

Раздел К

Повышение коэффициента мощности и фильтрация гармоник

Содержание		
1	Реактивная энергия и коэффициент мощности	K2
	1.1 Природа реактивной энергии	K2
	1.2 Установки и приборы, требующие реактивной энергии	K2
	1.3 Коэффициент мощности	K3
	1.4 Практические значения коэффициента мощности	K4
2	Зачем повышать коэффициент мощности?	K5
	2.1 Снижение стоимости электроэнергии	K5
	2.2 Техническая/экономическая оптимизация	K5
3	Методы повышения коэффициента мощности	K7
	3.1 Теоретические принципы	K7
	3.2 Выбор оборудования	K7
	3.3 Выбор между постоянным или автоматически управляемым блоком конденсаторов	K9
4	Выбор места установки конденсаторов	K10
	4.1 Централизованная компенсация	K10
	4.2 Посекционная компенсация	K10
	4.3 Индивидуальная компенсация	K11
5	Выбор оптимального уровня компенсации	K12
	5.1 Общий метод	K12
	5.2 Упрощенный метод	K12
	5.3 Метод, основанный на учете штрафных тарифов	K14
	5.4 Метод, основанный на снижении гарантированной максимальной полной мощности (кВА)	K14
6	Компенсация на зажимах трансформатора	K15
	6.1 Компенсация для повышения располагаемой выходной активной мощности	K15
	6.2 Компенсация реактивной энергии, поглощаемой трансформатором	K16
7	Повышение коэффициента мощности асинхронных двигателей	K18
	7.1 Подсоединение блока конденсаторов и уставки защиты	K18
	7.2 Методы предотвращения самовозбуждения асинхронного двигателя	K19
8	Пример системы до и после компенсации коэффициента мощности	K20
9	Влияние гармоник	K21
	9.1 Проблемы, связанные с гармоническими составляющими энергосистемы	K21
	9.2 Возможные решения	K21
	9.3 Выбор оптимального решения	K23
10	Блоки конденсаторов	K24
	10.1 Емкостные элементы	K24
	10.2 Выбор устройств защиты и управления и соединительных кабелей	K25

1 Реактивная энергия и коэффициент мощности

Системы переменного тока обеспечивают две формы энергии:

- «Активная» энергия, измеряемая в киловатт-часах (кВтч), которая преобразуется в механическую работу, тепло, свет и т.д.
- «Реактивная» энергия, которая принимает две формы:
 - «Реактивная» энергия, требуемая для индуктивных цепей (трансформаторы, двигатели и т.д.)
 - «Реактивная» энергия, генерируемая емкостными цепями (кабели, силовые конденсаторы и т.д.)

1.1 Природа реактивной энергии

Все индукционные (т.е., электромагнитные) машины и устройства, работающие в составе систем переменного тока, преобразуют электрическую энергию от генераторов энергосистемы в механическую работу и тепло. Такая энергия измеряется счетчиками киловатт-часов и называется «активной» или ваттной энергией. Для осуществления такого преобразования необходимо образование магнитных полей в машинах, и эти поля связаны с другой формой энергии, обеспечиваемой энергосистемой, - «реактивной» или «безваттной» энергией.

Причина этого состоит в том, что индукционная цепь циклически поглощает энергию из системы (на создание магнитных полей) и отдает эту энергию обратно в систему (в течение спада магнитных полей) дважды за каждый цикл мощности-частоты.

Точно такое же явление происходит при наличии параллельно включенных емкостных элементов в энергосистеме, таких как кабели или блоки силовых конденсаторов и т.д. В этом случае энергия запасается электростатически (заряд конденсатора). Циклическая зарядка и разрядка емкостной цепи оказывает на генераторы системы такое же влияние, как описанное выше для индукционной цепи, но ток на емкостной цепи имеет фазу, противоположную фазе тока индукционной цепи. На этом основаны схемы повышения коэффициента мощности.

Следует отметить, что хотя «безваттный» ток (точнее говоря, безваттная составляющая тока нагрузки) не забирает энергии из системы, он вызывает потери энергии в системах передачи и распределения энергии из-за нагрева проводников.

В реальных энергосистемах безваттные составляющие токов нагрузок неизменно индуктивны, а модули полного сопротивления систем передачи и распределения преимущественно индуктивно реактивны. Индуктивный ток через индуктивное реактивное сопротивление — наихудший возможный режим падения напряжения (т.е., прямая противофаза напряжению системы).

По этим причинам:

- потери энергии при передаче и
- падения напряжения

Органы, регулирующие энергоснабжение, требуют снижения ограничения безваттного (индуктивного) тока в максимальной возможной степени.

Безваттные (емкостные) токи имеют обратный эффект на уровни напряжения и вызывают повышение напряжения в энергосистемах.

Как правило, мощность (кВт), связанная с «активной» энергией, обозначается буквой P.

Реактивная мощность (квар) обозначается буквой Q. Индуктивно-реактивная мощность условно принимается положительной (+Q), а емкостно-реактивная — отрицательной (-Q).

В п.1.3 описывается взаимосвязь P, Q и S.

S - «полная» мощность, кВа.

Рис. К1 показывает полную мощность (кВа) как векторную сумму активной (кВт) и реактивной (квар) мощности.

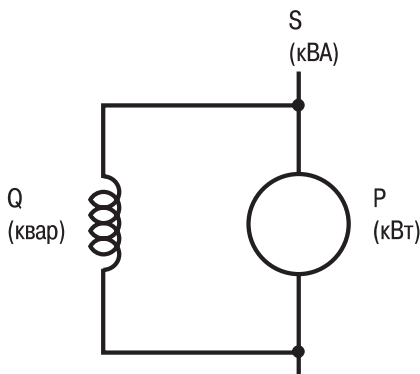


Рис. К1: Электродвигатель требует активной (P) и реактивной (Q) мощности от энергосистемы

1.2 Установки и приборы, требующие реактивной энергии

Всем установкам и приборам переменного тока, включающим электромагнитные устройства или зависящим от магнитносвязанных обмоток, требуется, в той или иной степени, реактивный ток для создания магнитного потока.

Общеприменимыми единицами оборудования этого класса являются трансформаторы и реакторы, двигатели и разрядные лампы (т.е., балластные сопротивления) (см. **Рис. К2**). Соотношение реактивной (квар) и активной (кВт) мощности при полностью нагруженной единице оборудования зависит от характеристик такой единицы:

- 65-75% для асинхронных двигателей
- P Q5-10% для трансформаторов

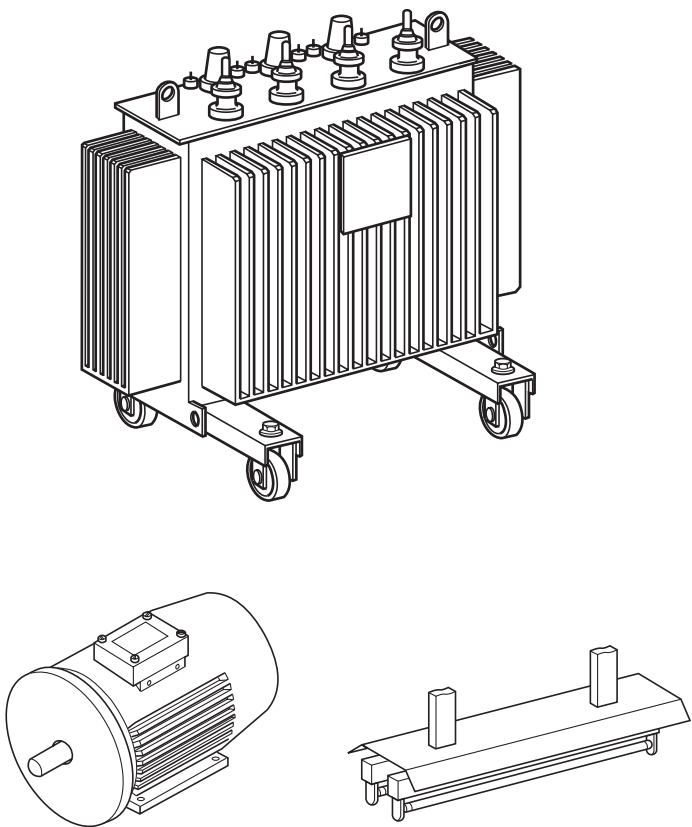


Рис. К2: Потребители мощности, которым также требуется реактивная энергия

1 Реактивная энергия и коэффициент мощности

Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) есть отношение кВт к кВА. Чем ближе коэффициент мощности приближается к своему максимальному значению 1, тем больше польза для потребителя и поставщика.

$PF = P \text{ (кВт)}/S \text{ (кВА)}$

P = активная мощность

S = полная (кажущаяся) мощность

1.3 Коэффициент мощности

Определение коэффициента мощности

Коэффициент мощности нагрузки, которая может являться энергопотребляющей единицей оборудования или совокупностью таких единиц (например, вся система), задается отношением P/S , т.е., число кВт, деленное на число кВА в заданный момент времени.

Значение коэффициента мощности изменяется в диапазоне 0÷1.

Если токи и напряжения являются идеальными синусоидальными сигналами, коэффициент мощности равен $\cos \varphi$.

Коэффициент мощности около единицы означает, что реактивная мощность мала в сравнении с активной, а низкое значение коэффициента указывает на противоположное.

Векторная диаграмма мощности

- Активная мощность P (кВт)
 - Однофазная (1 фаза и нейтраль): $P = V \times I \times \cos \varphi$
 - Однофазная (фаза-фаза): $P = U \times I \times \cos \varphi$
 - Трехфазная (3 провода или 3 провода + нейтраль): $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$
- Реактивная мощность Q (квар)
 - Однофазная (1 фаза и нейтраль): $P = V \times I \times \sin \varphi$
 - Однофазная (фаза-фаза): $Q = U \times I \times \sin \varphi$
 - Трехфазная (3 провода или 3 провода + нейтраль): $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \varphi$
- Полная мощность S (кВА)
 - Однофазная (1 фаза и нейтраль): $S = V \times I$
 - Однофазная (фаза-фаза): $S = U \times I$
 - Трехфазная (3 провода или 3 провода + нейтраль): $P = \sqrt{3} \times U \times I$

где:

V = напряжение между фазой и нейтралью

U = междуфазное напряжение

I = ток

φ = угол между векторами напряжения и тока.

□ Для сбалансированных или почти сбалансированных нагрузок 4-проводных систем

Векторы тока и напряжения и вывод векторной диаграммы мощности

«Векторная» диаграмма мощности – полезный инструмент, выводимый непосредственно из истинной диаграммы вращающихся векторов токов и напряжений следующим образом:

Напряжения энергосистемы принимаются в качестве исходных величин, и рассматривается только одна фаза, исходя из предположения о сбалансированной 3-х фазной нагрузке.

Исходное напряжение фазы (V) совпадает с горизонтальной осью, а ток (I) этой фазы сдвинут (отстает) (практически для всех нагрузок энергосистемы) относительно напряжения на угол φ .

Составляющая тока I , совпадающая по фазе с напряжением V , является ваттной составляющей тока I и равна $I \cos \varphi$, значение $VI \cos \varphi$ равно активной мощности (кВ) в цепи, если V выражается в кВ.

Составляющая тока I с отставанием 90 градусов от напряжения V является безваттной составляющей тока I и равна $I \cdot \sin \varphi$, а значение $V \cdot I \cdot \cos \varphi$ равно реактивной мощности (квар), если напряжение V выражается в кВ.

Результат умножения I на V в кВ (VI) равен полной мощности (кВА) для цепи.

Получается простая формула $S^2 = P^2 + Q^2$

Следовательно, умноженные на 3, указанные выше значения кВт, квар и кВА на фазу могут удобно представлять взаимосвязь кВА, кВт, квар и коэффициента мощности для общей 3-х фазной нагрузки, как показано на **Рис. К3**.

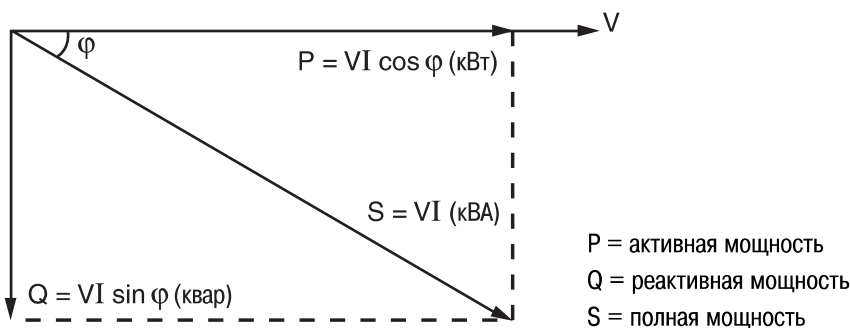


Рис. К3: Диаграмма мощности

1 Реактивная энергия и коэффициент мощности

Пример расчета мощности (см. Рис. К4)

Тип цепи	Полная мощн. S (кВА)	Активная мощн. P (кВт)	Реакт. мощн. Q (квар)
Однофазная (фаза и нейтраль)	$S = VI$	$P = VI \cos \varphi$	$Q = VI \sin \varphi$
Однофазная (фаза-фаза)	$S = UI$	$P = UI \cos \varphi$	$Q = UI \sin \varphi$
Пример 5 кВт нагрузки $\cos \varphi = 0.5$	10 кВА	5 кВт	8.7 квар
Трехфаз. (3 провода или 3 провода + нейтраль)	$S = e UI$	$P = e UI \cos \varphi$	$Q = e UI \sin \varphi$
Пример Двигатель $P_n = 51$ кВт $\cos \varphi = 0.86$ $\rho = 0.91$ (кпд двигателя)	65 кВА	56 кВт	33 квар

Рис. К4: Пример расчета активной и реактивной мощности

1.4 Практические значения коэффициента мощности

Расчет для трехфазного примера рассмотренного ранее:

P_n = мощность на валу = 51 кВт

P = потребляемая активная мощность

$$P = \frac{P_n}{\rho} = \frac{51}{0.91} = 56 \text{ кВт}$$

S = полная мощность

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{56}{0.86} = 65 \text{ кВА}$$

Таким образом, используя диаграмму Рис. К5 или карманный калькулятор, значение $\text{tg } \varphi$, соответствующее $\cos \varphi$ 0,86, равно 0,59

$Q = P \text{ tg } \varphi = 56 \times 0,59 = 33$ квар (см. Рис. К15).

или

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{65^2 - 56^2} = 33 \text{ квар}$$

Средние значения коэффициента мощности для наиболее распространенного оборудования (см. Рис. К6)

Оборудование			cos φ	tg φ
■ Стандартный асинхронный двигатель	при нагрузке	0%	0.17	5.80
		25%	0.55	1.52
		50%	0.73	0.94
		75%	0.80	0.75
		100%	0.85	0.62
■ Лампы накаливания			1.0	0
■ Флуоресцентные лампы (без компенсации)			0.5	1.73
■ Флуоресцентные лампы (с компенсацией)			0.93	0.39
■ Газоразрядные лампы			0.4 - 0.6	2.29 - 1.33
■ Печи сопротивления			1.0	0
■ Печи индукционного нагрева (с компенсацией)			0.85	0.62
■ Диэлектрические электропечи			0.85	0.62
■ Резистивные паяльные аппараты			0.8 - 0.9	0.75 - 0.48
■ Стационарные сварочные аппараты для дуговой сварки			0.5	1.73
■ Мотор-генераторная силовая установка дуговой сварки			0.7 - 0.9	1.02 - 0.48
■ Установка «трансформатор-выпрямитель» дуговой сварки			0.7 - 0.8	1.02 - 0.75
■ Электродуговая печь			0.8	0.75

Рис. К6: Значения $\cos \varphi$ и $\text{tg } \varphi$ для наиболее распространенного оборудования

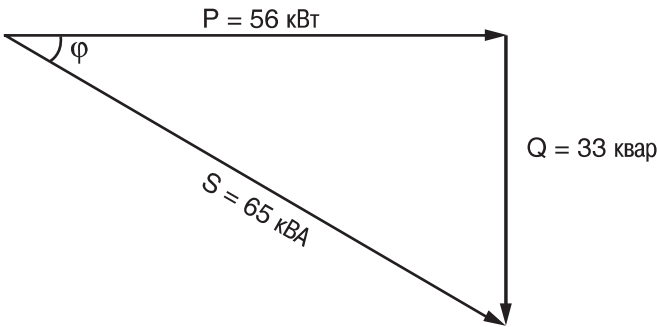


Рис. К5: Расчетная диаграмма мощности

2 Зачем повышать коэффициент мощности?

Повышение коэффициента мощности обеспечивает несколько технических и экономических преимуществ, особенно снижение счетов за электроэнергию

2.1 Снижение стоимости электроэнергии

Оптимальное регулирование потребления реактивной мощности дает следующие экономические преимущества.

Приводимая информация основана на фактической структуре тарифных ставок, общепринятой в Европе и направленной на стимулирование потребителей минимизировать потребление реактивной энергии.

Установка конденсаторов для повышения коэффициента мощности позволяет потребителям снижать затраты на электроэнергию за счет поддержания уровня потребления реактивной мощности ниже значения, согласованного (по договору) с поставщиком электроэнергии. В рамках рассматриваемой тарифной структуры счет за потребленную реактивную энергию выставляется по критерию tg φ.

Как указано выше:

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q \text{ (кварч)}}{P \text{ (кВтч)}}$$

С точки зрения поставки электроэнергии, поставщик электроэнергии поставляет реактивную энергию бесплатно:

- До точки, при которой ее потребление составляет менее 40% от потребления активной энергии (tg φ = 0,4) в течение максимального периода 16 часов в день (с 06-00 ч до 22-00 ч) в период наибольшей нагрузки (часто зимой)
- Без ограничения в течение периодов низкой нагрузки зимой, весной и летом.

В течение периодов ограничения счет за реактивную энергию, потребленную свыше 40% активной энергии (tg φ > 0,4), выставляются ежемесячно по текущим ставкам. Таким образом, количество реактивной энергии Р, оплачиваемой потребителем в такие периоды, составляет: кварч (к оплате) = Р кВтч (tg φ – 0,4), где Р кВтч – активная энергия, потребленная в течение периодов ограничения, кВтч tg φ – общая реактивная энергия за период ограничения и 0,4Р кВтч – количество реактивной энергии, поставленной бесплатно за период ограничения.

Tg φ = 0,4 соответствует коэффициенту мощности 0,93. Таким образом, если принимаются меры по обеспечению того, что в течение периодов ограничения коэффициент мощности никогда не упадет ниже 0,93, потребитель ничего не будет платить за потребленную реактивную мощность.

Однако, получая такие преимущества пониженных затрат на электроэнергию, потребитель должен учитывать стоимость приобретения, установки и обслуживания конденсаторов для повышения коэффициента мощности и регулирования распределительных устройств, автоматических устройств (в случае ступенчатой компенсации) вместе с дополнительными кВтч, потребляемыми диэлектриками.

Учитывая такие затраты на конденсаторы и т.д., может оказаться более экономически выгодным обеспечивать только частичную компенсацию, т.е., оплата некоторой потребляемой реактивной энергии может обходиться дешевле, чем 100% компенсация.

Вопрос повышения коэффициента мощности - это, прежде всего, вопрос оптимизации (за исключением очень простых случаев).

Повышение коэффициента мощности позволяет уменьшить номинальные значения мощности трансформаторов, распределительных устройств, кабелей и т.д., а также сократить потери мощности и ограничить падения напряжения

2.2 Техническая/экономическая оптимизация

Высокий коэффициент мощности позволяет оптимизировать все компоненты системы. Следует избегать завышения номиналов определенного оборудования. Для получения оптимальных результатов необходимо устанавливать компенсирующие устройства как можно ближе к потребителю реактивной (индуктивной) энергии.

Уменьшения сечений кабелей

Рис. К7 требуемое увеличение сечений кабелей при снижении коэффициента мощности с единицы до 0,4.

Множитель для площади поперечного сечения жил(ы) кабеля	1	1.25	1.67	2.5
cos φ	1	0.8	0.6	0.4

Рис. К7: Множитель для сечения кабеля в зависимости от cos φ

2 Зачем повышать коэффициент мощности?

Снижение потерь (Р, кВт) в кабелях

Потери в кабелях пропорциональны квадрату тока и измеряются счетчиком киловатт-часов установки. Например, снижение общего тока в проводнике на 10% приводит к снижению потерь почти на 20%.

Снижение падений напряжения

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности снижают или даже полностью устраняют (индуктивный) реактивный ток в вышележащих проводниках, тем самым, снижая или устраняя падения напряжения.

Примечание: Избыточная компенсация приводит к повышению напряжения на конденсаторах.

Повышение располагаемой мощности

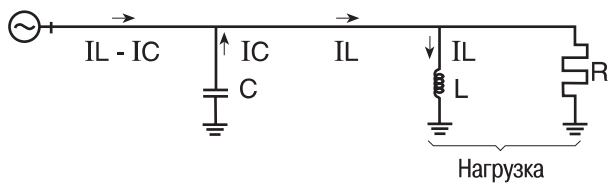
Повышение коэффициента мощности нагрузки, питаемой от трансформатора, приводит к снижению тока через трансформатор, что позволяет добавлять нагрузку. На практике может оказаться дешевле повысить коэффициент мощности (1), чем заменить трансформатор на больший номинал.

Этот вопрос рассматривается в разделе 6.

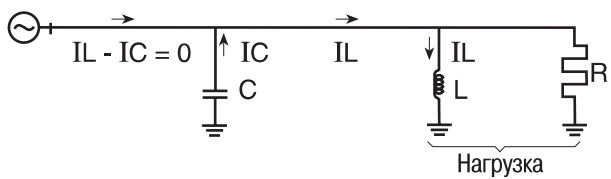
(1) В силу других преимуществ высокого значения коэффициента мощности, указанных выше.

