычно приводится к более простой схеме, как это показано на рис. 14.15, причем учитываются соображения, высказанные в § 14.1.

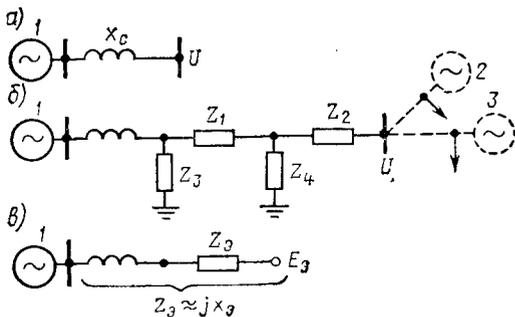


Рис. 14.15. Схема замещения системы при асинхронном ходе одной из ее станций (1):

а — упрощенная схема; станция 1 — шины неизменного напряжения U ; б — схема системы, в которой станция 1 имеет связь с шинами неизменного напряжения U через сложную сеть; в — схема системы, в которой напряжение U не считается неизменным и все нагрузки и станций (кроме станции 1) «свернуты» и заменены эквивалентным сопротивлением Z_3

и эквивалентной э. д. с. E_3

**§ 14.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖИМА ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ
ПРИ НЕСИНХРОННОЙ СКОРОСТИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ
(ГЕНЕРАТОРА, ДВИГАТЕЛЯ, СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА)**

Рассмотрим основные соотношения между параметрами режима системы, которая состоит из синхронной машины, вращающейся с постоянной угловой скоростью ω_0 , отличной от синхронной, и шин неизменного по значению и частоте ω_0 напряжения. Особенности этого несинхронного режима приходится учитывать при рассмотрении ряда переходных процессов:

а) резких изменениях режима системы, вызывающих выпадение из синхронизма, во время которых скорость отклоняется от синхронной ($\omega \neq \omega_0$);

б) длительной взаимно несинхронной работе отдельных систем, связанных ЛЭП;

в) работе синхронной машины в режиме установившегося асинхронного хода после окончания процессов, связанных непосредственно с выпадением из синхронизма.

Сложные явления, происходящие при несинхронной работе, в настоящем разделе будут описаны упрощенно, преимущественно качественно, и в дальнейшем будут уточняться по мере рассмотрения тех или иных практических задач.

Рассмотрение направлено в основном на физику происходящих процессов, а количественные оценки даются приближенными.

Отметим основные особенности процессов, происходящих при несинхронной работе:

1. В машине и линии передачи циркулирует ток, имеющий слагающие двух частот: постоянную ω_0 и изменяющуюся $\omega_1 = f(t)$. Строго говоря, следовало бы учитывать, что мгновенные значения результирующего тока будут давать биения. Однако не будем их учитывать, полагая, что ω_1 мало отличается от ω_0 .

Применительно к схеме, приведенной на рис. 14.16, а, можно для мгновенных значений записать

$$i = I_{11} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + I_{12} \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Приняв для простоты рассуждений, что $I_{11} = I_{12} = 1$ и $\varphi_1 = \varphi_0 = 0$, получим

$$i = 2 \sin \frac{\omega_1 + \omega_0}{2} \cos \frac{\omega_1 - \omega_0}{2}$$

или, если $\omega_1 \approx \omega_0$,

$$i \approx 2 \sin \omega t,$$

где $\omega = \frac{\omega_1 + \omega_0}{2} \approx \omega_0 + st$.

Таким образом, оперируем только с действующими значениями напряжений и токов при скорости ω_0 и несколько отличной от нее скорости ω .

2. Синхронная машина одновременно приобретает свойства асинхронной, так как во всех короткозамкнутых обмотках ротора и эквивалентных им цепях появятся токи, обусловленные наличием скольжения.

3. Параметры режима синхронной машины изменяются; э. д. с. E_ω зависит от скольжения; созданные ею составляющие токов со скоростью ω проходят через реактивные сопротивления, изменяющиеся для этих токов в отношении ω/ω_0 и приобретающие новые значения $x_{s\omega} = x\omega/\omega_0$.

Задача получения статических характеристик мощности при несинхронной работе генератора, сводящаяся к определению токов, мощностей и электромагнитных моментов, может быть решена тремя способами.

Первый способ основывается на предположении о возможности применения принципа суперпозиции при разделении рассматриваемой машины на две — синхронную 1 и асинхронную 2 (рис. 14.16, а). Синхронная машина, связанная

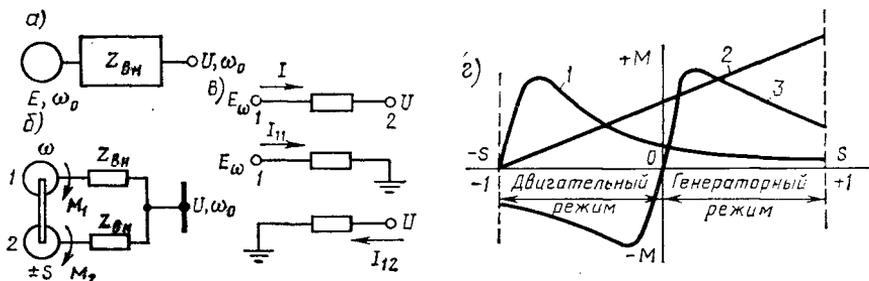


Рис. 14.16. К выводу упрощенного выражения вращающего момента при постоянном скольжении:

а — исходная схема; б — разделение несинхронно работающей машины на две механически связанные — синхронную 1 и асинхронную 2; в — зависимость момента и его составляющих от скольжения при $n=2$; г — определение токов методом наложения в несинхронно работающей синхронной машине

с напряжением U , работает со скоростью ω , имеет э. д. с. E_{ω} и развивает электромагнитный момент $M_{эл}$. Асинхронная машина присоединена к шинам напряжения U , работает со скольжением s и является в зависимости от его знака асинхронным двигателем или асинхронным генератором, как это показано на рис. 14.16, б. При этом параметры машины 2, как асинхронной, будут определяться всеми короткозамкнутыми обмотками ее ротора; сопротивление сети $Z_{вн}$ в простейшем случае будет введено в цепь статора каждой машины. Это, конечно, возможно только при грубых расчетах первого приближения.

При первом способе можно получить выражения мощностей с помощью схем замещения, пользуясь методом наложения и определяя токи в каждой ветви.

Второй способ* нахождения параметров режима (токов, мощностей) при работе с несинхронной частотой сводится к определению дополнительных э. д. с., наводимых в каждой обмотке статора, и некоторой новой э. д. с. (E_q или E'_q), действующей в схеме замещения машины.

Третий способ** заключается в применении полных уравнений асинхронной машины (уравнения Парка—Горева), позволяющих учесть все изменения скорости и обусловленные ими изменения э. д. с. и моментов.

Рассмотрим первый простейший способ определения электромагнитных моментов согласно схеме, показанной на рис. 14.16, а. Для синхронной машины 1, связанной с шинами U , схема замещения имеет вид, показанный на рис. 14.16, б, где, согласно методу наложения,

* См.: Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1970, гл. IV.

** Там же, гл. XXII.

$$\dot{I} = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} = \dot{E}_\omega / Z_\omega - \dot{U} / Z,$$

где $Z_\omega = r + j\omega_* x = r + j(1-s)x$; $Z = r + jx$.

Мощности в начале и конце передачи будут найдены как

$$\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{E}_\omega \hat{I}; \quad \dot{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \dot{U} \hat{I}.$$

При определении э. д. с. E_ω предполагается, что появившиеся при независимом возбуждении и возникающие в результате скольжения дополнительные (наведенные) токи учтены в условной асинхронной машине 2; тогда $E_\omega = \omega_* E$. Если ток возбуждения получается от возбуждателя и подвозбудителя, сидящих на одном валу с генератором, то $E_\omega = \omega_*^3 E$. В общем случае $E_\omega = \omega_*^n E$. С учетом этого

$$\dot{S}_1 = \dot{E} \dot{E} \omega_*^{2n} / \dot{Z}_\omega - \dot{U} \dot{E} \omega_*^n / \dot{Z}.$$

После преобразования получим

$$P_1 = \operatorname{Re}(\dot{S}_1) = \frac{E^2 \omega_*^2 r_\omega}{Z^2} + \frac{UE \omega_*^n}{Z} \sin(\delta_0 - st - \alpha), \quad (14.5)$$

где

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{r}{x}; \quad r_\omega = \frac{(r^2 + x^2) r}{r^2 + (\omega_* x)^2} \omega_*^{2n-2}.$$

При этом электромагнитный момент синхронной машины 1

$$M_{\text{сн}} = M_1 = P_1 / \omega_*,$$

или

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{E^2 (1+s)}{z^2} r_\omega + \frac{EU (1+s)^{n-1}}{z} \sin(\delta_0 - st - \alpha) = \\ &= M_{11} + M_{12} \sin(\delta_0 - st - \alpha). \end{aligned} \quad (14.5a)$$

Здесь первое слагаемое момента, иногда называемое *собственным моментом* M_{11} , получается при взаимодействии обмотки ротора, питаемой э. д. с. E , и обмотки статора, замкнутой на сопротивление r_ω . Его зависимость от скольжения при $n = 2$ показана на рис. 14.16, б (характеристика I).

В простейшем случае при $n = 1$ собственный момент

$$M_{11} = E^2 r \omega_* / [r^2 + (\omega_* x)^2], \quad (14.5б)$$

где $\omega_* = 1 + s$.

Формула (14.5б) по структуре аналогична известной формуле момента (мощности) асинхронного двигателя. При $s = 0$ член M_{11} превращается в так называемую *собственную мощность* $P_{11} = (E^2/z) \sin \alpha$.

Второе слагаемое в выражении (14.5а) называется *взаимным моментом*; при $s = 0$ он превращается во взаимную мощность P_{12} . Зависимость амплитуды взаимного момента от скольжения при $n = 2$ изображается характеристикой 2 (рис. 14.16, б).

Мнимая часть комплекса \dot{S}_1 , т. е. $\text{Im}(S_1)$, определяет реактивную мощность:

$$Q_1 = \frac{E^2 \omega_*^2}{z^2} x_\omega - \frac{EU \omega_*^n}{z} \cos(\delta_0 - st - \alpha), \quad (14.6)$$

где

$$x_\omega = \frac{(r^2 + x^2) \omega_* x}{r^2 + (\omega_* x)^2} \omega_*^{2n-2}.$$

В конце передачи значения активной и реактивной мощностей записываются как

$$\text{Re}(\dot{S}_2) = P_2 = \frac{EU}{z} \sqrt{\frac{1 + \rho^2}{(1+s)^2 + \rho^2}} \omega_*^n \sin(\delta_0 - st + \alpha_\omega) - \frac{U^2}{z} \sin \alpha; \quad (14.7)$$

$$\text{Im}(\dot{S}_2) = Q_2 = \frac{EU}{z} \sqrt{\frac{1 + \rho^2}{(1+s)^2 + \rho^2}} \omega_*^n \cos(\delta_0 - st + \alpha_\omega) - \frac{U^2}{z} \cos \alpha, \quad (14.8)$$

где $\rho = r/x$; $\alpha_\omega = \text{arctg}[r/(\omega_* x)]$.

Разность активных мощностей в начале и конце передачи при непрерывном изменении положения и величины вектора \dot{E}_ω оказывается не равной потерям мощности в активном сопротивлении r :

$$P_1 - P_2 = I^2 r \pm \Delta \varphi(s),$$

где $\Delta \varphi(s)$ — дополнительные потери, связанные со скольжением.

В частном случае, когда активным сопротивлением цепи статора можно пренебречь ввиду его малости, природа $\Delta \varphi(s)$ становится более ясной. Так, принимая $\delta_0 = 0$, $r = 0$, $\alpha = 0$, из (14.5) и (14.7) будем иметь:

$$P_1 = \frac{EU}{x} \omega_*^n \sin st; \quad P_2 = -\frac{EU}{x} \omega_*^{n-1} \sin st.$$

При этом дополнительные потери

$$\Delta \varphi(s) = \Delta P = P_1 - P_2 = \frac{s}{1+s} \frac{E \omega_*^n U}{x} \sin st. \quad (14.9)$$

При отсутствии активного сопротивления приращение ΔP может быть израсходовано только на изменение энергии W_L , запасенной в индуктивности, связывающей точки присоединения э. д. с. E и напряжения U . Запас энергии $W_L = LI^2/2$ можно выразить через потери реактивной мощности и среднюю угловую скорость $\omega_{*cp} = (1 + \omega_*)/2 = (2 + s)/2$:

$$W_L = L \omega_{*cp} I^2 / (2 \omega_{*cp}) = \Delta Q / (2 + s).$$

Определяя ΔQ как разность (14.6) и (14.8), при $r = 0$ получим

$$W_L = \frac{Q_1 - Q_2}{2 + s} = \frac{-1}{1 + s} \frac{E \omega_*^n U}{x} \cos st + \frac{U^2}{(2 + s)x} + \frac{E^2 \omega_*^{2n}}{(1 + s)x(2 + s)}.$$

Очевидно, что в рассмотренном случае

$$dW_L/dt = [s/(1 + s)] (E \omega_*^n U / x) \sin st = \Delta P$$

или

$$P_2 = P_1 - dW_L / dt. \quad (14.10)$$

При учете активного сопротивления передачи имеем

$$P_2 = P_1 - I^2 r - dW_L / dt. \quad (14.10a)$$

Асинхронный момент. Найдем электромагнитный момент M_2 , развиваемый условно выделенной машиной 2 (рис. 14.16, а), которую при отрицательном скольжении считаем двигателем, а при положительном — генератором.

Если предположить, что на роторе генератора Γ имеется только одна обмотка возбуждения, выполненная как равномерно распределенная, то электромагнитный момент

$$M_{ac} = M_2 = \frac{U^2 r s}{r^2 + (x_1 s)^2} = \frac{U^2 s x_1 / r}{x_1 [1 + (x_1 s / r)^2]}. \quad (14.11)$$

Здесь x_1 и r — параметры схемы замещения асинхронного двигателя, включающие внешнее сопротивление $z_{вн}$.

Переходя от параметров асинхронного двигателя к параметрам синхронного генератора и заменяя $x_1 = x'_d x_d / (x_d - x'_d)$; $x_1 / r = T'_d$, согласно табл. 6.3, получаем

$$M_2 = \frac{U^2 (x_d - x'_d)}{x'_d x_d} \frac{T'_d s}{1 + (T'_d s)^2}. \quad (14.12)$$

Зависимость момента M_2 от скольжения s представлена на рис. 14.16, б характеристикой 3.

Уточнение формул асинхронного момента. У синхронного генератора обмотка возбуждения расположена не равномерно по всему ротору, как это было принято при выводе (14.12), а только по продольной оси d . Кроме обмотки возбуждения по оси d действует продольная демпферная обмотка, а по оси q — поперечная. Аналогично тому, как это делалось при выводе (14.12), определим момент, развиваемый в результате действия трех одноосных обмоток, как половину от суммы моментов трех асинхронных машин, у каждой из которых имеются соответствующие распределенные обмотки (рис. 14.17):

$$M_2 = 0,5 (M'_2 + M''_2 + M'''_2)$$

или

$$M_2 = \frac{U^2}{2} s \left[\frac{x_1 / r_1}{x_1 [1 + (x_1 s / r_1)^2]} + \frac{x_2 / r_2}{x_2 [1 + (x_2 s / r_2)^2]} + \frac{x_3 / r_3}{x_3 [1 + (x_3 s / r_3)^2]} \right]. \quad (14.13)$$

Заменяя значения x_1 , x_2 , x_3 двигателя через параметры генераторов и вводя вместо x/r соответствующие постоянные времени, получим

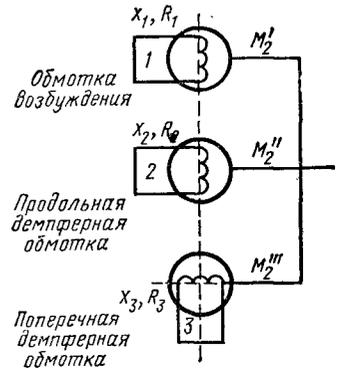


Рис. 14.17. Представление машины с тремя обмотками тремя машинами

$$M_2 = \frac{U^2}{2} s \left[\frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \frac{T'_d}{1 + (sT'_d)^2} + \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} \frac{T''_d}{1 + (sT''_d)^2} + \frac{x_q - x''_q}{x_q x''_q} \frac{T''_q}{1 + (sT''_q)^2} \right]. \quad (14.14)$$

Выражение (14.14) получено для случая простейшей связи (через x) генератора и шин неизменного напряжения U . При этом в сопротивлении x_d, x'_d, x''_d вводится сопротивление связи, т. е. $x_d = x_{dг} + x_c$ и т. д. При сложной связи генератора и шин неизменного напряжения (через z_{12}) момент $M_{2г}$, определенный при непосредственном включении генератора на шины неизменного напряжения, может быть при желании пересчитан согласно выражению

$$M_2 = M_{2г} (x'_d x_d / z_{12})^2. \quad (14.15)$$

Взаимное сопротивление z_{12} определено при замещении генератора сопротивлением x'_d .

При отсутствии продольной демпферной обмотки ($x'_d = x''_d$) и наличии такой же поперечной демпферной обмотки, как и обмотка возбуждения ($x''_q = x'_q, x_q = x_d, T'_d = T''_d$), формула (14.14) переходит в (14.12).

Выражение (14.14) определяет среднее значение асинхронного момента. Однако, как было показано ранее (см. рис. 14.2), в отличие от момента асинхронного двигателя момент синхронного генератора при асинхронном ходе изменяется около среднего значения с частотой скольжения (главная причина этого — неравномерное распределение обмоток в машине). Не приводя здесь вывода, запишем выражение для мгновенного значения момента в асинхронном режиме (при постоянном или медленно меняющемся скольжении):

$$M_2 = M_{ac} = \frac{U^2}{2} \left\{ \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2} \left[1 + \sqrt{1 + (sT'_d)^2} \sin \left(2\delta_0 - \arctg \frac{1}{sT'_d} - 2st \right) \right] + \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} \frac{sT''_d}{1 + (sT''_d)^2} \left[1 + \sqrt{1 + (sT''_d)^2} \sin \left(2\delta_0 - \arctg \frac{1}{sT''_d} - 2st \right) \right] + \frac{x_q - x''_q}{x_q x''_q} \frac{sT''_q}{1 + (sT''_q)^2} \left[1 - \sqrt{1 + (sT''_q)^2} \sin \left(2\delta_0 - \arctg \frac{1}{sT''_q} - 2st \right) \right] \right\}, \quad (14.16)$$

где δ_0 — угол начала отсчета.

Реактивная мощность, соответствующая эквивалентной — выделенной асинхронной машине для простейших условий [тех же, что были приняты при выводе (14.11)], находится согласно схеме замещения двигателя:

$$Q_{ac} = I^2 x = \frac{U^2 x_1 s^2}{r^2 + (sx_1)^2} = \left(\frac{U^2 r s}{r^2 + (x_1 s)^2} \right) \frac{s}{r/x_1}. \quad (14.17)$$

Сомножитель в скобках представляет собой $M_2 = P_{ac}$, а $r/x_1 = s_{кр}$ — критическое скольжение, тогда

$$Q_{ac} \approx P_{ac} s / s_{кр.}$$

$$(14.18)$$

Здесь не принимается во внимание намагничивающая мощность асинхронной машины, уже учтенная при определении реактивной мощности машины, как синхронной в (14.8).

Учитывая действие на роторе трех обмоток [при предпосылках и допущениях, принятых при выводе предыдущих формул (14.14) и (14.16)], выражение для асинхронной реактивной мощности имеет вид (также при $s = \text{const}$ или медленно меняющемся)

$$Q_{ac} = \frac{U^2}{2} \left\{ \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \left[\frac{(sT'_d)^2}{1 + (sT'_d)^2} + \frac{sT'_d}{\sqrt{1 + (sT'_d)^2}} \cos \left(2\delta_0 - \arctg \frac{1}{sT'_d} - 2st \right) \right] + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \left[\frac{(sT''_d)^2}{1 + (sT''_d)^2} + \frac{sT''_d}{\sqrt{1 + (sT''_d)^2}} \times \cos \left(2\delta_0 - \arctg \frac{1}{sT''_d} - 2st \right) \right] + \left(\frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x_q} \right) \left[\frac{(sT''_q)^2}{1 + (sT''_q)^2} - \frac{sT''_q}{\sqrt{1 + (sT''_q)^2}} \cos \left(2\delta_0 - \arctg \frac{1}{sT''_q} - 2st \right) \right] \right\}. \quad (14.19)$$

Общий средний момент. Этот момент, действующий на ротор синхронной машины, работающей со скоростью, отличной от синхронной ($\omega \neq \omega_0$, где $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 — частота на шинах приемной системы),

$$M = M_1 + M_2,$$

где M_1 определено согласно (14.5а), а M_2 — согласно (14.14).

Статические и динамические характеристики асинхронного режима. Если приведенные выше характеристики получены при постоянном токе возбуждения исходного режима в предположении, что э. д. с. $E = E_q$, то их можно назвать *статическими*. Эти же характеристики могут быть получены как *динамические*, если учитывать изменения э. д. с. по времени: $E = f(t)$. При этом э. д. с. E должна находиться из дополнительных дифференциальных уравнений, отражающих также начальные условия — толчок, изменение схемы, изменение скорости. В простейшем случае динамической можно считать характеристику при $E = E'_q$.

При асинхронном режиме можно различать:

— установленный асинхронный ход — при постоянном скольжении достаточно большом, таком, что M_2 имеет решающее значение в выявлении характера режима (было рассмотрено выше);

— изменяющийся асинхронный ход — также при большом, но переменном скольжении, когда идет процесс выпадения из синхронизма или, напротив, втягивания в синхронизм.

В этих двух случаях пользуются полученными выражениями момента, рассматривая их как статические или динамические.

Синхронная машина иногда может работать со скольжением, создающим демпферный момент M_2 , влияющий на процесс, но тем не менее не

считается находящейся в асинхронном режиме. Здесь можно различить два основных случая:

— малых качаний вблизи синхронной скорости ($s < 0,05\%$) (см. гл. 7,8);

— больших качаний ($s > 0,05\%$), при которых влияние демпферного момента M_2 имеет решающее значение, но машина, качаясь, остается в синхронном режиме, причем угол δ меняется в широких пределах, оставаясь меньше 360° относительно любой другой синхронной машины системы.

Рассмотрим подробнее некоторые случаи изменяющегося асинхронного хода. При этом дополнительный момент (мощность), вызванный наличием скольжения и обусловленный связанными с ним токами, появляющимися в обмотках ротора, включая и демпферные обмотки, будет

$$\Delta M \approx \Delta P = U^2 \sin \delta \frac{x_d - x_d(p)}{x_d x_d(p)} (\cos \delta_0 - \cos \delta) + U^2 \cos \delta \frac{x_q - x_q(p)}{x_q x_q(p)} (\sin \delta - \sin \delta_0).$$

Уравнение это, содержащее оператор P , может быть раскрыто во времени с помощью интеграла Дюамеля:

$$\frac{Y(p)}{Z(p)} A(t) = A(0) \varphi(t) + \int_{\theta=0}^{\theta=t} \varphi(t-\theta) \frac{dA(\theta)}{d\theta} d\theta,$$

где для первого члена ΔM

$$Y_1(p) = x_d - x_d(p); \quad Z_1(p) = x_d(p) A_1(t) = \cos \delta_0 - \cos \delta(t).$$

Аналогично, для второго

$$Y_2(p) = x_q - x_q(p); \quad Z_2(p) = x_q(p) A_2(t) = \sin \delta(t) - \sin \delta_0.$$

Вместо весьма сложных, но общих динамических характеристик, получающихся в этом случае, можно применить упрощенные выражения, полученные в предположении об определенном (заданном) изменении скольжения.

Скачкообразное изменение скольжения. Предположим, что скольжение изменяется не плавно, а скачками, по интервалам от некоторого s_0 до s_1 . Тогда добавочный момент для машины без демпферных обмоток будет

$$\Delta M \approx K_s \left(\frac{x_d - x_q}{T_d' - T_{d0}'} \frac{T_d'}{x_d} + \frac{x_q}{x_d} e^{-\frac{t}{T_d'}} \right) \sin \delta \left[\frac{s_0^2 - s_1^2}{(1 + s_0^2 T_d'^2)(1 + s_1^2 T_d'^2)} \right],$$

где

$$K_s = U^2 x_{af}^2 T_d' / (r_f x_d x_q).$$

Для машины с демпферной обмоткой выражение для ΔM усложняется, но расчеты особых трудностей не представляют.

Синусоидальное изменение скольжения. Предположим, что угол изменяется следующим образом:

$$\Delta \delta = \Delta \delta_m \cos \gamma t,$$

где γ — частота колебаний и соответственно $\Delta s = \Delta s \sin \gamma t$. Тогда будем считать, что

$$\Delta M = U^2 \left(\frac{1}{x_q \gamma^2} - D_q \right) \cos^2 \delta_0 + \left(\frac{1}{x_d \gamma^2} - D_d \right) \sin^2 \delta_0,$$

где

$$D_d = -\frac{1}{x_d} \frac{T'_d (T'_{d0} - T'_d)}{1 + (\nu T'_d)^2} - \frac{1}{\nu^2 x_d} + \frac{1}{x'_d} \frac{T''_d (T''_{d0} - T''_d)}{1 + (\nu T''_d)^2};$$

$$D_q = -\frac{1}{x_q} \frac{T''_q (T''_{q0} - T''_q)}{1 + (\nu T''_q)^2} - \frac{1}{\nu^2 x_q}.$$

Для расчетов, проводимых упрощенно в условиях, когда частота колебаний γ неизвестна, можно воспользоваться выражением

$$\Delta M = P_d = U^2 \left(\sin^2 \delta \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} T''_d + \cos^2 \delta \frac{x_q - x''_q}{x_q x''_q} T''_q \right).$$

В этом случае мощность демпфирования при синусоидальных колебаниях угла δ с малой амплитудой и малой частотой, в предположении отсутствия сопротивления в обмотке возбуждения

$$\Delta P = P_d \delta / dt.$$

Несинхронное автоматическое повторное включение (НАПВ). В этом случае в генераторе возникает электромагнитный момент, который создает механическое воздействие на вал генератора, на крепления корпуса статора, на фундаментные болты и т. п. Электромагнитный момент в генераторе при НАПВ определяется э. д. с. генератора, напряжением сети, углом их сдвига по фазе относительно друг друга и сопротивлением связи между генератором и системой.

Как будет показано далее, наибольшую опасность для генераторов при несинхронном включении представляет не ток, а электромагнитный момент и именно момент является фактором, ограничивающим допустимость применения НАПВ, поэтому рассмотрим более подробно моменты, возникающие в генераторах при несинхронных включениях. Выражение электромагнитного момента в общем виде достаточно сложно. Анализ моментов может быть проведен по более простой формуле, полученной из общего выражения [15] при условии пренебрежения затуханием всех свободных токов, наведенных в контурах ротора, за исключением затухания аperiodической слагающей тока статора:

$$M = U^2 \frac{x''_q - x'_d}{x'_q x''_d} \left\{ \sin [2\delta_0 + (1 - 2s)t] e^{-t/T_a} - \frac{1}{2} \sin 2[\delta_0 + (1 - s)t] e^{-2t/T_a} - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{2} \sin 2(\delta_0 - st) + E^2 \left[\frac{1}{x'_d} \sin(1 - s)t e^{-t/T_a} - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{1}{2} \frac{x''_q - x''_d}{x'_q x''_d} \sin 2(1 - s)t e^{-2t/T_a} \right] + UE \left(\frac{1}{x'_d} \left\{ \sin(\delta_0 - st) - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \sin[\delta_0 + (1 - s)t] e^{-t/T_a} \right\} - \frac{x''_q - x''_d}{x'_q x''_d} \left\{ \sin[\delta_0 + (1 - 2s)t] e^{-t/T_a} - \right. \right.$$

$$-\sin[\delta_0 + 2(1-s)t]e^{-2t/T_a}$$

Малые качания. При скольжении $s \approx 0$ (в окрестности очень малых изменений) можно согласно (14.5) принять, что

$$M_{11} = P_{11} + K_{11}s, \text{ где } P_{11} = (E^2/z) \sin \alpha.$$

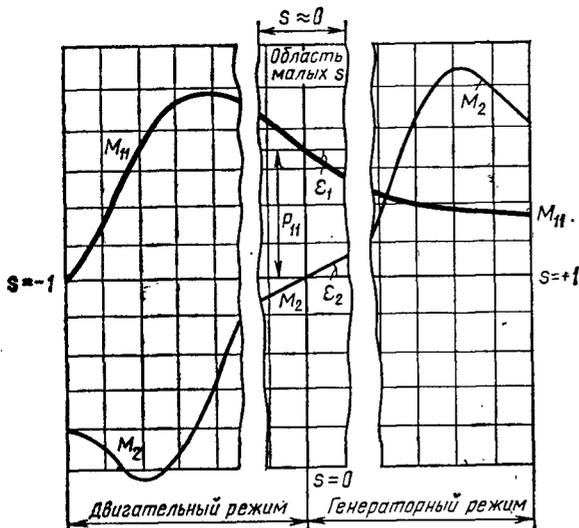


Рис. 14.18. Изменение вращающего момента и его слагающих при изменении скольжения

В соответствии с рис. 14.18 значение

$$K_{11} = \operatorname{tg} \varepsilon_1 = |dM_{11}/ds|.$$

В простейшем случае на основании (14.56) можем записать

$$K_{11} = |E^2 r (x^2 - r^2) / z^4|,$$

или при $r \ll x$

$$K_{11} \approx (E/x)^2 r.$$

В величинах P_{11} и K_{11} в зависимости от конкретных условий* можно ввести E_q или $E' \approx \approx E'_q$ и соответственно понимать под z и x суммарное сопротивление цепи, в которое генератор введен или синхронным x_q , или переходным x_d сопротивлением.

Согласно рис. 14.18, при малых скольжениях ($s < 0,05\%$) можно представить

$$M_2 = K_{22}s, \text{ где } K_{22} = \operatorname{tg} \varepsilon_2 = |dM_2/ds|.$$

При этом в случае удаленности генератора от шин значение M_2 (или K_{22}) должно быть пересчитано в соответствии с (14.15). Исследуя качания, при определении K_{22} необходимо воспользоваться выражением (14.16) для мгновенного значения момента. Учитывая только первый член в (14.16), получим

$$K_{22} = \left| \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} U^2 T'_d \sin^2 \delta \right|.$$

Полный момент, действующий на ротор генератора в этих условиях, при $s > 0$

$$M = P_{11} + P_{12} + (K_{22} - K_{11})s.$$

Обозначив $K_{22} - K_{11}$ через P_d , получим

$$M = P_{11} + P_{12} + P_d s. \quad (14.20)$$

* При использовании статической или динамической характеристики.