Повышение коэффициента мощности нагрузки требует блока конденсаторов, служащего в качестве источника реактивной энергии. Устройство обеспечивает компенсацию реактивной энергии

а) Проходят только реактивные составляющие тока



б) При IC = IL вся реактивная мощность подается от блока конденсаторов



в) При токе нагрузки, добавленном к (б)

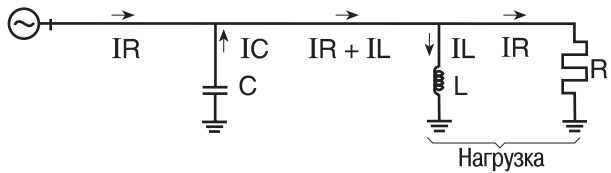


Рис. К8: Особенности компенсации коэффициента мощности

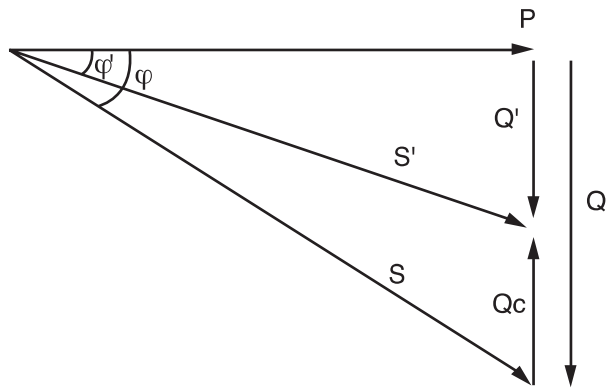


Рис. К9: Диаграмма, показывающая принцип компенсации $Q_c = P (tg \varphi - tg \varphi')$

3.1 Теоретические принципы

Индуктивная нагрузка, имеющая низкий коэффициент мощности, требует от генераторов и систем передачи/распределения пропускать реактивный ток (с отставанием от напряжения системы на 90 градусов) с сопутствующим потерями мощности и повышенными падениями напряжениями, как указывается в п.1.1. Если блок шунтирующих конденсаторов добавить к нагрузке, его (емкостной) реактивный ток будет проходить по тому же пути через энергосистему, как и реактивный ток нагрузки. Поскольку (как указывается в п.1.1) такой емкостной ток I_c (который опережает напряжение системы на 90 градусов) прямо противофазен реактивному току нагрузки (I_L), две составляющие, протекающие по одному пути, будут компенсировать друг друга. При этом, если блок конденсаторов достаточно большой и $I_c = I_L$, не будет реактивного тока в системе перед конденсаторами.

Это указывается на Рис. К8 (а) и (б), который показывает только реактивные составляющие тока.

На этом рисунке:

R – элементы, потребляющие активную мощность нагрузки

L – элементы, потребляющие реактивную (индуктивную) мощность нагрузки

C – элементы, потребляющие реактивную (емкостную) мощность нагрузки устройств повышения коэффициента мощности (т.е., конденсаторов).

Как видно из диаграммы (б) Рис. К9, блок конденсаторов C подает весь реактивный ток нагрузки. По этой причине конденсаторы иногда называются «генераторами реактивной мощности - VAR».

На диаграмме (с) Рис. К9 добавлена активная ваттная составляющая тока и показано, что нагрузка (при полной компенсации) представляется энергосистеме как имеющая коэффициент мощности 1.

Как правило, полная компенсация нагрузки не является экономически целесообразной.

На Рис. К9 используется диаграмма мощности, обсуждаемая в п.1.3 (см. Рис. К3), для демонстрации принципа компенсации путем снижения большой реактивной мощности Q до меньшего значения Q' посредством блока конденсаторов, имеющего реактивную мощность Qc. При этом величина полной мощности S снижается до S'.

Пример:

Двигатель потребляет 100 кВт при коэффициенте мощности 0,75 (т.е., $tg \varphi = 0,88$). Для повышения коэффициента мощности до 0,93 (т.е., $tg \varphi = 0,4$), реактивная мощность блока конденсаторов должна составлять: $Q_c = 100 (0,88 - 0,4) = 48$ квар.

Выбор уровня компенсации и расчет номинальных параметров блока конденсаторов зависит от конкретной нагрузки. Факторы, подлежащие учету, разъясняются в разделе 5 для общего случая и в разделах 6 и 7 для трансформаторов и двигателей.

Примечание: Перед тем, как реализовать проект компенсации, следует учесть ряд мер предосторожности. В частности, следует избегать увеличения номинальных значений мощности двигателей, также как и работы двигателей в режиме холостого хода. В последнем случае получаемая реактивная энергия, потребляемая двигателем, приводит к крайне низкому коэффициенту мощности (-0,17); это вызвано крайне малой активной мощностью кВт, потребляемой двигателем (в ненагруженном состоянии).

3.2 Выбор оборудования

Компенсация на низком напряжении

При низком напряжении компенсация обеспечивается посредством:

- Нерегулируемого конденсатора
- Устройства автоматического регулирования или батареи, допускающие непрерывное регулирование при изменении нагрузки

Примечание: Если установленная реактивная мощность компенсации превышает 800 квар и нагрузка является постоянной и устойчивой, как правило, экономически выгодно устанавливать блоки конденсаторов на высоком напряжении.

Компенсация может осуществляться постоянной емкостью при благоприятных условиях

Постоянные (нерегулируемые) конденсаторы (см. Рис. K10)

В данной схеме используется один или более конденсаторов для обеспечения постоянного уровня компенсации. Управление может быть:

- Ручным: посредством выключателя или выключателя нагрузки
- Полуавтоматическим: посредством контактора
- Прямое подключение к нагрузке и коммутация вместе с ней

Такие конденсаторы применяются:

- На зажимах индуктивных устройств (двигатели и трансформаторы)
- На сборных шинах, питающих ряд небольших двигателей, и индуктивное оборудование, для которого отдельная компенсация стоит слишком дорого.
- В случаях, где уровень нагрузки достаточно постоянен



Рис. K10: Пример конденсаторов постоянного уровня компенсации

Автоматические блоки конденсаторов (см. Рис. K11)

Этот тип оборудования обеспечивает автоматическое управление компенсацией коэффициента мощности и поддержание выбранного уровня коэффициента мощности в узких пределах. Такое оборудование применяется на нагрузках с относительно высокими уровнями изменения активной и/или реактивной мощности, например:

- На сборных шинах главного распределительного щита
- На зажимах высоконагруженного кабеля



Рис. K11: Пример оборудования автоматического регулирования компенсации

3 Методы повышения коэффициента мощности

Автоматическое регулирование блоков конденсаторов дает возможность мгновенной адаптации уровня компенсации к уровню нагрузки

Принципы и причины применения автоматической компенсации

Блок конденсаторов разделяется на ряд секций, каждая из которых управляется контактором. Включение контактора включает его секцию параллельно с другими уже работающими секциями. Поэтому, емкость блока (батареи) может увеличиваться или уменьшаться ступенчато путем включения и выключения контакторов управления.

Управляющее реле контролирует коэффициент мощности управляемых цепей и служит для включения или выключения соответствующих контакторов для поддержания достаточно постоянного коэффициента мощности системы (в пределах допуска, задаваемого величиной каждой батареи компенсации). Трансформатор тока для контрольного реле должен находиться на одной фазе входного кабеля, питающего контролируемые цепи (см. Рис. K12).

Блок конденсаторов Thyrimat (см. Рис. K12) является устройством автоматической компенсации коэффициента мощности, включающим статические контакторы (тиристоры) вместо стандартных контакторов.

Статическая компенсация особенно пригодна для определенных нагрузок, включающих оборудование с быстрым циклом и/или высокой чувствительностью к возмущению, возникающим при переходных процессах.

Преимущества статических контакторов:

- Мгновенная реакция на любое изменение коэффициента мощности (время реакции — 2 с или 40 мс в зависимости от регулятора)
- Неограниченное число операций (срабатываний)
- Устранение переходных процессов в сети при включении конденсаторов
- Бесшумная работа

Тщательная подгонка компенсации под уровень, требуемый нагрузкой, позволяет предотвращать перенапряжения при низкой нагрузке, т.е., предотвращение режима перенапряжения и возможности повреждения оборудования. Перенапряжения из-за чрезмерной реактивной компенсации зависят, отчасти, от значения полного сопротивления источника.

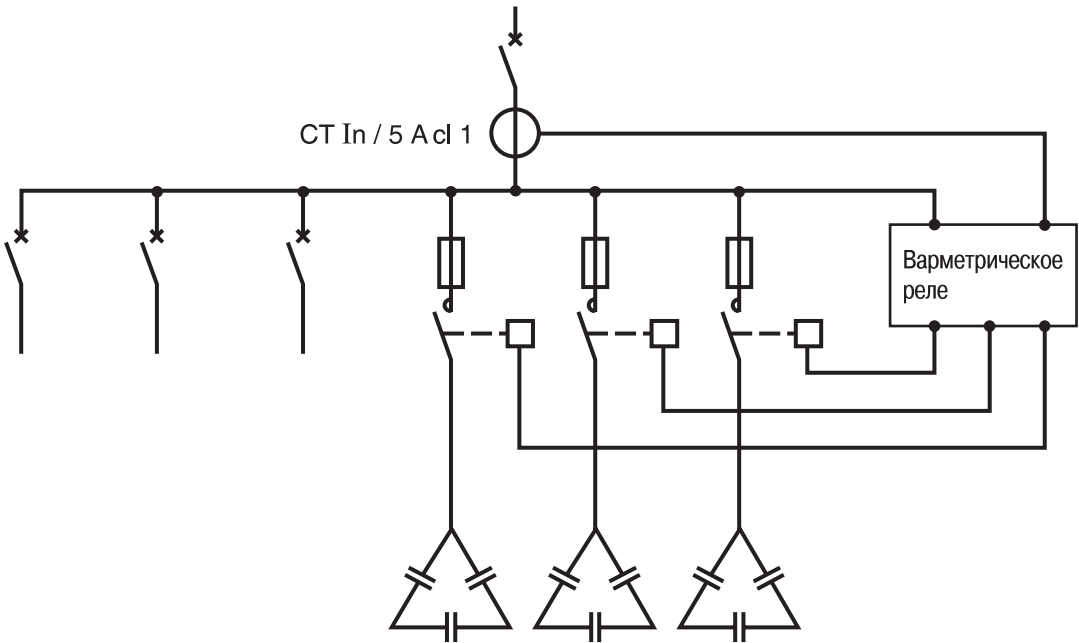


Рис. K12: Принцип управления автоматической компенсацией

3.3 Выбор между нерегулируемым или автоматически управляемым регулируемым блоком конденсаторов

Общепринятые правила

Если номинальная реактивная мощность (квар) не превышает 15% номинальной мощности силового трансформатора, может применяться постоянная компенсация. Свыше 15% рекомендуется устанавливать автоматически управляемый блок (батарею) конденсаторов. Местоположение конденсаторов низкого напряжения в установке определяет режим компенсации, которая может быть централизованной (один центр для всей нагрузки), частичной (посекционной), локальной (на каждом отдельном устройстве) или некоторой комбинацией последних двух. В принципе, идеальная компенсация обеспечивается в точке потребления на уровне, требуемом в любой момент.

На практике, выбор определяется техническими и экономическими факторами.

4 Выбор места установки компенсирующих конденсаторов

Централизованная компенсация может применяться при постоянной и устойчивой нагрузке

4.1 Централизованная компенсация (см. Рис. K13)

Принцип
Блок (батарея) конденсаторов подсоединяется к сборным шинам главного низковольтного распределительного щита и работает в течение периода нормальной нагрузки.

- Преимущества**
- Централизованная компенсация обеспечивает:
- Снижение платы за избыточное потребление реактивной мощности
 - Снижение требуемой полной мощности (кВА), на которой, как правило, основана постоянная плата за электроэнергию
 - Снижение нагрузки силового трансформатора, который становится способным принять дополнительную нагрузку при необходимости

- Примечания**
- Реактивный ток продолжает протекать по всем проводникам кабелей от главного низковольтного распределительного щита
 - По этой причине централизованный режим компенсации не обеспечивает возможность уменьшения сечения таких кабелей и снижения потерь в них.

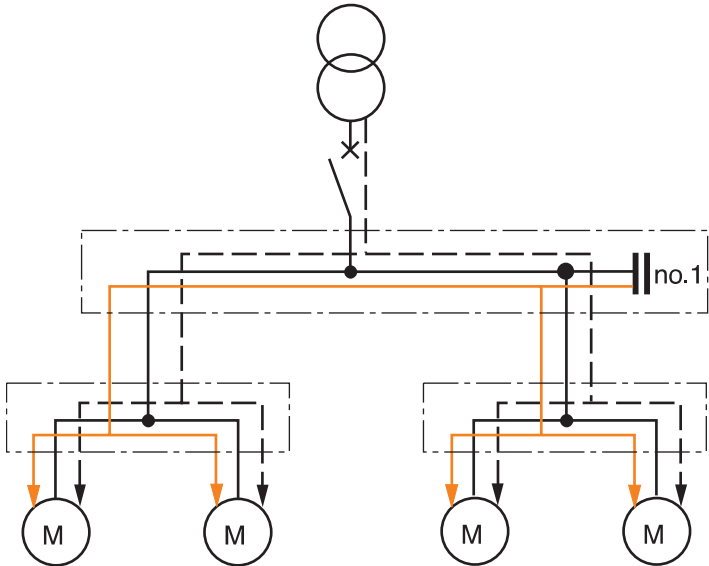


Рис. K13: Централизованная компенсация

Посекционная компенсация рекомендуется при большой системе и в том случае, когда графики нагрузки ($P = f(t)$) различны для разных частей установки.

4.2 Посекционная компенсация (см. Рис. K14)

Принцип
Блоки конденсаторов подсоединяются к сборным шинам каждого локального распределительного щита, как показано на Рис. K14.

Значительная часть системы выигрывает от такой схемы, в частности, питающие кабели от главного распределительного щита к каждому локальному распределительному щиту, на котором осуществляется компенсация.

- Преимущества**
- Посекционная компенсация обеспечивает:
- Снижение платы за избыточное потребление реактивной мощности
 - Снижение требуемой полной мощности (кВА), на которой, как правило, основана постоянная плата за электроэнергию
 - Снижение нагрузки силового трансформатора, который становится способным принять дополнительную нагрузку при необходимости
 - Возможность уменьшения сечений кабелей, питающих локальные распределительные щиты, или использования таких кабелей без уменьшения сечений для обеспечения дополнительной пропускной способности на случай повышения нагрузки
 - Снижение потерь в кабелях

- Примечания**
- Реактивный ток продолжает протекать по всем проводникам кабелей от местных низковольтных распределителей
 - По этой причине посекционная компенсация не обеспечивает возможность уменьшения сечений этих кабелей и снижения потерь в них.
 - При больших изменениях нагрузки всегда существует риск избыточной компенсации и сопутствующих перенапряжений

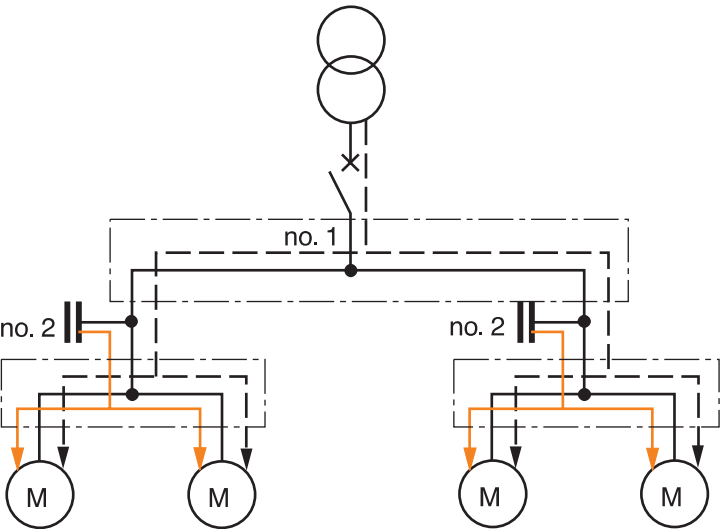


Рис. K14 : Посекционная компенсация

4 Выбор места установки конденсаторов

Применение индивидуальной компенсации следует рассматривать при значительной мощности двигателя в сравнении с мощностью системы

4.3 Индивидуальная компенсация

Принцип

Конденсаторы подсоединяются непосредственно к зажимам индуктивной цепи (например, двигателям, см. п.7). Возможность применения индивидуальной компенсации должна рассматриваться при значительной мощности двигателя в сравнении с заявленной полной (кажущейся) мощностью (кВА).

Номинальная реактивная мощность (квар) блока (батареи) конденсаторов составляет порядка 25% номинальной мощности (кВт) двигателя. Дополнительная компенсация в исходной точке (трансформатор) обеспечивает дополнительное преимущество.

Преимущества

- Индивидуальная компенсация обеспечивает:
- Снижение платы за избыточное потребление реактивной мощности
- Снижение требуемой полной мощности (кВА)
- Уменьшение сечений всех кабелей, снижение потерь в кабелях

Примечания

- Значительные реактивные токи устраняются.

5 Выбор оптимального уровня компенсации

5.1 Общий метод

Составление перечня потребления реактивной мощности на стадии проектирования

Такой перечень может составляться аналогично (и одновременно) перечню потребляемой мощности, как описывается в Разделе В. После составления такого перечня могут определяться уровни потребляемой активной и реактивной мощности на каждом уровне установки (как правило, в точках основных и промежуточных распределительных цепей).

Технико-экономическая оптимизация для существующей установки

Оптимальная мощность конденсаторов для компенсации коэффициента мощности для существующей установки может определяться на основе следующих основных факторов:

- Счета за электроэнергию до установки конденсаторов
- Счета за электроэнергию, ожидаемые после установки конденсаторов
- Затраты:
 - Затраты на приобретение конденсаторов и устройств управления (контакторы, реле, распределительные щиты и т.д.)
 - Затраты на установку и техобслуживание
 - Затраты, связанные с потерями из-за диэлектрического нагрева, в сравнении с пониженными потерями в кабелях, трансформаторе и т.д. после установки конденсаторов

Несколько упрощенных методов, применяемых в отношении стандартных тарифов (общепринятых в Европе) приводятся в п.5.3 и п.5.4.

5.2 Упрощенный метод

Общий принцип

Ориентировочный расчет применим, как правило, для большинства практических случаев и может быть основан на предположении о коэффициенте мощности 0,8 (отстающем) до компенсации. Метод повышения коэффициента мощности до значения, достаточного для предотвращения штрафных тарифов (они зависят от местных структур тарифных ставок, но здесь оно полагается равным 0,93) и снижения потерь, падений напряжения и т.д. в установке, рассматривается на основе данных, приводимых на **Рис. K15** на следующей странице.

Как видно из приводимой таблицы, повышение коэффициента мощности с 0,8 до 0,93 потребует 0,355 квар на кВт нагрузки. Мощность блока конденсаторов на сборных шинах главного распределительного щита системы составляет

$$Q \text{ (квар)} = 0.355 \times P \text{ (кВт)}.$$

Данный упрощенный метод позволяет быстро определить требуемый тип конденсаторов для компенсации коэффициента мощности (централизованные, посекционные или индивидуальные).

Пример

Требуется повысить коэффициент мощности установки 666 кВА с 0,75 до 0,928. Требуемая активная мощность составляет $666 \times 0,75 = 500$ кВт.

На Рис. K17, на пересечении строки «cos φ = 0,75» (до компенсации) и столбца «cos φ = 0,93» (после компенсации) находим значение 0,487 квар компенсации на кВт нагрузки.

Следовательно, для нагрузки 500 кВт требуемая мощность емкостей компенсации составляет $500 \times 0,487 = 244$ квар.

Примечание: данный метод применим при любом уровне напряжения, т.е., не зависит от напряжения.

5 Выбор оптимального уровня компенсации

До компенсации		Номинальное значение (квар) блока конденсаторов, устанавливаемого на кВт нагрузки, для повышения cos φ (коэффициент мощности) или tan φ до заданного значения													
		tg φ	0.75	0.59	0.48	0.46	0.43	0.40	0.36	0.33	0.29	0.25	0.20	0.14	0.0
tg φ	cos φ	cos φ	0.80	0.86	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
2.29	0.40		1.557	1.691	1.805	1.832	1.861	1.895	1.924	1.959	1.998	2.037	2.085	2.146	2.288
2.22	0.41		1.474	1.625	1.742	1.769	1.798	1.831	1.840	1.896	1.935	1.973	2.021	2.082	2.225
2.16	0.42		1.413	1.561	1.681	1.709	1.738	1.771	1.800	1.836	1.874	1.913	1.961	2.022	2.164
2.10	0.43		1.356	1.499	1.624	1.651	1.680	1.713	1.742	1.778	1.816	1.855	1.903	1.964	2.107
2.04	0.44		1.290	1.441	1.558	1.585	1.614	1.647	1.677	1.712	1.751	1.790	1.837	1.899	2.041
1.98	0.45		1.230	1.384	1.501	1.532	1.561	1.592	1.628	1.659	1.695	1.737	1.784	1.846	1.988
1.93	0.46		1.179	1.330	1.446	1.473	1.502	1.533	1.567	1.600	1.636	1.677	1.725	1.786	1.929
1.88	0.47		1.130	1.278	1.397	1.425	1.454	1.485	1.519	1.532	1.588	1.629	1.677	1.758	1.881
1.83	0.48		1.076	1.228	1.343	1.370	1.400	1.430	1.464	1.497	1.534	1.575	1.623	1.684	1.826
1.78	0.49		1.030	1.179	1.297	1.326	1.355	1.386	1.420	1.453	1.489	1.530	1.578	1.639	1.782
1.73	0.50		0.982	1.232	1.248	1.276	1.303	1.337	1.369	1.403	1.441	1.481	1.529	1.590	1.732
1.69	0.51		0.936	1.087	1.202	1.230	1.257	1.291	1.323	1.357	1.395	1.435	1.483	1.544	1.686
1.64	0.52		0.894	1.043	1.160	1.188	1.215	1.249	1.281	1.315	1.353	1.393	1.441	1.502	1.644
1.60	0.53		0.850	1.000	1.116	1.144	1.171	1.205	1.237	1.271	1.309	1.349	1.397	1.458	1.600
1.56	0.54		0.809	0.959	1.075	1.103	1.130	1.164	1.196	1.230	1.268	1.308	1.356	1.417	1.559
1.52	0.55		0.769	0.918	1.035	1.063	1.090	1.124	1.156	1.190	1.228	1.268	1.316	1.377	1.519
1.48	0.56		0.730	0.879	0.996	1.024	1.051	1.085	1.117	1.151	1.189	1.229	1.277	1.338	1.480
1.44	0.57		0.692	0.841	0.958	0.986	1.013	1.047	1.079	1.113	1.151	1.191	1.239	1.300	1.442
1.40	0.58		0.665	0.805	0.921	0.949	0.976	1.010	1.042	1.076	1.114	1.154	1.202	1.263	1.405
1.37	0.59		0.618	0.768	0.884	0.912	0.939	0.973	1.005	1.039	1.077	1.117	1.165	1.226	1.368
1.33	0.60		0.584	0.733	0.849	0.878	0.905	0.939	0.971	1.005	1.043	1.083	1.131	1.192	1.334
1.30	0.61		0.549	0.699	0.815	0.843	0.870	0.904	0.936	0.970	1.008	1.048	1.096	1.157	1.299
1.27	0.62		0.515	0.665	0.781	0.809	0.836	0.870	0.902	0.936	0.974	1.014	1.062	1.123	1.265
1.23	0.63		0.483	0.633	0.749	0.777	0.804	0.838	0.870	0.904	0.942	0.982	1.030	1.091	1.233
1.20	0.64		0.450	0.601	0.716	0.744	0.771	0.805	0.837	0.871	0.909	0.949	0.997	1.058	1.200
1.17	0.65		0.419	0.569	0.685	0.713	0.740	0.774	0.806	0.840	0.878	0.918	0.966	1.007	1.169
1.14	0.66		0.388	0.538	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996	1.138
1.11	0.67		0.358	0.508	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966	1.108
1.08	0.68		0.329	0.478	0.595	0.623	0.650	0.684	0.716	0.750	0.788	0.828	0.876	0.937	1.079
1.05	0.69		0.299	0.449	0.565	0.593	0.620	0.654	0.686	0.720	0.758	0.798	0.840	0.907	1.049
1.02	0.70		0.270	0.420	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878	1.020
0.99	0.71		0.242	0.392	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.701	0.741	0.783	0.850	0.992
0.96	0.72		0.213	0.364	0.479	0.507	0.534	0.568	0.600	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821	0.963
0.94	0.73		0.186	0.336	0.452	0.480	0.507	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794	0.936
0.91	0.74		0.159	0.309	0.425	0.453	0.480	0.514	0.546	0.580	0.618	0.658	0.700	0.767	0.909
0.88	0.75		0.132	0.82	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.631	0.673	0.740	0.882
0.86	0.76		0.105	0.255	0.371	0.399	0.426	0.460	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713	0.855
0.83	0.77		0.079	0.229	0.345	0.373	0.400	0.434	0.466	0.500	0.538	0.578	0.620	0.687	0.829
0.80	0.78		0.053	0.202	0.319	0.347	0.374	0.408	0.440	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661	0.803
0.78	0.79		0.026	0.176	0.292	0.320	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634	0.776
0.75	0.80			0.150	0.266	0.294	0.321	0.355	0.387	0.421	0.459	0.499	0.541	0.608	0.750
0.72	0.81			0.124	0.240	0.268	0.295	0.329	0.361	0.395	0.433	0.473	0.515	0.582	0.724
0.70	0.82			0.098	0.214	0.242	0.269	0.303	0.335	0.369	0.407	0.447	0.489	0.556	0.698
0.67	0.83			0.072	0.188	0.216	0.243	0.277	0.309	0.343	0.381	0.421	0.463	0.530	0.672
0.65	0.84			0.046	0.162	0.190	0.217	0.251	0.283	0.317	0.355	0.395	0.437	0.504	0.645
0.62	0.85			0.020	0.136	0.164	0.191	0.225	0.257	0.291	0.329	0.369	0.417	0.478	0.620
0.59	0.86				0.109	0.140	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.343	0.390	0.450	0.593
0.57	0.87				0.083	0.114	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.317	0.364	0.424	0.567
0.54	0.88				0.054	0.085	0.112	0.143	0.175	0.209	0.246	0.288	0.335	0.395	0.538
0.51	0.89				0.028	0.059	0.086	0.117	0.149	0.183	0.230	0.262	0.309	0.369	0.512
0.48	0.90					0.031	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.234	0.281	0.341	0.484

Значение, выбранное для примера в п.5.2

Значение, выбранное для примера в п.5.4

Рис. K15: Реактивная мощность (квар), устанавливаемая на кВт нагрузки, для повышения коэффициента мощности

При определенных (общепринятых) структурах тарифных ставок изучение счетов за период года с наибольшей нагрузкой позволяет определить уровень квар компенсации, требуемый для предотвращения излишней платы за реактивную энергию (кварч). Период окупаемости конденсаторов для повышения коэффициента мощности и сопутствующего оборудования составляет, как правило, 18 месяцев.