При $n = 1$ момент

$$M = (E^2/z) \sin \alpha + (EU/z) \sin (\delta - \alpha) + P_a s,$$

где P_a — демпферный коэффициент, не зависящий от скольжения.

При $K_{22} > K_{11}$, что обычно бывает в крупных электрических системах, значение P_a положительно, что означает *положительное демпфирование* (с ростом скольжения $+s$ увеличивается мощность, отдаваемая в генераторном режиме) (см. рис. 14.18). Если $K_{22} < K_{11}$, то P_a отрицательно, что означает *отрицательное демпфирование* (с ростом скольжения уменьшается мощность, отдаваемая в генераторном режиме). Последнее приводит не к затуханию колебаний, как в предыдущем случае, а к раскачиванию, т. е. превращению малых колебаний в большие — нарастающие, в процессе развития которых выражение (14.20) уже потеряет силу ($s \gg 0,05\%$).

Большие качания. При больших качаниях пользование полученным коэффициентом P_a уже становится не вполне корректным. Известны пригодные при достаточно больших s расчетные выражения*.

§ 14.6. ВЫПАДЕНИЕ ИЗ СИНХРОНИЗМА, АСИНХРОННЫЙ ХОД И РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ

До сих пор рассматривалась машина, работающая несинхронно с некоторым скольжением s относительно шин неизменного напряжения или другой машины. Проанализируем процесс выпадения из синхронизма. При этом в исследуемом процессе будем различать три стадии**: режим синхронных колебаний и переход от синхронного к асинхронному режиму; установившийся асинхронный ход; режим ресинхронизации. Рассмотрим эти процессы применительно к простейшей системе, схема которой показана на рис. 14.19, а. Предположим, что в этой системе отключилась одна из цепей ЛЭП. Повторное включение отключившейся линии восстановило условия нормальной работы передачи. Однако полученный ротором генератора толчок оказался настолько велик, что генератор, ускоряясь, выпал из синхронизма. Исходя из предположения, что скольжение мало, и пренебрегая асинхронной мощностью, можно провести анализ методом площадей, приняв $M = P$.

В переходном процессе площадка торможения $3'-4-5-3'$ оказывается меньше площадки ускорения $1-2-3-3'-1$ (рис. 14.19, б). Ротор проходит участок $4-5$, где на него действуют тормозящие силы; пройдя положение, отвечающее точке 5, он вновь получает ускорение, непрерывно увеличивающееся и становящееся значительным при достижении угла сдвига в $200-300^\circ$. Скольжение обуславливает появление асинхронного момента. Среднее значение асинхронного момента M_{ac} определяется согласно выражению (14.14). Пренебрежем пульсацией асинхронного момента (которая происходит с двойной частотой скольжения). В начальной части кривой $P_{ac} = M_{ac} = \varphi(s)$.

Асинхронная мощность (момент) непрерывно возрастает с ростом скольжения. Эта зависимость представлена кривой $7-7'$ на рис. 14.19, б. Далее с ростом скольжения зависимость $P_{ac} = \varphi(s)$ приобретает вид, показанный на рис. 14.20. Вместе

* Литкенс П. В. Нелинейные колебания в регулируемых электрических системах. — М.: МЭИ, 1974.

** Эти три стадии не обязательно свойственны любому процессу; может быть переход от синхронного к асинхронному режиму минуя стадию синхронных колебаний и т. д.

с ростом скорости (увеличением скольжения) мощность турбины P_T (кривая 5'-6 на рис. 14.19) уменьшается под действием регулятора скорости турбины. Синхронная мощность во время рассматриваемого процесса будет пульсирующей:

$$P_{\text{сн}} = (EU/x) \sin st.$$

Являясь функцией скольжения, она, в свою очередь, будет влиять на процесс, вызывая пульсации. При некотором значении скольжения s_{∞} момент турбины

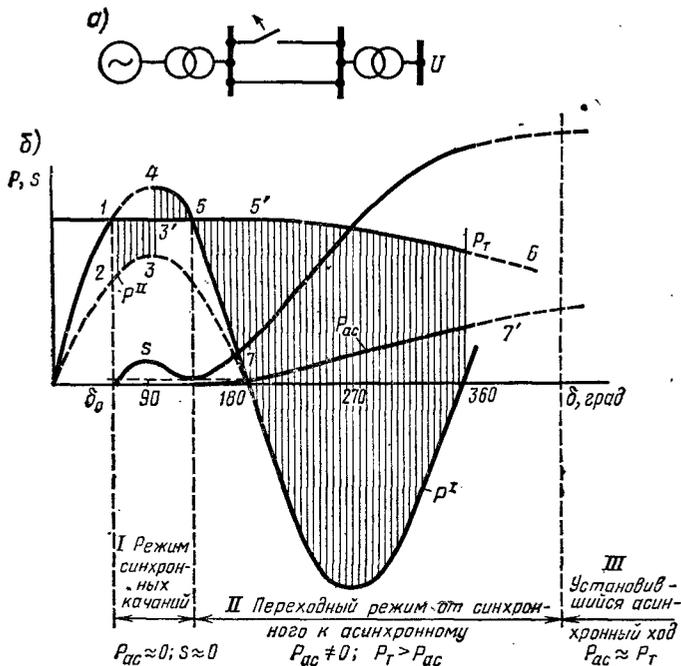


Рис. 14.19. Выпадение из синхронизма и переход на асинхронный ход синхронного генератора:

а — схема системы; б — процесс выпадения из синхронизма

уравновесится средним асинхронным моментом генератора $M_T = M_{\text{ас}}$. Приближенно это значение скольжения s_{∞} можно найти следующим образом.

Представим графически зависимость асинхронного момента (мощности) от скольжения так, как это сделано на рис. 14.20. Зная характеристику $M_{\text{ас}} = \varphi(s)$ и коэффициент неравномерности турбины, а также полагая, что зависимость $M_T = \varphi(s)$ линейна, найдем среднее скольжение s_{∞} (рис. 14.20).

Установившийся асинхронный ход при отсутствии пульсаций будет характеризоваться скольжением s_{∞} и асинхронным моментом $M_{\text{ас}\infty}$, отвечающим значению скольжения s_{∞} . Однако если выпавшая из синхронизма машина возбуждена, то кроме взаимно уравновешивающих друг друга асинхронного момента и момента турбины на валу агрегата при асинхронном ходе будет действовать также синхронный пульсирующий вращающий момент (рис. 14.21), создавая пульсации

скольжения, изменяющегося от $s_{\text{макс}}$ до $s_{\text{мин}}$. Пульсации скольжения тем больше, чем больше синхронный момент; значение скольжения проходит через минимум при угле, близком к 180° , если асинхронный момент и момент турбины малы; далее процесс повторяется периодически. Это обстоятельство особо существенно при определении условий ресинхронизации.

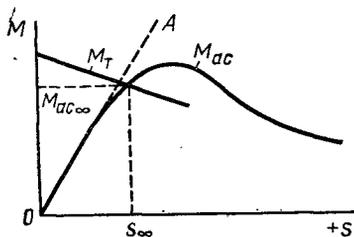


Рис. 14.20. Изменение асинхронного момента синхронного генератора и момента турбины при изменении скольжения

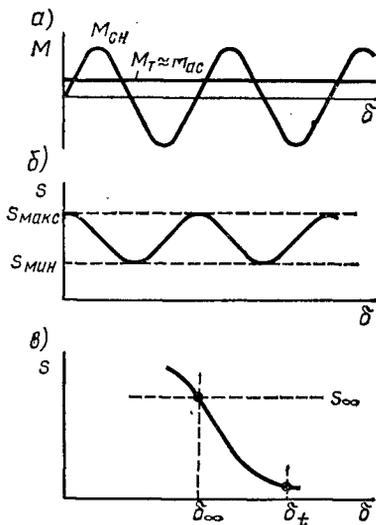


Рис. 14.21. Изменения синхронного момента (а) и вызываемые ими изменения скольжения (б, в)

Критерий ресинхронизации. Относительное движение ротора генератора описывается уравнением

$$T_J d^2\delta/dt^2 = M_T - M_{сн} - M_{ac} = \Sigma M$$

и после преобразований левой части

$$T_J s ds/d\delta = \Sigma M. \quad (14.21)$$

Предположим, что $M_T = f(\omega_0 + s)$; $M_{ac} = \varphi(\omega_0 + s)$ заданы как функции угла δ . Тогда, согласно (14.21), получим энергию при колебаниях угла от $\delta_{\text{макс}}$ до δ :

$$\frac{T_J s_{\text{макс}}^2}{2} - \frac{T_J s^2}{2} \int_{\delta}^{\delta_{\text{макс}}} \Sigma M d\delta, \text{ где } \Sigma M = f(\delta).$$

Значение скольжения в любой момент времени

$$s = \sqrt{s_{\text{макс}}^2 - \frac{2}{T_J} \int_{\delta}^{\delta_{\text{макс}}} \Sigma M d\delta}. \quad (14.22)$$

Если происходящее в процессе пульсации в установившемся асинхронном режиме скольжение пройдет через нуль ($s = 0$), то появится возможность ресинхронизации.

Согласно (14.22), эта возможность появится, когда

$$s_{\text{макс}}^2 = \frac{2}{T_J} \int_{\delta}^{\delta_{\text{макс}}} \Sigma M d\delta. \quad (14.23)$$

Значения $s_{\text{макс}}$, определенные в соответствии с (14.23), не позволяют получить количественные результаты для установления надежных условий ресинхронизации по двум причинам:

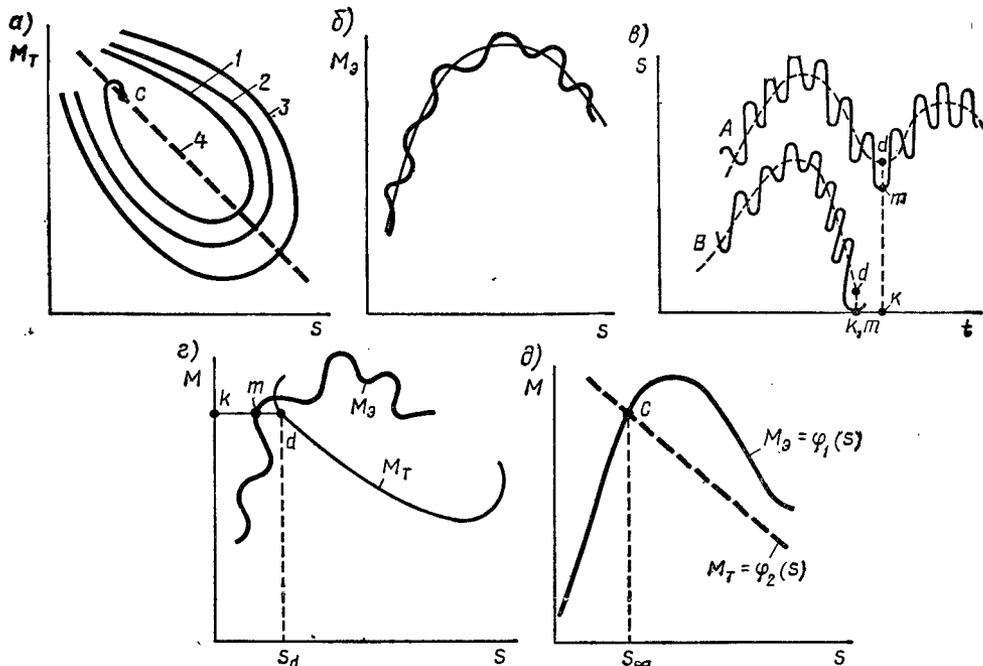


Рис. 14.22. Поведение генератора и турбины при установлении асинхронного хода

1) выражение (14.23) указывает только на возможность ресинхронизации, т. е. дает необходимые, но не необходимые и достаточные условия ресинхронизации; 2) зависимость $M = \varphi(\delta)$, входящая в (14.23), заранее не известна, и получение количественных результатов требует предположений о ее характере. Принимая $\Sigma M = M_m \sin \delta$, где $\delta = 0 \div \pi$, будем иметь

$$s_{\text{макс}} = 2 \sqrt{M_m/T_J} ; s_{\text{ср}} = \sqrt{M_m/T_J}. \quad (14.24)$$

В общем случае при других предположениях о изменении угла δ получим

$$s_{\text{ср}} = K \sqrt{M_m/T_J},$$

где K меняется от 1 до $\sqrt{2}$. Выражая T_J в секундах, а M_m — в относительных единицах, иногда записывают

$$s_{\text{ср}} = (0,06 \div 0,08) \sqrt{M_m/T_J}.$$

При получении (14.24) были сделаны и другие допущения. Так, существенно, что установившийся асинхронный режим и условия синхронизации определялись согласно статической характеристике момента первичного двигателя. В действительности этот режим наступает не сразу и процесс его установления идет в соответствии с динамической характеристикой, отличающейся от статической тем сильнее, чем больше ускорение генератора, инерция регулятора скорости и серводвигателя направляющего аппарата.

Характер процесса при учете динамических характеристик. Протекание процесса ресинхронизации, показанное на рис. 14.22, как и любых быстрых процессов, определяется динамическими характеристиками, являющимися деформированными статическими и иногда существенно отличающимися от них. Примерный вид динамических характеристик турбин $M_T = \varphi(s)$ при разных ds/dt (кривые 1, 2, 3) и статической характеристики (зависимость 4) показан на рис. 14.22, а. На рис. 14.22, б приводится асинхронная динамическая характеристика мощности генератора с наложенной на нее пульсирующей синхронной составляющей мощности: $M_g = \varphi(s, ds/dt)$. Изменение скольжения (пульсации) $s = f(t)$ в случаях А и Б показано на рис. 14.22, в. Здесь в случае А процесс ресинхронизации невозможен, так как минимальное скольжение (точка m) не проходит через нулевое значение (точка k). В случае В, напротив, создаются условия возможной синхронизации ($s = 0$, k и m совпадают). На рис. 14.22, г даны те же соотношения, что и на рис. 14.18, в, но применительно к изменениям динамических моментов. Опять-таки условием возможности синхронизации будет равенство нулю отрезка $k - m$.

Установившийся асинхронный ход показан на рис. 14.22, д, когда соответствующее ему значение скольжения s_{∞} определяется пересечением статических характеристик $M_g = \varphi_1(s)$ и $M_T = \varphi_2(s)$.

§ 14.7. ПРАКТИКА ВХОЖДЕНИЯ В СИНХРОНИЗМ АСИНХРОННО РАБОТАЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ (РЕСИНХРОНИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ)

Асинхронный ход генератора или части системы, появившийся в результате нарушения устойчивости, должен быть ликвидирован, и синхронная работа должна быть восстановлена. При этом удобнее всего восстановить синхронизм путем ресинхронизации выпавшего генератора без отключения его от сети. Такое восстановление нормального режима обладает рядом преимуществ, главное из которых — быстрота восстановления. Так, в случае отключения генератора от сети и последующей его синхронизации набор нагрузки будет происходить не менее нескольких минут. Все это время выпавший из синхронизма генератор не будет выдавать энергию в систему. Если же выпавший из синхронизма генератор не отключается от сети, то, даже работая в асинхронном режиме, он выдает в сеть некоторую мощность, а входя в синхронизм путем ресинхронизации, он быстро увеличивает эту мощность. Если генератор или станция, выпавшая из синхронизма и некоторое время $\Delta t_{\text{а.с}}$ проработавшая в асинхронном режиме, затем восстанавливает свою синхронную работу при условиях, близких к условиям исходного режима, то такую систему практически нельзя считать неустойчивой, ее следует рассматривать как систему, обладающую результирующей устойчивостью.

Способность системы восстанавливать синхронную работу после кратковременного асинхронного хода и будет, следовательно, называться *результатирующей устойчивостью*.

Результатирующая устойчивость широко реализуется в практике эксплуатации энергосистем, и для ее улучшения (уменьшения установившегося скольжения s_{∞} , сокращения времени асинхронного хода Δt_{ac} и повышения надежности ресинхронизации) разработаны специальные устройства.

При нарушении синхронизма, вызванных статической неустойчивостью, которая обусловлена изменением схемы системы или перегрузкой генераторов, ресинхронизация оказывается возможной только после вмешательства персонала, который должен установить причины неустойчивости. Вхождение в синхронизм после нарушения динамической устойчивости может происходить и без вмеша-

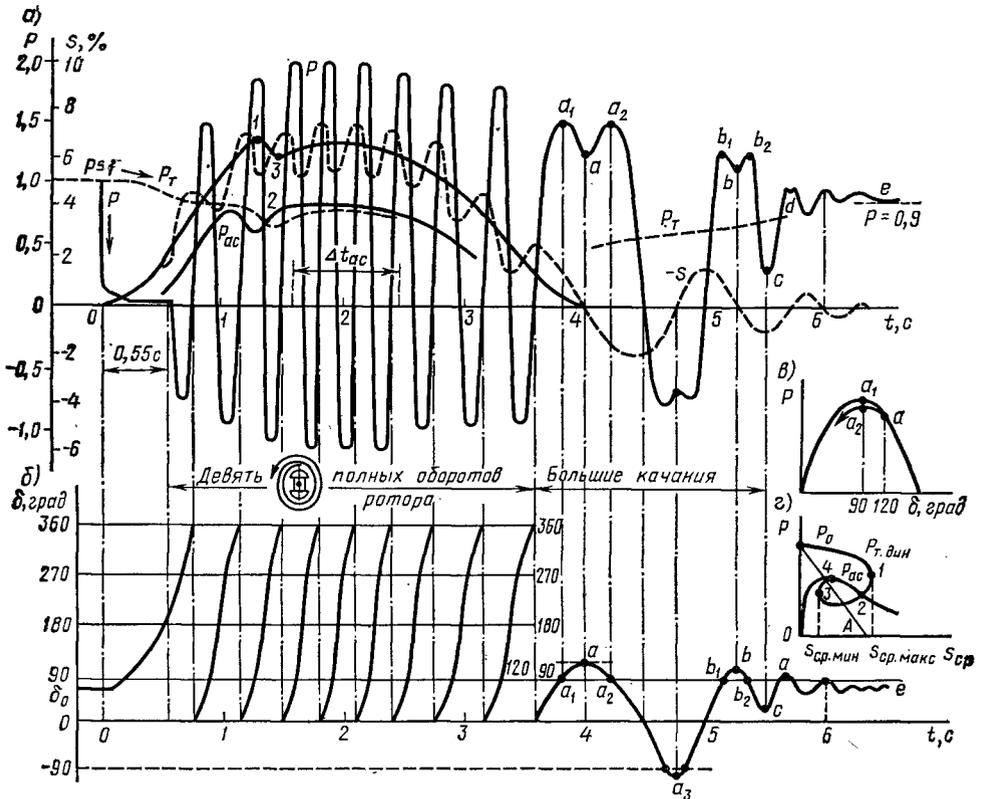


Рис. 14.23. Примерный характер протекания процесса при выпадении из синхронизма и последующей ресинхронизации:

a — изменение полной электрической мощности генератора P , мощности турбины P_T , асинхронной мощности P_{ac} , входящей в полную мощность P , среднего s_{cp} и мгновенного s скольжения; b — $\delta = f(t)$, a_1, a, a_2, b_1, b, b_2 — большие качания, зависимость $P = f(\delta)$; c — процесс установления асинхронного хода; зависимости $P_T = \varphi(s_{cp})$, $P_{ac} = \varphi(s_{cp})$. Точки 1, 2, 3, 4 на рис. a соответствуют тем же точкам на рис. g ; точки a_1, a, a_2 , точки b_1, b, b_2 и точки c, d, e на рис. a соответствуют тем же точкам на рис. b и e

ства персонала, автоматически, под действием регуляторов скорости или специальных приборов-ресинхронизаторов.

Опыт эксплуатации показал, что вполне возможна удачная ресинхронизация и результирующая устойчивость не только отдельных генераторов, но и групп генераторов или групп станций — частей системы, связанных линиями передачи. Ресинхронизация успешно проводится на мощных электростанциях, как гидравлических, так и тепловых. Возможность ресинхронизации и специальные мероприятия по ее проведению должны предусматриваться при проектировании электрических станций и систем.

Происходящие процессы показаны на рис. 14.23. Этот рисунок является обработанной осциллограммой ресинхронизации генератора мощностью 50 МВт. Происходящие процессы можно условно разбить на три характерных этапа. П е р в ы й э т а п — это трехфазное короткое замыкание, продолжающееся в данном конкретном случае около 0,55 с. В это время агрегат не отдает мощность в сеть. Небольшая часть ее расходуется на покрытие потерь в генераторе и трансформаторе, а основная ее часть идет на сообщение ротору кинетической энергии — увеличение его скорости сверх синхронной. Из рисунка видно, что значение среднего скольжения довольно быстро растет.

После отключения короткого замыкания начинается в т о р о й э т а п процесса. Наличие возбуждения и динамической явнополюсности генератора во время устанавливающегося и установившегося асинхронного хода вызывает колебания активной мощности. Под действием регулятора скорости впуск энергоносителя и мощность турбины начинают уменьшаться, наступает кратковременный асинхронный ход при скольжении s_{∞} . Этот кратковременный асинхронный режим продолжается только в течение Δt_{ac} и вскоре нарушается в результате действия регулятора или вмешательства персонала, уменьшающих мощность первичного двигателя. Скольжение начинает интенсивно уменьшаться. На 4-й секунде, после дветя полных проворотов ротора, скольжение проходит через нуль.

Наступает т р е т ь и й э т а п процесса, во время которого генератор входит в синхронизм, показателем чего служат характерные «двугорбые» характеристики мощности, отражающие процесс больших качаний, во время которых мгновенное скольжение периодически изменяет знак при среднем скольжении, равном нулю. На 6-й секунде качания прекращаются и наступает нормальная работа ресинхронизировавшегося генератора, причем за счет снижения мощности, необходимого для осуществления ресинхронизации, мощность в установившемся режиме оказывается примерно на 10% меньше мощности исходного режима (45 МВт вместо 50 МВт). Применительно к последнему случаю этот процесс можно видеть на рис. 14.23, г, где показано, что запаздывание изменения механической мощности турбины под действием инерционных органов, реагирующих на возрастание скорости, приводит к запаздыванию мощности турбины и «забросу» скольжения до $s_{cp, макс}$ (точка 1). В дальнейшем в процессе изменения мощности турбины скольжение падает до $s_{cp, мин}$ и после нового увеличения достигает установившегося значения s_{∞} . Установившийся асинхронный ход, продолжающийся в течение Δt , прекращается дополнительным воздействием на турбину и уменьшением ее мощности, что приводит к снижению скольжения и ресинхронизации.

Процесс вхождения в синхронизм существенно зависит от параметров регулятора скорости. Эти параметры могут быть таковы, что среднее скольжение будет монотонно приближаться к установившемуся значению, определяемому статизмом регулятора, средним асинхронным моментом и собственным моментом

генератора. Для этого случая характер процесса показан на рис. 14.24 (характеристика 1). Генератор входит в синхронизм при изменениях мгновенного скольжения.

Однако часто регулятор скорости имеет такую настройку и такие параметры, что при приближении к синхронизму происходит перерегулирование и скольжение приближается к установившемуся значению колебательно или даже с переменной знака (характеристики 2 и 3). В тех случаях когда регулятор настроен так, что среднее скольжение при подходе к нулевому значению меняет знак (характеристика 3 на рис. 14.24), может наблюдаться явление срыва ресинхронизации.

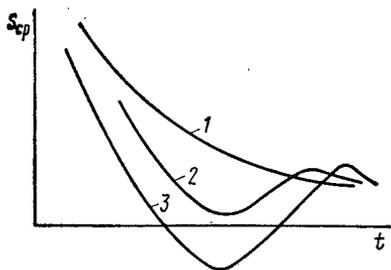


Рис. 14.24. Зависимости $s_{ср} = f(t)$ при ресинхронизации, построенные для трех случаев настройки регулятора скорости

Ресинхронизировавшийся генератор снова переходит в асинхронный режим. Это явление иногда называют *проскакиванием синхронизма*. После проскакивания синхронизма может снова произойти ресинхронизация или переход в новый асинхронный режим. Это зависит от вида кривой среднего скольжения. Во всяком случае, при любой настройке регулятора, а также любых параметрах генератора и системы можно за счет специального воздействия на регулирующее устройство генератора добиться уверенной и достаточно быстрой его ресинхронизации.

Явления, происходящие при ресинхронизации генераторов, в настоящее время еще не полностью изучены, и совершенно надежной методики расчета, отражающей детали протекания процесса, особенно в сложной системе, пока не существует. Однако общая инженерная характеристика процесса может быть получена с помощью ЦВМ и АВМ.

Рассмотрение процесса ресинхронизации можно провести, применяя способ площадей, который в этом случае может дать хотя и грубое, но все же удовлетворительное описание происходящих явлений. Далее будут рассмотрены основные уравнения, позволяющие производить расчеты и получать с их помощью ориентировочную оценку условий ресинхронизации генераторов или асинхронно работающих частей системы для тех или иных конкретных случаев.

Процесс ресинхронизации синхронных генераторов, работающих в асинхронном режиме при скорости, большей синхронной. В асинхронно работающей машине наличие возбуждения приводит, как было показано выше, к пульсациям скольжения от $s_{макс}$ до $s_{мин}$. При некотором значении тока возбуждения мгновенное скольжение может пройти через нуль. Уменьшая мощность первичного двигателя, можно снизить скольжение. Прохождение скольжения через нуль означает, что дополнительная кинетическая энергия ротора стала равна нулю, а асинхронная мощность исчезла, так как генератор вошел в синхронизм.

Останется или нет генератор далее в режиме синхронной работы, зависит от протекания процесса и соотношений между электрической мощностью $P_{сн}$, действующей после входа генератора в синхронизм, и мощностью турбины P_T , а также от угла δ , при котором скольжение прошло через нуль. Условие $s = 0$ есть необходимое, но в большинстве случаев недостаточное для ресинхронизации.

Рассмотрим процесс ресинхронизации, пользуясь основным соотношением, вытекающим из метода площадей. Из соотношения (14.23) следует, что значение $s = 0$ может наступить при условии

$$s_{cp} = \sqrt{\frac{1}{T_J} \int_0^{\delta} \Sigma M d\delta}.$$

Это условие может осуществляться при различных значениях угла δ и различных соотношениях синхронного момента $M_{сн}$ и момента турбины M_T .

Предположим, что увеличение тока возбуждения, как это показано на рис. 14.25, а, увеличивает синхронный вращающий момент и вызывает такое увеличение пульсаций скольжения, что скольжение $s_{мин}$ пройдет через нуль ($ds/dt = 0$). Этот момент будем считать наступлением синхронного режима — ресинхронизацией, которая, однако, может быть и неуспешной, если генератор вновь выйдет из синхронизма.

Условия вхождения в синхронизм могут быть приближенно выявлены из следующих простых соотношений. Предположим, что вплоть до момента синхронизации на валу генератора действовал тормозящий избыточный момент (если генератор шел со скоростью выше синхронной). Благодаря этому моменту скольжение уменьшается. Избыточный момент, определяющий движение генератора в асинхронном режиме, состоит из трех составляющих — момента турбины, синхронного и асинхронного моментов:

$$\Delta M = M_T - M_{сн} - M_{ac}.$$

Так как при $s = 0$ асинхронный момент равен нулю (при неучете динамических составляющих), то необходимым условием вхождения в синхронизм при $t = t_{сн}$ будет

$$M_{сн} \geq M_T.$$

При $M_{сн} > M_T$ ресинхронизация будет успешной (если не учитывать возможности повторного нарушения синхронизма в процессе последующих качаний, что будет рассмотрено далее). В этом случае в процессе колебаний, вызванных знакопеременным синхронным моментом, скольжение достигает нуля при наличии нескомпенсированного тормозного момента $\Delta M < 0$, вследствие чего скольжение меняет знак и угол δ начинает уменьшаться. Этот случай показан на рис. 14.25, а.

Соотношение $M_{сн} = M_T$ соответствует критическому случаю, когда при вхождении в синхронизм генератор оказывается в положении неустойчивого равновесия. Любое малое возмущение в зависимости от направления его воздействия приводит либо к уменьшению угла и успешной ресинхронизации, либо к увеличению угла и выпадению из синхронизма. Этот случай показан на рис. 14.25, б.

Если условие $M_{сн} \geq M_T$ не выполняется, то ресинхронизация не может произойти, хотя скольжение может настолько близко подойти к нулю, что практически режим можно считать синхронным. При неудачной синхронизации угол δ будет продолжать изменяться и генератор в конечном счете останется в асинхронном режиме (рис. 14.25, в). Итак, синхронизация возможна при углах δ , которые обеспечивают $M_{сн} \geq M_T$.

Значение угла $\delta_{сн}$, при котором появляется возможность втягивания в синхронизм,

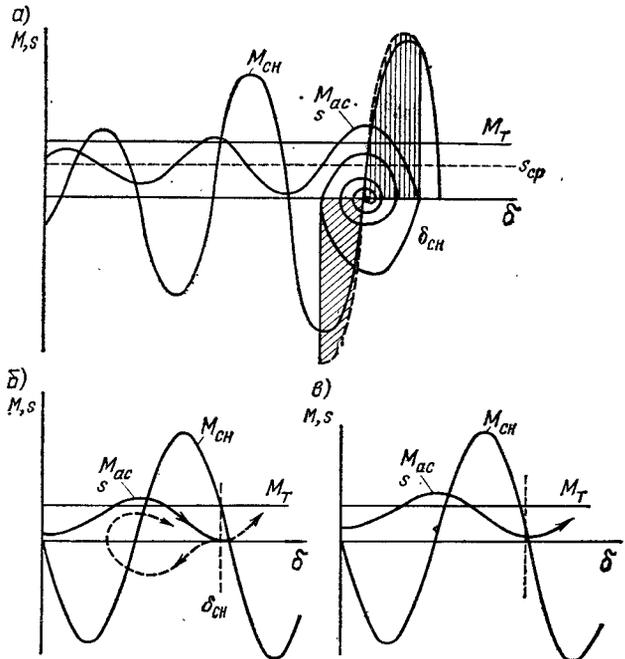


Рис. 14.25. Ресинхронизация генератора при подведении к синхронизму увеличением возбуждения

будет тем ближе к 180° , чем меньше момент турбины по отношению к максимальному синхронному. В пределе, при $M_T \approx 0$, ресинхронизация будет происходить при углах, близких к 180° . При этом, как уже указывалось, чем ближе угол синхронизации к 180° , тем больше размах и период качаний, которые наступают после вхождения в синхронизм. Но так как после вхождения в синхронизм среднее скольжение уменьшается до нуля, то регулятор скорости турбины начинает увеличивать выпуск энергоносителя, вследствие чего возрастает момент турбины. Это приводит к увеличению площадей ускорения и уменьшению площадей тормо-

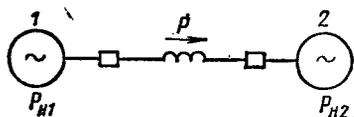


Рис. 14.26. Схема слабой связи без промежуточных нагрузок

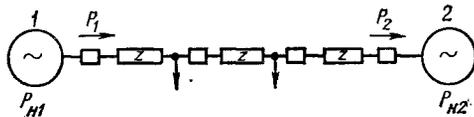


Рис. 14.27. Схема слабой связи с промежуточными нагрузками

жения в процессе качаний, в результате чего возможно выпадение из синхронизма в одном из последующих циклов качаний.

Подобные случаи называются *неуспешной ресинхронизацией*. Часто можно избежать неуспешной ресинхронизации, надлежащим образом регулируя в процессе качаний ток возбуждения. Рост амплитуды синхронного момента приводит к уменьшению амплитуды качаний, что сводит опасность повторного выпадения из синхронизма к минимуму. Процесс вхождения в синхронизм, рассмотренный ранее с помощью метода площадей, может быть рассчитан посредством метода последовательных интервалов при обязательном учете характеристик турбин и установленных на них регуляторов скорости.

Практически важные выводы сводятся к следующему:

- 1) когда асинхронный момент мал, например при работе генератора через длинную линию, асинхронный ход и втягивание в синхронизм будут осуществляться при малом моменте турбины. При этом во избежание больших качаний и возможности неуспешной ресинхронизации ее лучше проводить при меньшем или снятом возбуждении. Только после подхода генератора к скольжению ($s = 0$) целесообразно увеличивать возбуждение, с тем чтобы обеспечить спокойное вхождение в синхронизм с уменьшением размаха качаний;
- 2) когда асинхронный момент достаточно велик (например, при работе генератора через короткую линию, ресинхронизации турбогенераторов, двигателей и т. д.), процесс ресинхронизации в большинстве случаев лучше осуществлять при значительном токе возбуждения;
- 3) после ресинхронизации обычно целесообразно дальнейшее увеличение тока возбуждения, уменьшающее размах качаний;
- 4) сильное регулирование возбуждения эффективно облегчает процесс ресинхронизации.

Ресинхронизация частей систем, объединенных слабой связью. Ранее указывалось что и слабосвязанные части системы или отдельные системы могут выйти из синхронизма и после асинхронного хода ресинхронизироваться. Напомним, что *слабосвязанными системами* называются системы, соединенные между собой такой ЛЭП, по которой можно передавать из одной системы в другую по условиям статической устойчивости мощность, не превышающую 15—25% от мощности меньшей из систем. Слабой связью между системами может являться ЛЭП, связывающая системы (рис. 14.26), а также ЛЭП, имеющая ряд промежуточных нагрузок (рис. 14.27).

При анализе ресинхронизации энергосистем, соединенных слабыми связями, в качестве грубого допущения обычно принимают, что: а) напряжение на основных нагрузках энергосистем (но не на нагрузках, подключенных к линии) постоянно и потребляемая мощность неизменна; б) регуляторы скорости турбины настроены так, что скольжение, соответствующее статизму системы, устанавливается без перегулирования.

Рассмотрим условия ресинхронизации для случая слабой связи по схеме объединенных систем, соответствующей рис. 14.26, при допущении, что ЛЭП имеет только реактивное сопротивление. Более сложные случаи, например случай, когда к ЛЭП подключены нагрузки или когда слабой связью служит ЛЭП с промежуточными электрическими станциями, здесь не рассматриваются.

При исследовании ресинхронизации двух концентрированных систем, соединенных слабой связью, можно каждую из них заменить одним эквивалентным генератором и воспользоваться соотношениями, выведенными для двух генераторов соизмеримой мощности. При этом предположим, что при асинхронном ходе между системами не возникает больших качаний и нарушеннй устойчивости внутри каждой из этих систем не может быть. Предположим также, что мощность в предаварийном режиме передавалась из системы 1 в систему 2 (рис. 14.27). При отключении линии, соединяющей системы, частота в системе 1 повышается, а частота в системе 2 понижается в соответствии со статическими характеристиками систем. После несинхронного включения среднее установившееся скольжение будет незначительно отличаться от скольжения перед включением, так как собственные моменты систем, определяемые мощностью нагрузки, остаются при асинхронном ходе практически теми же, что и при раздельной работе, а асинхронные моменты при слабой связи незначительны. При сделанных допущениях ресинхронизация обеспечивается в случае несинхронного включения с любым углом, если выполняется условие*

$$\delta_{\text{ср. доп}} = \sqrt{M_{12}/T_{J2}} \geq \delta_{\text{ср. уст}} = (M_{T10} - M_{11} - M_{ac1}) \sigma_1 + (M_{22} - M_{T20} - M_{ac2}) \sigma_2. \quad (14.25)$$

Примем, что в (14.25) индекс 1 имеет та система, в которой частота выше; за базисную мощность примем мощность меньшей системы. Величины M_{11} и M_{22} учитывают нагрузку и потери в сети. Статизмы частот системы (σ_1 и σ_2) должны быть взяты с учетом имеющегося в системе резерва мощности.

Эквивалентная механическая постоянная

$$T_{J2} = T_{J1} T_{J2} / (T_{J1} + T_{J2}).$$

Имеется некоторая вероятность ресинхронизации при скольжении, превосходящем $\delta_{\text{ср. доп}}$, но меньшем $2\delta_{\text{ср. доп}}$. В том случае, когда слабая связь между системами осуществляется с помощью ЛЭП без промежуточных нагрузок, можно упростить расчет условий ресинхронизации. При определении среднего установившегося скольжения при слабой связи между системами можно пренебречь влиянием асинхронного момента, так как наибольшее значение асинхронного момента здесь составляет около 2% от взаимного момента.

В ряде случаев можно не учитывать изменения собственного момента вследствие появления потерь мощности в активном сопротивлении линий. Для выявления этих случаев сравним собственный и взаимный моменты. Собственный момент

$$M_{11} = M_H + (E_1^2/z_{11}) \sin \alpha_{11} = M_H + M_{\Pi}.$$

Сопоставим взаимный момент и момент потерь:

$$M_{\Pi}/M_{12} = E_1^2 z_{12} \sin \alpha_{11} / (z_{11} E_1 E_2) = E_1 z_{12} \sin \alpha_{11} / (E_2 z_{11}). \quad (14.26)$$

Как это видно из рис. 14.22, здесь $z_{11} = z_{12}$, $\alpha_{11} = \alpha_{12}$. Примем также, что $E_1 \approx E_2$. С учетом указанных равенств соотношение (14.26) примет вид

$$M_{\Pi}/M_{12} = \sin \alpha_{12}. \quad (14.27)$$

Следовательно, при передаче в предаварийном режиме мощности, близкой к предельной, погрешность в определении установившегося скольжения, вызванная пренебрежением активным сопротивлением линии, может быть найдена согласно (14.27). Например, для линий 500—220 кВ с расщепленными проводами $\alpha_{12} \approx 6^\circ$ и погрешность в определении $\delta_{\text{ср. уст}}$ при неучете активного сопротивления не будет превосходить 10%.

Рассмотрим условия ресинхронизации для тех случаев, когда можно пренебречь потерями в активном сопротивлении линии. Как следует из рис. 14.27, в предаварийном режиме баланс мощностей определяется соотношением

* Расчет ресинхронизации рекомендуется проводить с большим запасом, т. е. принимать $K = 1$. При расчетах уставок делительной защиты могут быть взяты меньшие запасы, так как если ресинхронизация не произошла, то установившийся асинхронный режим будет происходить со скольжением, большим $\delta_{\text{ср. доп}}$.

$$P = P_{12} \sin \delta_{12} = P_{T10} - P_{11} = P_{22} - P_{T20}.$$

Уравнение моментов может быть записано как

$$M = M_{12} \sin \delta_{12} = M_{T10} - M_{11} = M_{22} - M_{T20}, \quad (14.28)$$

где $M < M_{12}$.

Подставляя (14.28) в (14.25) и пренебрегая асинхронными моментами, получим

$$\sqrt{M_{12}/T_{J_s}} \geq M(\sigma_1 + \sigma_2),$$

откуда

$$M/M_{12} \leq 1/[(\sigma_1 + \sigma_2) \sqrt{M_{12}T_{J_s}}]. \quad (14.29)$$

Из (14.29) следует, что уменьшение взаимного момента позволяет обеспечивать ресинхронизацию при меньших запасах статической устойчивости в предаварийном режиме. Кроме того, при достаточно малом M_{12} ресинхронизация будет происходить даже после нарушения статической устойчивости. Однако в последнем случае после ресинхронизации вновь произойдет нарушение статической устойчивости, если не ограничить мощность, передаваемую по линии. Это положение проверялось с помощью математического моделирования, причем при исследовании учитывались динамические характеристики регуляторов скорости и частотный эффект нагрузки. Полученные результаты показали, что (14.29) дает условия ресинхронизации с запасом, что объясняется в основном неучетом динамических свойств регуляторов скорости. Во время исследований при достаточно малых M_{12} наблюдалось также временное восстановление синхронизма после нарушения статической устойчивости.

* § 14.8. УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕДАЧАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Очевидно, что регулирование потока мощности вентилей передачи постоянного тока (ППТ) может более быстро, чем при регулировании генераторов переменного тока, устранять небаланс мощности в энергосистеме. Мощность ППТ обычно изменяется в функции скольжения генераторов, получающаяся быстродействующая система регулирования повышает динамическую устойчивость систем переменного тока, предотвращает аварийный выбег генераторов. Общая закономерность примерно такова: чем больше мощность ППТ в исходном режиме, тем больше повышается уровень динамической устойчивости. В случае аварии в передающей энергосистеме переменного тока форсировка ППТ поможет торможению генераторов при сбросе мощности. Для увеличения динамической устойчивости приемной энергосистемы при необходимости компенсации энергии ускорения генераторов приемного конца осуществляется реверс мощности ППТ.

Регулирование при увеличении мощности ППТ. На рис. 14.28 показан пример системы с параллельными передачами переменного и постоянного тока. Система регулирования, используемая для увеличения мощности ППТ, показана штриховыми линиями. Она реагирует на сигнал от снижения напряжения при авариях в энергосистеме переменного тока. Ток в ППТ увеличивается с ростом тока уставки I_{d0} регулятором тока.

Обозначения, принятые на рис. 14.29, где показаны угловые характеристики мощности для системы, приведенной на рис. 14.28, следующие: P_0 — мощность, протекающая по ЛЭП переменного тока в нормальном режиме; V_1 — площадь торможения за счет изменения мощности генераторов; P_d — мощность ППТ в нормальном режиме; δ_0 — угол расхождения э. д. с. в нормальном режиме; $\delta_{откл}$ — угол расхождения э. д. с. в момент отключения короткого замыкания; $\delta_{макс}$ — максимальный угол, соответствующий пределу динамической устойчивости; A_1 —

уменьшение энергии системы переменного тока вследствие короткого замыкания (площадка ускорения); A_2 — то же, системы постоянного тока (P_d); B_2 — торможение за счет увеличения мощности ППТ.

Если регулирование не обеспечивает быстрого увеличения мощности ППТ, т. е. $B_2 = 0$, то на рис. 14.29 видно, что площадки ускорения $A_1 + A_2$ становятся больше площадки торможения B_1 и генератор Γ будет ускоряться. Для увеличения динамической устойчивости мощность ППТ надо увеличить так, чтобы

$$B_2 = (A_1 + A_2) - B_1. \quad (14.30)$$

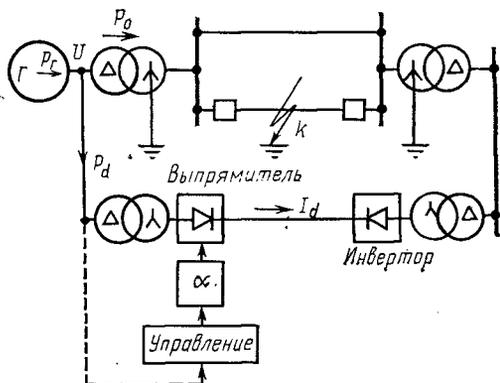


Рис. 14.28. Электрическая система, содержащая передачу переменного тока и управляемую постоянному тока:

P_r — мощность генератора; P_d — мощность ППТ; P — мощность передачи переменного тока; α — угол зажигания (управление мощностью ППТ)

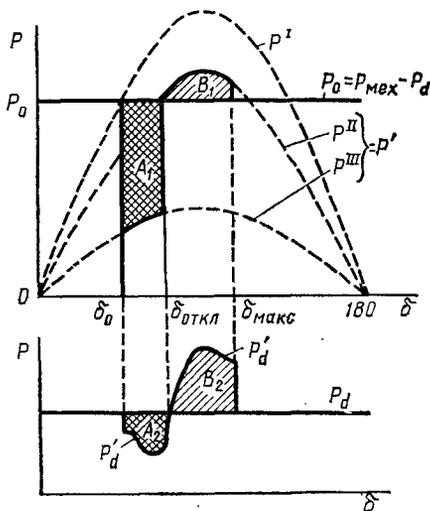


Рис. 14.29. Угловые характеристики генераторного конца передачи, содержащей генератор и линию передачи постоянного тока

Обозначим через P' характеристики мощности при переходном режиме P^{II} , P^{III} генератора, соответственно через P_d — переходную характеристику ППТ.

Уравнение (14.30) может быть представлено как

$$\int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} (P'_d - P_d) d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} [(P_0 - P^{III}) + (P_d - P'_d)] d\delta - \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} (P^{II} - P_0) d\delta. \quad (14.31)$$

Взаимосвязь между механической мощностью на входе $P_{мех}$ и электрической мощностью на выходе P_v генератора установим следующим образом. Введем символическое обозначение мощности в начале ЛЭП переменного тока P' . Тогда в нормальном и переходном режимах:

$$P_{мех} = P_v; \quad P'_v = P' + P'_d,$$

где $P'_r = P^{II} + P'_d$ — в послеаварийном режиме (аналогично, $P'_r = P^{III} + P'_d$ во время аварии), т. е. в общем случае $P' = P^{II}$ или P^{III} .

При использовании этих взаимосвязей (14.31) запишется так:

$$\int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} P'_d d\delta = \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} P_{мех} d\delta - \int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} P'_r d\delta - \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} P' d\delta. \quad (14.32)$$

Изменение P'_d , т. е. мощности ППТ, показано на рис. 14.30, где $t_{откл} = t_s$ и t_d — продолжительность короткого замыкания и время послеаварийного процес-

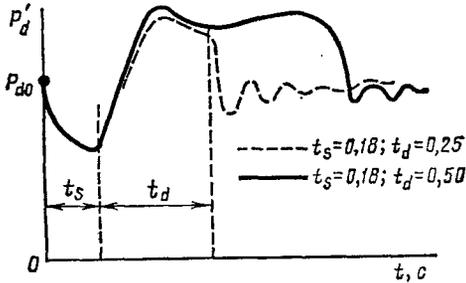


Рис. 14.30. Изменение мощности передачи постоянного тока при АПВ на линии передачи переменного тока

са соответственно. При $t_d > 0,45$ с в исследуемой регулируемой системе увеличение мощности ППТ в дальнейшем может считаться почти постоянным.

Если P'_d в (14.32) постоянно, то (14.32) превращается в выражение

$$P'_d \approx P_{мех} \frac{\delta_{макс} - \delta_0}{\delta_{макс} - \delta_{откл}} - \frac{1}{\delta_{макс} - \delta_{откл}} \left(\int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} P'_r d\delta + \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} P' d\delta \right). \quad (14.33)$$

Приращение мощности $\Delta P_d = (P'_d - P_d)$ находится из (14.33). Необходимо подчеркнуть, что условные значения P'_r и P' изменяются в функции угла и времени. Из (14.33) видно, что если P'_r и P' имеют большие значения во время аварии, т. е. уменьшение мощности на выходе генератора мало, то и увеличение P_d может быть незначительным.

Реверс мощности ППТ. Динамическая устойчивость приемной энергосистемы (рис. 14.31) определяется согласно угловым характеристикам мощности, показанным на рис. 14.32. В нормальном режиме механическая мощность, выдаваемая генератором, $P_{мех} = P_r = P - P_d$. При коротком замыкании в системе переменного тока электрическая мощность, отдаваемая генератором, уменьшается: $P_r < < P_{мех}$. Вследствие этого генератор, ускоряясь, может выйти из синхронизма. Его устойчивость можно повысить уменьшением мощности ППТ или реверсом ее потока мощности. На рис. 14.32 показаны площадки: энергии ускорения генератора (A_1), уменьшения мощности ППТ, создающей энергию, эквивалентную торможению (A_2). При реверсе ППТ появляется площадка B_2 , отвечающая дополнительной энергии торможения. Согласно способу площадей,

$$B_2 = A_1 - A_2 - B_1. \quad (14.34)$$

Пусть P'_r , P' , P'_d — мощности во время переходных процессов в генераторе, ЛЭП переменного тока и ППТ соответственно. Тогда (14.34) можно записать в виде

$$\int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} (P'_d + P_d) d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{откл}} [(P_0 - P') - (P_d - P'_d)] d\delta - \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{макс}} (P_0 - P') d\delta. \quad (14.35)$$

Используя соотношения $P_m = P_r = P - P_d$; $P'_r \approx P' - P'_d$ и (14.35), можно записать (14.35) аналогично (14.32), имея в виду, что P'_d при изменении δ от $\delta_{откл}$ до $\delta_{макс}$ означает реверсивную мощность ППТ. Для того чтобы повысить

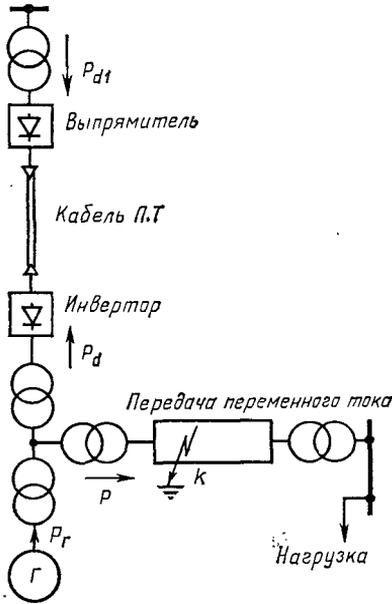


Рис. 14.31. Схема системы, содержащей передачу постоянного и переменного тока, совместно питающие нагрузку

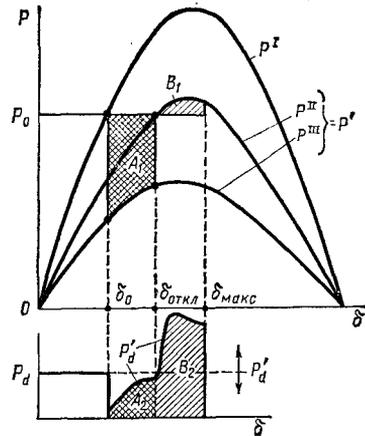


Рис. 14.32. Угловые характеристики мощности при управлении ППТ в системе, показанной на схеме рис. 14.31

динамическую устойчивость приемной системы, показанной на рис. 14.31, должны быть приняты во внимание следующие соображения:

- а) при коротком замыкании в приемной ЭС уменьшение мощности ППТ предотвращает ускорение генератора и обеспечивает динамическую устойчивость;
- б) в случае значительного уменьшения мощности на выходе генератора при коротком замыкании необходимо произвести реверс потока мощности ППТ для предотвращения ускорения генератора.

Связь между изменением угла δ генератора и временем отключения аварии в случае отсутствия регулирования ППТ показана на рис. 14.33, а в случае регулирования ППТ — на рис. 14.34, из которых следует, что регулирование ППТ резко улучшает динамическую устойчивость.

Расчеты изменений мощности ППТ проводятся согласно выражению

$$P_d = (K_1 E_1 \cos \alpha - R_1 I_d) I_d, \quad (14.36)$$

где ток

$$I_d = K_1 E_1 \cos \alpha - E_{d2} / Z. \quad (14.37)$$

Здесь K_1 — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя; $E_1 = U_1$ — фазовое напряжение переменного тока отправного конца; α — угол регулирования выпрямителя; $R_1 = r_B$ — эквивалентное сопротивление выпрямителя; E_{d2} — выпрямленное напряжение

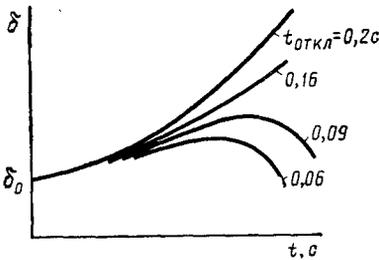


Рис. 14.33. Изменение угла при коротком замыкании в системе, показанной на схеме рис. 14.31, без управления ППТ

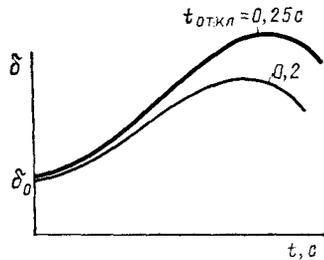


Рис. 14.34. Изменение угла при коротком замыкании (рис. 14.31) при управлении ППТ

инвертора при холостом ходе; $Z = Z_0$ — сопротивление цепи тока, включающего эквивалентное сопротивление выпрямителя и инвертора.

Подставив (14.37) в (14.36), получим

$$\left. \begin{aligned} P_d &= [(Z - R_1) K_a E_1^2 + (2R_1 - Z) E_{d2} K_a E_1 - R_1 E_{d2}^2] / Z^2; \\ P_{\text{ППТ}} &= [(Z - r_B) K_B U_1^2 + (2r_B - Z_2) U_2 K_B U_1 - r_B U_2^2] / Z_2^2, \end{aligned} \right\} \quad (14.38)$$

где $K_a = K_1 \cos \alpha$. Очевидно, что K_a — функция α , так же как и K_B , зависящая от $\cos \alpha$ и схемы выпрямителя.

Так как $Z > R_1$, то $(Z - R_1) > (2R_1 - Z)$. Из (14.38) видно, что при отсутствии регулирования выпрямленного напряжения инвертора E_{d2} мощность P_d может стать равной нулю при глубоких снижениях напряжения в системе переменного тока.

* § 14.9. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Сопротивление, заземляющее нейтраль трансформатора. В высоковольтных сетях электрических систем СССР нейтрали трансформаторов глухо заземляются. Если нейтрали трансформаторов заземлить через небольшое сопротивление, не повышающее заметно напряжения на нейтрали, то условия работы изоляции не меняются, а устойчивость систем при несимметричных коротких замыканиях существенно увеличивается.

Увеличение сопротивления аварийного шунта, вводимого в комплексную схему, приводит к уменьшению сброса мощности во время короткого замыкания и, следовательно, к улучшению динамической устойчивости (рис. 14.35, а, б).

Если в нормальном режиме максимальная передаваемая мощность составляет $P_m^I = EU/x_{12}^I$, то при аварии без заземления нейтрали

$$P_m^{\text{III}} = EU/x_{12}^{\text{III}},$$

где

$$x_{12}^{III} = x_a + x_b + x_a x_b / x_\Delta \quad (\text{здесь } x_\Delta = x_{2\Sigma} + x_{r\Sigma}).$$

В случае заземления нейтрали через активное сопротивление R_{T0}

$$P^{III} = E^2 y_{11}^{III} \sin \alpha_{11}^{III} + E U y_{12}^{III} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}^{III}),$$

где y_{11}^{III} и y_{12}^{III} — проводимости, содержащие активное сопротивление R_0 ; определяются согласно схеме замещения, показанной на рис. 14.35, в.

Построив характеристики P^I , P^{II} , P^{III} с помощью способа площадей, можно установить, что система, неустойчивая в результате однофазного короткого замыкания и отключения цепи при глухом заземлении нейтрали, может стать устойчивой при заземлении нейтрали через активное сопротивление, выбранное надлежащим образом. Включение активного сопротивления положительно сказывается на устойчивости, увеличивая амплитуду P_m^{III} .

Если при некотором значении $R_0 = R_1$ характеристика P^{III} пройдет достаточно близко к характеристике P^{II} , то запас устойчивости системы почти не будет зависеть от продолжительности аварии. Он будет такой же, как и при отключении цепи без аварии (рис. 14.36).

При активном сопротивлении в нейтрали трансформатора $R_0 > R_1$ характеристика P^{III} пройдет выше характеристики P^{II} . Снижение мощности во время короткого замыкания будет меньше, чем при мгновенном отключении. Анализируя соотношения площадок торможения и последующего (после окончания короткого замыкания) ускорения, можно убедиться в том, что при большой длительности короткого замыкания система будет более устойчивой. Такое улучшение устойчивости будет происходить до тех пор, пока сопротивление в нейтрали не достигнет некоторого значения $R_0 = R_2$. Дальнейшее увеличение активного сопротивления в нейтрали будет приводить к снижению амплитуды характеристики P^{III} из-за уменьшения y_{11} и соответственно к ухудшению устойчивости.

При значении $R_0 = R_3$ характеристика P^{III} опять сблизится с характеристикой P^I . Вновь, как и при $R = R_1$, устойчивость не будет зависеть от времени отключения короткого замыкания. Дальнейшее увеличение сопротивления в нейтрали сначала ухудшает устойчивость, а затем при больших сопротивлениях, равноценных разземлению нейтрали, вновь улучшает ее, приближаясь к случаю, когда нейтраль трансформатора разземлена.

При решении вопроса о заземлении нейтрали повышающих и понижающих трансформаторов необходимо иметь в виду, что вследствие большого реактивного сопротивления нулевой последовательности ЛЭП характер заземления нейтрали повышающих трансформаторов почти не влияет на устойчивость при замыканиях на землю в конце ЛЭП, и, наоборот, сильно влияет при замыканиях в начале. Точно так же заземление нейтрали понижающих трансформаторов существенно лишь при замыканиях на землю в конце линии.

При этом потери мощности в заземляющем сопротивлении приходятся в значительной мере на местные генераторные станции приемной системы. При небольшой постоянной

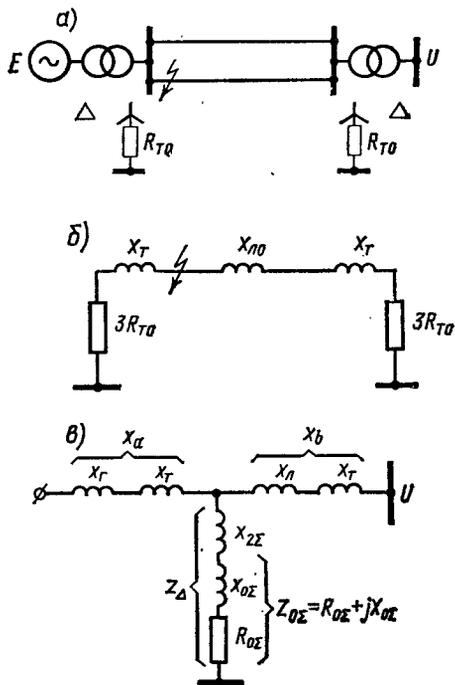


Рис. 14.35. Заземление нейтрали трансформаторов через активное сопротивление:

а — схема замещения системы; б — схема замещения нулевой последовательности; в — комплексная схема замещения системы при однофазном коротком замыкании

инерции станций это может привести иногда не к улучшению, а к ухудшению устойчивости системы.

Заземление нейтралей через активные сопротивления приводит к повышению устойчивости и при двухфазных замыканиях на землю, хотя и значительно меньшему, чем при однофазных. Оптимальное значение активных сопротивлений при двухфазных замыканиях на землю значительно выше, чем при однофазных. Заземление нейтралей трансформаторов

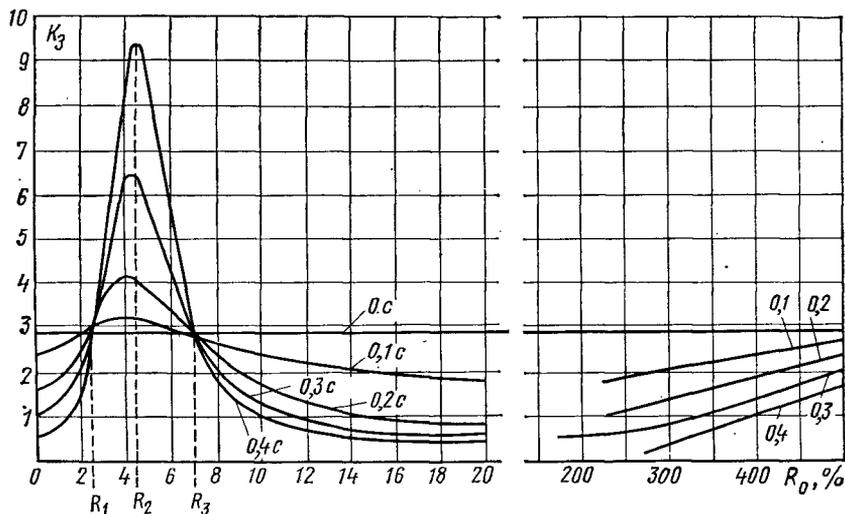


Рис. 14.36. Влияние активного сопротивления в нейтрали трансформаторов на запас динамической устойчивости электропередачи с различными временами отключения при однофазном коротком замыкании

через реактивные сопротивления, как правило, менее эффективно, чем заземление через активные сопротивления.

Установка для электрического торможения генераторов во время аварии.

Для повышения устойчивости при симметричных коротких замыканиях, как известно, могут быть использованы активные сопротивления, включаемые или последовательно с каким-либо звеном передачи, или параллельно ему (рис. 14.37). Наиболее эффективно включение активных сопротивлений параллельно генераторам или трансформаторам передающей станции. В этом случае действие нагрузочного сопротивления продолжается и после отключения короткого замыкания, а в ряде случаев может только начинаться после отключения короткого замыкания.

Если мощность приемной системы велика сравнительно с мощностью передающей станции, то с помощью нагрузочных сопротивлений можно достичь благоприятных результатов.

Специальные устройства регулирования турбин. Выше было рассмотрено улучшение устойчивости путем поглощения избыточной мощности, развиваемой первичным двигателем в дополнительных нагрузочных сопротивлениях, включаемых в сбросе мощности во время аварии или после нее. Однако небаланс мощности ΔP может быть скомпенсирован и другим путем, а именно уменьшением мощности первичного двигателя.

Если бы регуляторы турбин были безынерционными и вся система регулирования турбины могла следить за изменениями электрической мощности, соответственно меняя механическую мощность, то избыточные моменты всегда были бы устранены и возможность нарушения устойчивости исключена.

Обычные регуляторы турбин не могут решить такую задачу. Наличие инерции, люфтов и трения во всех органах системы регулирования приводит к тому, что регулирование происходит с запаздыванием и нечувствительностью. При качаниях регуляторы практически не реагируют на изменения скорости и клапаны турбины (паровая турбина) или направляющий аппарат (гидротурбина) остаются почти неподвижными. Кроме того, если бы система регулирования и позволяла осуществлять быстрое закрытие впуска энергоносителя, то уменьшение мощности все равно не было бы столь быстрым. При быстром уменьшении впуска энергоносителя в гидравлической турбине происходит явление гидравлического удара, а в паровой турбине — расширения пара в паровых объемах между регулирующим клапаном и первым рядом сопл.