5.3 Метод, основанный на учете штрафных тарифов

Следующий метод позволяет рассчитать мощность предлагаемого блока (батареи) конденсаторов на основе данных по счетам за электроэнергию в тех случаях, когда структура тарифных ставок соответствует (или аналогична) описываемой в п.2.1 данного раздела. Метод определяет минимальную компенсацию, требуемую для предотвращения штрафов за потребление избыточной реактивной энергии (кварч).

- Метод заключается в следующем:
- Подборка счетов за электроэнергию за 5 холодных месяцев (во Франции это период с ноября по март, включительно).
 - **Примечание:** в странах с тропическим климатом на летние месяцы может приходиться наибольшая нагрузка и максимальное потребление (из-за использования кондиционеров воздуха) и это необходимо учитывать при определении периодов повышенных тарифов. В данном примере рассматривается холодный период года во Франции.
 - Просмотр в счетах строк «потребленная реактивная энергия» и «кварч к оплате». Выбор счета с максимальной платой за реактивную мощность (кварч) (после проверки того, что это не было вызвано некоторой исключительной ситуацией).

Например: 15966 кварч в январе.

- Оценка общего времени рабочей нагрузки установки в течение этого месяца. Например, 220 часов (22 дня x 10 ч). Должны учитываться часы в течение наибольшей нагрузки и максимальных (пиковых) нагрузок энергосистемы. Такие данные содержатся в тарифной документации. Как правило, продолжительность периода максимальной нагрузки энергосистемы составляет 16 часов каждого дня (06.00 -22.00 или 07.00 – 23.00 в зависимости от региона). Вне этих периодов плата за реактивную энергию не подвергается значительному изменению.

- Необходимое значение компенсации в квар = кварч к оплате/число часов работы(1) = Qc

Как правило, мощность устанавливаемого блока расчетные приспособления (линейки) конденсаторов выбирается немного больше расчетного значения.

Некоторые изготовители прилагают к конденсаторам инструкции, предназначенные специально для такого рода расчетов согласно конкретным тарифам. Сопроводительная документация содержит рекомендации по пригодному оборудованию и схемам управления, а также информацию по ограничениям, налагаемым гармоническими напряжениями энергосистемы. Такие напряжения требуют конденсаторов с повышенными номинальными данными (теплоотдача, напряжение и ток) и/или использования индуктивной или фильтров для подавления гармоник.

5.4 Метод, основанный на снижении гарантированной максимальной полной мощности (кВА)

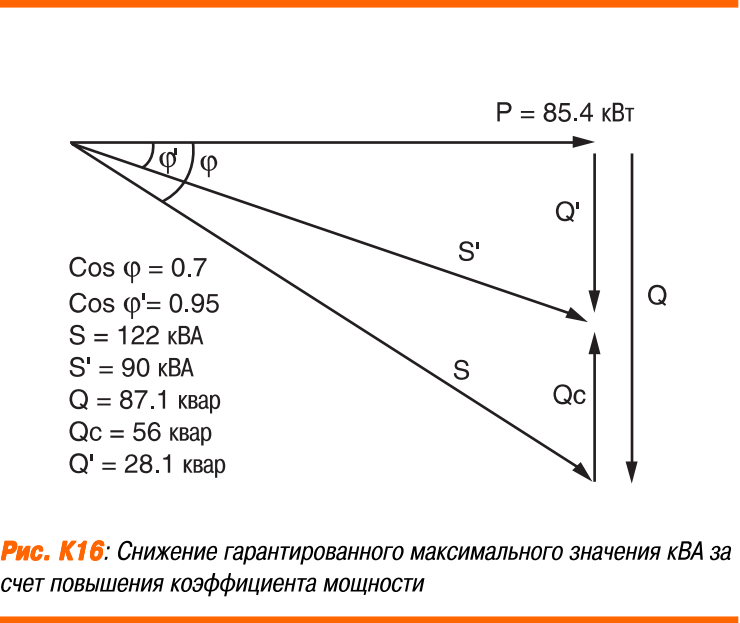
Очевидна выгода от снижения гарантированной потребляемой мощности (кВА) для потребителей, тарифы для которых основаны на постоянной плате за гарантированные кВА плюс доплата за потребленные кВтч. Диаграмма на Рис. K16 показывает, что по мере повышения коэффициента мощности уменьшается значение кВА при заданном значении кВт (P). Повышение коэффициента мощности нацелено (кроме других ранее указанных преимуществ) на снижение гарантированного уровня и предотвращение его превышения (т.е., предотвращение платы по повышенной ставке за кВА в течение периодов избыточного потребления и/или отключения энергоснабжения). Рис. K17 показывает значение квар компенсации на кВт нагрузки, требуемое для повышения значения коэффициента мощности.

Пример:

Супермаркет имеет гарантированную нагрузку 122 кВА при коэффициенте мощности 0,7 (отставание), т.е., активная мощность на нагрузку составляет 85,4 кВт. Договор с таким потребителем основан на поэтапных увеличениях гарантированной мощности (кВА) (шаг 6 кВА до 108 кВА и шаг 12 кВА выше этого значения, как это принято для многих типов двухставочных тарифов). В данном случае счет потребителю выставляется на основе 132 кВА. Согласно Рис. K15, установка блока конденсаторов 60 квар позволит повысить коэффициент мощности нагрузки с 0,7 до 0,95 (0,691 x 85,4 = 59 квар). Гарантированное значение кВА составляет

$\frac{85.4}{0.95} = 90 \text{ кВА}$, т.е., улучшение 30%.

Для 2-х ставочных тарифов, основанных, отчасти, на гарантированном значении потребляемой мощности кВА, Рис. K17 позволяет определить значение потребляемой мощности квар компенсации, требуемое для снижения гарантированного значения кВА, и предотвращения его превышения.



(1) В оплачиваемый период в течение часов оплачиваемой реактивной мощности в рассматриваемом выше случае:

$Qc = \frac{15,996 \text{ квар ч}}{220 \text{ ч}} = 73 \text{ квар ч}$

6 Компенсация на зажимах трансформатора

Установка блока (батареи) конденсаторов может устранять необходимость замены трансформатора в случае увеличения нагрузки

6.1 Компенсация для повышения располагаемой выходной активной мощности

Шаги, аналогичные принимаемым для снижения гарантированного максимального значения кВА, т.е., повышения коэффициента мощности нагрузки, как обсуждается в п.5.4, позволяют максимизировать располагаемую мощность трансформатора, т.е., подавать больше активной мощности.

В некоторых случаях данный метод позволяет избежать замены трансформатора на трансформатор большей мощности для обслуживания возросшей нагрузки. Рис. К17 показывает мощность (кВт) полностью нагруженных трансформаторов при различных коэффициентах мощности нагрузки, увеличение которых приводит к увеличению активной выходной мощности.

tg φ	cos φ	Номинальное значение кВА трансформаторов (в кВА)											
		100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
0.00	1	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
0.20	0.98	98	157	245	309	392	490	617	784	980	1225	1568	1960
0.29	0.96	96	154	240	302	384	480	605	768	960	1200	1536	1920
0.36	0.94	94	150	235	296	376	470	592	752	940	1175	1504	1880
0.43	0.92	92	147	230	290	368	460	580	736	920	1150	1472	1840
0.48	0.90	90	144	225	284	360	450	567	720	900	1125	1440	1800
0.54	0.88	88	141	220	277	352	440	554	704	880	1100	1408	1760
0.59	0.86	86	138	215	271	344	430	541	688	860	1075	1376	1720
0.65	0.84	84	134	210	265	336	420	529	672	840	1050	1344	1680
0.70	0.82	82	131	205	258	328	410	517	656	820	1025	1312	1640
0.75	0.80	80	128	200	252	320	400	504	640	800	1000	1280	1600
0.80	0.78	78	125	195	246	312	390	491	624	780	975	1248	1560
0.86	0.76	76	122	190	239	304	380	479	608	760	950	1216	1520
0.91	0.74	74	118	185	233	296	370	466	592	740	925	1184	1480
0.96	0.72	72	115	180	227	288	360	454	576	720	900	1152	1440
1.02	0.70	70	112	175	220	280	350	441	560	700	875	1120	1400

Рис. К17: Активная мощность полностью нагруженных трансформаторов при питании нагрузок при различных значениях коэффициента мощности

Пример: (см. Рис. К18)

Установка питается от трансформатора 630 кВА при нагрузке 450 кВт (P1) и средним

коэффициентом мощности 0,8 (отстающим). Полная мощность $S1 = \frac{450}{0.8} = 562 \text{ кВА}$

Соответствующая реактивная мощность

$Q1 = \sqrt{S1^2 - P1^2} = 337 \text{ квар}$

Расчетное увеличение нагрузки P2 = 100 кВт при коэффициенте мощности 0,7 (отставание).

Полная мощность $S2 = \frac{100}{0.7} = 143 \text{ кВА}$

Соответствующая реактивная мощность

$Q2 = \sqrt{S2^2 - P2^2} = 102 \text{ квар}$

Каково минимальное значение емкостной мощности квар, подлежащей установке для предотвращения замены трансформатора?

Теперь подаваемая общая мощность составляет:

$P = P1 + P2 = 550 \text{ кВт}$

Максимальная реактивная мощность трансформатора 630 кВА при подаче 550 кВт составляет:

$Qm = \sqrt{S^2 - P^2} \quad Qm = \sqrt{630^2 - 550^2} = 307 \text{ квар}$

Общая требуемая реактивная мощность до компенсации:

$Q1 + Q2 = 337 + 102 = 439 \text{ квар}$

Таким образом, минимальный значение устанавливаемого блока конденсаторов:

$Q_{\text{квар}} = 439 - 307 = 132 \text{ квар}$

Следует отметить, что данный расчет не учитывает пиковые нагрузки и их продолжительность.

Оптимальное возможное повышение, т.е., компенсация для получения коэффициента мощности 1, обеспечит резерв мощности трансформатора $630 - 550 = 80 \text{ кВт}$.

Номинальное значение блока конденсаторов должно составлять 439 квар.

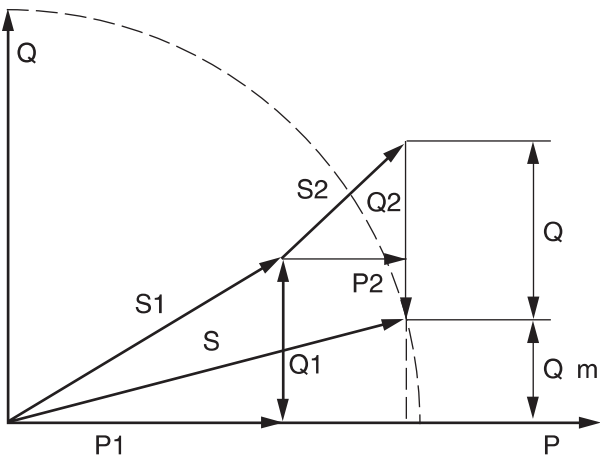


Рис. К18: Компенсация Q позволяет повысить нагрузку S2 без необходимости замены существующего трансформатора, выходная мощность которого ограничивается значением S

При измерении на стороне высокого напряжения трансформатора потери реактивной мощности в трансформаторе могут (в зависимости от тарифа) требовать компенсации

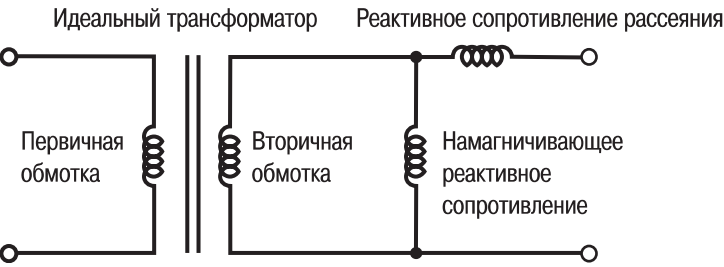


Рис. K19: Реактивные сопротивления трансформатора на фазу

Реактивная мощность, поглощаемая трансформатором, не может не приниматься во внимание, и может составлять (около) 5% от номинальной мощности трансформатора при его номинальной нагрузке. Компенсация может обеспечиваться блоком конденсаторов. В трансформаторах реактивная мощность поглощается обоими реактивными сопротивлениями (с параллельным соединением (намагничивающие) и последовательным соединением (магнитный поток рассеивания)). Полная компенсация может обеспечиваться блоком параллельно соединенных конденсаторов низкого напряжения

K16

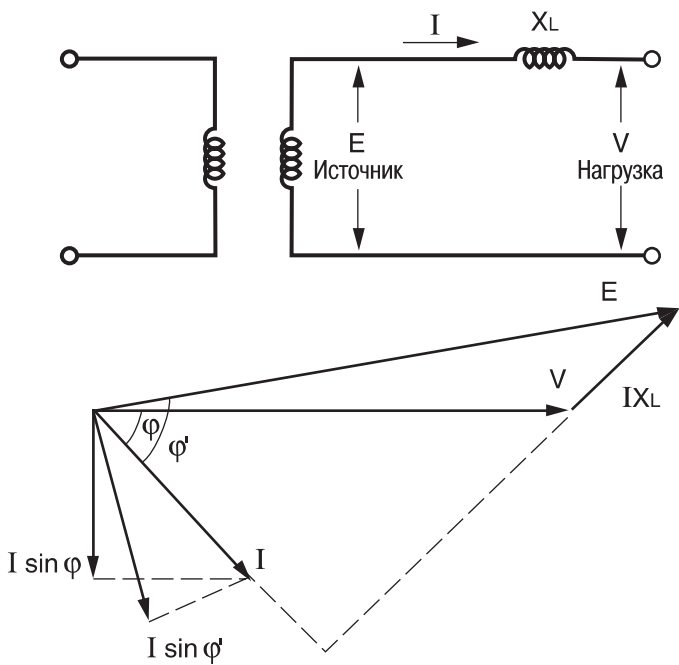


Рис. K20: Поглощение реактивной энергии последовательным индуктивным сопротивлением

6.2 Компенсация реактивной энергии, поглощаемой трансформатором

Индуктивные реактивные сопротивления трансформатора

Во всех предыдущих случаях рассматривались устройства с параллельным соединением, используемые в нормальных нагрузках, и блоки конденсаторов для повышения коэффициента мощности и т.д. Причина такого выбора состоит в том, что параллельно соединенная установка требует наибольшего количества реактивной энергии в энергосистемах; однако, реактивные сопротивления с последовательным соединением, такие как индуктивные реактивные сопротивления силовых линий и реактивные сопротивления рассеяния обмоток трансформатора и т.д., также поглощают реактивную энергию.

При измерениях на стороне высокого напряжения трансформатора потери реактивной энергии в трансформаторе могут (в зависимости от тарифа) требовать компенсации. Поскольку рассматриваются только потери реактивной энергии, трансформатор может быть представлен с помощью элементарной схемы (Рис. K19). Все значения реактивных сопротивлений приведены к вторичной обмотке трансформатора, на которой параллельное ответвление представляет путь намагничивающего тока. Намагничивающий ток остается практически постоянным (при около 1,8% номинального тока) при изменении нагрузки от нуля до номинальной в нормальном режиме, т.е., при постоянном напряжении на первичной обмотке. Поэтому, на стороне высокого или низкого напряжения может устанавливаться постоянный (нерегулируемый) шунтирующий конденсатор для компенсации поглощаемой реактивной энергии.

Поглощение реактивной мощности (XL) в последовательном соединении (магнитный поток рассеяния) реактивных сопротивлений

Простая иллюстрация этого явления приводится на векторной диаграмме (Рис. K20).

Реактивная составляющая тока через нагрузку = $I \sin \varphi$, так что, $Q_L = VI \sin \varphi$.

Реактивная составляющая тока от источника = $I \sin \varphi'$ так что,

$$Q_E = EI \sin \varphi'$$

Где V и E выражены в кВ.

Можно видеть, что $E > V$ и $\sin \varphi' > \sin \varphi$.

Разница между $EI \sin \varphi'$ и $VI \sin \varphi$ XL дает значение квар на фазу (поглощение XL).

Можно показать, что такое значение квар равно $I^2 X_L$ (аналог потерь активной мощности (кВт) $I^2 R$ - потери в последовательно соединенных элементах).

Из формулы $I^2 X_L$ легко вывести поглощаемое значение квар при любом значении нагрузки для заданного трансформатора следующим образом:

Если используются значения в относительных единицах (вместо значений в процентах), можно выполнить прямое умножение I на XL.

Пример:

Трансформатор 630 кВА с реактивной составляющей напряжения короткого замыкания 4% работает при полной нагрузке.

Каковы его потери реактивной мощности (квар)?

$$4\% = 0,04 \text{ pu } I_{pu} = 1$$

$$\text{Потери} = I^2 X_L = 12 \times 0,04 \text{ pu квар}$$

Где 1 pu = 630 кВА

3-хфазные потери реактивной мощности (квар) $630 \times 0,04 = 25,2$ квар (или, просто, 4% от 630 кВА).

При половине нагрузки, т.е., $I = 0,5$ pu потери составят $0,5^2 \times 0,04 = 0,01 \text{ pu} = 630 \times 0,01 = 6,3$ квар и т.д.

Данный пример и векторная диаграмма (Рис. K22) показывают, что:

- Коэффициент мощности на стороне первичной обмотки нагруженного трансформатора отличается (нормально ниже) от коэффициента на вторичной обмотке (из-за поглощения реактивной энергии (квар))
- Потери реактивной энергии (квар) при полной нагрузке из-за реактивного сопротивления рассеяния равно реактивному сопротивлению трансформатора в процентах (4% - потери реактивной мощности (квар), равные 4% номинального значения кВА трансформатора)
- Потери реактивной мощности (квар) из-за реактивного сопротивления утечки изменяются согласно квадрату тока (или нагрузки кВА)

6 Компенсация на зажимах трансформатора

Для определения общих потерь реактивной энергии (квар) трансформатора необходимо добавить постоянные потери в цепи намагничивающего тока (прибл. 1,8% номинального значения кВА трансформатора) к указанным «последовательным» потерям. **Рис. K21** показывает потери реактивной мощности (квар) при холостом ходе и при полной нагрузке для типового распределительного трансформатора. В принципе, последовательно включенные индуктивные сопротивления могут компенсироваться постоянно включенными нерегулируемыми конденсаторами (как в общем случае протяженных высоковольтных линий передачи). Однако, такая схема сложна для выполнения, тем более что при уровнях напряжения, рассматриваемых в данном руководстве, всегда применима параллельная компенсация.

В случае измерений на стороне высокого напряжения достаточно повысить коэффициент мощности до значения, при котором трансформатор плюс потребление реактивной мощности нагрузки ниже уровня, при котором взимается дополнительная плата за электроэнергию. Этот уровень зависит от тарифа, но часто соответствует значению $\text{tg } \varphi \text{ } 0,31$ ($\cos \varphi \text{ } 0,955$).

Номинальная мощность (кВА)	Реактивная мощность (квар), подлежащая компенсации	
	Без нагрузки	Полная нагрузка
100	2.5	6.1
160	3.7	9.6
250	5.3	14.7
315	6.3	18.4
400	7.6	22.9
500	9.5	28.7
630	11.3	35.7
800	20	54.5
1000	23.9	72.4
1250	27.4	94.5
1600	31.9	126
2000	37.8	176

Рис. K21: Потребление реактивной мощности для распределительных трансформаторов с первичными обмотками 20 кВ

K17

Теоретически, потери реактивной энергии (квар) в трансформаторе могут быть полностью компенсированы путем регулирования блока конденсаторов таким образом, чтобы создать небольшой избыток реактивной мощности конденсаторов (Q_C) по сравнению с реактивной мощностью нагрузки (Q_L) ($Q_C - Q_L > 0$). При этом коэффициент мощности нагрузки ($\cos \varphi$) увеличится и будет опережающим. В таком случае вся реактивная мощность (квар) трансформатора подается от блока конденсаторов, а ввод на сторону высокого напряжения трансформатора имеет коэффициент мощности 1, как показано на **Рис. K22**.