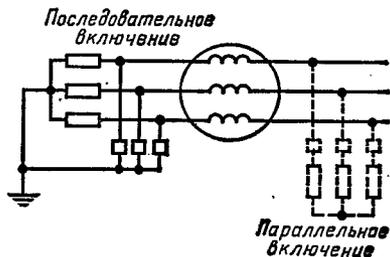


Рис. 14.37. Простейшие схемы включения нагрузочных сопротивлений

Несмотря на трудности воздействия на первичный двигатель, уже созданы промышленно-экспериментальные устройства, позволяющие осуществить надлежащее воздействие и привести мощность первичного двигателя в соответствие с изменяющейся электрической мощностью. Эта задача решается в двух направлениях: разрабатываются новые регуляторы скорости, позволяющие осуществлять необходимое регулирование, которое улучшает статическую и динамическую устойчивость системы; создаются системы аварийного регулирования, улучшающие только динамическую устойчивость.

Совершенствование систем регулирования современных мощных паровых турбин с промежуточным перегревом пара позволяет использовать управление вращающим моментом турбины в аварийных и послеаварийных режимах энергосистемы для существенного увеличения пределов передаваемой по линиям мощности. При этом в функции аварийного регулирования турбины входят:

- кратковременная быстрая разгрузка в момент сброса мощности генератора из-за короткого замыкания на ЛЭП, позволяющая предотвратить выпадение агрегата из синхронизма;
- ограничение мощности агрегатов в послеаварийном режиме на уровне, не превышающем предела статической устойчивости электропередачи;
- обеспечение перехода к новому стационарному режиму без толчков и дополнительных колебаний.

В ряде случаев аварийное снижение мощности блоков позволяет предотвратить необходимость их отключения от сети. Регулирование мощности паровой турбины позволяет демпфировать колебания ротора агрегата в переходных процессах, что может иметь в будущем важное практическое значение при использовании в энергосистемах турбогенераторов со сверхпроводящими обмотками возбуждения.

Аварийное регулирование паровых турбин дает существенный эффект лишь в том случае, если оно осуществляется в тесной взаимосвязи с регулированием

возбуждения турбогенератора (форсирование возбуждения, развозбуждение, демпфирование качаний). Поэтому необходимо одновременное согласованное управление возбуждением турбогенератора и механической мощностью его турбины от одного комплексного управляющего устройства.

Применение промежуточных (подпорных) синхронных компенсаторов и управляемых конденсаторов для обеспечения высокой пропускной способности сверхдальних ЛЭП. Дальние электропередачи должны рассматриваться

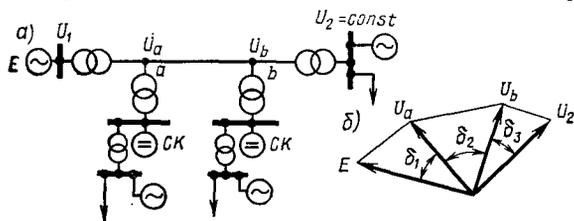


Рис. 14.38. Электропередача с промежуточными синхронными компенсаторами: (СК) или источниками реактивной мощности (ИРМ)

а — схема; б — векторная диаграмма

не только как линии, служащие для передачи мощности от удаленной станции к приемной системе, но одновременно и как элементы единой высоковольтной сети. Электропередачи в этом случае должны выполняться с устройствами поперечной компенсации. СК или ИРМ, применяемые в качестве рассматриваемых устройств, оказываются относительно дешевыми, так как одновременно обеспечивают вы-

сокую пропускную способность электропередачи, связь местных систем и улучшают качество электроснабжения прилегающих районов.

Промежуточные СК или ИРМ, которые устанавливаются на подстанциях, должны обеспечивать поддержание напряжения на линии при изменениях режима электропередачи и тем самым повышать ее устойчивость. Промежуточные синхронные компенсаторы могут быть особенно эффективны при установке на них автоматических регуляторов возбуждения без зоны нечувствительности. В этом случае мощность синхронных компенсаторов может быть равной 0,6—0,8 от передаваемой мощности, что делает применение подобных схем экономически оправданным и конкурентоспособным по отношению к применению других средств повышения устойчивости, например с продольной компенсацией индуктивного сопротивления линии с помощью статических конденсаторов. Дальнейшее уменьшение установленной мощности промежуточных синхронных компенсаторов можно получить при подборе регулирующих устройств, наиболее эффективных в каждом конкретном случае.

Различные компенсаторы, устанавливаемые на промежуточных подстанциях, делят линию на самостоятельные участки, поддерживая напряжения постоянными в начале и конце каждого участка. Если мощность синхронных компенсаторов достаточна для того, чтобы обеспечить постоянство напряжения в точке их присоединения, то предел передаваемой мощности всей электропередачи будет определяться пределом мощности участка, имеющего наименьшую пропускную способность (рис. 14.38), причем последняя находится как произведение напряжений по концам участка, разделенное на его сопротивление.

При резких нарушениях режима, вызванных короткими замыканиями, регуляторы возбуждения не могут достаточно быстро обеспечить постоянство напряжения, что приводит к ограничению передаваемой мощности. В этом отношении продольная компенсация имеет определенные преимущества перед обычными синхронными компенсаторами, даже снабженными регуляторами возбуждения

сильного действия, поскольку ее эффективность проявляется мгновенно, влияя на повышение как статической, так и динамической устойчивости.

Вставки постоянного тока (ВПТ). Вставки являются электропередачами постоянного тока (ППТ), имеющими выпрямительное устройство, инверторное устройство и линию постоянного тока, длина которой l может быть любой. При $l > 0$ вставка передает энергию на расстояние и выполняет ряд других функций. Эти же функции выполняются и при $l = 0$. К ним относятся: 1) возможность связи систем (подсистем — частей системы), имеющих разные частоты; 2) быстрое регулирование потока мощности, включая изменение его направления; 3) снижение уровня токов короткого замыкания в подсистемах, имеющих ВПТ; 4) уменьшение взаимного влияния связываемых подсистем и в этом смысле обеспечение электромеханических процессов (устойчивости) во всей системе. Недостатками ВПТ являются потери энергии (более 5% от проходящей через вставку), появление гармонических составляющих в напряжении и соответственно в токе, необходимость в дополнительных источниках реактивной мощности, значительные стоимость сооружения* (0,06—0,10 млн. руб/МВт) и расходы по его эксплуатации. Упомянутые достоинства функций ППТ имеют соответственно такие альтернативы:

1. Жесткое поддержание частоты в связываемых системах (подсистемах). Так, французская и другие европейские энергосистемы, не имея ВПТ, успешно работают параллельно при условии, что отклонения частоты не превосходят 0,01 Гц. Следует сопоставлять эти альтернативы, учитывая убытки от некачественной частоты у потребителя. Однако могут быть случаи, когда ВПТ не имеет альтернативы. Это случаи, когда надо связать между собой системы, заведомо работающие или могущие в определенное время работать с разными частотами. Например в Японии (частота 50 и 60 Гц), в США — удаленные, несинхронно работающие системы, вставка между энергосистемой СССР и Финляндией в г. Выборге и т. д.
2. Регулирование источников энергии и применение регулируемых под нагрузкой трансформаторов, в частности поперечно-регулируемых.
3. Ограничение токов к. з. или усиление выключателей.
4. Усиление устойчивости за счет ряда мероприятий.

В соответствии с отмеченным вставку (ВПТ) надо считать при $l = 0$ или $l > 0$ средством управления режимом, применяемым в исключительных, специально обоснованных случаях.

В обычных случаях система переменного тока любой сложности может быть полностью управляема. Широко применять вставки, создавая подсистемы с разными частотами внутри единой системы, неправильно. Однако возможно, что в будущем на развитую сеть сверхвысокого напряжения системы переменного тока с фиксированной неизменной частотой будет наложена сеть постоянного тока и в этом сочетании ВПТ найдут свое место. Вопрос этот пока еще не проработан.

* § 14.10. МЕРОПРИЯТИЯ РЕЖИМНОГО ХАРАКТЕРА

Влияние схемы системы. При оценке схемы системы часто оперируют понятием «жесткости» схемы, как одним из важнейших ее свойств. Жесткость в какой-либо узловой точке характеризуется изменением нагрузки, при которой измене-

* По данным зарубежной печати.

ние значения и фазы напряжения будет происходить на некоторую определенную величину, принимаемую за единицу. Жесткость зависит от относительных сопротивлений, связывающих узловые точки системы. Чем сильнее зафиксированы напряжения по значению и фазе в узловых точках системы и чем теснее эти точки связаны между собой, тем больше жесткость системы в целом. Разумеется, узловые точки, расположенные вблизи шин бесконечной мощности, обладают наибольшей жесткостью. Жесткая схема имеет преимущества с точки зрения улучшения статической устойчивости и облегчения работы системы в послеаварийном режиме.

К недостаткам жесткой схемы относится увеличение тока короткого замыкания, в связи с чем мощность системы может стать больше разрывной мощности выключателей, что недопустимо. В этих случаях электрические системы приходится секционировать или применять выключатели с большей отключающей способностью. Жесткая схема может приводить к определенным трудностям в обеспечении динамической устойчивости, например при включении на параллельную работу сильно перегруженных ЛЭП; может вызывать значительные трудности в работе релейной защиты и требовать применения более совершенных видов релейной защиты.

Таким образом, выбор исходного режима работы системы и схемы ее соединений может существенно влиять на устойчивость.

Схемы работы электрических систем. Схема соединений электрических систем и их отдельных элементов существенным образом влияет на переходные процессы и устойчивость систем.

Схемы дальних электропередач. Эти схемы существенным образом влияют на характер переходных процессов и устойчивость. Их можно разделить на два вида:

транзитные мощные электропередачи, передающие электрическую энергию от какой-либо удаленной станции к потребляющей системе;

межсистемные связи, в которых потоки мощности могут идти как в одном, так и другом направлении, а значения их намного меньше мощности объединяемых систем.

Схемы дальних электропередач можно разделить на чисто транзитные линии, не имеющие промежуточных отборов и связей с местными энергосистемами, находящимися в тех районах, по которым проходит данная электропередача (рис. 14.39, а), и на линии с промежуточными подстанциями, связанными с местными энергосистемами, которые или потребляют мощность от электропередачи, или выдают в нее часть избыточной мощности (рис. 14.39, б).

Линии электропередачи с промежуточными отборами имеют определенные преимущества в отношении обеспечения устойчивости, так как на промежуточных подстанциях могут устанавливаться синхронные компенсаторы, обеспечивающие поддержание напряжения в некоторых «опорных» точках вдоль линии и этим улучшающие ее устойчивость.

Линии электропередачи могут выполняться блочными (рис. 14.39, в) или связанными (рис. 14.39, г).

При блочной передаче авария на линии касается как самой линии, так и всех присоединенных к ней генераторов, т. е. всего блока. Мощность одного блока ЛЭП не должна быть больше резервной мощности системы, так как иначе в после-

аварийном режиме (после выхода блока) нормальная работа системы станет невозможной: в ней начнется снижение частоты, появится опасность нарушения статической устойчивости, после чего придется осуществлять отключение части потребителей и, возможно, деление системы на несинхронно работающие части.

При связанной передаче авария на какой-либо из параллельных линий сопровождается отключением только поврежденного участка, а по остальным участкам линии может передаваться вся мощность удаленной станции.

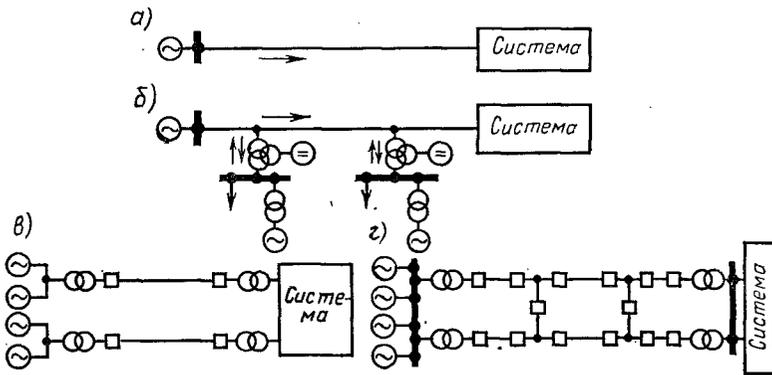


Рис. 14.39. Схемы выполнения магистральных электропередач:
 а — без промежуточных отборов; б — с промежуточными отборами; в — блочная;
 г — связанная

Преимуществом блочной схемы является то, что решение вопросов динамической устойчивости при использовании ее значительно упрощается. Короткое замыкание в наиболее тяжелой точке, т. е. у шин передающей станции (в начале линии одного блока), не будет восприниматься вторым блоком передающей станции, и, следовательно, никаких специальных мероприятий для сохранения динамической устойчивости этого блока в этом случае применять не надо. Генераторы же первого блока все равно отключаются, и, следовательно, вопроса об их динамической устойчивости также не возникает. В случае коротких замыканий у шин приемной системы условия динамической устойчивости генераторов второго блока оказываются более легкими. Однако улучшение динамической устойчивости достигается потерей части генераторов на передающей станции. Применение блочной схемы встречает также определенные трудности и в связи с присоединением независимых блочных линий к приемной системе.

При анализе схем соединений линий электропередач определенное значение имеет вопрос о точках присоединения нагрузки с той или иной характеристикой. Присоединение нагрузки к шинам удаленной станции, передающей большую долю мощности в систему, может существенным образом повлиять на устойчивость электропередачи. Так, при сильном регулировании возбуждение генераторов передающей станции накладывает определенное требование на включение трансформаторов тока, от которых осуществляется питание измерительных органов АРВ.

Следовательно, наличие нагрузки в тех или иных местах, ее значение и возможность изменений накладывают определенные требования на условия регулирования и влияют на характер переходных процессов.

Разделение электрических систем как средство сохранения динамической устойчивости. Деление электрических систем на несинхронно работающие части может рассматриваться как мероприятие, предотвращающее нарушение динамической устойчивости системы. Однако делить системы на части даже в аварийных условиях крайне нежелательно, так как деление приводит к ослаблению всей системы и, кроме того, может привести к тому, что в отдельных частях системы появится дефицит мощности, снизятся частота и напряжение. Деление системы можно рекомендовать только в том случае, когда оно является единственным способом сохранения динамической устойчивости. При этом в каждой электрической системе должны быть заранее установлены те точки, в которых разделение системы может быть произведено более или менее безболезненно.

В качестве способа восстановления нормального режима и объединения разделенных частей системы в последнее время начинает все шире применяться АПВБС.

Влияние резерва мощности и ее распределения в системе на переходные процессы и устойчивость. Условия надежности работы энергосистем требуют определенного резерва как на электростанциях, так и в различных устройствах электрических сетей.

На характер переходного процесса в первую очередь влияет наличие станционного резерва, значение которого сказывается на уровне устойчивости системы и значениях токов короткого замыкания. Станционный резерв состоит из резервов аварийного, нагрузочного (частотного), ремонтного (народнохозяйственного). С точки зрения влияния на переходные процессы интерес может представлять только вращающийся аварийный резерв, необходимый для избежания распада системы при внезапных выпадениях из работы отдельных агрегатов или мощных электропередач.

Минимально необходимый резерв определяется вероятностью наиболее тяжелых аварий и зависит от схемы системы, способа регулирования возбуждения и имеющейся автоматической разгрузки системы. Так, например, автоматические регуляторы возбуждения увеличивают резерв реактивной мощности, позволяя за счет форсирования возбуждения создать перегрузочный режим, допустимый в течение некоторого времени.

Наличие резерва по активной мощности в генераторах улучшает как статическую, так и динамическую устойчивость системы, обеспечивая работу генераторов при малых углах сдвига δ . Напротив, получение резерва реактивной мощности за счет недогрузки генераторов в исходном режиме реактивной мощностью приводит к ухудшению устойчивости, так как при этом работа осуществляется с пониженным током возбуждения и, следовательно, с большими начальными углами.

Распределение резерва и обменных потоков активной мощности имеет большое значение в современных энергосистемах при автоматическом регулировании их частоты. На гидростанциях применяется электрогидравлический регулятор частоты и мощности, в котором каналы отработки воздействий по частоте и мощности разделены, а функции информационной обработки входных сигналов и усиления регулирующих воздействий разграничены. Этим повышаются чувствительность и быстродействие регулятора, хорошо приспособленного к участию в системном регулировании активной мощности.

Эффективное участие гидрогенераторов в системном регулировании частоты и мощности обеспечивается второй ступенью иерархической структуры. Она пред-

ставляет собой систему группового управления агрегатами ГЭС, которая воспринимает плановое задание по мощности (график нагрузки), внеплановые и оперативные коррективы нагрузки, сигналы от системных устройств и регуляторов, колебания частоты в энергосистеме и в соответствии с принятым алгоритмом изменяет задания первичным электрогидравлическим регулятором гидроагрегатов.

Управляющие системы развиваются «по вертикали», совершенствуя регулирование отдельных процессов, и одновременно «по горизонтали», улучшая связи между различными устройствами и регуляторами. Это приводит к появлению объединенных комплексных управляющих устройств, применяющих ЦВМ, использующих переменную структуру, функциональные зависимости и т. д. Совмещение регуляторов дает конструктивные выгоды, обусловленные использованием общих измерительных преобразователей, цепей питания и защиты, и позволяет повысить эффективность и качество процессов управления, используя перекрестные связи между контурами регулирования при взаимной согласованности управляющих воздействий.

Единые конструктивные и аппаратные решения при комплексном построении агрегатной автоматики и увеличении горизонтальных связей между контурами обеспечивает современная радиоэлектроника, в первую очередь логические и аналоговые интегральные схемы.

Отключение части генераторов или реакторов как средство повышения устойчивости системы. Уменьшение отдаваемой генератором активной мощности при заданном токе возбуждения может быть в известном смысле аналогичным появлению резерва по активной мощности. Так, если во время динамического перехода в процессе аварии или в послеаварийном режиме отключить часть генераторов, то условия устойчивости остальной части генераторов улучшатся. Отключение части генераторов может быть средством для синхронизации выпавших из синхронизма станций (ресинхронизация).

В качестве мероприятия, улучшающего динамическую устойчивость, может применяться отключение части или всех шунтирующих реакторов. Шунтирующие реакторы разгружают генераторы от емкостной реактивной мощности и дают им возможность работать с высокой э. д. с. В то же время наличие шунтирующих реакторов приводит к увеличению взаимного сопротивления между станцией и приемной системой, что отрицательно сказывается на устойчивости. Обычно положительное влияние — увеличение э. д. с. — при наличии реакторов значительно выше, чем отрицательное влияние — увеличение взаимного сопротивления.

Если в нормальном режиме отключить шунтирующие реакторы, то необходимо немедленно снизить э. д. с., так как на ЛЭП и повышающих трансформаторах появится недопустимо высокое напряжение. В аварийном или послеаварийном режиме, когда напряжение на электропередаче понижено, отключение реакторов заметно улучшит устойчивость, так как оно приведет к снижению взаимного сопротивления системы до нормального.

Отмечая возможность улучшения устойчивости отключением части генераторов или реакторов, необходимо заметить, что все же применение этого мероприятия менее желательно, чем других мероприятий. Отключение генераторов приводит к понижению передаваемой мощности и необходимости синхронизировать и набирать мощность на включенных машинах. Отключение реакторов обычно влияет сравнительно мало, но в то же время известна опасность увеличения напряже-

ния и необходимость достаточно быстрого обратного их включения при восстановлении нормального режима заставляют считать это мероприятие вспомогательным.

Управление нагрузкой. Автоматическая разгрузка. Отключение части потребителей, т. е. автоматическая разгрузка системы, проводимая в зависимости от уровня частоты и напряжения в системе с учетом динамики изменения частоты, является весьма эффективным средством улучшения устойчивости при тяжелых авариях. Все устройства, управляющие нагрузкой, входят в общую группу устройств автоматического предотвращения нарушений устойчивости (АПНУ). Способы предотвращения нарушений весьма разнообразны. Так, при понижении уровня статической устойчивости может быть на некоторое время снижена нагрузка или мгновенно дистанционно отключена ее часть; второй способ применяется как эффективное средство борьбы с возникающей лавиной напряжения. Автоматическое отключение части нагрузки (АЧР) широко применяется (в ЭЭС СССР к ней подключено 60%) для ограничений аварийного снижения частоты и устранения опасности ее лавины (см. гл. 11). АЧР подразделяются на следующие основные категории:

АЧР I — действует при 46,5—48,5 Гц через 0,1 — 0,3 с, со ступенями действия через 0,1 Гц, предотвращает глубокое снижение частоты;

АЧР II — восстанавливает частоту до нормального значения, если она остается длительно пониженной, а также следует резервным устройством при появлении дополнительного дефицита активной мощности, что особенно существенно при каскадном развитии аварии;

ЧАПВ (частотное автоматическое включение) — восстанавливает питание потребителей, отключенных действием АЧР.

Одновременно может применяться автоматическая разгрузка «по напряжению» (при снижении напряжения). Вместо отключения потребителей может применяться снижение питающего их напряжения, что достигается переключением ответвлений на трансформаторах. Потребители, имеющие вентиляльные установки, так же как и передачи постоянного тока (ППТ), могут практически мгновенно управляться углами их зажигания и за счет увеличений или уменьшений мощности, так же как и мощности ППТ, улучшать режим электрической системы.

Результирующая устойчивость. Работа машин в электрических системах при больших скольжениях. Синхронный генератор, выпавший из синхронизма, обычно начинает работать как асинхронный со скоростью, несколько большей синхронной. При этом он может выдавать до 60% от своей номинальной мощности. Воздействием на первичный двигатель и возбуждение выпавшие из синхронизма генераторы могут быть введены в синхронизм через несколько (5—20) проворотов ротора. Эти режимы широко применялись в 40—50-х годах, позволяя избежать перерыва в выдаче электроэнергии на время набора мощности и осуществляя включение в сеть турбогенератора. Такая реализация результирующей устойчивости являлась мощным средством повышения надежности работы системы.

Однако рост протяженности сетей, усложнение их и опасные влияния асинхронного режима на генераторы, особенно высокоиспользуемые, и, что очень важно, на другие части системы привели к осторожному отношению к этому режиму, рекомендуемому только после тщательной проверки допустимости его. Альтернативой ему явилось применение на всех межсистемных и внутренних связях автоматических устройств (АЛАР), выявляющих часть системы, работаю-

щую асинхронно, и отделяющих ее. АЛАР, характеризуемый высоким (93—94%) показателем правильных действий, применяется теперь в качестве резерва при реализации результирующей устойчивости.

Допустимость асинхронного режима должна быть проверена как по условиям работы генератора, так и по условиям баланса реактивной мощности, колебаниям напряжения и условиям работы защиты.

Контрольные вопросы

- 14.1. Что такое асинхронный режим, или асинхронный ход?
- 14.2. Как меняется угол δ при асинхронном ходе генератора по отношению к шинам неизменного напряжения?
- 14.3. В чем заключаются основные допущения, принимаемые при определении характеристики режима простейшей системы с несинхронной скоростью вращения ее генераторов?
- 14.4. Какие составляющие имеет вращающий момент синхронной машины, работающей при скорости, отличной от синхронной, параллельно с системой неограниченной мощности?
- 14.5. Может ли активная мощность в начале передачи, имеющей только реактивное сопротивление, отличаться от мощности в конце передачи?
- 14.6. Как одним генератором заменяется группа генераторов при исследовании асинхронных режимов?
- 14.7. Каковы причины возникновения асинхронных режимов?
- 14.8. При какой скорости и каком скольжении синхронный генератор работает как асинхронный генератор или двигатель?
- 14.9. Как изменяется вращающий (электромеханический) момент синхронной машины при асинхронном ходе?
- 14.10. Объясните смысл каждого члена в формулах (14.13) и (14.14).
- 14.11. Как определить асинхронный момент синхронной машины, электрически удаленной от шин напряжения (принимаемого за неизменное) на сопротивление Z_{12} , если известен момент при ее непосредственном подключении к шинам этого напряжения?
- 14.12. Что понимать под статическими и динамическими характеристиками при асинхронном ходе?
- 14.13. От чего может произойти появление нарастающих колебаний у генератора, работающего на сеть, имеющую значительное активное сопротивление?
- 14.14. Что такое отрицательное демпфирование? В каких случаях оно возникает и к чему приводит? В чем его отличие от положительного демпфирования?
- 14.15. В чем состоит критерий ресинхронизации и при каких допущениях он получается?
- 14.16. Как протекает втягивание в синхронизм асинхронно работающего генератора?
- 14.17. Объясните процесс втягивания в синхронизм, изображенный на рис. 14.22.
- 14.18. В чем особенности ресинхронизации частей системы, объединенных слабой связью?
- 14.19. Что такое вторичное нарушение устойчивости и от чего оно может произойти?
- 14.20. Объясните протекание процесса, показанного на рис. 14.23, а, б, сопоставив их между собой. То же, на рис. 14.25, а, б.
- 14.21. Что такое результирующая устойчивость? Каковы практические пути ее реализации? Как проверить ее допустимость? Каков примерный порядок расчета и его особенности?
- 14.22. По каким признакам, находясь на щите управления или в машинном зале, можно узнать, что данный генератор находится в асинхронном режиме?
- 14.23. Как изменяются активная мощность и напряжение на шинах асинхронно работающего генератора?
- 14.24. В чем опасность асинхронного режима для асинхронно работающих генераторов и для системы, в которой эти генераторы работают?
- 14.25. Как изменяются характеристики и параметры элементов системы при асинхронном режиме (генераторов, первичных двигателей, нагрузки, линий электропередач)?
- 14.26. При каких основных допущениях рассчитываются асинхронный режим и ресинхронизация работающего асинхронно генератора или части системы?

14.27. Как изменится режим синхронного генератора после потери возбуждения (отключение возбудителя)?

14.28. Как происходит процесс выпадения синхронного генератора из синхронизма при нарушении статической устойчивости (перегрузке)?

14.29. Как происходит процесс выпадения из синхронизма синхронного генератора при нарушении динамической устойчивости?

Темы рефератов

1. Поведение паровой турбины при асинхронном ходе.
2. Поведение гидравлической турбины при асинхронном ходе.
3. Нагрузка системы при асинхронном ходе.
4. Полные (необходимые и достаточные) условия ресинхронизации.
5. Результирующая устойчивость и ее применение.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П1. АВАРИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Как и всякое техническое сооружение, электроэнергетическая система из-за каких-либо причин может прийти в ненормальное — а в а р и й н о е — состояние (режим). Это состояние, называемое в дальнейшем аварией, для энергосистемы характеризуется изменением параметров режима, причем в ряде случаев допустимым только на очень краткое время. Так, меняются в недопустимых пределах потоки мощности, напряжения, токи, частота, появляется асинхронная работа генераторов. Авария может затронуть только один или несколько элементов системы, которые, будучи отключены, позволяют ограничиться локальной аварией. Однако авария может захватить и всю (или большую часть) систему, т. е. превратиться в системную аварию, оказывающую отрицательное влияние на жизнь части или даже всей страны.

Такие системные аварии были, например, в США в 1965 г., когда на 14 часов были отключены потребители мощностью 40—50 млн. кВт, в Италии в 1978 г., когда в течение часа было недодаю потребителям 25 млн. кВт, в 1978 г. во Франции, где мощность потребителей, потерявших питание, превысила 30 млн. кВт, т.е. примерно 75% от всей нагрузки ЭЭС Франции. Недоотпуск энергии более чем за 10 часов аварии составил примерно 100 млн. кВт·ч. Основной причиной последовательного тяжелого развития аварии была недостаточная иерархичность управления и несогласованность действий как АЧР и автоматики (в том числе устройств минимального напряжения), так и оперативного персонала, который не принял ряда действий, облегчающих аварию, в частности не дал команду на отключение нагрузки в ряде районов. В Югославии в 1980 г. произошла системная авария, во время которой 70% (по мощности) потребителей остались без электроэнергии — некоторые на несколько часов. Для восстановления работы энергосистемы потребовалось получение мощности от соседних стран в размере 900 МВт. В 1981 г. в энергосистеме Мексики произошла системная авария, охватившая г. Мехико и всю центральную и южную часть страны. Причиной аварии явилось повреждение оборудования на двух электростанциях — на одной ГЭС и почти одновременно на одной ТЭС. Полное погашение длилось около 3 часов.

Системных аварий в разных странах за последние 10—15 лет было много. Особенно тяжелая системная авария произошла в США в районе Нью-Йорка в 1977 г., когда весь район почти 25 часов находился без электроэнергии.

Системные аварии — это не просто технические неполадки, это полное расстройство производственных, транспортных, социальных (бытовых) функций многомиллионного населения, обслуживаемого данной энергосистемой. Аварии с погашением системы влекли за собой аварии в лифтах, метро, железнодорожном транспорте, перестали работать аэропорты. Аварии не только расстраивали обслуживание населения, но и вызывали многочисленные жертвы.

Системная авария — это катастрофа в жизни страны. Системные аварии всегда возникают как небольшие, местные аварии. В большой энергосистеме их ежегодно происходит несколько сотен*, но только несколько процентов из них переходят в системные аварии, остальные локализуются или ликвидируются средствами автоматики.

* В ЭЭС СССР ежегодно регистрируется около 300 таких нарушений, которые вызывают работу разгрузочной и делительной автоматики и работу АЧР: См.: Управление мощными энергообъединениями/Воропай Н. И., Еришевич В. В., Лугинский Я. Н. и др.; Под ред. С.А. Савалова, — М.: Энергоатомиздат, 1984.

Аварии с основным электротехническим оборудованием (приблизительные данные) произошли из-за повреждения или неисправности следующих элементов (в % от общего числа, т. е. 100%); генераторов — 8; синхронных компенсаторов — 5; трансформаторов — 12; выключателей — 6; разъединителей — 3; измерительных трансформаторов — 1; КРУ — 6; опор — 7; линейных проводов — 36; линейной изоляции — 8, а также: вследствие неправильной работы устройств защиты и автоматики — 3; ошибочных действий персонала — 5.

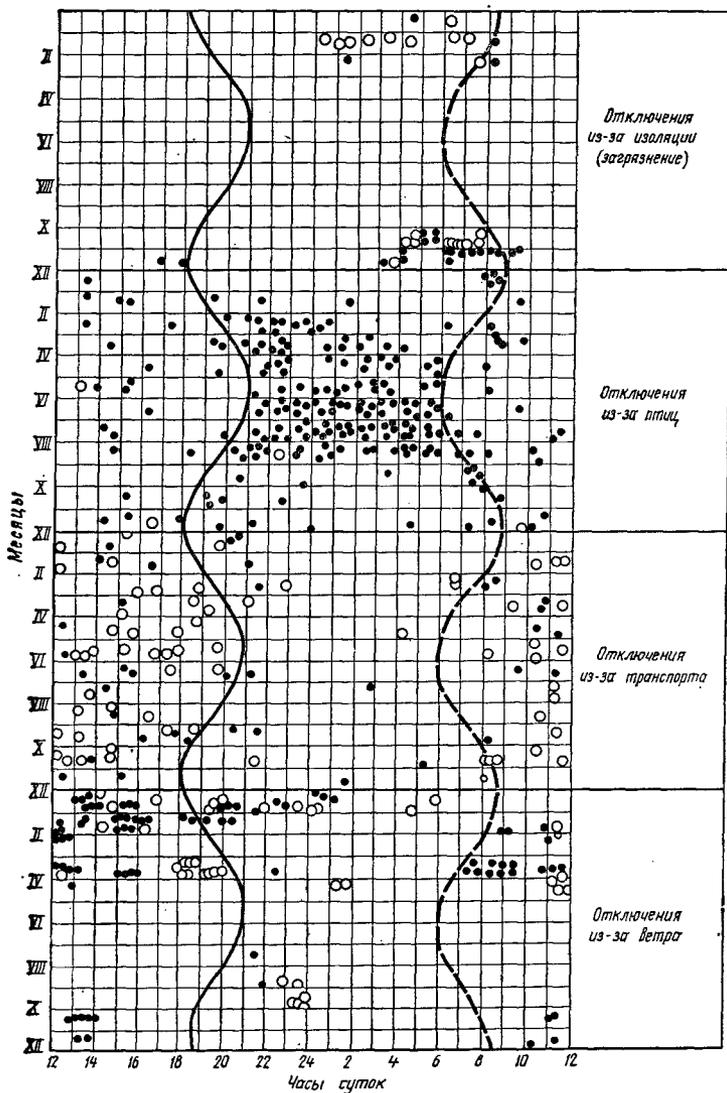


Рис. П1.1. Распределение отключений с точно установленной причиной по времени года и суток:

● — отключение с успешным АПВ; ○ — отключение с неуспешным АПВ;
 — — — — — восход солнца; — — — — — заход солнца

Аварии с генераторами происходили из-за заводских дефектов изготовления — 65%, эксплуатационных нарушений (перенапряжения и др.) — 36%; у трансформаторов примерно такое же соотношение аварий из-за старения изоляции и дефектов эксплуатации.

Аварии на воздушных линиях электропередачи были вызваны следующими причинами (в % от общего числа, т. е. 100%):

— повреждения опор: из-за дефектов монтажа — 9,0; стихийных явлений (сильного ветра, гололеда) — 14,5;

— повреждения линейных проводов: из-за старения — 5,0; повреждения автокраном — 10,5; стихийных явлений (сильного ветра, снега, гололеда) — 43;

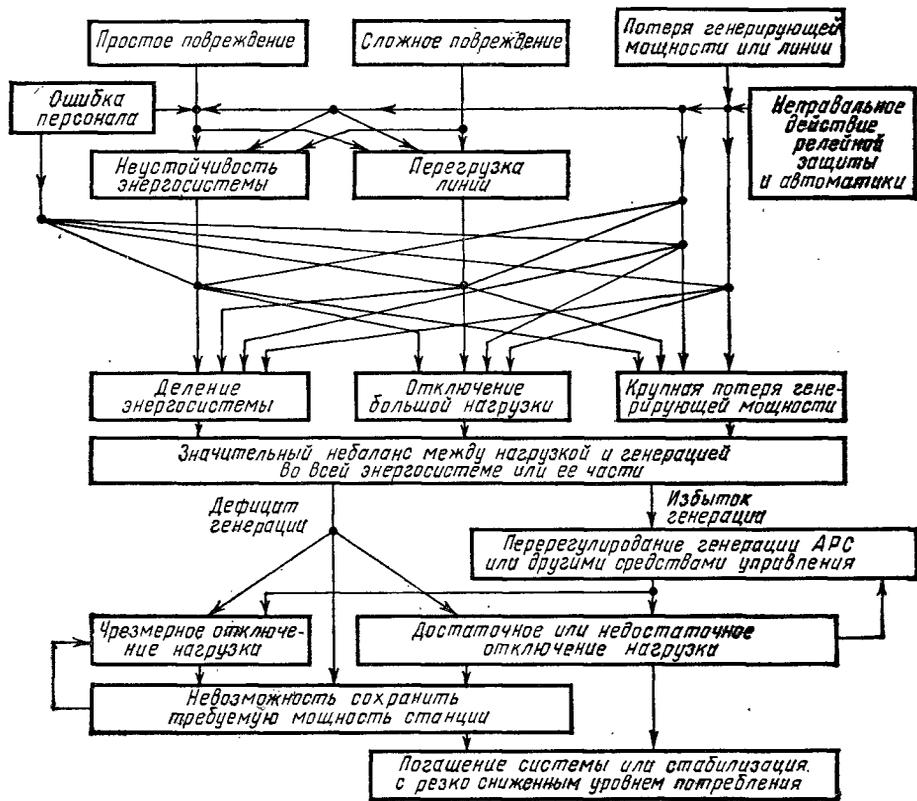


Рис. П1.2. Обобщенная схема развития аварии в большом энергообъединении

— повреждения линейных изоляторов: из-за дефектов монтажа — 5; грозы — 5; гололеда — 3.

Все эти данные только ориентировочные, средние за некоторый период (год) и их значения изменяются в разные годы, месяцы, часы суток. Так, на рис. П1.1 показаны характерные распределения причин отключения для линий 110—220 кВ, полученные для одной из энергосистем на территории СССР*. Развитие локальной аварии и ее возможное превращение в системную аварию в обобщенном виде показано на рис. П1.2, где в качестве первоначальных аварий указаны три: простое повреждение — это обыч-

* См.: Буссель А. Г., Журников Г. А., Обухова Е. П., Шаргородский В. Л. Причины отключений воздушных линий 110—220 кВ. — Электричество, 1975, № 2.

по короткое замыкание, сложное — когда происходит несколько одновременных повреждений (например, одновременные короткие замыкания в результате гололеда, урагана и т. п.) и потеря генерирующей мощности. Например, крупная системная авария в Южной системе США началась со взрыва двух бочек с горючим, что вызвало пожар и отключение трех линий напряжением 345 кВ. Вследствие этого система с нагрузкой более 2 ГВт распалась на подсистемы, и были полностью обесточены 450 000 абонентов, в том числе 7300 промышленных предприятий. Электроснабжение было восстановлено через 7 часов после начала аварии. Разумеется, можно проследить все причины, рассмотрев аварию в обобщенном виде (рис. П1.2). В развитие приведенной схемы на рис. П1.3 показан граф переходов от одной стадии аварии к другой. На линиях графов показана частота данного перехода (применительно к ЕЭС СССР). Необходимо учесть два характерных пути развития аварий. В системах со слабыми связями и относительно быстро происходит перегрузка связей и различных видов нарушений устойчивости с последующим отделением подсистем. В системах с сильными связями и возникает небаланс мощности, изменяется частота всей энергосистемы с последующим отключением генераторов или нагрузки с помощью АЧР. При этом в энергосистемах со слабыми связями потребители отключаются чаще, чем в энергосистемах с сильными связями.

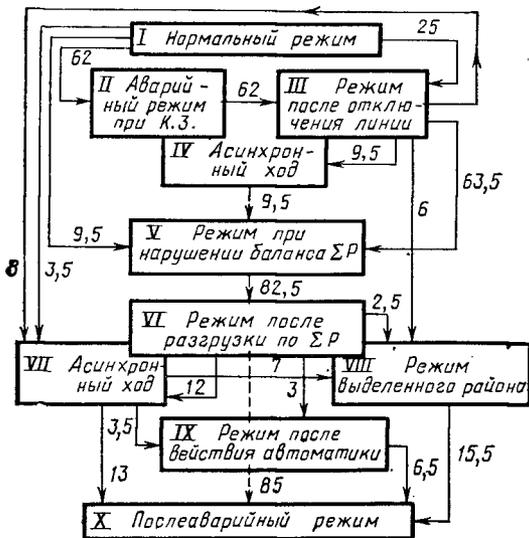


Рис. П1.3. Обобщенный граф процесса развития аварий

Цифры на стрелках — статистические данные в процентах от общего числа аварий

ния на шинах всех или почти всех объектов отделившейся системы. Для ускорения и облегчения восстановления нормального режима проводится временное секционирование частей системы. Нагрузка при этом подключается частями (блоками) по нескольким десяткам мегаватт. После восстановления нагрузки и стабилизации частоты устанавливается экономическое распределение мощности между станциями и агрегатами системы.

В обеспечении успешной ликвидации аварии и перехода от послеаварийного режима к новому — нормальному — очень большое, если не решающее, значение имеет и е р а р х и ч е с к о е у п р а в л е н и е, принятое в энергосистемах СССР и стран — членов СЭВ. Система противоаварийной автоматики на всех уровнях полностью координированная и благодаря этому особенно эффективная. Отсутствие или неполная реализация этих мероприятий в подавляющем большинстве зарубежных энергосистем снижало их живучесть, приводило и приводит к тяжелым системным авариям*. Классической системной аварией, по праву называемой «аварией века», считается авария, происшедшая в США 9 ноября 1965 г. Авария, продолжавшаяся 14 часов, охватила район с 30 млн. жителей, площадью 20 000 км². Общая потерянная мощность составила более 44 000 МВт.

Рассмотрим основные причины того, как небольшая местная авария (неправильная работа реле) развилась в столь крупную — системную.

* Подробнее см.: Пелисье Р. Электрические системы. — М.: Высшая школа; Управление мощными энергообъединениями/Воропай Н. И., Еришевич В. В., Лугинский Н. Н. и др.; Под ред. С. А. Савалова. — М.: Энергоатомиздат, 1984; Еришевич В. В. Надежность энергосистем в США. — Энергохозяйство за рубежом, 1980, № 1; Гершенгеорн А. И. Крупное нарушение электроснабжения г. Нью-Йорка. — Энергохозяйство за рубежом, 1978, № 2.

1. Электроснабжение данного района производилось 42 различными частными энергетическими компаниями, которые хотя и делили район на 15 зон с диспетчерскими пунктами в каждом, но не имели управления, даже похожего на единое иерархическое. Действия диспетчеров были во время аварии не только не согласованы, но даже противоречивы.

2. Были не согласованы между собой, недостаточны, а часто вообще отсутствовали устройства системной противоаварийной автоматики, что вместе с отсутствием единого автоа-

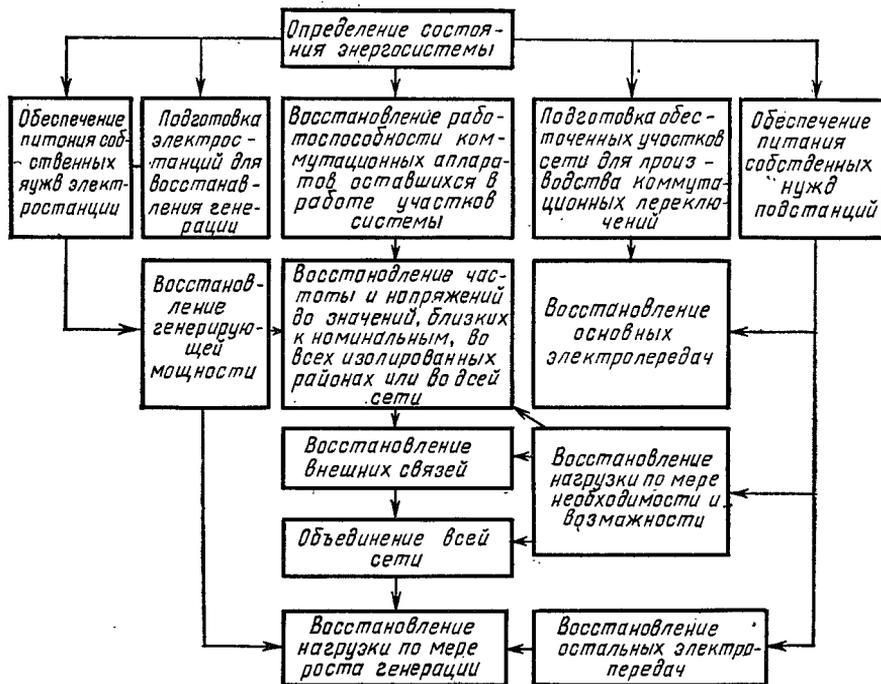


Рис. П1.4. Структурная схема, отражающая стратегию деятельности оперативного персонала по восстановлению полностью погашенной энергосистемы

тического и диспетчерского управления привело к тому, что система во время аварии оказалась фактически неуправляемой.

3. Особенно существенным было отсутствие аварийной разгрузки потребителей по частоте (АЧР) и напряжению.

4. Отсутствовало, как правило, гарантированное питание собственных нужд ТЭС данного района.

5. Система не могла делиться так, чтобы в разделившихся частях производство и потребление энергии было сбалансировано.

6. Жизненно необходимые или очень важные потребители не имели источников гарантированного питания (аэропорты, больницы, службы безопасности и т. д.).

Восстановление электроснабжения испытывало также трудности, связанные с отсутствием иерархического управления. Так, на разных участках системы восстановление шло разными темпами: относительно быстрым оно было в провинции Онтарио, которая имела в северной части многочисленные ГЭС, не охваченные аварией (некоторые из них не имели в этот момент межсистемных связей с югом). Оно могло бы быть еще более быстрым, если бы на ТЭС питание собственных нужд не отключалось защитой от понижения частоты.

Линии, связывающие станции севера Канады с районом Торонто, хотя и многочисленные, имели ограниченную пропускную способность. Отключения этих линий из-за перегрузки задержали восстановление электроснабжения.

Причины медленного восстановления электроснабжения в штатах Нью-Йорк, Коннектикут и Массачусетс различны:

— разделение межсистемной связи на многочисленные отдельные системы происходило зачастую случайно, так что имелось несоответствие между структурой этих сетей и распределением мощности имеющихся источников;

— большое число потребителей (в частности, освещение большинства жилых зданий Нью-Йорка) оставалось подключенным к системе, что вызывало значительное потребление электроэнергии; попытки восстановления электроснабжения оказались безуспешными из-за недостатка генерируемой мощности;

— источник аварии стал известен только спустя пять дней, а во время аварии персонал боялся включать под напряжение линии, опасаясь их неисправности;

— попытки возможно быстрого восстановления электроснабжения на некоторых участках линий потребовали большого количества последовательных включений и отключений вплоть до исчерпания всего резерва сжатого воздуха на воздушных выключателях, пополнить который было невозможно из-за отсутствия электроснабжения. Очевидно, что наличие единого иерархического управления и центрального диспетчерского пункта, координирующего переключения всей системы, могло бы если не исключить, то по крайней мере уменьшить перечисленные трудности;

— остановленные ТЭС были пущены в ход только после восстановления питания собственных нужд станций от удаленных источников. При этом восстановление электроснабжения затруднялось тем, что значительные нагрузки оставались подключенными к системе, вызывая новые местные аварии.

Выводы, сделанные после анализа аварии. Федеральная энергетическая комиссией была выявлена необходимость:

— единого управления объединенной электроэнергетической системой, с одной стороны, ответственного за ее концепцию, а с другой — контролирующего надежность работы системы;

— улучшения устойчивости, регулирования, защиты;

— снабжения аппаратурой измерения, связи и автоматики;

— усиления межсистемных связей;

— распределения вращающихся резервов по всей объединенной системе;

— контроля за действием реле и всех автоматических устройств;

— разгрузки устройств для разгрузки системы;

— оснащения вспомогательными источниками всех потребителей, для которых недопустим перерыв в питании (больницы, средства связи всех видов);

— совершенствования законодательства, переносащего контроль за надежностью электрических систем с органов штатов на федеральные органы.

Для устранения причины, вызывающей аварии, требовались прежде всего национализация энергетики и создание ЕЭС с единым иерархическим управлением и централизованной противоаварийной автоматикой. Это в последующие годы было сделано только частично в виде создания больших, мощных (частных) объединений — пулов, которые улучшили положение, но не смогли полностью решить задачу устранения системных аварий.

Главное, что было необходимо, — это национализация энергетики и создание ЕЭС — не было сделано, так как в соответствии с решениями правительства США и конгресса энергетика должна оставаться сферой частных владений. Создание мощных объединений (пулов и сверхпулов) хотя и улучшило положение, но не исключило основных причин возникновения и развития системных аварий.

После 1965 г. таких аварий в США было много, но особое место занимает крупнейшая системная авария, происшедшая 13 июля 1977 г. в Нью-Йорке, уступающая по масштабам лишь аварии 9 ноября 1965 г. в северо-восточной части США, однако превосходящая ее по длительности восстановления электроснабжения. Во время этой аварии было полностью нарушено электроснабжение Нью-Йорка и его пригородов, что привело к прекращению работы городского транспорта, телевидения, водоснабжения и других городских служб, питаемых электроэнергией от энергосистемы. Из-за отсутствия напряжения были выключены светофоры, что усложнило работу городского автомобильного транспорта. Прекращение работы радаров и аэродромной сигнализации вызвало необходимость отмены рейсов самолетов в Нью-Йоркском аэропорту.

Восстановление работы энергосистемы и подачу электроэнергии оказалось возможным осуществить лишь через 25 часов после полного погашения. Поэтому многие жители пригородов 14 июля 1977 г. не смогли попасть на работу и большая

часть предприятий была закрыта. В городе погас свет и остановились лифты, поезда метро, водяные насосы — в общем все, приводимое в движение электричеством. Шок поразил не только город-гигант, но и всю страну. Прекратились передачи телевидения, замолкли теле-таппы информационных агентств, закрылись на целый день банки, фондовая и товарная биржи на Уолл-стрите. В течение ночи 13—14 июля происходили многочисленные пожары, поджоги и грабежи магазинов. Все вместе привело к убыткам в размере более миллиарда долларов.

Возникновение и развитие аварии. В Нью-Йорке стояла жаркая погода. Из-за «тепловой волны» электрическая нагрузка от кондиционеров была очень большой и максимум нагрузки системы превысил 8000 МВт. К вечеру нагрузка стала снижаться и перед началом аварии составляла 6090 МВт. В связи с этим пиковые ГТУ были остановлены и в 20 часов их персонал был отпущен домой. Электроэнергетическая система «Консолидейтед Эдисон», состоящая из отдельных частных предприятий, в это время вырабатывала 3890 МВт (в том числе внутригородские генераторы — около 3000 МВт). Извне в систему импортировалось 2200 МВт.

Резерв был достаточно велик. Так, мобильный резерв был равен 2734 МВт (в том числе вводимый в течение 10 мин — 1446 МВт, вводимый в течение 30 мин — 1288 МВт). Мощность резерва в черте города составляла 1998 МВт, в том числе мощность быстро запускаемых ГТУ — 790 МВт.

Авария развивалась быстро, поскольку сформулированные выше условия управления аварийным режимом были нарушены. Так, решающее значение в развитии аварии имела неудовлетворительная структура АЧР. В энергокомпаниях США применяется только одна система АЧР, состоящая из нескольких ступеней с разными уставками по частоте и одинаковыми небольшими выдержками времени (аналогично АЧР1 в энергосистемах СССР). Применяемая в СССР вторая система — АЧР11, состоящая из нескольких ступеней с одинаковыми уставками по частоте и разными, большими выдержками времени, в энергокомпаниях США не предусматривается. Если бы в системе «Консолидейтед Эдисон» имелась АЧР11, она, подействовав после повторного снижения частоты, вызванного ложным отключением блока мощной станции Рейвенсвуд, могла бы предотвратить дальнейшее развитие аварии. Не имея возможности подробно разбирать ход аварии, заметим, что каскадному развитию аварии в значительной мере способствовали ошибки диспетчерского персонала, который не принял всех возможных мер по разгрузке оставшихся в работе линий электропередачи: недостаточно быстро и не полностью реализовал резерв мощности на электростанциях в Нью-Йорке, не попытался замкнуть в транзит находившиеся под напряжением линии, не отключил часть нагрузки в Нью-Йорке. Развитие аварии привело к тому, что система «Консолидейтед Эдисон» с нагрузкой 5750 МВт и включенными генераторами мощностью 4250 МВт осталась изолированной от внешних энергосистем. Возникновение дефицита мощности в 1500 МВт вызвало снижение частоты со скоростью 4,5 Гц/с и срабатывание устройств АЧР.

Вследствие быстрого снижения частоты устройства АЧР сработали несколькими ступенями и в 22 районах распределительной сети отключили мощность 1833 МВт. Отключение столь значительной мощности явилось причиной повышения напряжения в системе, в которой около 50% протяженности сетей составляют кабели. В 21 ч 29 мин 47 с защита от потери возбуждения отключила ряд генераторов. В итоге произошло полное погашение системы, длившееся, как указано выше, 25 часов.

Авария заставила вновь поднять вопрос, достаточна ли надежность энергосистем для того, чтобы предотвратить возможность возникновения подобного рода аварий. В ответ на этот вопрос руководители многих энергообъединений Западной Европы и США заявили, что в условиях полностью интегрированной энергосистемы, обеспеченной достаточной резервной мощностью генераторов и пропускной способностью внутри- и межсистемных связей, и при наличии разработанного плана ликвидации неполадок и применения АЧР возможность возникновения крупной системной аварии, связанной с длительным нарушением электроснабжения большого числа потребителей, маловероятна, но для этого необходимо соблюдение определенных требований к построению систем и ходу ликвидации возникших аварий.

П2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РУКОВОДЯЩИХ УКАЗАНИЯХ И НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ РАСЧЕТОВ

§ П2.1. Требования устойчивости электроэнергетических систем

Требования устойчивости электроэнергетических систем формулируются в руководящих указаниях, которые периодически выпускаются Минэнерго СССР и являются обязательными.

Прежде всего руководящие указания требуют, чтобы нормальный установившийся режим имел запас устойчивости. Послеаварийный режим возникает после переходного режима и характеризуется снижением запасов устойчивости не ниже некоторых значений. Длительность послеаварийного режима определяется временем, необходимым диспетчеру для изменения режима, как правило, не более 20 мин.

В руководящих указаниях и других документах часто вводится понятие перетоков в сечениях, т. е. таких отключаемых элементах, которые соединяют (связывают) две какие-либо части системы. Разрыв таких связей рассекает систему на две изолированные части. Перетоки в сечениях при установившихся режимах подразделяют на нормальные, утяжеленные, вынужденные.

Утяжеленные перетоки допускаются при отсутствии необходимых резервов мощности, недостаточной маневренности оборудования тепловых и атомных электростанций или неблагоприятном наложении плановых и аварийных ремонтов основного оборудования электростанций и сетей.

Вынужденные перетоки допускаются при предотвращении ограничений потребителей, потерях гидроресурсов, экономии энергоресурсов, а также при невозможности уменьшения перетока из-за недостаточной маневренности АЭС.

Для определения динамической устойчивости принимаются расчетные возмущения, разделяемые на три группы.

Группа I. Отключение элемента сети напряжением 500 кВ и ниже. Однофазное короткое замыкание при работе основной защиты с успешным и неуспешным ОАПВ.

Группа II. Отключение любого элемента сети напряжением выше 500 кВ (для схемы связи АЭС с энергосистемой — выше 750 кВ). Однофазное короткое замыкание на линии электропередачи выше 500 кВ (для схемы связи АЭС с энергосистемой — выше 750 кВ) при работе основной защиты с неуспешным ОАПВ. Многофазные короткие замыкания на линии электропередачи любого класса напряжения при работе основной защиты с успешным и неуспешным АПВ. Отключение генератора или блока генераторов, наибольших по мощности в данной ОЭС.

Группа III. Одновременное отключение двух цепей или двух линий, идущих по одной трассе более чем на половине длины более короткой линии.

Возмущения групп I и II с отключением элемента сети или генератора (блока генераторов), которые вследствие ремонта одного из выключателей приводят к отключению второго элемента сети, подключенного к этому же распределительному устройству.

Однофазное короткое замыкание на линии электропередачи или шинах любого класса напряжения при отказе одного из выключателей.

Отключение части генераторов электростанции, связанное с полным отключением одной секции (системы) шин суммарной мощностью до 50% мощности электростанции или возникновение такого же или большего аварийного небаланса мощности по любым причинам.

Руководящие указания 1984 г. не дают рекомендаций по определению коэффициентов запаса по динамической устойчивости, ограничиваясь ответом: «устойчиво», «неустойчиво». Коэффициенты запаса можно найти, рассмотрев серию последовательно утяжеленных (изменением какого-либо параметра или групп параметров режимов) режимов, как это делается при определении запаса по статической устойчивости. В этом случае запас может находиться по времени $K = (t_1 - t_{кр})/t_1$, где t_1 — время отключения при исходном режиме, когда система остается устойчивой; $t_{кр}$ — время отключения в критическом режиме, когда система находится на пределе устойчивости, или по соответствующим углам δ .

Запас статической устойчивости данного режима качественно определяется близостью к режиму, лежащему на границе области, в которой появляется аperiodическое или колебательное нарушение устойчивости. Запас количественно характеризуется коэффициентами запаса K_p по потокам активной мощности в сечениях P системы и коэффициентами запаса по напряжению в узлах нагрузки K_U .

Для определения запаса устойчивости последовательными утяжелениями режима (расмотрением ряда установившихся режимов, которые при изменении некоторого параметра или группы параметров приведут к предельному режиму) находится предельный режим ($P_{пр}$ — граница области устойчивости). Частота при этом обычно принимается постоянной (нормальной или сниженной) или указывается на принятые условия изменения частоты.

С учетом принятых обозначений коэффициент запаса

$$K_P = (P_{пр} - P - \Delta P) / P. \quad (П2.1)$$

Здесь ΔP — амплитуда нерегулярных колебаний активной мощности в этом сечении.

Утяжеление режима и определение предельного перетока в сечении проводится в предположении отключения любых устройств, препятствующих достижению предельного перетока в данном сечении (автоматическое ограничение перетока, противоаварийная автоматика и т. п.). Предельные перетоки определяются с учетом перегрузок всего оборудования, допустимых в течение 20 мин.

При возрастании перетока рекомендуется считать загруженными генераторы с одной стороны сечения и разгруженными — с другой. После достижения максимальной мощности генератора можно увеличивать переток, увеличивая одну и соответственно уменьшая другую активную и реактивную нагрузки и далее перегружая генераторы (сняв для этого соответствующие ограничения, в том числе ограничения по току ротора).

Для конкретных условий могут быть рассмотрены и другие факторы, вызывающие увеличение перетока.

При определении предельного по условиям статической устойчивости перетока активной мощности и утяжелении режима могут изменяться перетоки в других сечениях. В этих случаях следует определять $P_{пр}$ в соответствии запас по значению $P_{пр}$, определенному в сечении, дающем наименьшую предельную мощность.

Амплитуда нерегулярных колебаний активной мощности ΔP устанавливается по данным измерений и может быть определена по выражению

$$\Delta P = K \sqrt{P_{н1} P_{н2} / (P_{н1} + P_{н2})}, \quad (П2.2)$$

где $P_{н1}$, $P_{н2}$ — суммарные мощности нагрузки с каждой из сторон рассматриваемого сечения, МВт; коэффициент K принимается равным 1,5 при ручном регулировании мощности и 0,75 при автоматическом регулировании частоты и мощности с периодом остающихся колебаний около 10 мин, МВт.

Коэффициент запаса по напряжению в узле нагрузки

$$K_U = (U - U_{кр}) / U, \quad (П2.3)$$

где U — напряжение узла нагрузки в исходном режиме; $U_{кр}$ — его критическое напряжение на границе, принимаемое не меньшим $0,7 U_{ном}$ и $0,75 U_{норм}$, где $U_{норм}$ — напряжение в узле при нормальном режиме.

Критическое напряжение может определяться расчетным путем (см. гл. 11) и построением $E = f(U)$ с учетом регулирования напряжения трансформаторов и статических характеристик нагрузки.

Показатели устойчивости должны иметь значения не менее указанных в табл. П2.1.

В нормальной схеме при нормальных перетоках динамическая устойчивость при возмущениях группы должна обеспечиваться без применения противоаварийной автоматики.

Таблица П2.1

Переток в сечении	Минимальные коэффициенты запаса по активной мощности	Минимальные коэффициенты запаса по напряжению	Группы возмущений, при которых должна обеспечиваться динамическая устойчивость	
			при нормальной схеме	при ремонтной схеме
Нормальный	0,20	0,15	1, II, III	1, II
Утяжеленный	0,15	0,15	I, II	I
Вынужденный	0,08	0,10	—	—

При этом для связей АЭС с энергосистемами динамическая устойчивость должна обеспечиваться без воздействия противоаварийной автоматики на разгрузку АЭС (на всех этапах развития).

При отключении линии высшего для данного сечения класса напряжения устойчивость может не сохраняться, если:

— предел статической устойчивости уменьшается более чем на 70%;

— предел статической устойчивости по оставшимся связям не превышает утроенной расчетной амплитуды нерегулярных колебаний мощности в этом сечении.

Вынужденные перетоки не допускаются, если нарушение устойчивости при возмущениях групп I и II и правильном функционировании противоаварийной автоматики может привести к отключению потребителей суммарной мощностью, превышающей больше чем в 10 раз мощность того ограничения потребителей, которое требуется для обеспечения нормального перетока.

Работа с вынужденным перетоком в сечениях, непосредственно примыкающих к АЭС, не допускается.

Если фактические схемы и режимы системы требуют применения противоаварийной автоматики, отличной от имеющейся, то временно (до ее ввода) допускается работа с перетоками, при которых возможны нарушения устойчивости для возмущений групп II и III при условии, что суммарная мощность автоматически отключаемых потребителей при нарушении устойчивости не более чем в 10 раз превышает величину ограничения потребителей, требуемую для обеспечения нормативных показателей нормального режима.

Должно предусматриваться автоматическое прекращение асинхронных режимов, как правило, делением систем на несинхронно работающие части. Результирующая устойчивость (ресинхронизация как с применением автоматических устройств, так и самопроизвольная) обязательно резервируется делением системы. Во всех случаях допустимая длительность асинхронного режима и способ его прекращения устанавливаются для каждой системы и каждого ее сечения с учетом предотвращения повреждений оборудования энергосистемы, возможных дополнительных нарушений синхронизма и нарушений электроснабжения потребителей. При этом особое внимание следует уделять устойчивости электростанций и крупных узлов нагрузки, вблизи которых может оказываться центр качаний (см. гл. 14).

§ П2.2. Соображения о выборе метода и шага расчета механических переходных процессов в электрических системах *

Точность и быстрота расчета устанавливаются в зависимости от поставленной задачи. Выбираемый метод и шаг прежде всего связаны с выбором математической модели, описывающей переходные процессы в электрической системе, и зависит от длительности исследуемого процесса и точности задания исходной информации. Ниже приведена степень описания модели в зависимости от класса точности, которой будем далее пользоваться для различных переходных процессов.

1 - й к л а с с. Процессы в генераторах описываются полными уравнениями Парка—Горева. Учитывается влияние демпферных обмоток. Учитываются системы регулирования мощности турбины и возбуждения генератора — АРВ с. д.