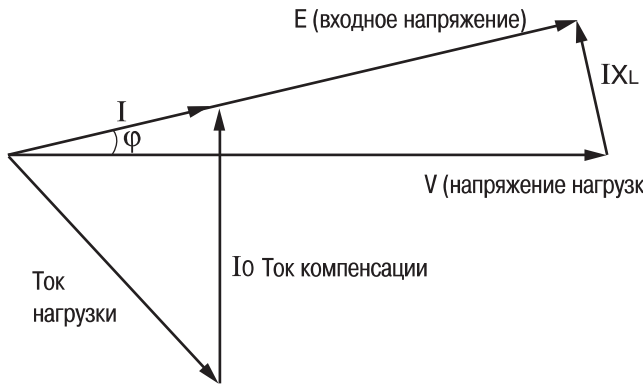


Рис. K22: Перекомпенсация нагрузки до полной компенсации потерь реактивной энергии в трансформаторе

С практической точки зрения, компенсация реактивной энергии (квар), поглощаемой трансформатором, осуществляется конденсаторами, главным образом предназначенными для повышения коэффициента мощности нагрузки (централизованно, секционированно или индивидуально). В отличие от большинства других элементов, поглощающих реактивную энергию, поглощение трансформатором (т.е., из-за реактивного сопротивления рассеяния) значительно изменяется при изменении уровня нагрузки, так что, если для трансформатора применяется индивидуальная компенсация, то средний уровень нагрузки должен приниматься в качестве гарантированного.

Однако, такое поглощение реактивной энергии составляет, как правило, относительно небольшую часть общей реактивной мощности установки, и поэтому рассогласование компенсации с временным изменением нагрузки не представляет проблемы.

Рис. K21 показывает типовые значения потерь реактивной энергии для намагничивающей цепи (строки «квар без нагрузки»), а также общие потери при полной нагрузке для стандартных распределительных трансформаторов, при питании 20 кВ (с учетом потерь из-за реактивного сопротивления рассеяния).

Индивидуальная компенсация для двигателя рекомендуется для двигателей большой мощности (КВА) по отношению к заявленной мощности установки

7.1 Подсоединение блока конденсаторов и уставки защиты

Общие замечания
Из-за малого потребления активной мощности коэффициент мощности двигателя крайне низкий при холостом ходе или при малой нагрузке. Реактивный ток двигателя остается практически постоянным при всех нагрузках, так что, на ряд ненагруженных двигателей приходится потребление реактивной мощности, которое лишь негативно сказывается на установке по причинам, описанным в предыдущих разделах.
Поэтому, два хороших правила состоят в том, что ненагруженные двигатели следует выключать, а номинальные значения двигателей не должны завышаться (поскольку это лишь снизит их нагрузку).

Соединение

Блок конденсаторов должен подсоединяться непосредственно к зажимам двигателя.

Специальные двигатели

Не рекомендуется применять компенсации для специальных двигателей (шаговые, реверсивные и т.д.).

Влияние на уставки защиты

После применения компенсации для двигателя ток блока двигатель-конденсатор станет меньше, чем до компенсации, при том же режиме нагрузки двигателя. Это вызвано тем, что значительная часть реактивной составляющей тока двигателя подается от конденсатора, как показано на Рис. K23.

Если максимально токовая защита двигателя расположена до соединения двигателя и конденсатора (это всегда так в случае подсоединения конденсаторов к зажимам), уставки реле защиты должны уменьшаться на отношение:

$$\frac{\cos \varphi \text{ до компенсации}}{\cos \varphi \text{ после компенсации}}$$

Для двигателей с компенсацией в соответствии со значениями квар, указываемыми на Рис. K24 (максимальные значения, рекомендуемые для предотвращения самовозбуждения стандартных асинхронных двигателей, как обсуждается в п.7.2), указанное выше отношение будет иметь значение, аналогичное указываемому для соответствующих оборотов на Рис. K25.

K18

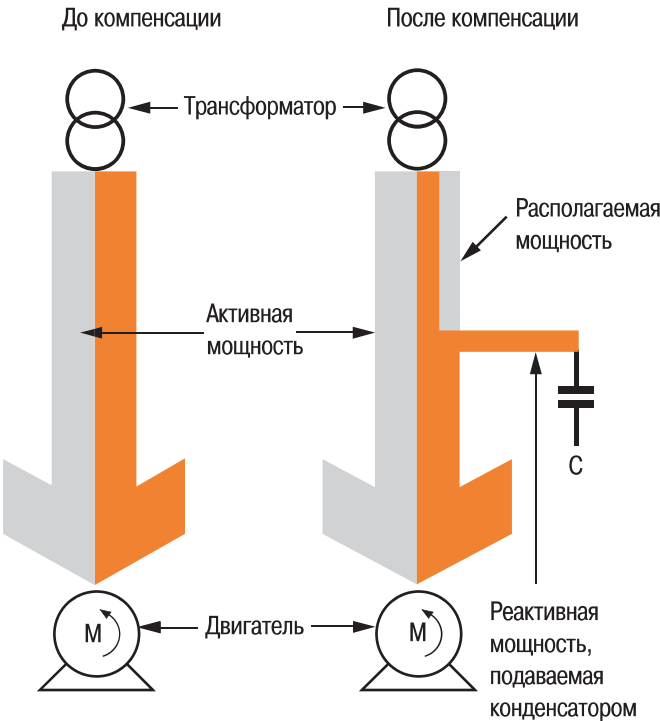


Рис. K23: До компенсации трансформатор подает всю реактивную мощность; после компенсации конденсатор подает большую часть реактивной мощности

3-х фазные двигатели 230/400В					
Номинальная мощность		Устанавливаемая мощность квар			
		Скорость вращения (об/мин)			
кВт	л.с.	3000	1500	1000	750
22	30	6	8	9	10
30	40	7.5	10	11	12.5
37	50	9	11	12.5	16
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	340	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	482	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

Рис. K24: Максимальное значение квар компенсации коэффициента мощности, применяемое на зажимах двигателя без риска самовозбуждения

Обороты, об/мин	Коэффициент уменьшения
750	0.88
1000	0.90
1500	0.91
3000	0.93

Рис. K25: Коэффициент уменьшения для максимально токовой защиты после компенсации

Если блок конденсаторов подсоединяется к зажимам асинхронного двигателя, важно проверить что его номинальное значение меньше значения, при котором возможно самовозбуждение

7.2 Методы предотвращения самовозбуждения асинхронного двигателя

Двигатель с высокоинерционной нагрузкой будет продолжать вращаться (если специально не затормаживается) после выключения его питания.

«Магнитная инерция» цепи ротора означает создание ЭДС в обмотке статора на короткий период времени после выключения, которая уменьшиться до нуля через 1 или 2 периода в случае двигателя без компенсации.

Однако, конденсаторы компенсации коэффициента мощности составляют 3-х фазную «безваттную» нагрузку для такой затухающей ЭДС, которая вызывает емкостные токи в обмотке статора. Такие токи в статоре создают вращающееся магнитное поле в роторе, которое действует точно по той же оси и в том же направлении, что и затухающее электромагнитное поле.

Как следствие, поток ротора увеличивается; токи статора увеличиваются; и напряжение на зажимах двигателя повышается; иногда до опасно высокого уровня. Это явление известно как самовозбуждение и является одной из причин того, почему генераторы переменного тока, как правило, не работают при опережающих коэффициентах мощности, т.е., имеется тенденция к спонтанному (и неконтролируемому) самовозбуждению.

Примечания:

1. Характеристики двигателя, приводимого в движение инерцией нагрузки, не являются строго идентичными его характеристикам холостого хода. Однако, данное предположение является достаточно точным с практической точки зрения.
2. В двигателе, действующем в качестве генератора, циркулирующие токи являются в основном реактивными, так что, эффект торможения (замедления) двигателя вызван главным образом только нагрузкой, представленной его охлаждающим вентилятором.
3. Ток (угол отставания почти 90°), потребляемый от источника питания ненагруженным двигателем в нормальных условиях, и ток (угол опережения почти 90°), подаваемый на конденсаторы двигателем, выступающим в качестве генератора, имеют одинаковое фазовое соотношение с напряжением на зажимах. Именно поэтому две характеристики могут налагаться на один график.

Для предотвращения самовозбуждения, как описывается выше, номинальная мощность (квар) блока конденсаторов должна ограничиваться следующим максимальным значением:

$Q_c \leq 0.9 \times I_0 \times U_n \times \sqrt{3}$, где I_0 = ток холостого хода двигателя и U_n = межфазное номинальное напряжение двигателя (в кВ). На **Рис. K26** приводятся значения Q_c , соответствующие данному критерию.

Пример:

3-хфазный двигатель, 75 кВт, 3000 об/мин, 400В, может иметь блок конденсаторов не выше 17 квар согласно **Рис. K24**. Табличные значения, как правило, слишком малы для соответствующей компенсации двигателя до нормально требуемого уровня $\cos \phi$ (**Рис. K27**). Однако, дополнительная компенсация может применяться для системы, например, общий блок конденсаторов, установленный для централизованной компенсации ряда небольших единиц оборудования.

Высокоинерционные двигатели и/или нагрузки

В любой установке с высокоинерционными нагрузками, приводимыми в действие двигателями, выключатели или контакторы, управляющие такими двигателями, должны быстро выключаться в случае полной потери электропитания.

Если не принять такой меры предосторожности, высока вероятность возникновения крайне высоких напряжений (из-за самовозбуждения), поскольку все другие блоки конденсаторов системы расположены параллельно с блоками конденсаторов высокоинерционных двигателей.

Поэтому, схема защиты таких двигателей должна включать реле отключения по максимальному напряжению вместе с реле контроля обратной мощности (двигатель подает питание на остальное оборудование до рассеяния полученной инерционной энергии).

Если блок конденсаторов, связанный с высокоинерционным двигателем, больше, чем рекомендованный на Рис. K24, он должен управляться отдельно с помощью выключателя или контактора, который осуществляет выключение вместе с главным выключателем или контактором двигателя, как показано на Рис. K26.

Включение главного контактора осуществляется после включения конденсаторов.

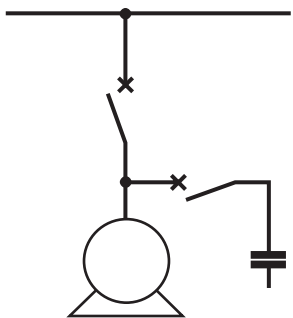
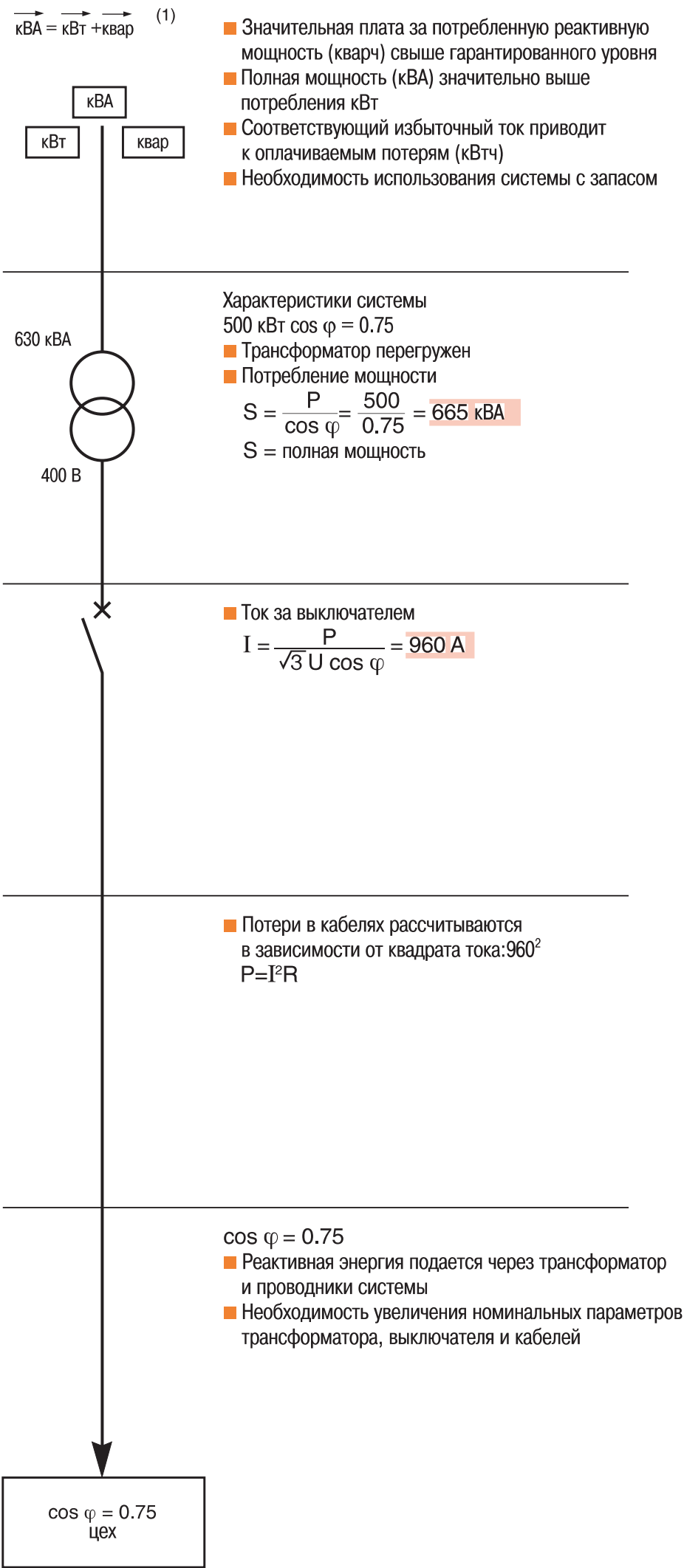


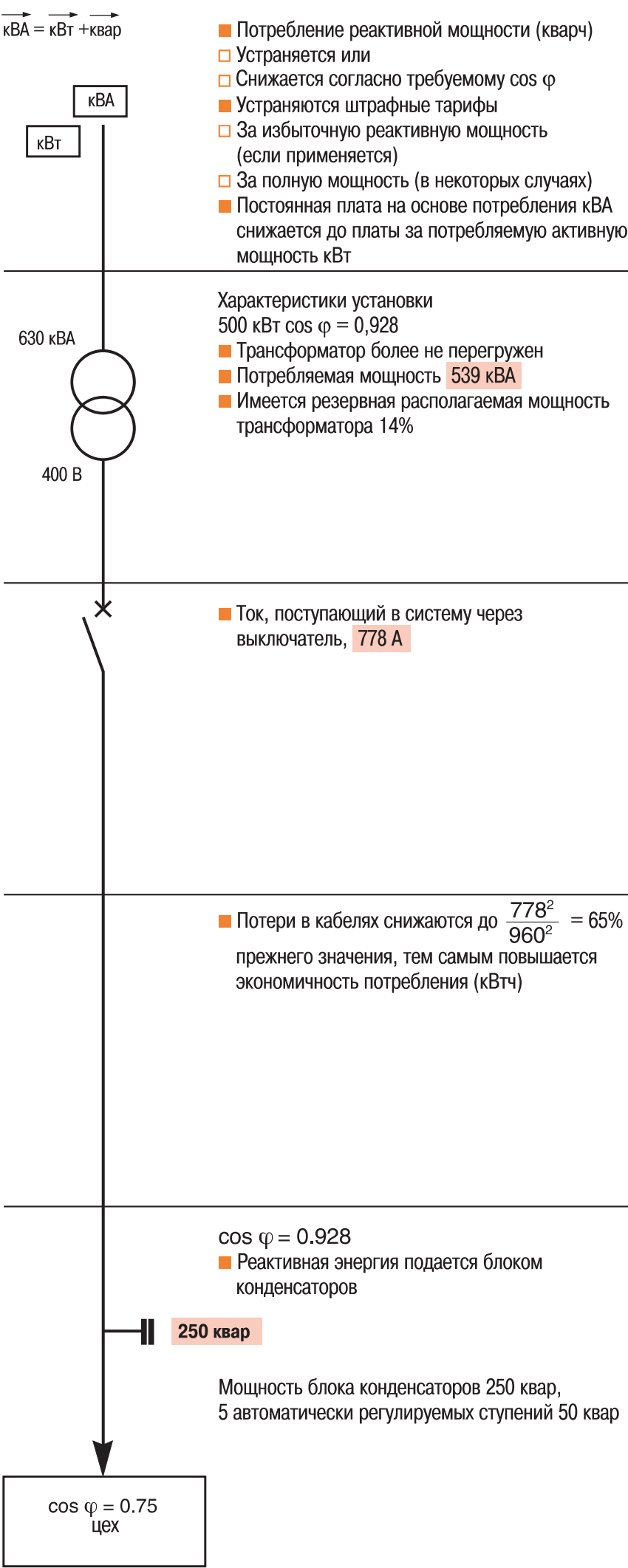
Рис. K27: Подсоединение блока конденсаторов к двигателю

8 Пример установки до и после компенсации коэффициента мощности

Установка до компенсации коэффициента мощности



Установка после компенсации коэффициента мощности



Примечание: Фактически, $\cos \varphi$ цеха остается равным 0,75, но $\cos \varphi$ всей установки до блока конденсаторов на низковольтных терминалах трансформатора, - 0,928. Как указывается в п.6.2, $\cos \varphi$ на стороне высокого напряжения трансформатора немного ниже (2) из-за потерь реактивной мощности в трансформаторе.

Рис. К26: Техничко-экономическое сравнение установки до и после компенсации коэффициента мощности

(1) Стрелки указывают векторные величины
(2) Тем более в случае до компенсации

9 Влияние гармоник

9.1 Проблемы, связанные с гармоническими составляющими энергосистемы

Оборудование, включающее силовые электронные компоненты (частотное регулирование двигателей, тиристорные выпрямители и т.д.) значительно увеличивает проблемы вызываемые гармоническими составляющими в системе электропитания.

Гармоники создают проблемы с момента зарождения промышленности и вызваны нелинейными сопротивлениями намагничивания трансформаторов, реакторов, балластными сопротивлениями резонансных ламп и т.д.

Гармоники симметричных 3-х фазных систем являются, как правило, нечетными: 3-я, 5-я, 7-я, 9-я..., и их величина уменьшается с увеличением порядкового номера. Несколько устройств могут быть использованы различными путями для снижения конкретных гармоник до пренебрежимо малых значений — полное устранение невозможно. В данном разделе рекомендуются практические средства снижения влияния гармоник, особенно для блоков конденсаторов.

Конденсаторы особо чувствительны к гармоническим составляющим питающего напряжения в силу того, что емкостное реактивное сопротивление уменьшается при увеличении частоты. На практике это означает, что лишь относительно малый процент гармонических напряжений может вызывать протекание значительного тока в цепи конденсаторов.

Присутствие гармоник вызывает искажение (нормально синусоидальной) формы волны напряжения или тока; чем выше содержание гармоник, тем больше степень искажения.

Если собственная резонансная частота комбинации «блок конденсаторов/реактивное сопротивление энергосистемы» близка к частоте конкретной гармоники, возникает частичный резонанс с повышенными значениями напряжения и тока при частоте гармоники. В данном случае повышенный ток вызовет перегрев конденсатора с постепенным ухудшением диэлектрика, которое в конечном итоге приводит к выходу из строя.

Имеется несколько решений этих проблем с применением следующих средств:

- Параллельно подсоединенный фильтр и/или реакторы для подавления гармоник или
- Активные силовые фильтры или
- Гибридные фильтры

Влияние гармоник учитывается, главным образом, путем увеличения номинальной мощности конденсаторов и последовательного подсоединения включения реакторов для подавления гармоник

9.2 Возможные решения

Пассивный фильтр (см. Рис. K28)

Противодействие гармоникам

Присутствие гармоник в питающем напряжении приводит к ненормально высоким уровням тока через конденсаторы. Поправка на это делается при расчете с учетом среднеквадратичного значения тока, которое в 1,3 раза больше номинального тока. Все последовательные элементы, такие как соединения, плавкие предохранители, переключатели и т.д., связанные с конденсаторами, рассчитываются с аналогичным увеличением (в 1,3-1,5 раза больше номинального значения).

Искажение гармониками формы волны напряжения часто выражается в появлении «пиков» и увеличении амплитуды нормальной синусоидальной волны. Такая возможность вместе с другими условиями перенапряжения, которые могут возникать при противодействии резонансным эффектам, как описывается ниже, учитываются путем увеличения уровня изоляции выше уровня изоляции «стандартных» конденсаторов. Во многих случаях эти две меры достаточны для обеспечения удовлетворительной работы.

Противодействие резонансным эффектам

Конденсаторы являются линейными реактивными устройствами и, как следствие, не генерируют гармоник. Однако, установка конденсаторов в энергосистеме (в которой сопротивления являются преимущественно индуктивными) может приводить к суммарному или частичному резонансу при одной из гармонических частот.

Порядок гармоники h_0 наименьшей резонансной частоты между индуктивностью системы и блоком конденсаторов определяется по формуле

$$h_0 = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

где

S_{sc} = уровень мощности (кВА) КЗ системы в точке соединения конденсатора

Q = номинальное значение мощности блока конденсаторов в квар; и h_0 = порядок гармоники

наименьшей резонансной частоты f_0 , т.е. $\frac{f_0}{50}$ для системы 50 Гц или $\frac{f_0}{60}$ для системы 60 Гц.

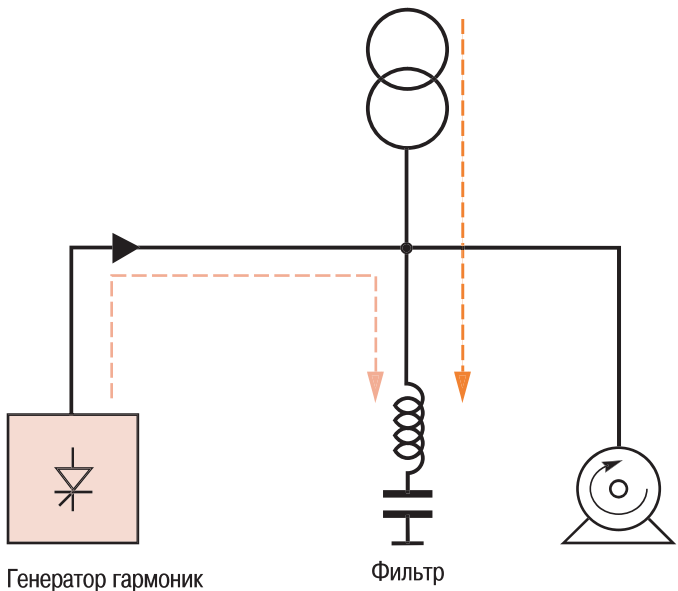


Рис. K28: Принцип работы пассивного фильтра

Например, $h_o = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$ может быть давать значение 2,93, которое показывает, что наименьшая частота резонанса комбинации «конденсатор/индуктивность системы» близка к частоте гармоники 3-го порядка системы.