2 - й к л а с с. Процессы в генераторах описываются упрощенными уравнениями Парка—Горева. Учитывается влияние демпферных обмоток. Учитываются системы регулирования мощности турбины и возбуждения генератора — АРВ с. д.

3 - й к л а с с. Процессы в генераторах описываются упрощенными уравнениями Парка—Горева. Влияние демпферных обмоток и систем регулирования мощности и возбуждения учитываются упрощенно.

4 - й к л а с с. Допускается постоянство э. д. с. ($E' = \text{const}$) в течение всего переходного процесса. Влияние демпферных контуров и системы регулирования не учитывается.

Расчет кратковременных переходных процессов длительностью 0,8—1,0 с.

1. При определении характера изменения угла генератора или генераторов без детального анализа процессов, происходящих в генераторах, регуляторах, линиях и других элементах электрической системы, следует пользоваться моделями 3-го и 4-го классов точности независимо от относительного активного сопротивления генераторов и сети.

* См.: *Веников В. А., Погосян Т. А.* Автоматическое изменение шага интегрирования при расчетах длительных переходных процессов в электроэнергетических системах. — Известия вузов СССР. Энергетика, 1984, № 3, с. 3—7.

Для решения системы дифференциальных уравнений в этом случае рекомендуется применять наиболее простые методы интегрирования, в частности принятый в энергетике метод последовательных интервалов и метод Рунге—Кутта II порядка (модифицированный и исправленный методы Эйлера) с шагом интегрирования, равным 0,05 с. Хотя эти методы не относятся к высокоустойчивым методам, они позволяют при шаге 0,05 с получить достаточно точный, отвечающий поставленной задаче результат, так как постоянные времени дифференциальных уравнений во много раз больше шага расчета, а длительность исследуемого процесса невелика.

2. Более полный анализ влияния демпферных контуров и систем регулирования возбуждения генераторов и мощности турбин требует независимо от относительного активного сопротивления генераторов и сети применения моделей 2-го класса точности. Системы регулирования возбуждения генераторов и мощности турбин будут при этом описаны жесткой системой дифференциальных уравнений, в которых постоянные времени отличаются на 1—2 порядка, а асинхронная мощность определяется по более точным выражениям (см. гл. 14).

Для решения такой системы также следует применять метод последовательных интервалов или метод Рунге—Кутта II порядка с шагом интегрирования 0,05 с при условии, что самая малая постоянная времени не менее 0,025 с. При меньших значениях постоянной времени в связи с ухудшением устойчивости численного решения будет накапливаться погрешность в процессе расчета. В этом случае для получения устойчивого числового решения необходима проверка выбранного метода и шага расчета по областям устойчивости численных методов*. При нарушении условия устойчивости числового решения следует уменьшить шаг до 0,01 с. Более эффективным для решения рассматриваемых задач оказывается метод трапеции (невяный метод II порядка с шагом, равным от 0,05 до 0,1 с), являющийся наиболее устойчивым и не допускающим накопления погрешности в процессе расчета. Применение этого метода с шагом 0,1 с приводит к сокращению времени расчета в 1,2—1,5 раза и увеличению точности вычислений примерно на 10% по сравнению с методом Рунге—Кутта II порядка. Методы Рунге—Кутта и методы прогноза и коррекции высокого порядка не эффективны, так как приводят к увеличению времени расчета на ЦВМ по сравнению со временем расчета методом трапеции примерно в 1,5—2 раза.

3. Более детальное исследование переходных процессов в генераторах требует применения моделей 1-го класса точности. Следует иметь в виду, что не всегда полное описание процессов в системе приводит к повышению достоверности результатов. Это зависит от относительного активного сопротивления цепи статора генератора и сети (r/x). При $r/x \geq 0,03$ для получения точных результатов необходимо описывать переходные процессы в генераторах полными уравнениями Парка—Горева. При этом так же точно требуется описывать и переходные процессы в остальных элементах электрической системы. Результаты расчета по полным уравнениям всегда более достоверны, чем результаты расчета по упрощенным уравнениям. При относительном активном сопротивлении $r/x < 0,03$ для получения точных и достоверных результатов рекомендуется применять упрощенные уравнения Парка—Горева, так как при этом расчеты по полным и упрощенным уравнениям практически полностью совпадают, а порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс, резко уменьшается, что приводит к сокращению времени расчета. Кроме того, полные уравнения более чувствительны к погрешности исходных данных (см. гл. 6). Следует также иметь в виду, что применение полных уравнений при малых r/x может привести к неправильному результату, если не учитывать появление дуги при отключении короткого замыкания. Учет же дуги, которая обычно моделируется активным сопротивлением, приводит к усложнению решаемой задачи и увеличению жесткости системы дифференциальных уравнений. Следовательно, при $r/x < 0,03$ следует применять упрощенные уравнения Парка—Горева, приводящие к резкому сокращению времени счета на ЦВМ и не ухудшающие при этом достоверности получаемых результатов.

Дифференциальные уравнения, описывающие процессы в генераторах полными уравнениями Парка—Горева, должны решаться наиболее устойчивыми методами численного интегрирования. В данном случае следует применять метод Рунге—Кутта IV порядка и метод прогноза и коррекции II порядка с шагом, равным 0,001 с. Для ускорения вычислений, без ухудшения при этом точности расчета, рекомендуется применять метод трапеции с шагом, равным 0,01 с. В этом случае скорость расчета на ЦВМ по сравнению с методом

* См.: *Погосян Т. А. Устойчивость методов численного интегрирования при расчете электромеханических переходных процессов в электрических системах.* — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1984, № 4, с. 32—39.

Рунге—Кутта IV порядка сокращается в 2—2,5 раза. Оценку погрешности во всех случаях надлежит проводить, вычисляя максимально возможную ошибку, возникшую при решении на ЦВМ конкретной задачи численными методами интегрирования по формуле*

$$R_n = \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i \Delta t} (d_i + \sigma_i),$$

где λ_i — собственные значения матрицы Якоби системы дифференциальных уравнений; Δt — шаг интегрирования; d_i — погрешность метода на шаге, σ_i — погрешность округления ЦВМ на шаге.

Расчет электромеханических переходных процессов длительностью 1,5—2 с

1. Для случая, когда требуется выявить характер изменения углов роторов генераторов без детального анализа процессов, происходящих в генераторах, регуляторах, линиях и других элементах электрической системы, необходимо пользоваться моделями 3-го класса точности. Применение в этом случае моделей 4-го класса точности недопустимо с точки зрения достоверности результатов.

Расчеты переходных процессов при этом должны проводиться с помощью явных методов интегрирования высокого порядка, которые являются более устойчивыми и не допускают значительного накопления погрешности в процессе вычислений. Рекомендуется применять метод Рунге—Кутта IV порядка и метод прогноза и коррекции II порядка с шагом, равным 0,05 с. Для ускорения расчетов целесообразнее применять метод трапеции с шагом, равным 0,1 с. При этом время счета сократится примерно в два раза, а точность результатов не ухудшится.

2. Более точный анализ влияния демпферных контуров и систем регулирования мощностей и возбуждения на переходный процесс длительностью 1,5—2 с требует применения моделей 2-го класса точности. Для решения таких задач следует применять методы Рунге—Кутта IV порядка, метод прогноза и коррекции II порядка с шагом, равным 0,05—0,025 с, и метод трапеции с шагом, равным 0,1 с. Чтобы не допустить накопления погрешности в процессе расчета, следует в начале и в процессе расчета по областям и условиям устойчивости периодически проверять устойчивость числового решения и подправлять шаг расчета. Для оценки накопленной погрешности необходимо в процессе расчета определять максимально возможную погрешность вычислений. Это позволит получить наиболее точный результат и до минимума сократить время расчетов.

3. Детальное описание переходных процессов длительностью до 1,5—2 с возможно при использовании моделей 1-го класса точности. Однако, так же как и при расчете кратковременных переходных процессов, применение моделей 1-го класса точности оказывается оправданным лишь при относительно активном сопротивлении генераторов и сети $r/x \geq 0,03$. Это объясняется теми же причинами, что и при расчете кратковременных переходных процессов.

В этом случае для обеспечения устойчивого числового решения необходимо уменьшить шаг (см. предыдущий случай) вследствие большой жесткости решаемой задачи (постоянные времени отличаются друг от друга на 2—3 порядка). Здесь следует применять метод Рунге—Кутта IV или V порядка и методы прогноза и коррекции II или III порядка (см. гл. 7) с шагом, равным 0,001 с. Применение методов прогноза и коррекции сокращает время расчета примерно в 1,2—1,5 раза по сравнению с методами Рунге—Кутта. Для большего сокращения времени расчета, но при сохранении желаемой точности вычислений рекомендуется применять метод трапеции с шагом, равным 0,005 с. Это позволит сократить время счета на ЦВМ примерно в 2—2,5 раза, не допуская при этом накопления погрешности.

Расчет длительных электромеханических переходных процессов (длительностью более 3 с).

1. Анализ изменения углов генераторов после возмущения длительностью более 3 с, без детального исследования процессов, происходящих в генераторах, линиях и других эле-

* См.: *Погосян Т. А.* Погрешность расчетов электромеханических переходных процессов в электрических системах. — *Электричество*, 1984, № 3, с. 54—56.

Метод интегрирования	Допустимая длительность исследуемого процесса, с	Класс точности решаемой задачи	Шаг расчета, с
Метод последовательных интервалов	0,8—1,0	3 и 4	0,05
		2	0,025—0,010
Рунге—Кутта II порядка	0,8—1,0	3 и 4	0,05
		2	0,01
Рунге—Кутта IV порядка	0,8—1,0 1,5—2,0	1	0,001
		3	0,05
		2	0,05—0,025
		1	0,001
	Более 3,0	3	Переменный с точностью 0,05
		2	Переменный с точностью 0,01
		1	Переменный с точностью 0,001
Кутта—Мерсона	1,5—2,0	3	0,05
		2	0,05—0,025
		1	0,001
	Более 3,0	3	Переменный с точностью 0,05
		2	Переменный с точностью 0,01
		1	Переменный с точностью 0,001
Прогноза и коррекции II порядка	0,8—1,0	1	0,001
	1,5—2,0	3	0,05
		2	0,05—0,025
		1	0,001

Метод интегрирования	Допустимая длительность исследуемого процесса, с	Класс точности решаемой задачи	Шаг расчета, с
Прогноза и коррекции II порядка	Более 3,0	3	Переменный с точностью 0,05
		2	Переменный с точностью 0,01
		1	Переменный с точностью 0,001
Прогноза и коррекции III порядка	1,5—2,0	3	0,05
		2	0,05—0,025
		1	0,001
	Более 3,0	3	Переменный с точностью 0,05
		2	Переменный с точностью 0,01
		1	Переменный с точностью 0,001
Трапеции (явный метод II порядка)	0,8—1,0	2	0,10—0,05
		1	0,01
	1,5—2,0	3	0,1
		2	0,05
		1	0,01
	Более 3,0	3	0,10—0,05
		2	0,05
		1	0,01—0,005

ментах электрической системы, проводится моделями 3-го класса точности. В этом случае точность результатов расчета сильно зависит от точности задания исходной информации, погрешности которой вследствие большой длительности исследуемого процесса приводят к заметному разбросу результатов расчета. Погрешность в конце расчета зависит от характера переходного процесса. Если исследуемый переходный процесс устанавливается, то погрешность расчета, возникшая вследствие неточного задания исходной информации, убывает и в пределе стремится к нулю. Если же параметры переходного процесса колеблются на границе области устойчивости, то погрешность возрастает и приводит к неправильному результату. Например, при применении моделей 3-го класса точности, при значении активного сопротивления $\pm 10\%$, разброс угла на четвертой секунде достигает примерно $4 \cdot 10^\circ$ в зависимости от схемы и параметров ее.

Для решения задач данного класса необходимо применять явные методы интегрирования с переменным шагом расчета и задаваемой точностью 0,05. При этом начальный шаг расчета необходимо проверять по областям устойчивости методов интегрирования и в процессе расчета по условиям этой устойчивости подправлять ее. Оценка полной погрешности расчета производится вычислением максимально возможной погрешности при числовом решении. В данном случае рекомендуется применять метод трапеции с шагом, равным 0,05 с, который в отличие от явных методов вследствие высокой устойчивости не допускает сильного накопления погрешности в процессе расчета. При применении этого метода разброс угла генератора, возникший вследствие неточного задания исходной информации, после 4—6 колебаний составляет всего 2—5°, что примерно в два раза меньше, чем при применении явных методов.

2. Более полный анализ переходных процессов в электрических системах необходимо производить по модели 2-го класса точности. Для решения задач данного типа, как и в предыдущем случае, необходимо применять явные методы численного интегрирования с автоматическим изменением шага расчета. При этом задаваемая точность должна составлять 0,01. Начальный шаг необходимо определять по областям устойчивости методов интегрирования и подправлять в процессе расчета по условиям устойчивости числового решения.

3. Для детального описания переходных процессов в генераторах применяются модели 1-го класса точности. Здесь также модели 1-го класса целесообразно применять при $r/x \geq 0,03$, причем для уменьшения накапливаемой погрешности в процессе расчета рекомендуется использовать комбинированный способ расчета по полным и упрощенным уравнениям. В начальные моменты возмущения и последствия противоаварийной автоматики расчеты необходимо проводить по полным уравнениям, а после затухания колебаний — по упрощенным уравнениям. При этом время счета на ЦВМ уменьшается примерно в два раза.

В табл. П2.2 приведены методы и шаги расчета электромеханических переходных процессов в электрических системах, которые рекомендуется выбирать в зависимости от класса и длительности решаемой задачи.

П2. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

Все величины, характеризующие режим работы энергосистемы в системе относительных единиц, выражаются в долях некоторых величин (той же размерности), принятых за единицы величин, называемых *базисными*.

Система относительных единиц в ее простейшем виде применяется при изучении токов коротких замыканий. В качестве базисных величин выбираются ток, напряжение, мощность или сопротивление. Две из этих величин выбираются произвольно, а остальные две определяются исходя из соотношений

$$S_6 = \sqrt{3} U_6 I_6; \quad Z_6 = U_6^2 / S_6.$$

Часто принимают $S_6 = U_6 I_6$, предполагая при этом, что значение $\sqrt{3}$ введено в ток, т. е. что ток завышен против действительного в $\sqrt{3}$ раз. В настоящей книге используется этот прием. Поэтому значения токов в относительных единицах I_* переводятся в абсолютные (амперы) согласно соотношению

$$I = I_6 I_* / \sqrt{3},$$

где I_6 выражено в амперах.

Если в рассматриваемой схеме имеются трансформаторные связи, то напряжение, принимаемое за базисное, должно быть выбрано на определенной ступени трансформации и все сопротивления, находящиеся на разных ступенях трансформации, должны быть сначала «приведены» к этой ступени трансформации, а затем уже вычислены в относительных единицах.

Для перевода сопротивлений, выраженных в омах, в относительные единицы применяют выражение

$$Z_* = (Z S_6 / U_6^2) (k_1^2, k_2^2, \dots, k_n^2),$$

где k_1, k_2, \dots, k_n — коэффициенты трансформации трансформаторов, размещенных между цепью, в которой находится сопротивление, и цепью, к которой приводятся сопротивления системы.

Соотношение между сопротивлениями, выраженными в процентах или долевых единицах, отнесенных к номинальной мощности, записывается как

$$Z_* = Z(S_6/S_{\text{ном}}) (U_{\text{ном}}^2/U_6^2) (k_1^2, k_2^2, \dots, k_n^2),$$

где $Z = Z_{\text{ном}}/100$.

При исследованиях электромеханических процессов система относительных единиц расширяется: она содержит время, угол, скорость, ускорение и т. д.

Время. В системе именованных единиц единицей времени является секунда. Разумеется, для исследования вращения ротора генератора более естественно выбрать единицу времени, связанную с углом поворота ротора генератора. За базисное время t_6 принимают время, в течение которого ротор, вращающийся с синхронной угловой скоростью ω_0 , повернется на 1 рад. Из этого определения следует, что $\omega_0 t_6 = 1$ или $t_6 = 1/\omega_0$. Время в относительных единицах выражается произведением времени (в секундах) и синхронной угловой скорости ротора:

$$t_* = t/t_6 = t\omega_0.$$

При частоте 50 Гц время $t_* = 314t$.

Таким образом, время, выраженное в относительных единицах, или, как иногда говорят, в радианах, выражается числом, в 314 раз большим, чем время, выраженное в секундах. Например, постоянная времени обмотки возбуждения генератора, равная 5 с, в относительных единицах равна 1570 рад.

Угол. Угол поворота ротора обычно определяется в электрических радианах, но иногда при записи всех величин в относительных единицах угол выражается в градусах.

Выражения электрического угла в градусах или радианах связаны с выражениями геометрического угла в градусах соотношением

$$\delta_{\text{эл}} \cdot \delta_{\text{геом}} = 180 : 360/2 m_p,$$

откуда $\delta_{\text{эл}} = \delta_{\text{геом}} m_p$, причем m_p — число пар полюсов рассматриваемого генератора.

Соотношения между углами, выраженными в радианах и градусах, могут быть записаны как

$$\delta \text{ [рад]} / \delta \text{ [град]} = 2\pi f / 360 f; \quad \delta \text{ [рад]} = (314/18\,000) \delta \text{ [град]} = \delta \text{ [град]} / 57,3.$$

Скорость. При исследовании процессов, связанных с вращением ротора, различают его абсолютную механическую скорость Ω , определяемую как производную геометрического смещения (выраженного в геометрических углах) ротора по времени $d\theta/dt$, и абсолютную электрическую скорость $\omega = d\delta/dt$ (углы θ и δ отсчитываются от неподвижной оси).

Электрическая и механическая скорости связаны выражением $\omega_0 = m_p \Omega_0$. Скорость ротора $\Delta\omega$ по отношению к синхронно вращающейся оси (относительная скорость) определяется как разность фактической электрической скорости ω и синхронной скорости ω_0 , или, что то же, как производная относительного угла по времени:

$$d\delta/dt = \Delta\omega = \omega - \omega_0,$$

откуда

$$\omega = \omega_0 + d\delta/dt.$$

Относительная механическая скорость

$$\Delta\Omega = \Delta\omega/m_p.$$

Относительная скорость, выраженная в долях от базисной (в относительных единицах),

$$\Delta\omega_* = \Delta\omega/\omega_0 = \omega/\omega_0 - \omega_0/\omega_0 = (1/\omega_0) (d\delta/dt).$$

Так как обычно за базисное значение скорости принимают синхронную скорость ω_0 , то выражение относительной скорости приобретает вид

$$\Delta\omega_* = \omega_* - 1 = (1/314) (d\delta/dt),$$

где величина δ выражена в радианах, а t — в секундах. При выражении электрического угла в градусах, а времени — в секундах имеем

$$\Delta\omega_* = \omega_* - 1 = (1/18\,000) (d\delta/dt).$$

Относительная механическая скорость, выраженная в долях от синхронной, численно равна электрической относительной скорости:

$$\Delta\Omega_* = \Delta\Omega/\Omega_0 = m_p\Delta\Omega/m_p\Omega_0 = \Delta\omega/\omega_0 = \Delta\omega_*.$$

Мощность и момент. Электромагнитная мощность в относительных единицах записывается так же, как и в именованных, но через э. д. с., напряжения и сопротивления, выраженные в относительных единицах.

Мощность связана с моментом и скоростью известным соотношением

$$P = \Omega M,$$

или в относительных единицах

$$P_* = \omega_* M_*.$$

Подставив $\omega_* = 1 + [(d\delta/dt)/18\,000]$, получим $P_* = [1 + (d\delta/dt)/18\,000]M_*$.

Если изменение относительной скорости ротора $d\delta/dt$ невелико, то $(d\delta/dt)/18\,000 \ll 1$; следовательно, даже при отклонении скорости от синхронной на 200—400 эл. град/с можно принять $P_* = M_*$, так как погрешность при таком допущении составит не более 1—2%.

Таким образом, при малых изменениях скорости (качаниях, начальной стадии выпадения из синхронизма и т. д.) часто принимают, что $P_* = M_*$.

Ускорение. Ускорение ротора (c^{-2}) характеризуется соотношением

$$\alpha = d\Delta\Omega/dt = \Delta M/J_0, \quad (\text{ПЗ.1})$$

где $\Delta\Omega$ — относительная угловая скорость: $\Delta\Omega_* = \Delta\Omega/\Omega_0$ с⁻¹ (или рад/с); ΔM — избыток вращающего момента*, м²·кг·с⁻², Н·м; J_0 — момент инерции, кг·м².

Умножив числитель и знаменатель правой части выражения (ПЗ.1) на Ω_0^2 и несколько преобразовав его, получим

$$\frac{d\Delta\Omega}{dt} = \frac{\Delta M\Omega_0^2}{2(J_0\Omega_0^2/2)} = \frac{\Delta M}{T_J} \Omega_0^2. \quad (\text{ПЗ.2})$$

Здесь $J_0\Omega_0^2/2$ — кинетическая энергия, запасенная ротором при движении с синхронной скоростью Ω_0 .

Величина T_J , равная удвоенному значению кинетической энергии ротора, вращающегося с синхронной скоростью, называется *постоянной инерции*. Она имеет размерность кг·м²·с⁻², или, что то же, Вт·с (или кВт·с).

Выражение (ПЗ.2) нетрудно еще раз преобразовать, перейдя от геометрической (механической) скорости к электрической и от момента — к мощности. Подставив в (ПЗ.1) соотношения

$$\Delta\Omega = \Delta\omega/m_p; \quad \Omega_0 = \omega_0/m_p; \quad \Delta M = \Delta P/\Omega_0,$$

запишем

$$\alpha = d\Delta\omega/dt = (\Delta P/T_J) \omega_0, \quad (\text{ПЗ.3})$$

или

$$\alpha = \omega_0 (\Delta P/T_J) = 314(\Delta P/T_J). \quad (\text{ПЗ.4})$$

Здесь $\omega_0 = 314$, т. е. имеет размерность рад/с.

* См.: Олейникова Л. Д. Единицы физических величин в энергетике. Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

Если ΔP выражено в тыс. кВт, то T_J — в тыс. кВт·с, α — в рад/с².

Если синхронную скорость выразить в градусах, т. е. подставить в (П3.4) $\omega_0 = 360$, $J_0 = 18\,000$, то получим ускорение (град/с²):

$$\alpha = 18\,000\Delta P/T_J. \quad (\text{П3.4а})$$

Разделив числитель и знаменатель (П3.4) на базисную мощность, запишем ускорение (град/с²):

$$\alpha = d^2\delta/dt^2 = 314\Delta P_*/T_J, \quad (\text{П3.4б})$$

где δ — выражено в рад; t — в секундах; T_J — в секундах.

Аналогично, из (П3.4) получим

$$\alpha = d^2\delta/dt^2 = 18\,000\Delta P_*/T_J, \quad (\text{П3.4в})$$

где α [град/с²]; δ [град]; t [с]; T_J [с], причем

$$T_J(\text{с}) = T_J(\text{кВт} \cdot \text{с})/S_6(\text{кВт}) = J_0\Omega_0^2/S_6.$$

Последнее соотношение может быть получено из известного выражения для определения постоянной инерции машины (с)

$$T_{J\text{ном}} = 2,74GD^2n^2/(1000S_{\text{ном}})$$

путем пересчета к базисной мощности:

$$T_J = T_{J\text{ном}}S_{\text{ном}}/S_6 = 2,74GD^2n^2/(1000S_6),$$

где GD^2 — маховой момент, кг·м²; n — частота вращения, об/мин; S_6 — базисная мощность, кВт·А.

Таким образом, в выражении относительного движения всегда должна входить постоянная инерции вращающихся машин, отнесенная к базисной мощности.

Если в (П3.4б) время выразить в относительных единицах, введя вместо $T_J(\text{с})$ величину T_J/ω_0 , вместо t — величину t_*/ω_0 , то получим ускорение в относительных единицах:

$$\alpha_* = \Delta P_*/T_J.$$

Иногда ускорение, выраженное в Гц/с², записывают как

$$\alpha_1 = \alpha/(2\pi) = \Delta M_*f_0/T_J. \quad (\text{П3.5})$$

Рассматривая (П3.2), легко установить, что постоянная инерции $T_J(\text{с})$ численно равна времени разгона $t_{\text{разг}}$ ротора генератора от неподвижного состояния до синхронной скорости (при условии, что на ротор действует постоянный вращающий момент, равный номинальному, и что момент сопротивления постоянен) или времени торможения от синхронной скорости до неподвижного состояния при постоянном тормозящем моменте, равном номинальному. В этом легко убедиться, проинтегрировав выражение (П3.2), где при разгоне $\Delta M_* = 1$, $\Omega_0 = 1$:

$$\int_{\Omega_*=0}^{\Omega_*=\Omega_0=1} T_J d\Omega_* = \int_{t=0}^{t=t_{\text{разг}}} dt,$$

откуда $T_J = t_{\text{разг}}$.

Аналогично, при торможении $T_J = t_{\text{торм}}$.

В действительности, когда вращающий момент, равно как и момент сопротивления, зависит от скорости, время торможения или ускорения оказывается больше T_J . В этих случаях T_J можно определить по экспериментально снятой кривой $\Omega = f(t)$ при $M_* = 1$:

$$T_J = (dt_*/d\Omega_*) \Delta M_*.$$

Практические методы определения постоянной инерции основываются на этом соотношении.

Кинетическая энергия. Чтобы выразить в относительных единицах приращения энергии ротора при изменении его скорости, запишем сначала основное выражение:

$$\Delta A = \int \Delta P dt = J_0 \frac{\Omega^2}{2} - J_0 \frac{\Omega_0^2}{2} = \frac{J_0 \Omega_0^2}{2} \left[\frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega_0^2} \right] = \frac{T_J}{2} (\Omega_*^2 - 1).$$

Подставив в него $\Omega_* = \omega_* = 1 + \Delta\omega_*/\omega_0$, получим

$$\int \Delta P dt = (T_J / 2) (\Delta\omega_*^2 + 2\Delta\omega_*). \quad (\text{ПЗ.6})$$

Рассматривая это выражение как квадратное уравнение, найдем

$$\Delta\omega_* = \sqrt{1 + \frac{2}{T_J} \int \Delta P dt} - 1. \quad (\text{ПЗ.6a})$$

Продифференцируем (ПЗ.6) по t :

$$\Delta P = \frac{T_J d\Delta\omega_*}{dt} (1 + \Delta\omega_*) \text{ или } \Delta M = \frac{\Delta P}{1 + \Delta\omega_*} = T_J \frac{d\Delta\omega_*}{dt}.$$

Представим $d\Delta\omega_*/dt$ в виде

$$\frac{d\Delta\omega_*}{dt} = \frac{d\Delta\omega_*}{dt} \frac{d\delta}{d\delta} = \Delta\omega_* \frac{d\Delta\omega_*}{d\delta},$$

тогда

$$\Delta M = T_J \Delta\omega_* \frac{d\Delta\omega_*}{d\delta} \text{ или } \Delta M d\delta = T_J \Delta\omega_* d\Delta\omega_*.$$

Проинтегрировав последнее выражение, получим уравнение кинетической энергии относительного движения*:

$$\frac{T_J \Delta\omega_*^2}{2} = \int_0^{\delta} \Delta M d\delta \text{ или } \frac{T_J \Delta\omega_*^2}{2} = \int \frac{\Delta P d\delta}{(1 + \Delta\omega_*)}. \quad (\text{ПЗ.6б})$$

Так как $\Delta\omega_* \ll 1$, то

$$\Delta A = \int \Delta P d\delta \approx T_J \frac{\Delta\omega_*^2}{2}, \quad (\text{ПЗ.6в})$$

откуда

$$\Delta\omega_* \approx \sqrt{\frac{2}{T_J} \int \Delta P d\delta}.$$

Аналогичное выражение можно найти из (ПЗ.6a) при условии, что $\Delta\omega_* \ll 1$.

Полученные выражения применяются обычно без специальных оговорок об их условии и приближенности.

Отметим, что аналогично выражению (ПЗ.6a) можно записать выражение для относительного изменения угловой скорости турбины:

* Различные формы уравнений движения представлены в табл. ПЗ.1.

$$\Delta\Omega_* = \sqrt{1 + 2A/T_J} - 1,$$

где $A = \int_0^t P dt$ — количество энергии, выработанное турбиной за время перемещения регулирующего органа, происходящего в связи с изменением нагрузки генератора.

Таблица ПЗ.1

№ п/п	Форма записи уравнения	Размерности величин			
		угол δ	время t	постоянная инерции T_J	мощности P, P_T
1	$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	рад	рад	рад	отн. ед.
2	$T_J \omega_0 \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	рад	рад	с	отн. ед.
3	$T_J \omega_0 P_6 \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	рад	рад	с	кВт
4	$\frac{T_J}{\omega_0} P_6 \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	рад	с	с	кВт
5	$\frac{T_J}{360 f_0} P_6 \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	эл. град	с	с	кВт
6	$\frac{T_J}{360 f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	эл. град	с	с	отн. ед.
7	$\frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	рад	с	с	отн. ед.
8	$\frac{T_J \omega_0}{P_6} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P$	рад	рад	кВт·с	отн. ед.
9	$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0 (P_T - P)$	рад	с	с	отн. ед.

ПА. ДЕМПФИРОВАНИЕ И ДЕМПФЕРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Демпферный коэффициент P_d вводится в уравнение движения синхронной машины в случаях, когда целесообразно упрощенно, без записи дифференциальных уравнений электромагнитных переходных процессов в контурах ротора, отразить влияние этих контуров в режимах асинхронной работы или синхронных электромеханических качаний СМ.

Демпферный коэффициент связан с механическими (трение и т. д.) и электрическими (появление асинхронной мощности) явлениями. В сложной системе, содержащей несколько несинхронно работающих генераторов, в статоре каждого из них появляются токи и напряжения, содержащие слагающие разных частот. Интенсивность слагающей той или иной частоты зависит от конструкции всех машин, значений э. д. с., абсолютных скоростей их роторов, конфигурации связывающих сетей и их сопротивлений. С определенным приближением можно полагать, что на статоре создается вращающееся поле, имеющее скорость, отличную от синхронной.

Эквивалентная мощность демпфирования, отражаемая значением коэффициента P_d (см. гл. 14), в каждой машине является суммой ряда мощностей:

1) обусловленных трением ($M_{Тр}$) и пропорциональных абсолютной скорости ротора данной машины ($P_{дТр}$);

2) связанных с действием «собственного момента» (M_{11}), пропорционального активному сопротивлению цепей статора, квадрату э. д. с. данной машины и значению $(1 - s)$, где s — скольжение результирующего магнитного потока статора, определенного как сумма всех магнитных полей, имеющих разные частоты (P_{d11});

3) вызванных асинхронным эффектом, проявляющимся в связи с взаимодействием токов в короткозамкнутых обмотках ротора, и упомянутого результирующего магнитного потока, имеющего скольжение s относительно ротора (P_{d2}).

Для упрощения задачи обычно исключают из рассмотрения многочастотность, полагая, что на статоре каждой машины создается синусоидальное поле, имеющее скорость, отличную от синхронной.

В случае нескольких станций, пренебрегая разными частотами мгновенных значений, определяют P_d по относительному движению роторов машин системы. Даже при такого рода упрощениях решение задачи по определению P_d и расчету относительного движения вызывает затруднения. Система из трех-четырех станций обычно заменяется двумя станциями или, еще чаще, станцией, работающей на шины неизменного напряжения. Так как $P_d \gg P_{тр}$, то принимают $P_{дтр} = \partial M_{тр} / \partial s \approx 0$, тогда для простейшего случая

$$P_d = P_{d11} + P_{d2} = \partial M_{11} / \partial s + \partial M_2 / \partial s.$$

При возбуждении, отвечающем нормальному режиму, значительном сопротивлении статора и малых скольжениях ($s < 0,0005$) производная от моментов принимает значения

$$\partial M_{11} / \partial s = -(1 \div 3); \quad \partial M_2 / \partial s = 0,5 \div 4.$$

Следовательно, P_d может стать положительным, что укажет на возможность самораскачивания. При установившемся асинхронном ходе и $s_{\infty} < s_{кр}$, определяя P_d как $\text{tg} \epsilon_0$, где ϵ_0 — угол наклона секущей, проведенной из точки $s = 0$ в точку кривой $M = f(s)$, при $s = s_{кр}$ обычно получаем значение P_d в диапазоне 100—600. При $s_{\infty} > s_{кр}$ обычно $P_d = 3 \div 30$. При удалении шин неизменного напряжения от рассматриваемой машины на z_{12} можно в е с ь м а г р у б о найти новое значение:

$$P_{d2} = P_d x_d'^2 / (z_{12}^2 + x_d'^2).$$

Размерность $[P_d] = [P][t]/[\delta]$. В полученных выше значениях величина P_d определена в относительных единицах. При представлении в уравнении относительного движения угла в радианах, времени в секундах, мощности в относительных единицах приведенные значения P_d должны быть разделены на 314 (рад/с).

Демпферный коэффициент синхронных качаний, включающий влияние обмотки возбуждения, зависит как от конструктивных параметров СМ, так и (в отличие от асинхронных режимов) от исходного режима и параметров устройств регулирования возбуждения. Так, для крупного турбогенератора без АРВ, работающего в простейшей электрической системе (станция-шины) и имеющей собственную частоту электромеханических колебаний порядка 1 Гц, значение $P_d = 2 \div 4$ отн. ед. При оснащении этого турбогенератора АРВ с д. и специальным выборе его настроечных параметров $P_d = 40 \div 60$ отн. ед. Заметим, что если в уравнении движения все постоянные времени записаны в секундах, а углы — в радианах, то и P_d нужно выражать в секундах:

$$P_d [с] = P_d [о. е.] / \omega_0 [\text{рад/с}].$$

Аналитические выражения для определения P_d через конструктивные параметры СМ, режимные параметры простой системы и АРВ даны в литературе*.

Для многомашинных электрических систем определение демпферного коэффициента синхронных качаний выделенной СМ является более сложной задачей. Это связано с тем, что в этом случае каждая СМ качается с $N - 1$ частотами (где N — число СМ) электромеханических колебаний. На каждой частоте имеется составляющая демпфирования.

Разработанная методика** рекомендует выделять доминирующую частотную состав-

* См.: Веников В. А., Литкенс И. В., Пуго В. И. Демпферные коэффициенты. Учебное пособие по курсу «Переходные процессы в электрических системах». — М.: МЭИ, 1979.

** См.: Литкенс И. В., Пуго В. И., Абдул Заде В. М. Демпферные коэффициенты синхронных генераторов в многомашинных электрических системах. — Электричество, 1984, № 3.

щую сложного переходного процесса и для нее определять эквивалентный демпферный коэффициент.

Пример П4.1. ГЭС передает энергию в мощную систему. Напряжение на шинах приемной подстанции неизменно. Привинципальная схема и ее параметры приведены на рис. П4.1. Реактивные сопротивления эквивалентного генератора ГЭС при тех же базисных условиях ($S_6 = 600 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_6 = 115 \text{ кВ}$) равны: $x_{dГ} = 3,72$; $x_{qГ} = 2,42$; $x'_{dГ} = 1,13$; $x''_{dГ} = 0,778$; $x''_{qГ} = 0,906$. Постоянные времени контуров гидротурбин составляют: $T_{d0} = 5 \text{ с}$; $T_{d0} = 0,08 \text{ с}$; $T''_{q0} = 0,13 \text{ с}$. Скоростные регуляторы гидротурбин имеют идентичные характеристики; коэффициент неравномерности регуляторов всех турбин $\sigma = 1,2\%$.

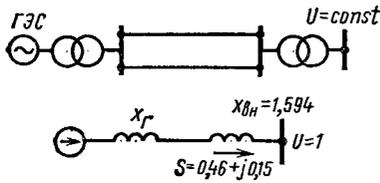


Рис. П4.1. Схема системы

Рассчитать режим электропередачи при асинхронном ходе генераторов, возбуждение которых в этом режиме снимается для уменьшения колебаний мощности.

Решение. Мощности и напряжения в системе при асинхронном ходе одной из генераторных станций определяются скольжением, с которым работают генераторы этой станции. Среднее скольжение установившегося асинхронного режима зависит от соотношения характеристик средней асинхронной мощности генератора и статической характеристики мощности регулируемой турбины.

Значения средней асинхронной мощности гидротурбин при чисто реактивной связи с шинами неизменного напряжения могут быть вычислены по формуле [согласно (14.14)]

$$P_{\text{ас.ср}} = -\frac{U^2}{2} s \left[\frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \frac{T'_d}{1 + (sT'_d)^2} + \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} \frac{T''_d}{1 + (sT''_d)^2} + \frac{x_q - x''_q}{x_q x''_q} \frac{T''_q}{1 + (sT''_q)^2} \right].$$

По условиям задачи в приведенном выше выражении

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_{dГ} + x_{\text{ВН}}}{x_{dГ} + x_{\text{ВН}}} = 5 \frac{1,13 + 1,594}{3,72 + 1,594} = 2,56 \text{ с};$$

$$T''_d = T''_{d0} \frac{x''_{dГ} + x_{\text{ВН}}}{x_{dГ} + x_{\text{ВН}}} = 0,08 \frac{0,778 + 1,594}{1,13 + 1,594} = 0,0695 \text{ с};$$

$$T''_q = T''_{q0} \frac{x''_{qГ} + x_{\text{ВН}}}{x_{qГ} + x_{\text{ВН}}} = 0,13 \frac{0,906 + 1,594}{2,42 + 1,594} = 0,081 \text{ с}.$$

Реактивные сопротивления в формуле асинхронной мощности включают внешнее сопротивление $x_{\text{ВН}}$. При выражении постоянных времени в относительных единицах (радианах) имеем

$$P_{\text{ас.ср}} = -\frac{1^2}{2} s \left[\frac{3,72 - 1,13}{(3,72 + 1,594)(1,13 + 1,594)} \frac{2,56 \cdot 3,14}{1 + (2,56 \cdot 3,14)^2 s^2} + \frac{1,13 - 0,778}{(1,13 + 1,594)(0,778 + 1,594)} \frac{0,0695 \cdot 3,14}{1 + (0,0695 \cdot 3,14)^2 s^2} + \frac{2,42 - 0,906}{(2,42 + 1,594)(0,906 + 1,594)} \frac{0,081 \cdot 3,14}{1 + (0,081 \cdot 3,14)^2 s^2} \right] = -\frac{71,6s}{1 + 64,5 \cdot 10^4 s^2} -$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{0,62s}{1 + 0,0475 \cdot 10^4 s^2} - \frac{1,915s}{1 + 0,0645 \cdot 10^4 s^2}; \\
 P_{ac} = & - \left\{ P_{ac f cp} \left[1 + \sqrt{1 + (sT'_d)^2} \sin \left(2\delta - \arctg \frac{1}{sT'_d} \right) \right] + \right. \\
 & + P_{ac d cp} \left[1 + \sqrt{1 + (sT''_d)^2} \sin \left(2\delta - \arctg \frac{1}{sT''_d} \right) \right] + \\
 & \left. + P_{ac q cp} \left[1 - \sqrt{1 + (sT''_q)^2} \sin \left(2\delta - \arctg \frac{1}{sT''_q} \right) \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

Здесь

$$sT'_d = -1,15 \cdot 2,56 \cdot 314 \cdot 10^{-2} = -9,25; \quad sT''_d = -1,15 \cdot 6,95 \cdot 314 \cdot 10^{-4} = -0,251;$$

$$sT''_q = -1,15 \cdot 8,1 \cdot 314 \cdot 10^{-4} = -0,292;$$

$$\arctg \frac{1}{-9,25} = 173,8^\circ; \quad \arctg \frac{1}{-0,251} = 104,1^\circ; \quad \arctg \frac{1}{-0,292} = 106,3.$$

Следовательно,

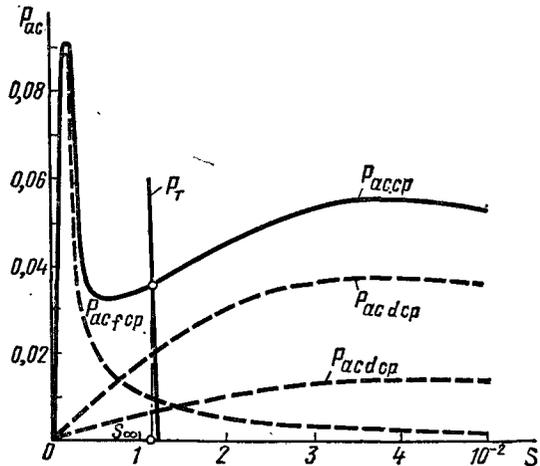
$$\begin{aligned}
 P_{ac} = & -0,0095 [1 + \sqrt{1 + 9,25^2} \sin(2\delta - 173,8^\circ)] - 0,0065 \times \\
 & \times [1 + \sqrt{1 + 0,251^2} \sin(2\delta - 104,1^\circ)] - 0,020 [1 - \sqrt{1 + 0,292^2} \sin(2\delta - 106,3^\circ)] = \\
 = & -0,036 - 0,0382 \sin(2\delta - 173,8^\circ) - 0,0067 \sin(2\delta - 104,1^\circ) + 0,0208 \sin(2\delta - 106,3^\circ).
 \end{aligned}$$

Характеристики $P = f(s)$ показаны на рис. П4.2.

Рис. П4.2. Характеристики асинхронной мощности:

P_T — статическая характеристика мощности регулируемой турбины, коэффициент неравномерности регулятора которой $\sigma = 1,2\%$. Точка пересечения характеристик турбины и генератора определяет значение среднего скольжения установившегося асинхронного хода $s_{\infty} = -0,0115$. Из рисунка следует, что $P_{ac f cp} = 0,0095$; $P_{ac d cp} = 0,0065$; $P_{ac q cp} = 0,020$.

Значение активной асинхронной мощности, учитываемое как среднюю, так и переменную слагающие, может быть вычислено согласно видоизмененной формуле (14.16)



В асинхронном режиме гидрогенераторы отдают в сеть также обусловленную явнополюсностью активную мощность, иногда называемую реакционной:

$$P_p = \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta = \frac{1}{2} \frac{3,72 - 2,42}{(3,72 + 1,594)(2,42 + 1,594)} \sin 2\delta = 0,0304 \sin 2\delta.$$

Согласно (14.19), реактивная мощность Q_r в системе при асинхронном ходе гидрогене-

ратора складывается из асинхронной мощности Q_{ac} и мощности намагничивания Q_{μ} , причём

$$Q_{\mu} = -\frac{U^2}{2} \left[\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} - \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta \right];$$

$$Q_{ac} = -\frac{U^2}{2} \left\{ \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d} \right) \left[\frac{(sT_d')^2}{1 + (sT_d')^2} + \frac{sT_d'}{\sqrt{1 + (sT_d')^2}} \cos \left(2\delta - \arctg \frac{1}{sT_d'} \right) \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \left[\frac{(sT_d'')^2}{1 + (sT_d'')^2} + \frac{sT_d''}{\sqrt{1 + (sT_d'')^2}} \cos \left(2\delta - \arctg \frac{1}{sT_d''} \right) \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \left[\frac{(sT_q'')^2}{1 + (sT_q'')^2} - \frac{sT_q''}{\sqrt{1 + (sT_q'')^2}} \cos \left(2\delta - \arctg \frac{1}{sT_q''} \right) \right] \right\}.$$

В этих формулах реактивные сопротивления включают также и реактивные сопротивления внешней цепи. Следовательно,

$$Q_{\mu} = -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{3,72 + 1,594} + \frac{1}{2,42 + 1,594} - \left(\frac{1}{2,42 + 1,594} - \frac{1}{3,72 + 1,594} \right) \cos 2\delta \right] = \\ = -0,2188 + 0,0304 \cos 2\delta;$$

$$Q_{ac} = -\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{1,13 + 1,594} - \frac{1}{3,72 + 1,594} \right) \left[\frac{(-9,25)^2}{1 + (-9,25)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(-9,25)}{\sqrt{1 + (-9,25)^2}} \cos (2\delta - 173,8^\circ) \right] + \left(\frac{1}{0,778 + 1,594} - \frac{1}{1,13 + 1,594} \right) \left[\frac{(-0,251)^2}{1 + (-0,251)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(-0,251)}{\sqrt{1 + (-0,251)^2}} \cos (2\delta - 104,1^\circ) \right] + \left(\frac{1}{0,906 + 1,594} - \frac{1}{2,42 + 1,594} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{(-0,292)^2}{1 + (-0,292)^2} - \frac{(-0,292)}{\sqrt{1 + (-0,292)^2}} \cos (2\delta - 106,3^\circ) \right\},$$

или

$$Q_{ac} = -[0,0961 - 0,089 \cos (2\delta - 173,8^\circ) - 0,00667 \cos (2\delta - 104,1^\circ) + \\ + 0,0211 \cos (2\delta - 106,3^\circ)].$$

Изменения параметров режима, полученные в соответствии с приведенными формулами, показаны на рис. П4.3. Вычислим напряжение на шинах генераторной станции, воспользовавшись выражением

$$\dot{U}_r = U + Q_{\Sigma} x_{вн}/U + jP_{\Sigma} x_{вн}/U.$$

При $\delta = 0$

$$\dot{U}_r = 1 + (-0,2008) \cdot 1,594/1 + j \cdot 0,03 \cdot 1,594/1 = 0,682 < 4,0^\circ.$$

Изменение $U_r = f(\delta)$ также приведено на рис. П4.3.

Пример П4.2. В системе, представленной на рис. П4.4, а, произошло отклонение скорости от синхронной.

Найти для системы, схема которой представлена на рис. П4.4, а, зависимость вращающего момента от скольжения при $\omega \approx \omega_0$, $t \approx t_0$.

Параметры системы: 1) турбогенератор малой мощности с независимым возбуждением, работающий без регулятора возбуждения: $E_q = 2,02$; $x_d = 0,893$; $x'_d = 0,063$; кабель: $x = 0,0235$; $r = 0,4$; трансформатор: $x_T = 0,055$. Схема замещения представлена на рис. П4.4, б.

Решение. Находим $x_{d\Sigma} = 0,971$; $x'_{d\Sigma} = 0,142$; $T'_d = 50$;

$$z = \sqrt{0,972^2 + 0,4^2} = 1,05; \quad \alpha = \arcsin(r/z) = 22,3^\circ; \quad z' = \sqrt{0,142^2 + 0,4^2} = 0,425.$$

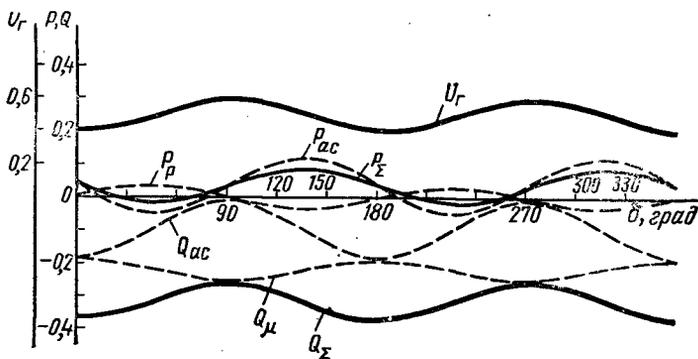


Рис. П4.3. Изменение параметров режима при асинхронном режиме

Для данных условий можно принять $n = 1$. Тогда, согласно § 14.5, при $\omega = \omega_0 = 1$

$$M_{11} = 2,02^2 \cdot 0,4/1,05^3 = 1,47.$$

Далее находим:

$$K_{11} = +2,02^2 \cdot 0,4(0,971^2 - 0,4^2)/1,05^4 = +1,05;$$

$$-K_{22} = 1(0,893 - 0,065)50 \cdot \sin^2 \delta / (0,971 \cdot 0,142) \approx 300 \sin^2 \delta.$$

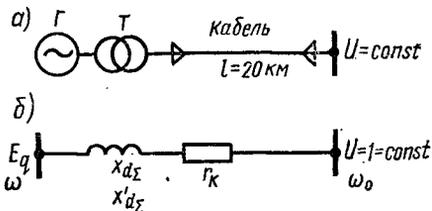


Рис. П4.4. Схема системы:

а — исходная схема; б — схема замещения

Поскольку связь между генератором и шинами неизменного напряжения не чисто реактивная, пересчитаем K'_{22} согласно (14.15):

$$-K'_{22} = (x_d x'_d / z'^2)^2 K_{22} = \left[\frac{0,893 \cdot 0,063}{0,425} \right] 300 \sin^2 \delta = 39,7 \sin^2 \delta.$$

Зависимость моментов от скорости построим, исходя из (14.12):

$$M_{11} = 2,02^2 \cdot 0,4\omega / (0,4^2 + 0,95\omega^2) = 1,632\omega / (0,16 + 0,95\omega^2).$$

и из (14.16), где упрощенно учтен только первый член:

$$M_2 = 16,85s \left[\frac{1}{A} + \frac{1}{\sqrt{A}} \sin \left(2\delta - \arctg \frac{1}{50s} \right) \right].$$

Здесь $A = 1 + (50s)^2$.

Из соответствующих графиков, представленных на рис. П4.5, следует, что $K_{22} < K_{11}$ при малых углах δ_0 , что должно привести к раскачиванию машины (отрицательному демпфированию).

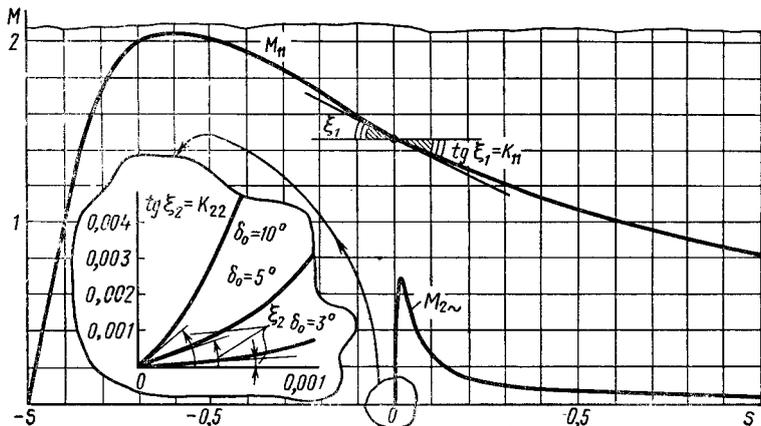


Рис. П4.5. Влияние установившегося асинхронного хода

П5. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ИСТОРИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Впервые необходимость изучения электромеханических переходных процессов в электрических системах возникла в начале 20-х годов в США, где и были проведены первые исследования по переходным процессам, результаты которых публиковались В. Бушем и Р. Бутцем, Б. Робертсоном, Р. Догерти, Э. Кларком, К. Найклом, Р. Рюденбергом, Ф. Лонглеем и особенно Р. Парком, предложившим (1928) дифференциальные уравнения синхронной электрической машины, которые получили далее широкую известность.

Несколько позже интерес к этой проблеме появился в ряде европейских стран. В нашей стране работы в этой области начали в 1926—1930 гг. Л. И. Сиротинский, В. П. Хацинский, Н. Н. Щедрин и А. А. Смуров, выпустивший монографию, содержащую раздел устойчивости. Одновременно с зарубежными публикациями в отечественных журналах («Электричество» и др.) рассматривались теория и основные методы анализа динамической устойчивости (метод площадей, метод шаг за шагом и т. д.).

В 1932 г. была опубликована работа Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова, проанализировавшая устойчивость нерегулируемых синхронных машин. В 1933—1934 гг. появились книги П. С. Жданова и С. А. Лебедева, где наряду с оригинальными исследованиями авторов концентрировался мировой опыт анализа переходных режимов электрических систем. В 1930—1935 гг. А. А. Горев в ряде статей и монографий опубликовал полученные им уравнения, аналогичные уравнениям Парка (позже их стали называть Парка—Горева), вывел критерии устойчивости, ориентируясь на метод малых колебаний, и построил исследование в духе всемирно известной работы А. А. Ляпунова, рассмотревшего еще в 1892 г. общую задачу об устойчивости движения. Одновременно в столь же строгой концепции вел работы П. С. Жданов. Он исследовал статическую устойчивость простой и сложной систем, рассматривая ее сначала как неспособную к самораскачиванию, позиционную, и затем уточнил

получаемые результаты, учитывая влияние электромагнитных переходных процессов, демпфирования и изменений частоты и получая при этом удобную для расчетов методологию.

К концу 30-х годов в СССР и за рубежом появились многочисленные полезные, но строго не обоснованные предложения оценивать статическую устойчивость по различным «практическим критериям», представленным производными от какого-либо одного параметра режима по другому ($dP/d\delta$, например $dP/d\delta$, dE/dU и т. д.). И. М. Маркович, предложивший в 1937—1938 гг. вместе с И. С. Бруком еще один важный критерий $d\Delta Q/dU$, далее совместно с С. А. Саваловым дал исчерпывающее обоснование его и других практических критериев, выявляя условия соответствия получаемых по ним результатов и результатов более строгого определения устойчивости методом малых колебаний и проверки ее по знаку свободного члена характеристического уравнения (П. С. Жданов). Этими работами в методику анализа устойчивости нерегулируемых систем, как простых, так и сложных с большим числом станций, была внесена достаточная ясность. В это же время выявилась природа лавины напряжения (К. А. Смирнов, П. С. Жданов), уточнились методы анализа устойчивости нагрузки (П. С. Жданов) и построения ее статических и динамических характеристик, определились типовые характеристики нагрузок (Д. И. Азарьев) и т. д.

Начиная с 1938—1940 гг. внимание инженеров привлекли возможности автоматического (пропорционального) регулирования возбуждения, далее эффективно внедрившегося в электрические системы. Так, в 1940—1941 гг. в системе «Азэнерго» И. А. Сыромятниковым была улучшена устойчивость применением средств автоматики, в первую очередь регуляторов возбуждения, оказавшихся особенно действенными средствами борьбы с лавиной напряжения. В ряде систем (Московской, Ленинградской, Уральской и др.) также широко использовались средства режимной автоматики. К этому времени регулирование возбуждения достаточно широко применялось и в зарубежных энергосистемах для поддержания напряжения, однако ему еще не уделялось большого внимания как средству улучшения устойчивости. Относящиеся в 1937—1938 гг. работы С. А. Лебедева показали теоретическую и практическую возможность режима искусственной (обусловленной действием регулятора) устойчивости и были большим шагом именно в этом направлении, интерес к которому за рубежом (В. Фрей, К. Лаванши, Ч. Конкордия, Г. Крон) появился значительно позже.

Как продолжение этих исследований можно рассматривать работу Л. В. Цукерника, разработавшего систему компаундирования генераторов, и ряда специалистов (Г. Р. Герценберг, М. М. Ботвинник, М. В. Мееров, И. А. Глебов и др.), предложивших (1950—1955) так называемое «сильное регулирование» возбуждения. В улучшении устойчивости электрических систем, содержащих дальние передачи (Куйбышев — Москва и др.), сильное регулирование сыграло большую роль наряду с другими мероприятиями (проектными и режимными), такими, как автоматическая разгрузка, реализация результирующей устойчивости, автоматическое повторное включение и т. д. (И. А. Сыромятников, Л. Г. Мамиконянц, И. М. Маркович, С. А. Савалов, С. С. Рокотян, Д. И. Азарьев, С. В. Усов, Е. Д. Зейлидзон и др.).

Применение пропорционального и в особенности сильного регулирования потребовало разработки методов расчета, учитывающих возможность самораскачивания, обусловленного как неправильной настройкой регуляторов, так и спецификой поведения «сильно регулируемой» системы у предела устойчивости. В связи с этим был опубликован ряд работ, основанных на методе малых колебаний, способствовавших отработке и внедрению сильного регулирования (И. В. Литкенс, Г. В. Михневич, И. Д. Урусов, О. В. Щербачев, М. Л. Левинштейн и др.). Эти работы содержали разработку тех или иных удобных для данных конкретных задач приемов изучения характеристических уравнений достаточно высоких порядков, основанных на методах Гурвица, Рауса, Михайлова, *D*-разбиения и т. д. Вопросы настройки регуляторов возбуждения рассматривались И. В. Литкенс, В. А. Строевым, И. А. Груздевым, В. Г. Любарским. Для определения порядка характеристического уравнения, являющегося функцией состава системы и структуры, и ее регулирующих устройств Л. В. Цукерником была получена формула на основании предложенных им (1956) уравнений для анализа устойчивости сложных регулируемых систем. Все упомянутые методы оказались весьма эффективными, практичными как для сравнительно простых систем (две-три станции), так и для более сложных (при использовании ЦВМ). Начатые еще в 30-е годы работы по быстрому регулированию паровых турбин для улучшения устойчивости получили свое развитие в работах Я. Н. Лугинского, Б. П. Мурганова и других и привели к важным практическим результатам.

Теория устойчивости и переходных процессов в системах, содержащих дальние передачи, рассмотрены рядом специалистов, в том числе А. А. Горевым, П. С. Ждановым, А. А. Вульфом, Н. Н. Щедриным, Р. Н. Рюденбергом, Э. В. Кимбарком. Э. Л. Кларком.

Позже внимание этим вопросам уделялось в работах В. К. Щербакова и его сотрудников, в работах ЭНИИНа, МЭИ, ЛПИ и других организаций.

Однако создание инженерной методики анализа устойчивости сколь угодно сложных автоматически регулируемых систем все еще составляет не решенную полностью проблему. Попытки решения ее на основе методов фазового пространства, тензора Римана — Кристоффеля (Г. Крон), прямого метода Ляпунова и других возможных новых подходов начали давать результаты. Хотя эти методы не общеприняты, но при решении некоторых задач удовлетворяют инженера (М. Я. Вайман, С. В. Страхов, Д. А. Арзамасцев, И. Н. Рудницкий и др.). Методы анализа динамической устойчивости, не изменившись принципиально, подверглись за последнее время совершенствованию, с одной стороны, продиктованному необходимостью учета действия регулирующих устройств, убыстрения отключений коротких замыканий, учета большого числа факторов, ранее рассматривавшихся как второстепенные, но все же влияющих на протекание процессов, а с другой стороны, обеспеченному возможностями современной вычислительной техники. Так, для расчетов динамики переходных процессов в ряде случаев стали применять так называемые уравнения для мгновенных значений, предложенные Р. Парком, А. Горевым, рассматривавшиеся Г. Кроном и др. Использование их при решении практических задач проводилось С. В. Страховым, Е. Я. Казовским, Л. П. Веретенниковым, С. Крери, Ч. Конкордия, Б. Адкинсом, Г. Стеггом, А. Элабидом и др. Появился ряд работ, развивающих теорию катастроф применительно к задачам энергетики.

Теория переходных режимов электрических систем в последнее десятилетие была вынуждена рассмотреть и ряд специальных задач. К ним относятся методика проведения эквивалентирования участков сложных систем* (работы Ф. Г. Гусейнова, Л. А. Жукова, Н. И. Воропай). Было проведено много исследований асинхронного хода синхронных машин в системах и их ресинхронизации. В СССР в этой области были проведены многочисленные исследования П. С. Ждановым, И. А. Сыромятниковым, Л. Г. Мамиконянцем, А. А. Хачатуровым и др. Исследованию этих режимов за рубежом уделялось несколько меньше внимания. При рассмотрении проблем устойчивости в историческом аспекте следует подчеркнуть, что вследствие ряда особенностей развития энергетики внимание к тем или иным проблемам теории и тем или иным путям улучшения устойчивости в СССР и за рубежом было различно. В отечественных энергосистемах улучшение устойчивости и качества переходных процессов достигалось не только повышением напряжения электропередач и конструктивными изменениями их параметров и параметров генераторов, но и режимными мероприятиями, к которым относились автоматическая разгрузка электрических систем, синхронное и несинхронное автоматическое повторное включение, автоматическое регулирование возбуждения и специальная его форсировка, применение асинхронного хода, обеспечение условий результирующей устойчивости, деление системы на несинхронно работающие части и т. д. Большое внимание уделялось вопросам надежности и живучести (Д. А. Арзамасцев, С. А. Совалов, Ю. Н. Руденко, М. Г. Портной и др.).

В зарубежных системах (США и др.) большее внимание обращалось на усиление связей, резервирование и проведение других, требующих вложения значительных средств, мероприятий при меньшем, чем в СССР, внимании к режимным мероприятиям. Недостаточное их применение было одной из наиболее существенных причин появления в системах США ряда тяжелых аварий.

Вопросы переходных процессов и устойчивости электрических систем получили начиная с конца 20-х годов отражение в СССР и за рубежом не только в статьях, но и во многих книгах, ряд которых содержит оригинальные результаты.

Несмотря на обширные исследования, позволяющие решать все текущие инженерные задачи, создание единой стройной теории режимов сложных электрических систем автоматически регулируемых и кибернетических систем является делом будущего.

Сообщая кратко, только основные и, разумеется, неполные исторические сведения, следует одновременно рекомендовать учащимся расширить их, ознакомившись с книгами: «История энергетической техники СССР» (ГЭИ, 1957, т. II, гл. IV—VII); «Сильное регулирование возбуждения» (ГЭИ, 1963, с. 15—16).