Из соотношения $h_o = \frac{f_o}{50}$ следует, что $f_o = 50 h_o = 50 \times 2,93 = 146,5$ Гц.

Чем ближе собственная частота резонанса приближается к частоте одной из гармоник, присутствующей в системе, тем больше (нежелательный) эффект. В вышеприведенном примере с большой вероятностью возникнут условия резонанса с гармонической составляющей 3-го порядка искаженной волны.

В таких случаях необходимо принять меры для изменения собственной частоты резонанса на значение, при котором не будет резонанса с какой-либо присутствующей гармоникой. Это достигается путем подсоединения последовательно с конденсатором катушки индуктивности для подавления гармоник.

В системах 50 Гц такие реакторы часто настраиваются на доведение собственной частоты резонанса комбинации, т.е., блок конденсаторов + реакторы, до 190 Гц. Реакторы настраиваются на 228 Гц для системы 60 Гц. Такие частоты соответствуют значению h_o 3,8 для системы 50 Гц, т.е., приблизительно посередине между гармониками 3-го и 5-го порядка.

В такой схеме присутствие реактора увеличивает ток основной частоты (50 Гц или 60 Гц) на небольшую величину (7-8%), а также напряжение через конденсатор в том же соотношении.

Эта характеристика учитывается, например, при использовании конденсаторов, рассчитанных на 440В для систем 400В.

Активный фильтр (см. Рис. K29)

Активные фильтры основаны на использовании силовой электроники. Как правило, они устанавливаются параллельно с нелинейной нагрузкой.

Активные фильтры анализируют гармоники, вводимые нагрузкой, и затем подают ток такой же гармоники на нагрузку с соответствующей фазой. В результате гармонические токи полностью нейтрализуются. Это означает, что они не могут больше проходить вверх к источнику питания и больше не выдаются источником.

Основное преимущество активных фильтров состоит в том, что они гарантируют эффективную компенсацию гармоник даже при изменении установки. Они исключительно просты в использовании в силу следующих характеристик:

- Автоматическая настройка конфигурации под гармонические нагрузки независимо от порядка гармоник
- Устранение рисков перегрузки
- Совместимость с электрогенераторами
- Подсоединение в любой точке электрической сети
- Несколько фильтров могут использоваться в одной и той же установке для повышения эффективности устранения гармоник (например, в случае установки новой машины)

Кроме того, активные фильтры могут также обеспечить компенсацию коэффициента мощности.

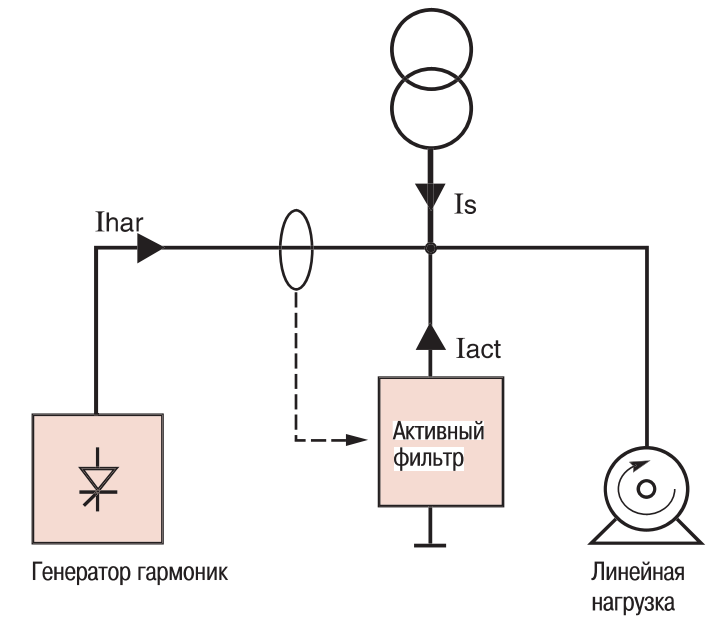


Рис. K29: Принцип работы активного фильтра

K22

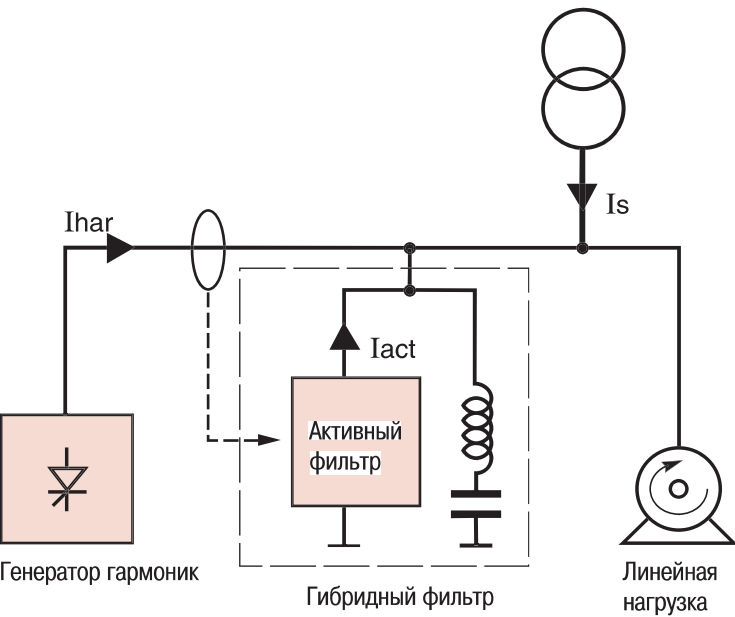


Рис. K30: Принцип работы гибридного фильтра

Гибридный фильтр (см. Рис. K30)

Данный тип фильтра объединяет преимущества пассивного и активного фильтра. Одна частота может отфильтровываться пассивным фильтром, а все другие частоты — активным фильтром.

	Пассив. фильтр	Активный фильтр	Гибрид. фильтр
Область применения	Промышл.	Третьего порядка	Промышл.
при общей мощности нелинейных нагрузок (частотно регулируемый период, ИБП, выпрямитель...)	Свыше 200 кВА	Менее 200 кВА	Свыше 200 кВА
Компенсация коэффиц. мощности		Нет	
Подавление гармонических искажений в напряжении для чувствительных нагрузок			
Подавление гармонических искажений в токе для предотвращения перегрузки кабелей			
Обеспечение строгих пределов устранения гармоник	Нет		

Рис. K31: Выбор наиболее пригодной технологии в зависимости от области применения

9.3 Выбор оптимального решения

Рис. K31 ниже показывает критерии, которые могут учитываться при выборе наиболее пригодной технологии в зависимости от области применения.

Для пассивного фильтра выбор делается на основе следующих параметров:

- Gh = сумма номинальных значений кВА всех устройств, генерирующих гармоники (статические преобразователи, инвертеры, регуляторы скорости и т.д.), подсоединенных к шинам, от которых питается блок конденсаторов. Если номинальные значения некоторых из таких устройств указываются только в кВт, принимается средний коэффициент мощности 0,7 для получения номинальных значений кВА.

■ Ssc = мощность трехфазного короткого замыкания в кВА на зажимах блока конденсаторов

■ Sn = сумма номинальных значений кВА всех трансформаторов, питающих (т.е., непосредственно подключенных к сборным шинам).

Если ряд трансформаторов работает в параллельном режиме, вывод одного или нескольких из них приводит к значительному изменению значений Ssc и Sn. На основе этих параметров выбор конденсатора, обеспечивающего допустимый уровень работы при гармонических напряжениях и токах системы, может делаться с помощью Рис. K32.

- Общее правило, применимое для трансформатора с любой номинальной мощности

$Gh \leq \frac{Ssc}{120}$	$\frac{Ssc}{120} \leq Gh \leq \frac{Ssc}{70}$	$Gh > \frac{Ssc}{70}$
Стандартные конденсаторы	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10% (кроме блоков 230В)	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10%, + реактор для подавления гармоник

- Упрощенное правило при номинальном значении трансформатора(ов) $Sn \leq 2\text{ MVA}$

$Gh \leq 0.15 Sn$	$0.15 Sn < Gh \leq 0.25 Sn$	$0.25 Sn < Gh \leq 0.60 Sn$	$Gh > 0.60 Sn$
Стандартные конденсаторы	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10% (кроме блоков 230В)	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10%, + реактор для подавления гармоник	Фильтр

Рис. K32: Выбор решений по ограничению гармоник, связанных с низковольтным блоком конденсаторов, питаемых через трансформатор

10.1 Емкостные элементы

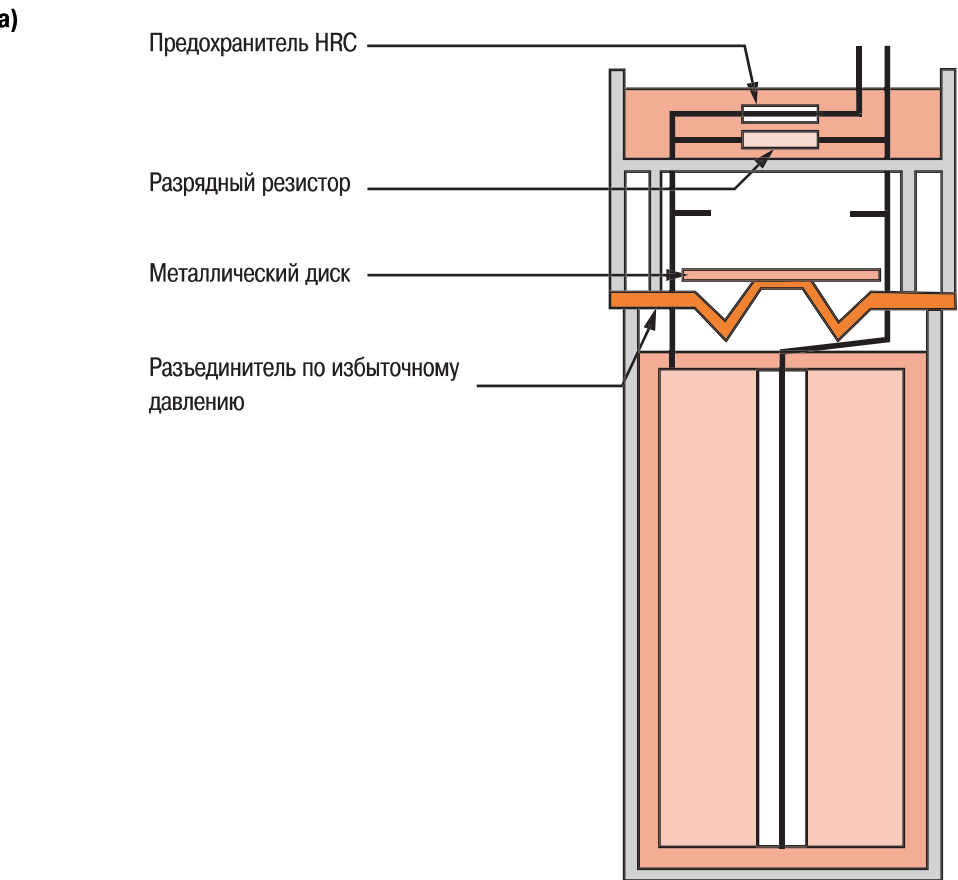
Технология
Конденсаторы являются сухими элементами (т.е., не пропитаны жидким диэлектриком), представляющими собой катушку двухслойной ленты из металлизированной самовосстанавливающейся полипропиленовой пленки. Они защищены высокоэффективной системой (разъединитель при превышении избыточного давления, используемый с плавким предохранителем с высокой отключающей способностью), которая отключает конденсатор при внутреннем повреждении.

Схема защиты работает следующим образом:

- Короткое замыкание через диэлектрик приводит к перегоранию плавкого предохранителя
- Иногда возникают уровни тока выше нормального, но недостаточные для перегорания предохранителя, например, из-за микроскопических пробоев в диэлектрической пленке. Такие «повреждения» часто ликвидируются из-за местного нагрева, вызванного током утечки («самовосстанавливающиеся» элементы)
- Если ток утечки сохраняется, повреждение может развиваться в короткое замыкание и плавкий предохранитель перегорит
- Газ, образующийся при испарении слоя металла в месте повреждения, постепенно повышает давление в пластиковом контейнере, что приводит к срабатыванию чувствительного к давлению устройства, которое закорачивает элемент, что приводит к перегоранию предохранителя.

Корпус конденсатора изготавливается из изоляционного материала, что обеспечивает его двойной изоляцией и устраняет необходимость заземления (см. **Рис. K33**).

K24



b)

Электротехнические характеристики			
Стандарт		Стандарты IEC 60439-1, NFC 54-104, VDE 0560 CSA, испытания UL	
Рабочий диапазон	Номинальное напряжение	400 V	
	Номинальная частота	50 Hz	
Допустимое отклонение емкости		- 5%, + 10%	
Диапазон температур (до 65 квар)	Максимальная температура	55 °C	
	Средняя температура за 24 ч	45 °C	
	Среднегодовая температура	35 °C	
	Минимальная температура	- 25 °C	
Уровень изоляции		Выдерживаемое напряжение, 50 Гц, 1 мин: 6 кВ Выдерживаемое импульс. напряжение 1.2/50: 25 кВ	
Допустимая перегрузка по току		Стандартный диапазон	Диапазон Н
		30%	50%
Допустимая перегрузка по напряжению		10%	20%

Рис. K33: Емкостный элемент, (a) поперечное сечение, (b) электротехнические характеристики

10.2 Выбор устройств защиты и управления и соединительных кабелей

Выбор соединительных кабелей и устройств защиты и управления зависит от токовой нагрузки.

Для конденсаторов ток зависит от следующих параметров:

- Приложенное напряжение и его гармоники
- Величина емкости

Номинальный ток батареи конденсаторов мощности Q (квар) и номинальным напряжением Un (кВ) определяется по формуле:

$$I_n = \frac{Q}{U_n \cdot \sqrt{3}}$$

Допустимый диапазон приложенного напряжения основной частоты плюс гармонические составляющие вместе с производственными допусками на фактическую емкость (для гарантированного номинального значения) может приводить к повышению до 50% выше расчетного значения тока. Прибл. 30% такого повышения вызвано повышениями напряжения, а 15% - производственными допусками, так что

$$1,3 \times 1,15 = 1,5 I_n$$

Все компоненты, проводящие ток конденсатора, должны быть рассчитаны на «наихудший режим» работы при температуре окружающей среды 50 C (максимум). При боле высоких температурах (выше 50 C) в корпусах и т.д., необходимо учесть уменьшение проводимости этих компонентов.

Защита

Выключатель выбирается так, чтобы обеспечить отключение с большой выдержкой времени при уставках по току равных:

- 1,36 x In для стандартного типа
- 1,50 x In для типа H
- 1,12 x In для типа SAH (настройка на 2,7 f)
- 1,19 x In для типа SAH (настройка на 3,8 f)
- 1,31 x In для типа SAH (настройка на 4,3 f)

Низкая уставка по времени (защита от короткого замыкания) должна быть нечувствительна к броску тока. Уставка составляет 10 x In для стандартного типа, типа H и типа SAH.

Пример 1

50 квар – 400В – 50 Гц – стандартный тип

$$I_n = \frac{50,000}{(400 \times 1.732)} = 72 \text{ A}$$

Высокая уставка по времени: 1,36 x 72 = 98А

Низкая уставка по времени: 10 x In = 720А

Пример 2

50 квар – 400В – 50 Гц – тип SAH (настройка на 4,3 f)

$$I_n = 72 \text{ A}$$

Высокая уставка по времени: 1,31 x 72 = 94А

Низкая уставка по времени: 10 x In = 720А

Соединительные кабели

На Рис. K34 приводятся минимальные значения площади поперечного сечения соединительного кабеля для конденсаторов Rectiphase.

Кабели управления

Минимальная площадь поперечного сечения таких кабелей – 1,5 мм² для 230В.

Мощность блока (квар)		Сечение медного кабеля (мм²)	Сечение алюминиевого кабеля (мм²)
230 В	400 В		
5	10	2.5	16
10	20	4	16
15	30	6	16
20	40	10	16
25	50	16	25
30	60	25	35
40	80	35	50
50	100	50	70
60	120	70	95
70	140	95	120
90-100	180	120	185
	200	150	240
120	240	185	2 x 95
150	250	240	2 x 120
	300	2 x 95	2 x 150
180-210	360	2 x 120	2 x 185
245	420	2 x 150	2 x 240
280	480	2 x 185	2 x 300
315	540	2 x 240	3 x 185
350	600	2 x 300	3 x 240
385	660	3 x 150	3 x 240
420	720	3 x 185	3 x 300

Рис. К34: Сечение кабелей, соединяющих блоки конденсаторов средней и большой мощности⁽¹⁾

K26

Для стороны вторичной обмотки трансформатора, рекомендуемая площадь поперечного сечения ≥ 2,5 мм².

Переходные напряжения

Переходные напряжения высокой частоты сопровождают переходные токи высокой частоты. Максимальный пик переходного напряжения никогда (при отсутствии гармоник установившегося режима) не превышает удвоенного максимального значения номинального напряжения при включении незаряженного конденсатора в работу.

Однако, если конденсатор уже заряжен в момент включения выключателя, переходное напряжение может достигать максимального значения, приблизительно в 3 раза превышающее нормальное номинальное пиковое значение.

Этот максимальный режим возникает при следующих условиях:

- Существующее напряжение на конденсаторе равно пиковому значению номинального напряжения и
- Контакты переключателя замыкаются в момент пикового питающего напряжения и
- Полярность питающего напряжения противоположна полярности заряженного конденсатора

В такой ситуации переходный ток принимает свое максимальное возможное значение, а именно: Вдвое больше своего максимума при включении предварительно незаряженного конденсатора, как указывается выше.

Для любых других значений напряжения и полярности на предварительно заряженном конденсаторе, переходные пики напряжения и тока будут меньше, чем указанные выше. В случае пикового номинального напряжения на конденсаторе, имеющего ту же полярность, что и питающее напряжение, и включения переключателя в момент пика питающего напряжения, не будет переходного напряжения или тока.

В случае автоматического переключения ступенчатых блоков конденсаторов, необходимо обеспечить, чтобы включаемая секция конденсаторов была полностью разряжена.

Время разрядки может уменьшаться, при необходимости, с помощью разрядных резисторов с пониженным значением сопротивления.

(1) Минимальное поперечное сечение недопустимое для любых факторов коррекции (режима установки, температуры и т.д.). Расчет сделан для однофазных кабелей проложенных открыто при температуре окружающей среды 30 °C.

Глава L

Обнаружение и устранение гармоник

Содержание		
1	Проблема: Зачем нужно обнаруживать и устранять гармоники?	L2
2	Стандарты	L3
3	Общие положения	L4
4	Основные последствия гармоник для электроустановок	L6
	4.1 Резонанс	L6
	4.2 Увеличенные потери	L6
	4.3 Перегрузки оборудования	L7
	4.4 Возмущения, влияющие на чувствительные нагрузки	L9
	4.5 Экономические последствия	L10
5	Основные показатели гармонических искажений и принципы измерений	L11
	5.1 Коэффициент мощности	L11
	5.2 Пик-фактор (коэффициент амплитуды)	L11
	5.3 Параметры мощности и гармоники	L11
	5.4 Гармонический спектр и гармоническое искажение	L12
	5.5 Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD)	L12
	5.6 Использование различных показателей	L13
6	Измерение показателей	L14
	6.1 Устройства, используемые для измерения показателей	L14
	6.2 Процедуры гармонического анализа распределительных цепей	L14
	6.3 Тщательный контроль гармоник	L15
7	Устройства обнаружения	L16
8	Способы ослабления гармоник	L17
	8.1 Основные рекомендации (решения)	L17
	8.2 Фильтрация гармоник	L18
	8.3 Метод	L20
	8.4 Конкретные модели фильтров	L20

1 Проблема: Зачем нужно обнаруживать и устранять гармоники?

Возмущения, вызываемые гармониками

Гармоники, протекающие по распределительным сетям, вызывают снижение качества электрической энергии, что может иметь ряд негативных последствий:

- перегрузки в распределительных сетях из-за увеличения действующего значения тока
- перегрузки в нулевых (нейтральных) проводниках из-за суммирования токов высших гармоник, кратных трем, которые генерируются однофазными нагрузками
- перегрузки, вибрация и преждевременное старение генераторов, трансформаторов и электродвигателей, а также повышенный шум трансформаторов
- перегрузки и преждевременное старение конденсаторов для повышения коэффициента мощности
- искажение формы питающего напряжения, которое может повлиять на «чувствительные» нагрузки
- помехи в сетях связи и телефонных линиях

Экономические последствия гармонических возмущений

Гармоники имеют значительные экономические последствия:

- преждевременное старение оборудования означает необходимость его замены раньше запланированного срока, если в нем с самого начала не был предусмотрен запас мощности
- перегрузки в распределительной сети могут привести к более высоким уровням потребления энергии и увеличению потерь
- Искажение формы кривой тока способно вызывать ложное срабатывание автоматических выключателей, что может приводить к остановке производственного процесса.

Наращение степени серьезности последствий

Всего десять лет назад гармоники еще не считались реальной проблемой, поскольку их влияние на распределительные сети было в целом незначительным. Однако массовое внедрение силовой электроники в различные виды оборудования привело к тому, что наличие гармоник стало серьезно сказываться во всех секторах экономической деятельности. Кроме того, оборудование, порождающее такие гармоники, часто является критически важным для компании или организации.

Какие гармоники нужно измерять и устранять?

Чаше всего в трехфазных распределительных сетях встречаются гармоники нечётного порядка. С увеличением частоты амплитуды гармоник обычно снижаются. Гармоники выше 50-ого порядка имеют незначительную амплитуду, и дальнейшие измерения не имеют смысла. Достаточно точные результаты измерений получаются при измерении гармоник до 30-ого порядка.

Энергоснабжающие компании контролируют содержание 3-ей, 5-ой, 7-ой, 11-ой и 13-ой гармоник в питающих сетях. В целом, достаточным является устранение гармоник низших порядков (до 13-ого). При более тщательном контроле учитываются гармоники до 25-ой включительно.

Вопросы гармонических искажений в электрических сетях регламентируются различными стандартами и нормами:

- стандартами обеспечения совместимости распределительных сетей
- нормативными требованиями к оборудованию, порождающему гармоники
- рекомендациями энергоснабжающих компаний, применимыми к электроустановкам

В настоящее время действует тройная система стандартов и норм, направленная на быстрое ослабление влияния гармоник и основанная на перечисленных ниже документах.