* Обзор можно найти в кн.: Гусейнов Ф. Г. Эквивалентирование сложных систем. — М.: Энергия, 1977.

u_B	— напряжение обмотки возбуждения синхронной машины	$P_{сн}$	— синхронная активная мощность
$e, u_{B.В}$	— напряжение обмотки возбуждения возбудителя	$P_{ас}$	— асинхронная активная мощность
U	— напряжение, действующее значение, линейное напряжение	Q	— реактивная мощность
\dot{U}	— комплекс напряжения	Q_s	— реактивная мощность рассеяния
U_d	— продольная составляющая напряжения	Q_r	— реактивная мощность намагничивания
U_q	— поперечная составляющая напряжения	$Q_{сн}$	— синхронная реактивная мощность
E	— э. д. с., действующее значение	$Q_{ас}$	— асинхронная реактивная мощность
\dot{E}	— комплекс э. д. с.	S	— полная мощность, комплекс полной мощности, синхронизирующая мощность
E_q	— синхронная э. д. с. (пропорциональна току обмотки возбуждения синхронной машины)	a_P	— регулирующий эффект нагрузки по реактивной мощности
$E_{q[0]}$	— э. д. с. в момент изменения режима	a_Q	— регулирующий эффект нагрузки по реактивной мощности
E_{q0}	— начальное значение э. д. с.	\mathcal{E}, A, W	— энергия
E_q	— фиктивная синхронная э. д. с. явнополюсной машины	P_d	— коэффициент демпфирования
E_{qe}	— вынужденная э. д. с. (пропорциональна напряжению обмотки возбуждения синхронной машины)	$P_{d\sigma}$	— эквивалентный коэффициент демпфирования
E'_q	— переходная э. д. с. (пропорциональна продольному потоку обмотки возбуждения синхронной машины)	M	— вращающий момент
E'	— переходная э. д. с., пропорциональная полному потоку ротора	M_T	— вращающий момент турбины
E_x	— расчетная э. д. с. синхронной машины, приложенная за сопротивлением Δx	$M_{сн}$	— синхронный момент
I	— ток, действующее значение	$M_{ас}$	— асинхронный момент
\dot{I}	— комплекс тока	J_0	— момент инерции
I_d	— продольная составляющая тока синхронной машины	Z_{mn}	— взаимные сопротивления ($m \neq n$)
I_q	— поперечная составляющая тока синхронной машины	Z_{nn}	— собственные сопротивления
I_a	— активная составляющая тока	R, r	— активное сопротивление
I_p	— реактивная составляющая тока	r_0	— активное сопротивление на единицу длины
Φ	— потокосцепление	R_B	— активное сопротивление обмотки возбуждения синхронной машины
$\Phi_{дрез}$	— результирующее потокосцепление, обмотки возбуждения синхронной машины по продольной оси	$R_{B.В}, R_e$	— активное сопротивление обмотки возбуждения возбудителя
P	— активная мощность	X, x	— реактивное сопротивление
P_m	— амплитуда угловой характеристики мощности	x_0	— реактивное сопротивление на единицу длины
P_T	— мощность турбины	x_d	— синхронное реактивное сопротивление синхронной машины по продольной оси
P_0	— мощность первичного двигателя (постоянная)	x_q	— синхронное реактивное сопротивление синхронной машины по поперечной оси
		x'_d	— переходное реактивное сопротивление синхронной машины по продольной оси
		x'_q	— переходное реактивное сопротивление

твление синхронной машины по поперечной оси
 x_d — сверхпереходное реактивное сопротивление синхронной машины по продольной оси
 x_d' — сверхпереходное реактивное сопротивление синхронной машины по поперечной оси
 x_s — реактивное сопротивление рассеяния
 x_p — реактивное сопротивление намагничивания
 x_c — реактивное сопротивление системы
 Δx — расчетное сопротивление синхронной машины
 $x_{d\Sigma}, x_{d\Sigma}', x_{q\Sigma}$ — суммарные сопротивления системы
 Y_{mn} — взаимная проводимость ($m \neq n$)
 Y_{nn} — собственная проводимость
 g — активная проводимость
 g_0 — активная проводимость на единицу длины
 b — реактивная проводимость
 b_0 — реактивная проводимость на единицу длины
 L_B — индуктивность обмотки возбуждения синхронной машины
 $L_{e\sigma}, L_{в.в}$ — индуктивность обмотки возбуждения возбудителя
 δ — угол сдвига фаз э. д. с. и напряжений
 φ — угол сдвига фаз между напряжением и током
 ψ — угол сдвига фаз между э. д. с. и током, фазный угол (аргумент) комплексного сопротивления
 α — дополнительный угол комплексного сопротивления
 γ — коэффициент распространения (комплексный)
 α_0 — коэффициент
 t — время
 Δt — интервал времени
 f — частота
 ω — круговая (циклическая) частота

ω_0 — синхронная угловая частота
 Ω — угловая скорость (геометрическая)
 s — скольжение
 γ — частота качаний
 α — угловое ускорение
 p — оператор дифференцирования по времени
 $W(p)$ — передаточная функция
 $T, (\tau)$ — постоянная времени
 T_{do} — постоянная времени обмотки возбуждения синхронной машины при разомкнутой обмотке статора
 $T_d'(\tau_d')$ — переходная постоянная времени синхронной машины по продольной оси
 $T_q'(\tau_q')$ — переходная постоянная времени синхронной машины по поперечной оси
 $T_d''(\tau_d'')$ — сверхпереходная постоянная времени синхронной машины по продольной оси
 $T_q''(\tau_q'')$ — сверхпереходная постоянная времени синхронной машины по поперечной оси
 $T_e(\tau_e)$ — постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя
 T_p — постоянная времени регулятора
 $T_J(\tau_J)$ — постоянная инерции
 $A_{\text{торм}}$ — площадка торможения
 $A_{\text{уск}}$ — площадка ускорения
 Π — параметр (обобщенный)
 K, k — коэффициент, коэффициент усиления

Индексы

Σ — знак, обозначающий суммарное сопротивление
 c — система
 $св$ — синхронное
 $ас$ — асинхронное
 0 — исходное значение
 $[0]$ — значение в момент изменения режима

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной книге представлены основные сведения по современной теории переходных электромеханических процессов в электрических системах.

Следует обратить внимание читателей, что изложение материала сделано в книге с упором на физико-техническую сторону происходящих явлений, с рассмотрением техники расчетов главным образом в разрезе связи этих явлений с теми предствлениями, которые необходимы инженеру при сознательном использовании цифровой вычислительной машины (ЦВМ) в практике проектирования и эксплуатации электрических систем.

Именно этот новый подход, направленный на проникновение во взаимосвязь расчетного алгоритма (выбор метода числовых решений, расчетного шага и т. д.) и физики явлений, пронизывает всю книгу. Освоение этого подхода должно являться первым узловым вопросом, на который надо обратить внимание при изучении материала книги. Далее таких узловых вопросов, отражающих новые тенденции, будет еще пять. Так, изучающему книгу неизбежно придется считаться с тем, что в современной и тем более будущей инженерной практике применяемые вычислительные методы, алгоритмы и программы будут несравненно более сложными, чем это могло быть описано в данной книге, предназначенной в качестве учебника. Поэтому, получив представления об основах физики явлений и их алгоритмировании, студент должен быть готов к тому, чтобы далее самостоятельно осваивать многочисленные алгоритмы и программы, в большом количестве уже имеющиеся в различных организациях, в которых далее придется работать. Они должны, однако, при этом помнить, что с какими бы специфическими программами они ни имели дело, как бы ни усложнялись и ни совершенствовались алгоритмы, какими бы быстродействующими и эффективными ни становились ЦВМ, основные соображения о том, как техническую задачу перевести на язык математики (формула, алгоритм, программа), как оценить сделанные при этом допущения и как трактовать полученный результат, может и должен дать только инженер. При этом останутся существенными изложенные в книге элементарные алгоритмы, связанные с физикой явления, инженерной оценкой этого явления. Они всегда останутся в силе и забывать о них не следует.

Ко второму узловому вопросу можно отнести то обстоятельство, что материалы настоящей книги тесно увязаны с такими специальными дисциплинами*, как «Основы программирования», «Численные методы», «Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах», «Вычислительная техника в энергетике», «Энергетические расчеты и их программирование». Поэтому полное освоение расчетной техники и задач, возникающих при проектировании и эксплуатации электрических систем, требует освоения и всего комплекса упомянутых дисциплин при достаточно хорошем знании общей математики.

Третьим узловым вопросом являются требования, предъявляемые к студенту в отношении не только овладения всей суммой научных и практических знаний по специальности, но и умения творчески мыслить, самостоятельно ставить и решать новые задачи как научного, так и производственного характера. Этот третий узловой вопрос может и должен рассматриваться в разрезе работ, проводимых студентами в порядке выполнения УИР, НИРС, написания рефератов, примерные темы которых приведены в каждой главе настоящей книги.

* В различных учебных планах эти дисциплины варьируются по своим названиям, но существо их не изменяется.

Не менее важен, чем предыдущие три, четвертый узловой вопрос — это системный подход ко всем тем задачам, которые непосредственно поставлены в изучаемом материале или вытекают из него. Так, например, нельзя рассматривать работу двигателей, соизмеримых по мощности с питающей системой, не учитывая процессов в генераторах этой системы. Такие сложные явления, как лавина напряжения, колебательные процессы, самовозбуждение и др., выделяются только в системном аспекте.

Пятый узловой вопрос — это выявление общего реального хода процессов, наиболее важных для установления условий проектирования и эксплуатации электрических систем. При этом важен подход не в духе абсолютной точности вычислений хода некоего абстрактного процесса, для которого абсолютно точно заданы его параметры и параметры системы. Здесь необходима практическая точность, учитывающая размытость параметров и обеспечивающая такое управление процессом, при котором должен быть получен нужный практический результат. Эта задача подчеркивается на протяжении всей книги, но она, разумеется, не может быть просто решена и требует от инженера творческого подхода.

Шестой узловой вопрос — это вопрос о сложности и многомерности электрической системы, изучению процессов в которой посвящена настоящая книга. В соответствии с методами кибернетики можно утверждать, что система любой сложности как в установленном, так и в переходном режиме может быть сделана управляемой, если для этого управления будет применено соответствующее регулирование в книге, посвященной только основам науки о переходных процессах, было бы неуместно остановиться на теории такого управления, его практике и имеющихся возможностях, но иметь их в виду для будущего изучения следует.

Конечно, в книге в силу ее специфики, направленной на изучение основ и только основ теории переходных процессов, не удалось остановиться на ряде других методов, применение которых только еще начинается. Так, будет все шире находить в практике расчетов переходных режимов метод кибернетического моделирования*, будет развиваться теория электроэнергетических расчетов на основе прямого (второго) метода Ляпунова**, ведутся поиски по применению метода теории катастроф к энергетическим задачам***. Все это потребует от изучающего эту книгу далее на базе имеющихся в ней положений проводить самостоятельное творческое изучение новых подходов и возможно новых более совершенных теорий и их практических приложений.

В современной практике создания электрических систем и систем управления ими уже появляются новые элементы, которые могли быть только упомянуты в книге. Это статические компенсаторы реактивной мощности (ИРМ, СТК), влияние которых на переходные процессы вообще, и в частности на устойчивость, очень велико. Существенно, что в системах появляются вставки постоянного тока (ВИП), изменяющие характер ряда переходных процессов и подлежащие в будущем более обстоятельному рассмотрению.

Заметное влияние на происходящие в системе процессы окажут накопители различных видов, применение которых начинает вырисовываться уже не только теоретически, но и практически. Наконец, регулирование передач постоянного тока (ППТ), как это показано в книге, может оказать существенное влияние на работу всей объединенной системы. Ряд важных особенностей методического и практического плана следует ожидать в связи с применением в АСУ микропроцессорной техники. Таким образом, настоящая книга является тем фундаментом, на котором далее будут изучаться развивающаяся теория переходных электромеханических процессов и ее многочисленные приложения в практике инженеров-электроэнергетиков, причем эти приложения уже могут получать свою реализацию и развитие на той теоретической базе, которую дает настоящая книга.

* *Веников В. А., Суханов О. А.* Кибернетические модели электрических систем. — М.: Энергоиздат, 1982, с. 328.

** *Вайман М. Я.* Устойчивость нелинейных механических и электромеханических систем. — М.: Машиностроение, 1981, с. 126.

*** *Веников В. А.* Электроэнергетика как большая система кибернетического типа. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1985, № 4, с. 12—16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. *Жданов П. С.* О статической устойчивости сложных электрических систем. — В сб.: Устойчивость электрических систем и динамические перенапряжения. Труды ВЭИ, вып. 40. — М.: ГЭИ, 1940, с. 100—194.
2. *Ульянов С. А.* Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970, 518 с.
3. Электрические системы: Математические задачи электроэнергетики/Под ред. *В. А. Веникова.* — М.: Высшая школа, 1981, 287 с.
4. *Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины. — М.: Энергия, 1980, 926 с.
5. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях/Под ред. *В. А. Веникова.* — М.: Энергоатомиздат, 1983, 456 с.
6. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем/Под ред. *В. А. Веникова.* — М.: Высшая школа, 1982, 244 с.

Дополнительная

7. *Маркович И. И.* Режимы энергетических систем. — М.: Энергия, 1969, 350 с.
8. Электрические системы: Электрические сети/Под ред. *В. А. Веникова.* — М.: Высшая школа, 1971; Электрические системы: Автоматизированные системы управления режимами энергосистем/Под ред. *В. А. Веникова.* — М.: Высшая школа, 1979, 447 с.
9. Автоматизация управления энергообъединениями/Под ред. *С. А. Савалова.* — М.: Энергия, 1979, 430 с.
10. *Лукашев Э. С.* Введение в теорию электрических систем. — Новосибирск: Наука, 1981, 172 с.
11. *Веретенников Л. П.* Теория и методы исследования процессов в судовых электроэнергетических системах. — Л.: Судостроение, 1975, 375 с.
12. *Мелешкин Г. А.* Переходные режимы судовых электроэнергетических систем. — Л.: Судостроение, 1971, 342 с.
13. *Гусейнов Ф. Г.* Упрощение расчетных схем электрических систем. — М.: Энергия, 1978, 182 с.
14. *Тимченко В. Ф.* Колебания нагрузок и обменной мощности энергосистем. — М.: Энергия, 1975, 208 с.
15. *Хачатуров А. А.* Несинхронные включения и ресинхронизация в энергосистемах. — М.: Энергия, 1969, 215 с.
16. *Портной М. Г., Рабинович Р. С.* Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. — М.: Энергия, 1978, 352 с.
17. Методика расчетов устойчивости автоматизированных электрических систем/Под ред. *В. А. Веникова.* — М.: Высшая школа, 1966, 247 с.
18. *Иванов В. А.* Регулирование энергоблоков. — Л.: Машиностроение, 1982, 308 с.
19. Применение ЭВМ для автоматизации технологических процессов в энергетике/Под ред. *В. А. Семенова.* — М.: Энергоатомиздат, 1983, 314 с.
20. Автоматика электроэнергетических систем/ Под ред. *В. Л. Козиса, Н. Н. Овчаренко.* — М.: Энергоиздат, 1981, 478 с.
21. *Рабинович Р. С.* Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. — М.: Энергия, 1980, 343 с.
22. *Стернинсон Л. Д.* Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. — М.: Энергия, 1975, 215 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авария, место, характер 162, 164, 497
— несимметричная 168, 169
— системная 497
—, причина 499
Алгоритм расчета процесса 180
Аналог, устойчивости стилизованный 57, 58
Анализ, задачи 112
Аппроксимация синусоиды 86
- Включение автоматическое, повторное 359, 407, 433
— генераторов синхронных 425
Возбуждение, регулирование 146, 187
Воздействие 14
Возмущение 14, 16
— малое, большое 17
- Генератор синхронный, явнополюсный 32, 33
- Двигатель, опрокидывание 334, 348, 349
Движения — возмущенное, невозмущенное 234
Демпфирование 184, 320, 516
Диаграмма векторная 135
Диссипативность 77
Добавка 244
Допущения, уровни 102
D-разбиение 239, 273
- Единицы относительные 511
- Жесткость обратной связи 141, 147
— схемы 425, 490
Живучесть 41
- Запас 56
— устойчивости 505
— — динамической 77, 506
— — статической 69, 505
- Идеализация, позиционная 107, 268
Интегрирование численное 85
Интервалы последовательные 173
История переходных процессов 522
Источник реактивной мощности (ИРМ, СТК) 397
- Качество 41
Колебания 327
- Колебания большие, вынужденные 194
— нелинейные многочастотные 193, 195, 198
—, частота собственная 254
Компенсаторы СК (ИРМ, СТК) промежуточные 488
Конденсаторы, включение в нагрузку 342
Консервативность 75
Координаты системы 116
Корни характеристического уравнения 236
Коэффициент запаса 56
— — по статической устойчивости 39
— — — динамической устойчивости 77, 82
— режима 241, 243
— усиления (максимальный) 247, 251
Критерий Гурвица 238, 265
— динамической устойчивости практический 76
— Жданова 340
— статической устойчивости практический 60, 65, 266
- Матрица узловых проводимостей 24, 29
Машина синхронная, явнополюсная 32
Место короткого замыкания 163
Метод Гурвица 245
— D-разбиения 239, 273
— Ляпунова 11, 111, 131, 234
— малых колебаний 264
— пересечения характеристик 36
Момент при асинхронном режиме 461, 463
Модель 98, 100
Мощность, определение потоков 31
— предельная при АРВ 249
—, потоки простейшей схемы 34
— синхронизирующая 253
- Лавина напряжения 327, 334, 344
Линеаризация 106
- Наблюдаемость 54, 100
Нагрузка 10, 22
— максимальная, предельная 36
— толчкообразная 360, 391
—, характеристики динамические 329
— — статические 329
Надежность 41
Напряжение, лавина 327, 334, 344
—, поддержание 49

Нелинейность 13
Нехватка (небаланс) мощности 51

Область, допустимая, введение 42
Огибающая 106
Описание, уравнения полные, упрощенные 16, 22
Определитель Гурвица 245
Оси 116
Осуществляемость 47, 51
Отключение 327

Параметр асинхронных режимов 451
— малый 109
— размытый 21
— распределенные 108
— режима 12
— системы 12
Предмет изучения дисциплины 20
Передача постоянного тока 480
Перетоки вынужденные 504
— утяжеленные 504
Питание, включение резерва 408
—, переключение 400, 407
Проводимость — собственная, взаимная 23, 27
Правило (способ) площадей 76
Процесс в вариациях 200
— опрокидывания 348
— переходный, опорный 199
— сложной системы 53
— электромеханический 14
Пуск двигателей асинхронных 371, 378
— — синхронных 374, 375
— — от соизмеримых источников 380
— одновременный 359, 383
Плоскость фазовая 72, 77, 83, 84
Принцип энергетический 67

Разгрузка автоматическая 494
Расчет на ЦВМ, численное интегрирование 506, 509
Регулятор возбуждения — настройка 319, 324
— высокой точности 276
— комплексный 275
— пропорционального действия (АРВ п. д.) 143, 146, 240
— сильного действия (АРВ с. д.) 271
Режим 9, 12, 13
— асинхронный 444
— — изменяющийся 466
— — малых качаний 468
— — установившийся 463
— больших качаний 469
— резких изменений в системах электро-снабжения 384
—, утяжеление 245, 503
— электромеханический 11, 14
Резерв 492
Резонанс 197

Ресинхронизация 470, 472, 476
—, критерий 473
— слабой связи 478

Самовозбуждение 258, 812
Самозапуск 338, 359, 402
Самораскачивание 256
Самосинхронизация 427
Связь обратная 147
— слабая 315
— —, устойчивость 317, 318
Седло 84
Сила внешняя гармоническая 189
Синтез 112
Система 12
— двух станций 395
— диссипативная 78
— консервативная 76
—, разделения на подсистемы 492
— сложная, динамическая устойчивость 218
— электрическая 9
— электроэнергетическая, структура 9, 22
Скорость регулирования 147, 486
Сопротивление в нейтрали 484
Состояние пространства 105
Сползание 60
Способ единичных токов 29
— наложения (суперпозиция) 27
— (правило) площадей 76
— — для станций 81
— преобразования 28
Строгость 104
Схема замещения 24, 32, 260
— — регулируемого генератора 260, 264
— — структурная 141

Текущая 60
Теория вероятности в задачах переходных процессов 205
— Ляпунова, теоремы 234
Топология 54
Торможение электрическое 486
Точность 103
Турбины, регулирование аварийное 186, 487

Угол максимальный 38
— отключения предельный 79, 84
Узлы нагрузки, устойчивость 410
Управление током возбуждения 187
Управляемость 54
Упрощение 263
Уравнение движения, формы записи 516
— Парка — Горева 123
— упрощенное 131, 134
— характеристическое 234, 237, 265
Условия нарушения статической устойчивости 245, 246
Усиление 247
Устойчивость динамическая 17, 56, 163
— нагрузки 410

Устойчивость результирующая 56, 448, 473, 494

— статическая 16, 56, 231, 239

— — нерегулируемой демпфируемой системы 253

Утяжеление 245, 503

Феномен 102

Флуктуация 10

Характеристика амплитудно-частотная 191

— динамическая 108, 362

— квазидинамическая 362

— механическая 366

— преобразовательной нагрузки 368

— статическая 107

Центр фазовой плоскости 84

— электрический, качаний 345, 456

Частота, ГОСТ 41, 294

—, влияние на устойчивость 266

—, динамические характеристики 303

—, качество 297

—, лавина 308

—, поддержание 48, 294

—; регулирование 298, 301

Шины независимого напряжения, бесконечной мощности 50, 61

Шунт аварийный 168

Электродвижущая сила 32

— — вращения 132

— — трансформации 132

— — E' , E'_a , E_g 171, 135

Элемент силовой, управляющий 9

— системы, схема замещения 138

Эмергентность 11

Энергетика 9

Эффект регулирующий 304, 370

Явление 14, 99

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список принятых сокращений	8
Глава 1. Характеристика курса	9
§ 1.1. Основные понятия об электрической системе и ее режимах	9
§ 1.2. Систематизация основных понятий и определений	12
§ 1.3. Подход к описанию переходных процессов	14
§ 1.4. Место дисциплины в обучении. Предмет изучения	19
Глава 2. Основы расчетов установившихся исходных и квазипереходных режимов	21
§ 2.1. Постановка задачи	21
§ 2.2. Построение схем замещения. Применение собственных и взаимных проводимостей	22
§ 2.3. Расчет собственных и взаимных проводимостей и сопротивлений	27
§ 2.4. Определение токов	29
§ 2.5. Определение мощности	31
§ 2.6. Система, имеющая нелинейные элементы	36
§ 2.7. Определение максимальных и предельных нагрузок	36
Глава 3. Требования к режимам и процессам	41
§ 3.1. Требования, предъявляемые к режимам	41
§ 3.2. Качество переходных процессов	42
§ 3.3. Осуществляемость режима	47
§ 3.4. Условия существования режима системы	51
§ 3.5. Управляемость и наблюдаемость электрических систем	54
Глава 4. Устойчивость как главное условие существования режима электрической системы	56
§ 4.1. Устойчивость в электрических системах и простейшие методы ее исследования	56
§ 4.2. Статическая устойчивость системы по условиям сползания (текучести) параметров нормального режима. Практические критерии устойчивости	58
§ 4.3. Энергетическая трактовка практических критериев устойчивости	66
§ 4.4. Применение практических критериев статической устойчивости	69
§ 4.5. Совмещение расчетов нормального режима и оценки его статической устойчивости	69
§ 4.6. Простейшая оценка устойчивости перехода от одного режима к другому (динамическая устойчивость и ее практические критерии)	70
Глава 5. Основные положения, принимаемые при исследованиях переходных режимов электрических систем	97
§ 5.1. Задачи и средства исследования	97
§ 5.2. Математика в технических задачах	98
§ 5.3. Модели переходных процессов в сложной электрической системе и организации исследований	99
§ 5.4. Точность и строгость в инженерных исследованиях	102
§ 5.5. Пространство и уравнения состояния (режима): Допущения и упрощения	105

Глава 6. Модели, уравнения и схемы замещения для исследования переходных режимов электрических систем	115
§ 6.1. Постановка задачи	115
§ 6.2. Математические описания и модели	115
§ 6.3. Обобщенные уравнения	118
§ 6.4. Физическая интерпретация уравнений в координатах d, q . Модель Парка—Горева	125
§ 6.5. Упрощенные уравнения	131
§ 6.6. Схемы замещения элементов системы	138
§ 6.7. Структурные схемы электрических систем	140
§ 6.8. Структурные схемы и уравнения систем регулирования	142
Глава 7. Большие колебания. Динамическая устойчивость	162
§ 7.1. Постановка задачи	162
§ 7.2. Числовое решение уравнения относительного движения методом последовательных интервалов	173
§ 7.3. Оценка некоторых наиболее характерных динамических переходов (изменений режима)	183
§ 7.4. Приближенное решение дифференциальных уравнений относительного движения ротора генератора при отклонениях входящих в него параметров	199
§ 7.5. Применение методов теории вероятностей при расчетах переходных процессов в электрических системах	205
§ 7.6. Особенности расчета переходного процесса (динамической устойчивости) сложной системы, содержащей произвольное число станций соизмеримой мощности и нагрузок	218
Глава 8. Статическая устойчивость электрической системы. Процессы при малых свободных возмущениях	231
§ 8.1. Постановка задачи	231
§ 8.2. Статическая устойчивость простейшей системы при регулировании возбуждения ее генераторов регулятором пропорционального действия	240
§ 8.3. Нерегулируемая система, рассмотренная без учета электромагнитных переходных процессов	253
§ 8.4. Самораскачивание и самовозбуждение	255
§ 8.5. Упрощенные соотношения для определения статической устойчивости, вытекающие из метода малых колебаний	260
§ 8.6. Основы устойчивости сложных систем. Критерии метода малых колебаний и практические критерии	264
§ 8.7. Устойчивость позиционной системы при представлении нагрузок постоянными сопротивлениями	267
§ 8.8. Статическая устойчивость системы с автоматическим регулятором возбуждения сильного действия	270
§ 8.9. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности	276
Глава 9. Изменения частоты мощности в энергосистемах	294
§ 9.1. Общая характеристика задачи	294
§ 9.2. Виды регулирования и их взаимодействие	298
§ 9.3. Статические характеристики системы (медленные изменения частоты в установившемся режиме)	300
§ 9.4. Динамические характеристики системы при изменении частоты	303
§ 9.5. Неустойчивость частоты (лавина частоты)	308
§ 9.6. Меры предотвращения неустойчивости частоты. Автоматическая разгрузка по частоте	309
Глава 10. Переходные процессы и устойчивость электрических систем, объединенных электропередачами, являющимися слабыми связями	313
§ 10.1. Постановка задачи	313
§ 10.2. Простейшая объединенная система, состоящая из двух отдельных систем, связанных слабой соединительной линией	314

§ 10.3. Динамическая устойчивость слабых связей	317
§ 10.4. Статическая устойчивость слабых связей	318
§ 10.5. Настройка регуляторов возбуждения	319
Глава 11. Переходные процессы в системах электроснабжения (узлах нагрузки) электрических систем при малых изменениях режима	327
§ 11.1. Общая характеристика проблемы	327
§ 11.2. Статические и динамические характеристики двигательной нагрузки	328
§ 11.3. Лавина напряжения (статическая устойчивость нагрузки, опрокидывание двигателей)	334
§ 11.4. Основные расчетные соотношения	335
§ 11.5. Практический критерий устойчивости комплексной нагрузки dE/dU	340
§ 11.6. Медленные понижения напряжения	346
§ 11.7. Процесс опрокидывания двигателей	348
§ 11.8. Работа асинхронных двигателей нагрузки при несимметрии и несинусоидальности приложенного напряжения	350
Глава 12. Переходные процессы в узлах нагрузки электрических систем при больших возмущениях	359
§ 12.1. Влияние больших отклонений параметров режима на поведение нагрузки	359
§ 12.2. Пуск двигателей	371
§ 12.3. Переходные процессы при пуске асинхронных двигателей, имеющих мощность, соизмеримую с мощностью источника	380
§ 12.4. Резкие изменения режима в системах электроснабжения	384
§ 12.5. Толчкообразные нагрузки	391
§ 12.6. Самозапуск двигателей	398
§ 12.7. Автоматическое повторное включение и переключение питания	407
§ 12.8. Влияние регулирования возбуждения синхронных двигателей на режим и устойчивость узлов нагрузок	410
§ 12.9. Самовозбуждение асинхронных двигателей во время пуска при применении последовательной емкостной компенсации в сети	412
Глава 13. Переходные процессы при включении синхронных генераторов	425
§ 13.1. Общие положения	425
§ 13.2. Процессы при самосинхронизации	427
§ 13.3. Электромеханический пуск синхронных генераторов	432
§ 13.4. Автоматическое повторное включение с самосинхронизацией	433
§ 13.5. Автоматическое повторное включение без контроля синхронизма	435
Глава 14. Улучшение режимов. Асинхронные режимы, ресинхронизация и результирующая устойчивость	444
§ 14.1. Общая характеристика асинхронных режимов в электрических системах	444
§ 14.2. Возникновение асинхронного режима	447
§ 14.3. Задачи, возникающие при исследовании асинхронных режимов	450
§ 14.4. Параметры основных элементов электрических систем при асинхронных режимах	451
§ 14.5. Характеристики режима простейшей системы при несинхронной скорости синхронной машины (генератора, двигателя, синхронного компенсатора)	459
§ 14.6. Выпадение из синхронизма, асинхронный ход и ресинхронизация	469
§ 14.7. Практика вхождения в синхронизм асинхронно работающих генераторов (ресинхронизация и результирующая устойчивость)	473
§ 14.8. Управление передачами постоянного тока для повышения динамической и результирующей устойчивости	430
§ 14.9. Дополнительные устройства для улучшения устойчивости	484
§ 14.10. Мероприятия режимного характера	489
Приложения. П1. Аварии в электрических системах	497
П2. Краткие сведения о руководящих указаниях и некоторые рекомендации по проведению расчетов	504
П2.1. Требования устойчивости электроэнергетических систем	504

П2.2. Соображения о выборе метода и шага расчета электромеханических переходных процессов в электрических системах	506
П3. Система относительных единиц	511
П4. Демпфирование и демпферный коэффициент	516
П5. Некоторые сведения по истории переходных процессов	522
Основные обозначения	525
Заключение	527
Список литературы	529
Предметный указатель	530

ВАЛЕНТИН АНДРЕЕВИЧ ВЕНИКОВ

**ПЕРЕХОДНЫЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Заведующая редакцией Н. И. Хрусталева. Редактор С. М. Оводова. Художник А. А. Акимов. Художественный редактор В. И. Мешалкин. Технический редактор З. А. Муслимова. Корректор Г. И. Кострикова.

ИБ № 4867

Изд. № СТД-424. Сдано в набор 23.01.85. Подп. в печать 21.11.85. Т-19953. Формат 70×90^{1/16}. Бум. офс. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 39,19 усл. печ. л. + форзац 0,29 усл. печ. л. 39,48 усл. кр.-отг. 40,98 уч.-изд. л. + форзац 0,25 уч.-изд. л. Тираж 15 000 экз. Зак. № 84. Цена 1 р. 80 к.

Издательство «Высшая школа». 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.