Стандарты, регламентирующие совместимость распределительных сетей и изделий:

Эти стандарты устанавливают необходимую совместимость распределительных сетей и электрооборудование:

- гармоники, порождаемые каким-либо устройством, не должны создавать в распределительной сети возмущений выше определенного уровня
- каждое устройство должно сохранять работоспособность при наличии в питающей сети возмущений определенного уровня
- стандарт IEC 61000-2-2 для низковольтных систем энергоснабжения общего применения
- стандарт IEC 61000-2-4 для промышленных электроустановок низкого и среднего напряжения

Стандарты, регламентирующие качество электрической энергии, обеспечиваемой распределительными сетями

- стандарт EN 50160 устанавливает характеристики электроэнергии, подаваемой распределительными сетями общего назначения
- стандарт IEEE 519 представляет общий подход энергоснабжающих компаний и потребителей к ограничению влияния нелинейных нагрузок. Энергоснабжающие компании стимулируют принятие превентивных мер, призванных повысить качество электроэнергии, снизить рост температуры и уменьшить влияние на коэффициенты мощности. Они намерены в будущем штрафовать потребителей, являющихся основными источниками гармоник в питающей сети.

Стандарты, устанавливающие требования к оборудованию

- стандарт IEC 61000-3-2 или EN 61000-3-2 для низковольтного оборудования с номинальным током менее 16 А
- стандарт IEC 61000-3-12 или EN 61000-3-4 для низковольтного оборудования с номинальным током более 16 А и менее 75 А

Максимально допустимые уровни гармоник

Проведенные международные исследования позволили собрать данные и оценить типичное содержание гармоник в распределительных электрических сетях. В таблице на **рис. L1** представлены уровни, которые, по мнению большинства энергоснабжающих компаний, не должны превышать.

Нечетные гармоники, некратные трем				Нечетные гармоники, кратные трем				Четные гармоники			
Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН	Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН	Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН
5	6	6	2	3	5	2.5	1.5	2	2	1.5	1.5
7	5	5	2	9	1.5	1.5	1	4	1	1	1
11	3.5	3.5	1.5	15	0.3	0.3	0.3	6	0.5	0.5	0.5
13	3	3	1.5	21	0.2	0.2	0.2	8	0.5	0.2	0.2
17	2	2	1	> 21	0.2	0.2	0.2	10	0.5	0.2	0.2
19	1.5	1.5	1					12	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1	0.7					> 12	0.2	0.2	0.2
25	1.5	1	0.7								
> 25	0.2 + 25/h	0.2 + 25/h	0.1 + 25/h								

Рис. L1. Максимально допустимые уровни гармоник

Присутствие гармоник говорит об искаженной форме тока или напряжения. Искажение же формы тока или напряжения означает наличие возмущений в распределительной сети и ухудшение качества поставляемой электроэнергии.

Источниками гармоник токов являются нелинейные нагрузки, подсоединенные к распределительной сети. Протекание гармоник токов по сети, имеющей некоторое полное сопротивление, приводит к появлению гармоник напряжений и соответственно к искажению формы питающего напряжения.

Происхождение гармоник

Устройства и системы, порождающие гармоники, имеются во всех секторах экономики, т.е. в промышленности, коммерческом секторе и жилищном хозяйстве. Гармоники порождаются нелинейными нагрузками, т.е. нагрузками, потребляющими ток с формой волны, отличающейся от формы волны питающего напряжения.

Примеры нелинейных нагрузок:

- промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи, и выпрямители)
- приводы с регулируемой скоростью с асинхронными двигателями или двигателями постоянного тока
- источники бесперебойного питания
- офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты, и др.)
- бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы)
- некоторые приборы с магнитным насыщением (трансформаторы)

Возмущения, создаваемые нелинейными нагрузками: гармоники тока и напряжения

Нелинейные нагрузки потребляют токи гармоник, которые поступают в распределительную сеть. Гармоники напряжения вызываются протеканием токов гармоник по сопротивлениям питающих цепей (по трансформатору и распределительной сети для случаев аналогичных тому, который показан на **рис. L2**).

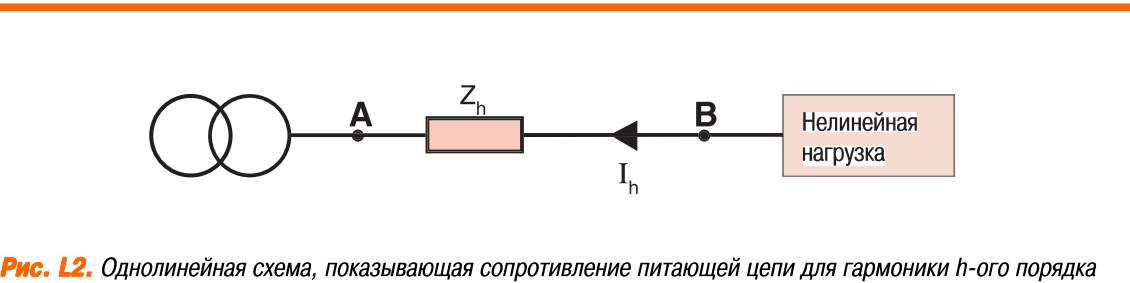


Рис. L2. Однолинейная схема, показывающая сопротивление питающей цепи для гармоники h-ого порядка

Реактивное сопротивление проводника возрастает с увеличением частоты тока, протекающего по этому проводнику. Поэтому для каждой гармоники тока (h-ого порядка) в цепи питания существует некоторое полное сопротивление Zh.

Когда по сопротивлению Zh протекает ток гармоники h-ого порядка, то по закону Ома он создает напряжение гармоники $U_h = Z_h \times I_h$. В результате этого форма напряжения в точке B искажается и отличается от синусоидальной. Все нагрузки, питающиеся через точку B, получают напряжение искаженной формы.

Для тока данной гармоники, это искажение пропорционально сопротивлению распределительной сети.

Протекание несинусоидальных токов в распределительных сетях

Можно считать, что нелинейные нагрузки генерируют токи высших гармоник в распределительную сеть в направлении источника питания.

На рис. L3 и L4 показана схема электроустановки, «загрязненной» гармониками. В схеме, изображенной на рис. L3, протекает ток частотой 50 Гц, а на рис. L4 – ток частотой гармоники h-ого порядка.

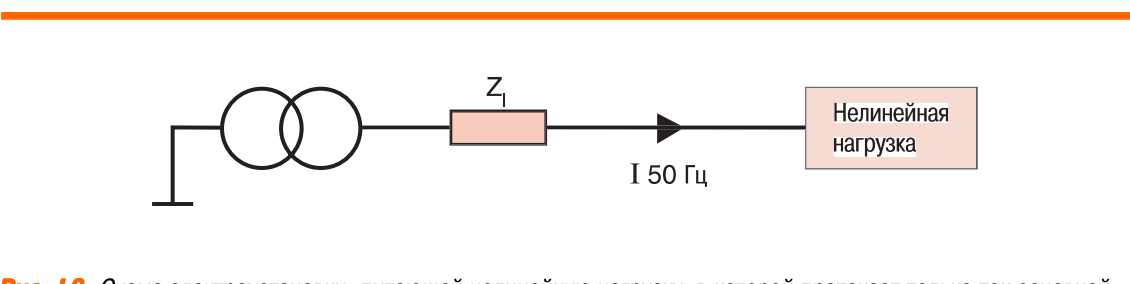


Рис. L3. Схема электроустановки, питающей нелинейную нагрузку, в которой протекает только ток основной частоты 50 Гц

3 Общие положения

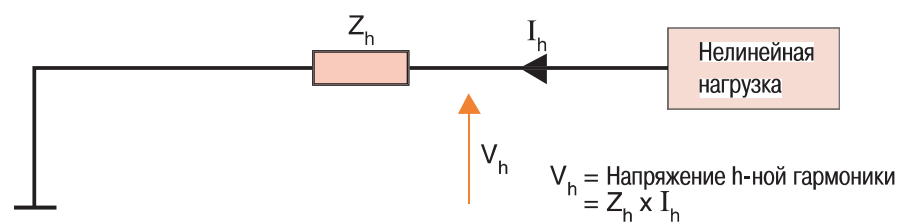
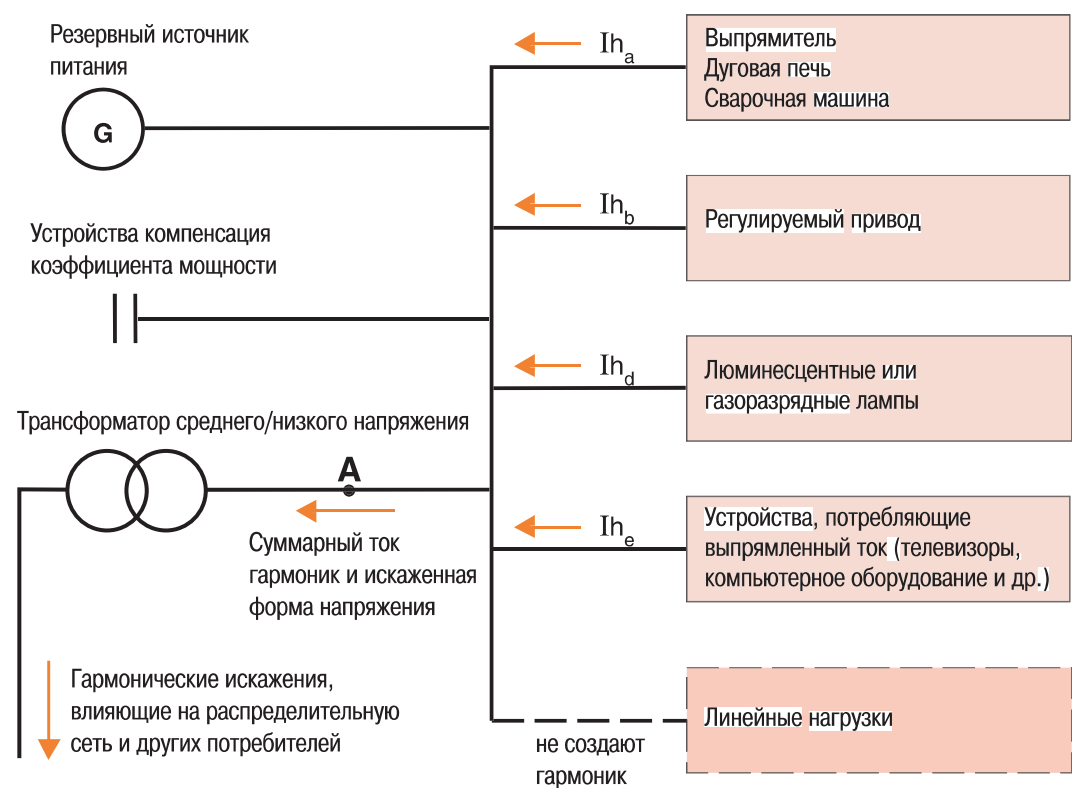


Рис. L4. Схема той же электроустановки, в которой протекает только ток *h*-ной гармоники

При питании нелинейной нагрузки возникает ток частотой 50 Гц (как показано на рис. L3), к которому добавляются токи I_h (рис. L4), соответствующие каждой *h*-ной гармонике.

По-прежнему считая, что нагрузки генерируют токи высших гармоник в распределительную сеть в направлении источника питания, можно построить схему протекания токов разных гармоник в этой сети (рис. L5).



L5

Примечание: Хотя на данной схеме определенные нагрузки генерируют токи гармоник в распределительную сеть, другие нагрузки могут поглощать такие токи

Рис. L5. Протекание токов гармоник в распределительной сети

Основные экономические последствия гармоник для электроустановок:

- повышенный расход энергии
- преждевременное старение оборудования
- производственные убытки

4 Основные последствия Ih гармоник для электроустановок

4.1 Резонанс

Одновременное использование емкостных и индуктивных устройств в распределительных сетях приводит к параллельному или последовательному резонансу, который проявляется соответственно в очень больших и очень малых значениях полного сопротивления. Изменения сопротивления вызывают изменения тока и напряжения в распределительной сети. В данном разделе будет рассматриваться только параллельный резонанс, как наиболее распространенный.

Рассмотрим следующую упрощенную электрическую схему (рис. L6) электроустановки, состоящей из:

- питающего трансформатора
- линейных нагрузок
- нелинейных нагрузок, потребляющих токи высших гармоник
- конденсаторов для повышения коэффициента мощности

Ниже представлена эквивалентная схема для гармонического анализа (рис. L7). Если пренебречь активным сопротивлением R, то полное сопротивление Z определяется по формуле:

$$Z = \frac{jL_s\omega}{1-L_sC\omega^2}$$

где:

Ls = индуктивность питающей сети (вышерасположенный участок сети + трансформатор + линия)

C = емкость конденсаторов для повышения коэффициента мощности

R = активное сопротивление линейных нагрузок

Ih = ток гармоник

Резонанс наступает тогда, когда знаменатель $1-L_sC\omega^2$ стремится к нулю. Соответствующая частота называется резонансной частотой цепи. При этой частоте полное сопротивление достигает максимума, и возникают напряжения гармоник большой величины, приводящие к значительным искажениям формы питающего напряжения. Искажение формы напряжения сопровождается протеканием в цепи Ls+C токов гармоник, превышающих токи, потребляемые нагрузками.

В результате такая распределительная сеть и конденсаторы для повышения коэффициента мощности подвергаются воздействию больших токов гармоник и перегрузкам. Чтобы избежать резонанса, последовательно с такими конденсаторами можно установить дроссели для компенсации гармоник.

4.2 Увеличенные потери

Потери в проводниках

Активная мощность, переданная нагрузке, зависит от составляющей (I_1) тока основной сетевой частоты.

Когда ток, потребляемый нагрузкой, содержит гармоники, действующее значение тока Irms превышает основной ток I1.

Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD) определяется выражением:

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

отсюда: $I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD^2}$

На рис. L8 показаны графики изменения следующих двух параметров в зависимости от суммарного коэффициента гармонических искажений:

- действующего значения тока Irms для нагрузки, потребляющей некоторый основной ток;
 - джоулевых потерь без учета скин-эффекта
- (точкой отсчета для обоих параметров является 1, соответствующая случаю отсутствию гармоник)

Токи гармоник вызывают увеличение джоулевых потерь во всех проводниках, в которых они протекают, и дополнительное повышение температуры в трансформаторах, устройствах, кабелях и др.

Потери в асинхронных машинах

Напряжения гармоники h-ого порядка, поступающие к асинхронным машинам, генерируют в роторе токи с частотами выше 50 Гц, являющиеся причиной дополнительных потерь.

L6

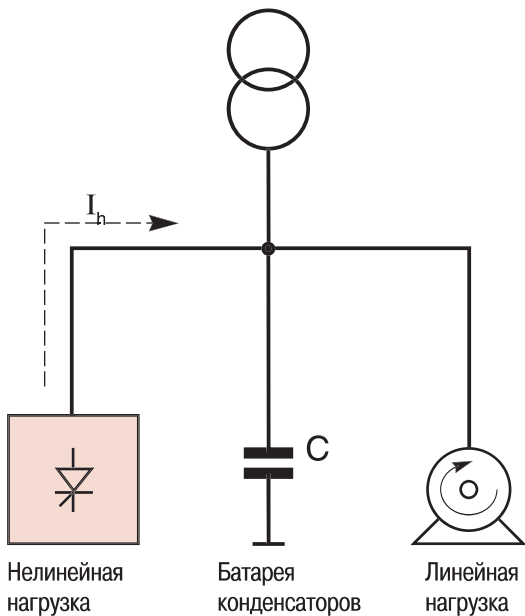


Рис. L6. Схема электроустановки

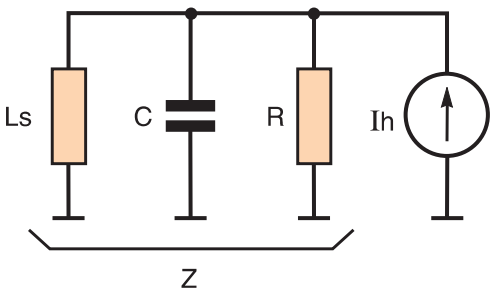


Рис. L7. Эквивалентная схема электроустановки, показанной на рис. L6

4 Основные последствия гармоник для электроустановок

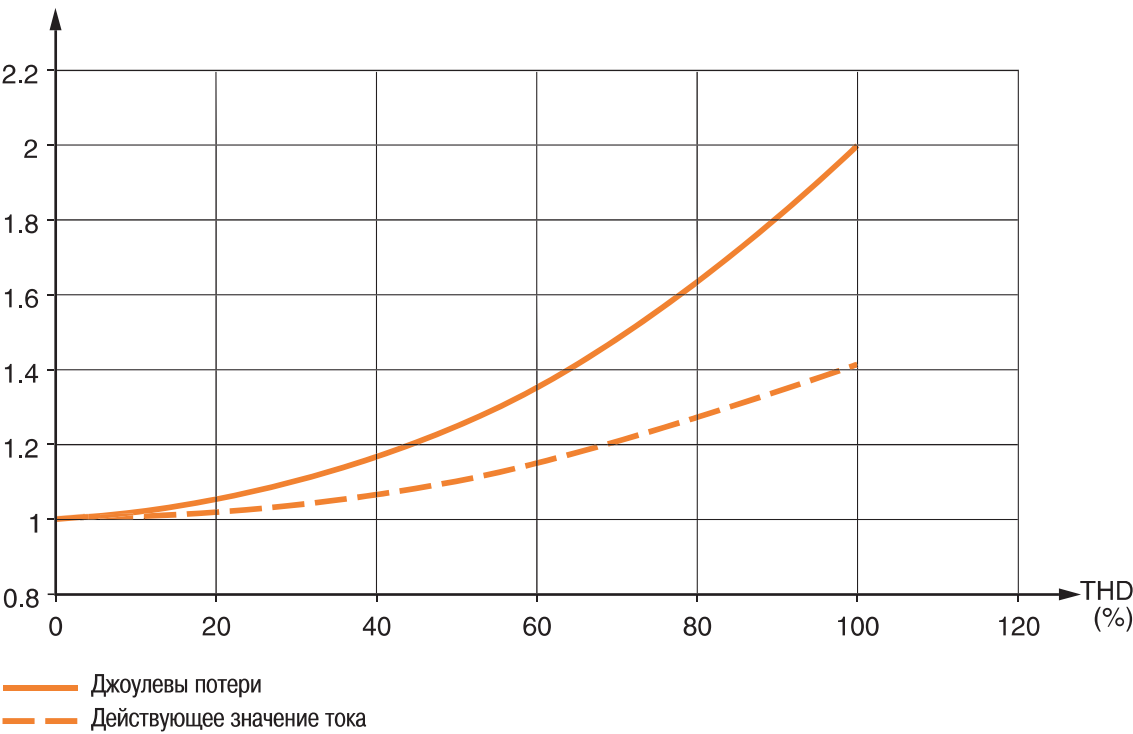


Рис. L8. Увеличение действующего тока и джоулевых потерь в зависимости от суммарного коэффициента искажений

Порядки величин

- питающее напряжение фактически прямоугольной формы вызывает **20-процентный рост** потерь
- питающее напряжение, содержащее гармоники $u_5 = 8\%$ (от основного напряжения U_1), $u_7 = 5\%$, $u_{11} = 3\%$, и $u_{13} = 1\%$, т.е. с суммарным коэффициентом искажений $THDu = 10\%$, приводит к дополнительным потерям в 6%.

Потери в трансформаторах

Токи гармоник, протекающие в трансформаторах, вызывают увеличение потерь в «меди» вследствие эффекта Джоуля и увеличенных потерь в «железе» из-за вихревых токов. Напряжения гармоник являются причиной потерь в «железе» вследствие гистерезиса. Обычно считается, что потери в обмотках возрастают пропорционально квадрату $THDi$, а потери в сердечнике – пропорционально $THDu$. В распределительно-сетевых трансформаторах, в которых уровни искажений ограничены, рост потерь составляет 10-15%.

Потери в конденсаторах

Напряжения гармоник, приложенные к конденсаторам, приводят к появлению токов, пропорциональных частотам этих гармоник. Эти токи вызывают дополнительные потери.

Пример

Питающее напряжение содержит следующие гармоники: Основное напряжение U_1 , гармонические напряжения $u_5 = 8\%$ (от U_1), $u_7 = 5\%$, $u_{11} = 3\%$, $u_{13} = 1\%$, т.е. суммарный коэффициент искажений $THDu = 10\%$. Ток увеличивается в 1,19 раз, а джоулевы потери – в 1.19^2 , т.е. в 1,4 раза.

4.3 Перегрузки оборудования

Генераторы

Номинальные характеристики (параметры) генераторов, питающих нелинейные нагрузки, должны быть снижены из-за дополнительных потерь, обусловленных протеканием токов высших гармоник. Уровень снижения рабочих параметров генератора, 30% общей нагрузки которого приходится на нелинейные нагрузки, составляет около 10%. В связи с этим необходимо использовать генератор повышенной мощности.

Источники бесперебойного питания (UPS)

Ток, потребляемый компьютерными системами, имеет очень большой коэффициент амплитуды (пик-фактор). Поэтому источник бесперебойного питания, параметры которого выбирались с учетом только действующего значения тока, может не обеспечить необходимый максимальный ток и оказаться перегруженным.

Трансформаторы

■ кривая, показанная ниже (рис. L9), отображает типичное требуемое снижение мощности трансформатора, питающего электронные нагрузки.

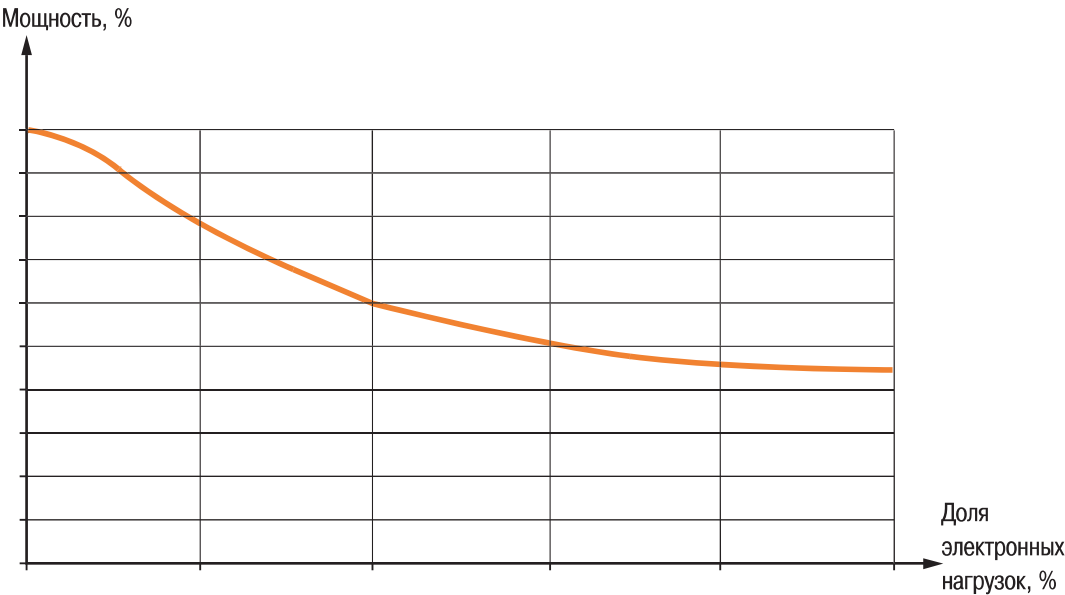


Рис. L9. Снижение мощности трансформатора, питающего электронные нагрузки

Пример

Если трансформатор питает суммарную нагрузку, 40% которой приходится на электронные нагрузки, его мощность должна быть снижена на 40%.

■ стандарт UTE C15-112 устанавливает зависимость коэффициента снижения мощности трансформаторов от токов гармоник.

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \left(\sum_{h=2}^{40} h^{1.6} T_h^2 \right)}}$$

$$T_h = \frac{I_h}{I_1}$$

Типовые значения:

- ток прямоугольной формы (амплитуда гармоник - 1/h¹): k = 0.86
- ток преобразователя частоты (THD = 50%): k = 0.80

Асинхронные машины

Стандарт IEC 60892 вводит понятие взвешенного коэффициента гармоник HVF (коэффициента гармоник напряжений), формула и максимальное значение которого приведены ниже.

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h}{h^2}} \leq 0.02$$

Пример

Питающее напряжение имеет основное напряжение U1 и гармонические напряжения u3 = 2% (от U1), u5 = 3%, u7 = 1%. Суммарный коэффициент искажений THDu = 3,7%, а HVF = 0,018. Это значение HVF очень близко к максимальному значению, при превышении которого необходимо проводить занижение рабочих характеристик рассматриваемой машины. В практическом смысле, при питании асинхронной машины THDu не должен превышать 10%.

Конденсаторы

В соответствии со стандартом IEC 60831-1, действующее значение тока, протекающего через конденсаторы, не должно превышать номинальный ток более чем в 1,3 раза.

Возвращаясь к приведенному выше примеру, напряжения гармоник составляют: u5 = 8% (от основного напряжения U1), u7 = 5%, u11 = 3% и u13 = 1%, т.е. суммарный коэффициент искажений THDu равен 10%, где при номинальном напряжении $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1.19$. При напряжении, превышающем номинальное напряжение на 10%, достигается предельное значение тока $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1.3$ и необходимо использовать конденсаторы с повышенными характеристиками.

(1) Фактически, эта форма тока близкая к прямоугольной. Это характерно для всех выпрямителей тока (трехфазных выпрямителей, индукционных печей).

4 Основные последствия гармоник для электроустановок

Нулевые (нейтральные) проводники

Рассмотрим систему, состоящую из сбалансированного трехфазного источника питания и трех одинаковых однофазных нагрузок, подсоединенных между фазами и нейтралью (рис. L10).

На рис. L11 показаны примерные формы токов, протекающих в этих фазах, и результирующий ток в нулевом проводнике.

В этом примере ток в нулевом проводнике имеет действующее значение, которое превышает действующее значение тока в фазном проводнике в $\sqrt{3}$ раза. Поэтому нулевой проводник должен иметь увеличенное сечение.

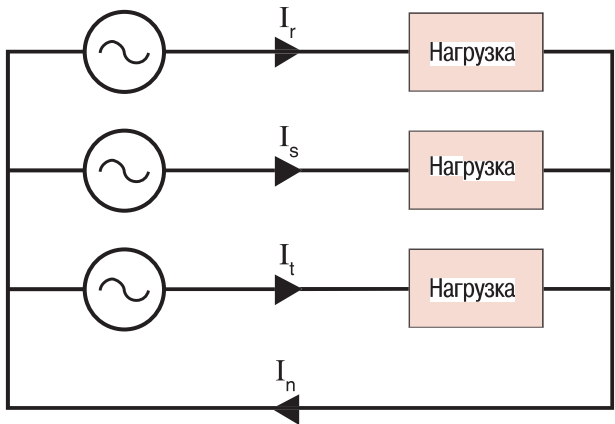


Рис. L10. Протекание токов в разных проводниках, соединенных с трехфазным источником питания

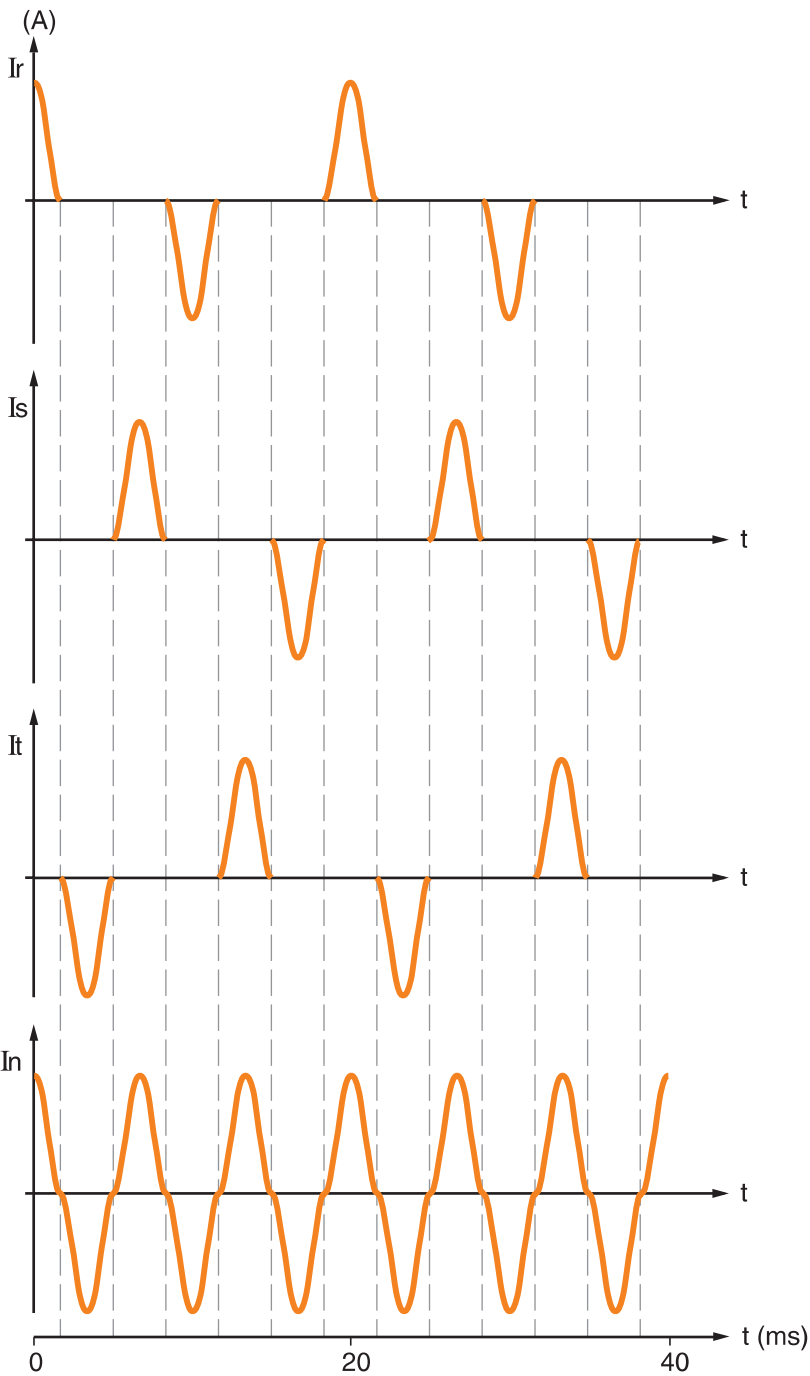


Рис. L11. Примеры токов, протекающих в разных проводниках, подсоединенных к трехфазной нагрузке ($I_n = I_r + I_s + I_t$)

4.4 Возмущения, влияющие на чувствительные нагрузки

Влияние искажения формы питающего напряжения

Искажение формы питающего напряжения может сказаться на работе чувствительного оборудования:

- устройств регулирования (температуры)
- компьютерного оборудования
- устройств управления и контроля (защитных реле)

Искажение телефонных сигналов

Гармоники создают помехи в слаботочных цепях управления. Уровень искажений зависит от длины параллельно идущих силовых и управляющих кабелей, расстояния между этими кабелями и частоты гармоник.

4.5 Экономические последствия

Потери энергии

Гармоники вызывают дополнительные потери энергии в проводниках и оборудовании (эффект Джоуля).

Повышенные затраты на электроэнергию

Наличие токов гармоник может потребовать увеличения потребляемой мощности и, следовательно, более высоких затрат.
Кроме того, энергоснабжающие компании намерены взимать повышенные тарифы с потребителей, которые выдают большое количество гармоник.

Необходимость использования оборудования с повышенными номинальными характеристиками

- снижение мощности источников питания (генераторов, трансформаторов и источников бесперебойного питания) вследствие наличия гармонических искажений означает необходимость использования устройств с более высокими номинальными характеристиками.
- сечение проводников должно выбираться с учетом протекания токов гармоник. Кроме того, из-за скин-эффекта сопротивление этих проводников возрастает с частотой. Чтобы избежать чрезмерных тепловых потерь, необходимо использовать проводники большего сечения.
- Протекание гармоник в нулевом проводнике означает, что его сечение тоже должно быть увеличено.

Уменьшение срока службы оборудования

Когда уровень искажений питающего напряжения приближается к 10%, срок службы оборудования значительно снижается. Это снижение было оценено на уровне:
■ 32,5% для однофазных машин
■ 18% для трехфазных машин
■ 5% для трансформаторов
Для того чтобы сроки службы оборудования соответствовали номинальной нагрузке, должно использоваться оборудование с завышенными параметрами (номинальная мощность, сечение проводников и т.д.).

Ложное срабатывание автоматических выключателей и отключение электроустановки

Автоматические выключатели, используемые в электроустановке, подвергаются воздействию пиков тока, создаваемых гармониками.
Эти пики токов вызывают их ложное срабатывание, что приводит к производственным потерям и затратам времени на повторный запуск электроустановки.

Примеры

Учитывая экономические последствия для перечисленных ниже электроустановок, оказалось необходимым установить фильтры подавления гармоник.

Вычислительный центр страховой компании

Было подсчитано, что стоимость часа простоя, вызванного ложным срабатыванием автоматического выключателя в этом центре, составляет 100000 евро.

Фармацевтическая лаборатория

Гармоники привели к выходу из строя генераторной установки и прерыванию продолжительных испытаний нового лекарственного средства. Соответствующие убытки были оценены в 17 миллионов евро.

Металлургический завод

Комплекс индукционных печей вызвал перегрузку и разрушение в течение одного года трех трансформаторов мощностью от 1500 до 2500 кВА. Стоимость нарушений производственного процесса была оценена в 20000 евро в час.

Фабрика, производящая садовую мебель

Выход из строя регулируемых приводов приводил к остановкам производства, оцененным в 10000 евро в час.

5 Основные показатели гармонических искажений и принципы измерений

Для количественного измерения и оценки гармонических искажений форм токов и напряжений используются несколько показателей, в частности:

- коэффициент мощности
- пик-фактор или коэффициент амплитуды
- мощность нелинейных искажений
- гармонический спектр
- величины гармонических искажений

Эти показатели следует использовать при определении любого необходимого корректирующего действия.

5.1 Коэффициент мощности

Определение

Коэффициент мощности (PF) представляет собой соотношение между активной мощностью (P) и полной мощностью (S).

$$PF = \frac{P}{S}$$

Его часто путают с параметром:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

где

P1 = активная мощность тока основной частоты

S1 = полная мощность тока основной частоты

Параметр cos φ относится только к основной сетевой частоте и поэтому отличается от коэффициента мощности PF, который учитывает наличие в электроустановке гармоник.

Интерпретация коэффициента мощности

Первым признаком наличия в электроустановке значительного количества гармоник является то, что замеренный коэффициент мощности PF отличается (меньше) от замеренной величины cos φ.

5.2 Пик-фактор

Определение

Пик-фактор или коэффициент амплитуды — это отношение величины амплитуды тока или напряжения (Im или Um) к его действующему значению.

- Для синусоидального сигнала пик-фактор равен соответственно $\sqrt{2}$.
- Для несинусоидального сигнала пик-фактор может быть или больше или меньше $\sqrt{2}$.

В последнем случае такие значения пик-фактора свидетельствуют об отличии формы кривой напряжения от синусоидальной, т.е. о наличии искажений.

Интерпретация пик-фактора

Для тока, потребляемого нелинейными нагрузками, величина пик-фактора значительно превышает $\sqrt{2}$. Обычно она составляет от 1,5 до 2, но в критических случаях может даже достигать 5. Большая величина пик-фактора свидетельствует о наличии больших переходных сверхтоков, способных вызывать ложные срабатывания защитных устройств.

5.3 Параметры мощности и гармоники

Активная мощность

Активная мощность (P) сигнала, содержащего гармоники, является суммой активных мощностей отдельных гармоник тока и напряжения одного и того же порядка.

Реактивная мощность

Реактивная мощность определяется исключительно для основной частоты, т.е.
 $Q = U_1 \times I_1 \times \sin \varphi^1$

Мощность искажений

При наличии гармоник мощность искажений D определяется как $D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2}$, где S - полная мощность.

5.4 Гармонический спектр и гармоническое искажение

Принцип

Каждый тип устройства, порождающего гармоники, потребляет ток гармоники определенной формы (определенной амплитуды и фазового сдвига). Эти параметры, особенно амплитуда каждой гармоники, имеют существенное значение для анализа.

Искажение, вносимое отдельной гармоникой (или гармоническое искажение h-ого порядка)

Искажение, вносимое отдельной гармоникой, определяется процентным соотношением амплитуд гармоник h-ого порядка и сигнала основной частоты (коэффициент n-ой гармоники (см. ГОСТ 13109-97)).

$$u_h(\%) = 100 \frac{U_h}{U_1}$$

или

$$i_h(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}$$

Гармонический спектр

Отображая амплитуду каждой гармоники в функции ее частоты, можно получить график, называемый спектром гармоник.

На **рис. L12** представлен пример спектра гармоник прямоугольного сигнала.

Действующее значение

Действующее значение тока и напряжения может быть рассчитано в функции действующего значения гармоник разных порядков.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

и

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$$

5.5 Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD)

Термин «суммарный коэффициент гармонических искажений» THD (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. ГОСТ 13109-97)) широко применяется при определении уровня содержания гармоник в знакопеременных сигналах.

Определение THD

Для сигнала y коэффициент THD определяется как:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1}$$

Это согласуется с определением, приведенным в стандарте IEC 61000-2-2.

Отметим, что это значение может превышать 1.

Согласно указанному стандарту, параметр h можно ограничить числом 50. Коэффициент THD позволяет одним числом выразить степень искажений, влияющих на ток или напряжение в любом месте электроустановки.

Обычно THD выражается в процентах.

Суммарный коэффициент искажений по току или напряжению

Для гармоник тока эта формула имеет вид:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

L12

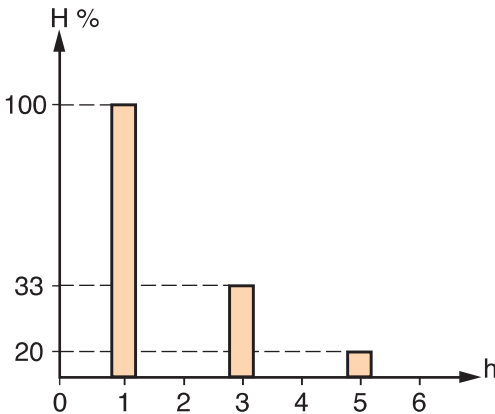
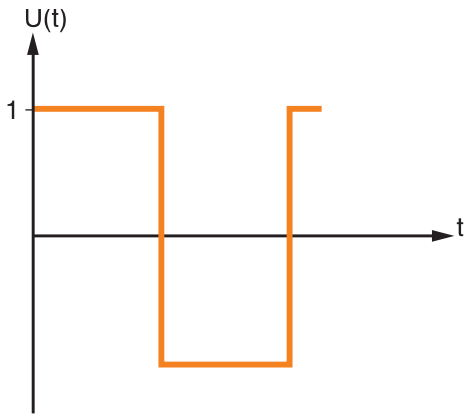


Рис. L12. Спектр гармоник прямоугольного сигнала напряжения $U(t)$

Ниже представлена эквивалентная формула, которая является более наглядной и удобной в применении, если известно полное действующее значение:

$$THDi = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

Для гармоник напряжения формула имеет вид:

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1}$$

Связь между коэффициентом мощности и THD (рис. L13)

Коэффициент THD, отражающий одним значением степень искажения формы тока или напряжения, является важным показателем. Спектр отображает отдельные гармоники, влияющие на искаженный сигнал (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. ГОСТ 13109-97)).

$$P \approx P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

$$\text{Следовательно: } PF = \frac{P}{S} \approx \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U_1 \cdot I_{rms}}$$

$$\text{так как: } \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$$

$$\text{отсюда: } PF \approx \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$$

На рис. L13 представлен график зависимости $\frac{PF}{\cos \varphi}$ от THDI.

5.6 Использование различных показателей

Показатель THDu характеризует искажение формы напряжения.

Ниже приведены несколько значений THDu и соответствующие им явления, происходящие в электроустановке.

- THDu < 5% - нормальная ситуация, отсутствие сбоев в работе оборудования
- 5-8% - значительное загрязнение сети гармониками, возможны некоторые сбои в работе
- > 8% - большая степень загрязнения сети гармониками, возможны сбои в работе оборудования. Требуется проведение тщательного анализа и установка компенсирующих устройств.

Показатель THDi характеризует искажение формы тока.

Устройство, вносящее гармонические возмущения, обнаруживается посредством замеров THDi на входах и выходах различных цепей и соответственно отслеживания путей протекания гармоник.

Ниже приведены несколько значений THDi и соответствующие им явления, происходящие в электроустановке:

- THDi < 10% - нормальная ситуация, отсутствие сбоев в работе оборудования
- 10-50% - значительное загрязнение сети гармониками с опасностью повышения температуры и обусловленной этим необходимостью перехода на кабели большего сечения и более мощные источники питания
- > 50% - большая степень загрязнения сети гармониками, возможны сбои в работе оборудования. Требуется проведение тщательного анализа и установка компенсирующих устройств.

Коэффициент мощности

Используется для того, чтобы оценить: насколько необходимо повысить мощность источника питания рассматриваемой электроустановки.

Пик-фактор (коэффициент амплитуды)

Используется для оценки способности генератора (или источника бесперебойного питания) обеспечивать мгновенные токи большой величины. Например, компьютерное оборудование потребляет ток с сильно искаженной формой волны, для которого пик-фактор может достигать значений 3-5.

Спектр (разложение сигнала на отдельные гармоники)

Дает другое представление электрических сигналов и может использоваться для оценки степени их искажения.

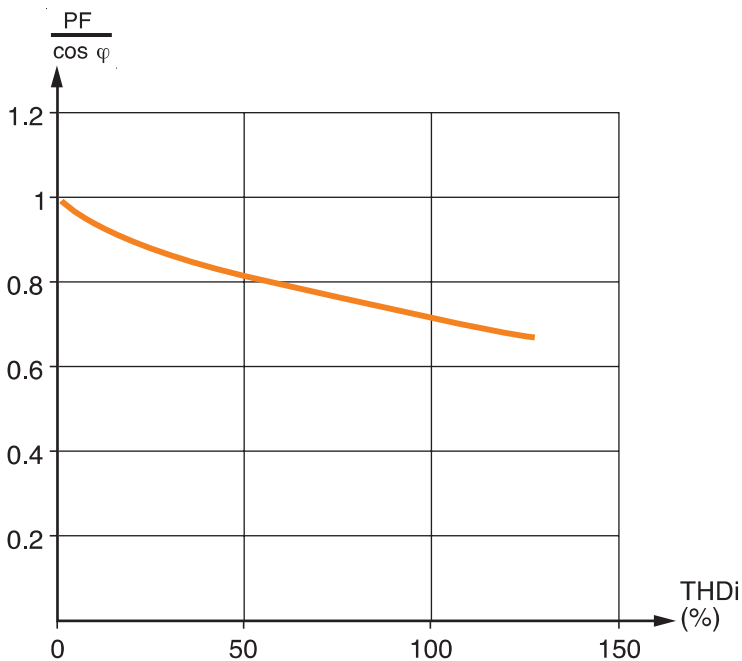


Рис. L13. Изменение $\frac{PF}{\cos \varphi}$ в функции THDi для случая, когда THDu = 0

6.1 Устройства, используемые для измерения показателей

Выбор устройств

Традиционные методы контроля и измерений предусматривают использование:

- осциллографов

Первые признаки искажений сигнала можно получить, просматривая сигналы тока или напряжения на осциллографе.

Отклонение формы волны от синусоидальной отчетливо указывает на наличие гармоник. На осциллограммах тока и напряжения появляются пики.

Заметим, однако, что данный метод не позволяет точно измерить гармонические составляющие.

- аналоговых спектроанализаторов

Они представляют собой комбинацию полосовых фильтров и вольтметра действующих значений, обеспечивают среднее качество измерений и не могут измерять сдвиг фаз.

Только последние модели цифровых анализаторов позволяют достаточно точно определить значения всех указанных выше показателей.

Функции цифровых анализаторов

Микропроцессоры цифровых анализаторов:

- вычисляют значения показателей гармоник (показателя мощности, пик-фактора, мощности искажений, THD)
- выполняют различные дополнительные функции (коррекцию, статистическое обнаружение, управление процессом измерений, отображение, обмен данными и др.)
- в многоканальных анализаторах обеспечивают разложение в спектр токов и напряжений практически в реальном времени

Работа анализатора и обработка данных

Аналоговые сигналы преобразуются в последовательность числовых значений.

На основе этих данных алгоритм быстрого преобразования Фурье рассчитывает амплитуды и фазы гармоник в большом количестве временных окон.

При расчете THD большинство цифровых анализаторов измеряют гармоники до 20-ого или 25-ого порядка.

Обработка последовательных значений, рассчитанных с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (сглаживание, классификация и статистика) может быть проведена самим измерительным устройством или внешним программным обеспечением.

6.2 Процедуры гармонического анализа распределительных сетей

Натурные измерения проводятся на промышленной или коммерческой электроустановке:

- в качестве превентивной меры с целью получения общего представления о состоянии распределительной сети (составления карты сети)
- в связи с принятием корректирующих мер:
 - для определения причины, источника возмущений и выбора технических решений, необходимых для их устранения
 - для проверки правильности выбранного решения (после введения изменений в распределительную сеть и проверки снижения доли гармоник)

Режим работы

Ток и напряжение исследуются:

- на источнике питания
- на шинах главного распределительного щита (или на шинах среднего напряжения)
- в каждой отходящей цепи главного распределительного щита (или на шинах среднего напряжения)

Для измерений необходимо знать точные условия работы электроустановки и в частности состояние батарей конденсаторов (включены, не включены, количество отключенных ступеней)

Цели анализа

- определить любое необходимое понижение рабочих параметров оборудования электроустановки или
- количественно определить параметры любых необходимых систем фильтрации и защиты от гармоник, которые должны быть установлены в исследуемой распределительной сети
- обеспечить возможность сравнения измеренных и номинальных значений параметров распределительной сети (максимальные значения гармонических искажений, допустимые значения, номинальные значения).

Использование измерительных устройств

Измерительные устройства служат для индикации как мгновенных, так и долговременных эффектов гармоник. Для анализа требуются значения параметров длительностью от нескольких секунд до нескольких минут в течение нескольких дней наблюдений.

Требуемые значения параметров включают:

- амплитуды гармоник токов и напряжений
- содержание каждой гармоники в токе и напряжении
- суммарный коэффициент искажений (THD) форм тока и напряжения
- сдвиг фаз между гармониками тока и напряжения для одного и того же порядка и сдвиг фаз гармоник по отношению к базовому сигналу, например, к напряжению основной частоты

6.3 Тщательный контроль гармоник

Показатели гармоник могут быть измерены:

- с помощью устройств, постоянно установленных в распределительной сети
- или экспертом, проведшим минимум полдня на площадке, на которой размещена электроустановка (что дает ограниченное представление о состоянии электроустановки)

Стационарные устройства предпочтительней

В силу ряда причин предпочтительнее устанавливать в распределительной сети стационарные измерительные устройства:

- присутствие эксперта ограничено по времени. Только несколько измерений в разных точках электроустановки и на протяжении достаточно длительного периода (от недели до месяца) позволяют получить общее представление о работе электроустановки и учесть все ситуации, которые могут возникнуть, в частности:
 - колебания напряжения источника питания
 - изменения в работе электроустановки
 - добавление нового оборудования к электроустановке
- измерительные устройства, установленные в распределительной сети, обеспечивают получение необходимых данных и облегчают проведение диагностики экспертами, сокращая тем самым количество и продолжительность их посещений.
- стационарные измерительные устройства выявляют любые новые возмущения, возникающие после установки нового оборудования, внедрения новых режимов работы или колебаний параметров питающей сети.

Преимущества использования встроенных устройств измерения и обнаружения

Устройства измерения и обнаружения, встроенные в электрическое распределительное оборудование:

- для общей оценки (превентивного анализа) состояния сети, избавляют от необходимости:
 - брать измерительное оборудование в аренду
 - вызывать экспертов
 - присоединять и отсоединять измерительное оборудование.

Для общей оценки состояния сети анализ главных низковольтных распределительных щитов может быть часто выполнен входным устройством и/или измерительными устройствами, установленными в каждой их отходящих цепей.

- для корректирующих мер имеются средства, позволяющие:
 - определить рабочие условия в момент аварийной ситуации
 - составить карту состояний распределительной сети и оценить внедренное техническое решение.

Использование специального оборудования для решения изучаемой проблемы повышает качество диагностики.

Система PowerLogic (с устройствами Power Meter и Circuit Monitor) и прибор Micrologic обладают всеми необходимыми функциями для обнаружения гармонических искажений

Измерения — первый этап в установлении контроля загрязнений питающей сети гармониками. В зависимости от условий эксплуатации каждой электроустановки необходимое решение обеспечивается различными типами измерительного оборудования.

Устройства контроля мощности

Система PowerLogic с устройствами Power Meter и Circuit Monitor

Эти изделия обеспечивают возможность высокоэффективных измерений в распределительных сетях низкого и среднего напряжения. Они представляют собой цифровые устройства, обладающие функциями контроля качества электроэнергии.

PowerLogic — комплексная модульная система, состоящая из Power Meter (PM) и Circuit Monitor (CM). Она позволяет удовлетворить широкий диапазон потребностей - от самых простых (Power Meter) до очень сложных (Circuit Monitor). Эти устройства могут применяться в новых или существующих электроустановках, в которых должен поддерживаться высокий уровень качества электроэнергии. Режим их работы может быть локальным и/или дистанционным.

В зависимости от места установки в распределительной сети, Power Meter обеспечивает начальную индикацию качества электроэнергии. Основные параметры, измеряемые устройством Power Meter:

- суммарный коэффициент гармоник тока и напряжения (THD)
- коэффициент мощности.

В зависимости от модели прибора, эти измерения могут быть объединены с функциями отметки времени и аварийной сигнализации.

Устройство Circuit Monitor (рис. L14) выполняет детальный анализ качества электроэнергии, а также анализирует возмущения в распределительной сети. Основными функциями этого устройства являются следующие:

- измерения более 100 электрических параметров
- хранение в памяти и привязка меток времени к минимальным и максимальным значениям каждого электрического параметра
- функции сигнализации, инициируемые значениями электрических параметров
- регистрация данных о событиях
- регистрация отклонений параметров тока и напряжения
- анализ гармоник
- регистрация формы сигнала (контроль отклонений)

Micrologic — устройство контроля качества электроэнергии, встроенное в автоматический выключатель

В новых электроустановках устройство контроля Micrologic H (рис. L15), являющееся составной частью силовых автоматических выключателей серии Masterpact, особенно полезно для измерений на вводах электроустановок или на больших отходящих линиях.

Устройство контроля Micrologic H обеспечивает точный анализ качества электроэнергии и детальную диагностику происшествий в сети и предназначено для работы совместно с монитором распределительного щита или контролером. Оно может:

- измерять ток, напряжение, активную и реактивную мощность
- измерять суммарный коэффициент искажений тока и напряжения (THD)
- отображать амплитуду и фазу гармоник тока и напряжения до 51-ой гармоники включительно
- регистрировать форму волны сигнала (контроль отклонений)

Функции, выполняемые устройством контроля Micrologic H, эквивалентны тем, которые выполняются устройством Circuit Monitor.

Работа устройств контроля качества электроэнергии

Программное обеспечение для дистанционной работы и анализа

В более общей структуре распределительной сети с функциями контроля, имеется возможность объединения различных контрольно-измерительных устройств с помощью сети передачи данных, что позволяет централизовать сбор данных и получить общее представление о возмущениях во всей распределительной электрической сети.

Затем, в зависимости от применения, оператор может провести измерения в реальном времени, рассчитать потребные значения, провести регистрацию форм сигналов, предусмотреть подачу предупредительных сигналов, и др.

Устройства контроля качества электроэнергии передают имеющиеся данные по сетям Modbus, Digipact или Ethernet.

Важная цель этой системы — способствовать выявлению и планированию работ по техническому обслуживанию и ремонту. Она позволяет существенно сократить продолжительность обслуживания и стоимость временно установленных устройств для проведения измерений на электроустановке или выбора параметров оборудования (фильтров).

Программное обеспечение контроля SMS

Программное обеспечение SMS — комплексное программное обеспечение, используемое для анализа распределительных сетей совместно с устройствами, входящими в систему PowerLogic. Оно устанавливается на персональном компьютере и может:

- отображать результаты измерений в реальном времени
- отображать «исторические» диаграммы за определенный период
- выбирать способ представления данных (таблицы, различные графики)
- проводить статистическую обработку данных (отображать гистограммы).



Рис. L14. Устройство Circuit Monitor

L16



Рис. L15. Устройство контроля Micrologic H с функцией измерения гармоник для силовых автоматических выключателей серии Masterpact NT и NW

8 Способы ослабления гармоник

- Существует три различных способа ослабления гармоник:
- модификация электроустановки
 - применение специальных устройств в системе электропитания
 - фильтрация

8.1 Основные рекомендации

Чтобы ограничить распространение гармоник в распределительной сети, существуют различные решения, которые должны учитываться особенно при проектировании новой электроустановки.

Размещайте нелинейные нагрузки ближе к источнику питания

Общие гармонические возмущения увеличиваются с уменьшением мощности короткого замыкания. Не учитывая всех экономических соображений, предпочтительно подсоединять нелинейные нагрузки как можно ближе к источнику питания (**рис. L16**).

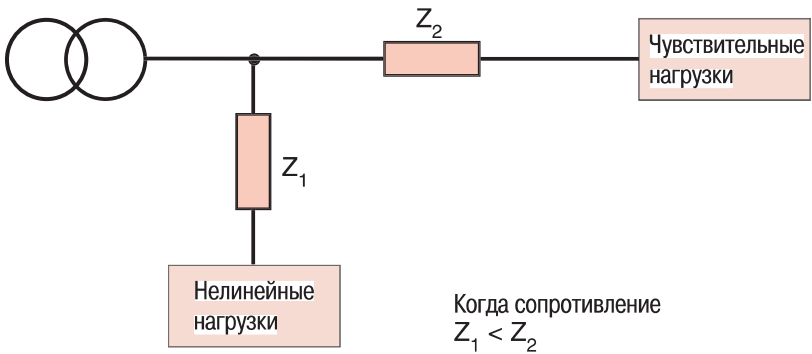


Рис. L16. Нелинейные нагрузки, подключенные как можно ближе к источнику питания (рекомендуемая схема)

Группируйте нелинейные нагрузки

При разработке однолинейной схемы нелинейные устройства должны быть отделены от других (**рис. L17**). Эти две группы устройств должны питаться от отдельных систем шин.

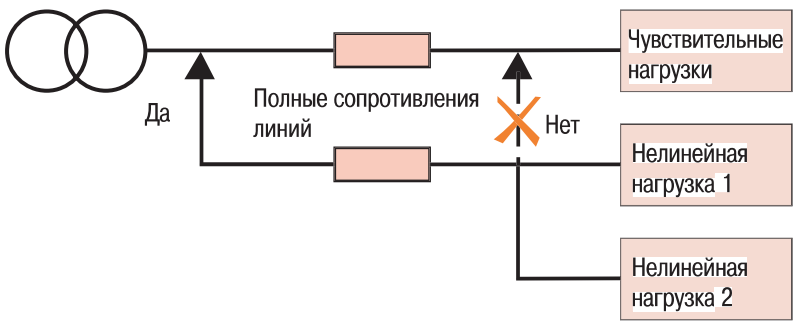


Рис. L17. Группирование нелинейных нагрузок и их подсоединение как можно ближе к источнику питания (рекомендуемая схема)

Используйте отдельные источники питания

Для ограничения содержания гармоник в сети можно также использовать источник питания с отдельным трансформатором (**рис. L18**).

Недостаток этого способа заключается в повышении стоимости электроустановки.

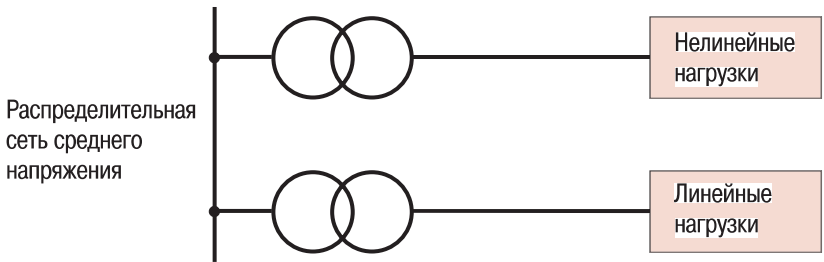


Рис. L18. Питание нелинейных нагрузок от отдельного трансформатора

Трансформаторы со специальными соединениями обмоток

Различные соединения обмоток трансформатора позволяют устранить определенные гармоники, например:

- соединение типа Dyd подавляет 5-ую и 7-ую гармоники (рис. L19)
- соединение типа Dy подавляет 3-ю гармонику
- соединение типа DZ 5 подавляет 5-ую гармонику

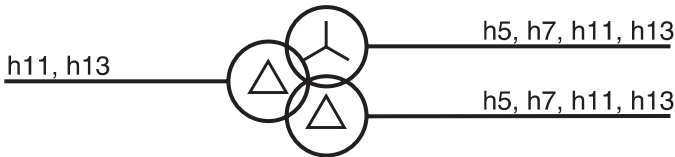


Рис. L19. Трансформатор с соединением обмоток типа Dyd подавляет распространение 5-ой и 7-ой гармоник вверх по сети

Устанавливайте линейные реакторы

При питании регулируемых приводов установка линейных реакторов позволяет сгладить форму тока. Увеличение полного сопротивления питающей сети ограничивает содержание гармоник тока.

Установка на батареях конденсаторов реакторов для подавления гармоник увеличивает полное сопротивление комбинации реактор-конденсатор для высших гармоник.

Это устраняет резонанс и защищает конденсаторы.

Выбирайте подходящую систему заземления установки

Система TN-C

В системе TN-C отдельный PEN-проводник обеспечивает защиту в случае замыкания на землю и протекания токов небаланса.

В установившихся условиях в таком проводнике протекают токи гармоник. Поскольку он имеет определенное сопротивление, то незначительные изменения потенциала (несколько вольт) между устройствами могут привести к сбоям в работе электронного оборудования.

Поэтому система TN-C должна использоваться только для питания силовых цепей в верхней части электроустановки и не должна применяться для питания «чувствительных» нагрузок.

Система TN-S

Данную систему рекомендуется применять при наличии в питающей сети гармоник. Нулевой проводник и защитный проводник (PE) полностью отделены друг от друга и поэтому распределение потенциалов по сети является более равномерным.

8.2 Фильтрация гармоник

В случаях, когда описанные выше превентивные меры оказываются недостаточными, необходимо оборудовать электроустановку системами фильтрации.

Существуют три типа фильтров:

- пассивные
- активные
- гибридные

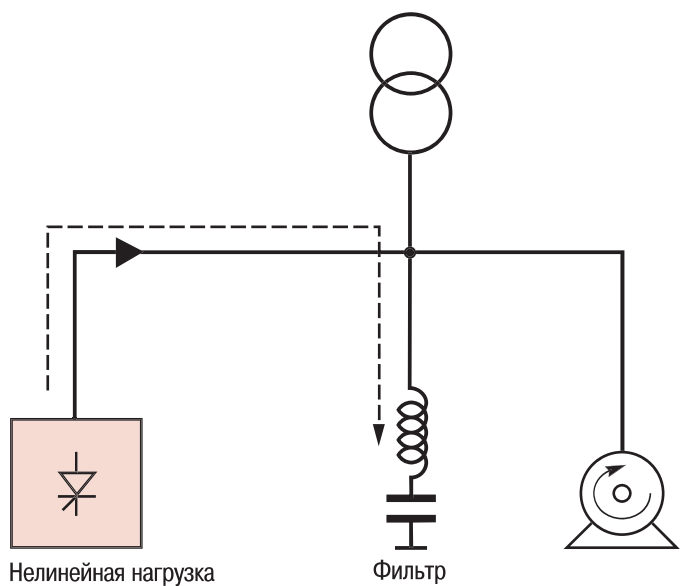


Рис. L20. Принцип действия пассивного фильтра

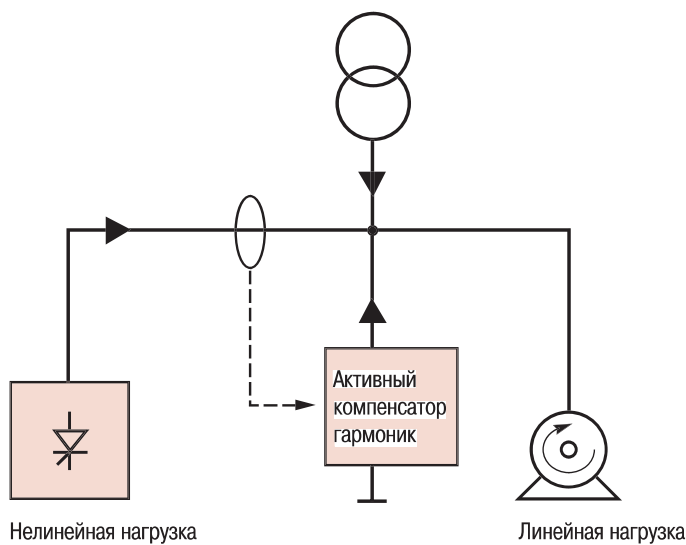


Рис. L21. Принцип действия активного фильтра

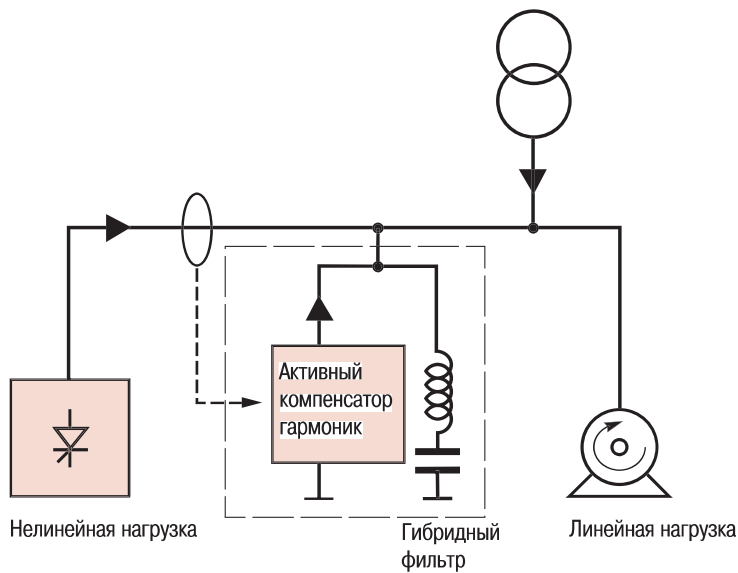


Рис. L22. Принцип действия гибридного фильтра

Пассивные фильтры

Типичные применения

- промышленные электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью более 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, выпрямители и др.)
- электроустановки, в которых необходима компенсация коэффициента мощности
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения напряжения с тем, чтобы не создавать возмущений для чувствительных нагрузок
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок.

Принцип действия

Параллельно нелинейной нагрузке устанавливается LC-контур, настроенный на частоту гармоник, которую необходимо подавить (рис. L20). Этот контур поглощает гармоники, предотвращая их попадание в распределительную сеть.

Обычно пассивный фильтр настраивается на частоту, близкую к частоте гармоник, которую необходимо подавить. Если требуется значительное снижение искажений нескольких гармоник, могут использоваться несколько параллельно соединенных фильтров.

Активные фильтры (активные компенсаторы гармоник)

Типичные применения

- коммерческие электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью менее 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, офисное оборудование и др.)
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок.

Принцип действия

Эти системы силовой электроники устанавливаются последовательно или параллельно нелинейной нагрузке и компенсируют гармоники тока или напряжения, потребляемые этой нагрузкой.

На рис. L21 показан параллельно включенный активный компенсатор гармоник, компенсирующий гармонику тока ($I_{har} = -I_{act}$).

Активный компенсатор гармоник генерирует в распределительную сеть гармоники, потребляемые соответствующей нелинейной нагрузкой, но с противоположной фазой. В результате этого сетевой ток I_s остается синусоидальным.

Гибридные фильтры

Типичные применения

- промышленные электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью более 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, офисное оборудование и др.)
- электроустановки, требующие компенсации коэффициента мощности
- электроустановки, в которых необходимо снизить искажения напряжения с тем, чтобы не создавать возмущений для чувствительных нагрузок
- электроустановки, в которых необходимо снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок
- электроустановки, в которых должны соблюдаться жесткие ограничения на «выброс» гармоник в сеть.

Принцип действия

Гибридный фильтр состоит из комбинации пассивных и активных фильтров (рис. L22). Он обладает преимуществами обоих типов фильтров и пригоден для применения в широком диапазоне уровней мощности и функционирования электроустановки.

Критерии выбора

Пассивный фильтр

Обеспечивает компенсацию коэффициента мощности и эффективную фильтрацию гармоник тока. Такие фильтры также снижают уровень гармоник напряжения в электроустановках, в которых форма напряжения питания отличается от синусоидальной. Если генерируемая фильтром реактивная мощность велика, то рекомендуется отключать установленный пассивный фильтр в те периоды времени, когда коэффициент загрузки установки является низким.

Предварительные исследования возможности применения фильтра должны учитывать возможное наличие батареи конденсаторов для компенсации коэффициента мощности, которую возможно придется удалить.

Активные компенсаторы гармоник

Обеспечивают подавление гармоник в широком диапазоне частот и могут работать с любым типом нагрузки.

С другой стороны, уровни мощности являются низкими.

Гибридные фильтры

Объединяют в себе преимущества активных и пассивных фильтров.

Для устранения гармоник может быть предложен полный набор услуг:

- анализ электроустановки
- системы измерения и контроля
- устройства фильтрации

8.3 Метод

Наилучшее решение с учетом технических и экономических факторов основывается на результатах тщательного анализа.

Аудит систем энергоснабжения среднего и низкого напряжения на наличие гармоник

Если Вы воспользуетесь услугами эксперта, Вам гарантируется, что предложенное им решение даст эффективные результаты (т.е. гарантированный максимальный суммарный коэффициент гармонических искажений THDu).

Аудит системы питания проводится инженером-специалистом по искажениям в распределительных электрических сетях, имеющим мощную аппаратуру и программное обеспечение для анализа и моделирования.

Аудит включает в себя следующие этапы:

- измерение возмущений, влияющих на ток, межфазное напряжение и напряжение между фазой и нейтралью от источника питания, возмущений от отходящих цепей и нелинейных нагрузок
- компьютерное моделирование явлений в сети для выяснения причин и выбора наилучшего решения
- полный отчет о результатах аудита, отражающий:
- текущие уровни возмущений
- максимально допустимые уровни возмущений (в соответствии с IEC 61000, IEC 34, и др.)
- предложение, содержащее решения с гарантированными уровнями функционирования электроустановки
- и, наконец, реализация выбранного решения с использованием необходимых средств и ресурсов.

Весь процесс аудита описан в международном стандарте ISO 9002.

8.4 Конкретные модели фильтров

Пассивные фильтры

Пассивные фильтры состоят из индуктивно-емкостных LC-контуров, настроенных на конкретную частоту гармоник, которую необходимо подавить.

Для устранения ряда гармоник система может состоять из нескольких фильтров. Для трехфазных напряжений 400 В максимальные допустимые мощности могут достигать:

- 265 кВА/470 А для 5-ой гармоник
- 145 кВА/225 А для 7-ой гармоник
- 105 кВА/145 А для 11-ой гармоник

Пассивные фильтры могут быть созданы для всех уровней напряжений и токов.

Активные фильтры

- активные компенсаторы гармоник SineWave
- пригодны для трехфазных напряжений 400 В, могут быть изготовлены на токи от 20 до 120 А
- компенсируют все гармоники от 2-ой до 25-ой. Компенсирование может быть полным или касаться определенных гармоник
- ослабление уровня искажений: при номинальной мощности отношение THDi на нагрузке к THDi на вышерасположенном участке сети превышает 10
- выполняемые функции: коррекция коэффициента мощности, компенсация гармоник нулевой последовательности, система диагностики и технического обслуживания, параллельное подключение, дистанционное управление, интерфейс связи Ibus/RS485
- активные фильтры Accusine
- пригодны для трехфазных напряжений 400 и 480 В, могут быть изготовлены на токи от 30 до 50 А
- фильтруют все гармоники вплоть до 50-ой
- выполняемые функции: коррекция коэффициента мощности, параллельное подключение, мгновенная реакция на изменения нагрузки

Гибридные фильтры

Эти фильтры объединяют в себе преимущества пассивного фильтра и активного компенсатора гармоник SineWave.