

Компания Schneider Electric приступила к выпуску «Технической коллекции Schneider Electric» на русском языке.

***Техническая коллекция** представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции Schneider Electric и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.*

*В **Технической коллекции** будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации Schneider Electric.*

***Техническая коллекция** предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.*

***Техническая коллекция** будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.*

*В каждом выпуске **Технической коллекции** будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.*

***Валерий Саженок,**
Технический директор
ЗАО «Шнейдер Электрик»,
Кандидат технических наук*

Выпуск № 21

Руководство по компенсации реактивной мощности с учетом влияния гармоник

Перевод выполнен
доцентом Самарского Государственного Технического Университета
Лыковым Юрием Федоровичем

Содержание

1. Основы компенсации реактивной мощности (PM)	3
1.1 Определения	3
1.1.1. Энергия активная, реактивная, полная	3
1.1.2. Активная и реактивная составляющие тока	3
1.1.3. Активная и реактивная составляющие мощности	3
1.1.4. Коэффициент мощности	4
1.2 Цели компенсации	4
1.3 Выбор типа компенсации	5
1.3.1. Выбор места компенсации	5
1.3.2. Выбор типа компенсации	5
1.4 Компенсация PM в присутствии гармоник	6
1.5 Названия, используемые в установках компенсации PM Schneider Electric	6
2. Переходные процессы и помехи	8
2.1 Переходный процесс включения	8
2.1.1. Случай нерегулируемой батареи	8
2.1.2. Случай ступенчато регулируемой батареи	10
2.2 Резонанс	12
2.3 Перегрузка токами высших гармоник	15
2.3.1. Общий случай	15
2.3.2. Перегрузка фильтров высших гармоник	15
3. Выбор защит	17
3.1 Ток включения	17
3.2 Выбор электрооборудования по нагреву (отключающие аппараты и кабели)	17
3.3 Выбор и настройка защит для конденсаторной батареи Schneider Electric	17
4. Технические приложения	21
Компенсация асинхронных двигателей	22
Компенсация трансформаторов	23
Сечение кабелей	24

Основы компенсации РМ

1.1 Определения

Составляющие тока, мощности и энергии:

- активная,
- реактивная,
- полная.

Лишь только одна активная составляющая производит работу или тепло.

1.1.1. Энергия активная, реактивная, полная

Любая электрическая машина, использующая переменный ток (двигатель, трансформатор) использует две формы энергии: активную и реактивную.

Активная потребленная энергия (кВт·ч) определяется активной мощностью P (кВт) электроприемников (ЭП). Она полностью переходит в механическую мощность (работу) и в тепло (потери).

Реактивная потребленная энергия (квар·ч) служит для питания магнитных цепей электрических машин.

Она соответствует реактивной мощности Q (квар) ЭП.

Полная энергия (кВ·А·ч) есть векторная сумма двух предыдущих видов энергии. Она соответствует полной мощности S (кВ·А) ЭП, то есть векторной сумме P (кВт) и Q (квар).

1.1.2. Активная и реактивная составляющие тока

Каждому виду мощности (активной и реактивной) соответствует ток.

Активный ток (I_a) совпадает по фазе с напряжением сети.

Реактивный ток (I_r) сдвинут на 90° относительно активного либо в сторону отставания (индуктивная нагрузка), либо в сторону опережения (емкостная нагрузка).

Полный ток (I_t) – это результирующий ток, который протекает по линии от источника до потребителя.

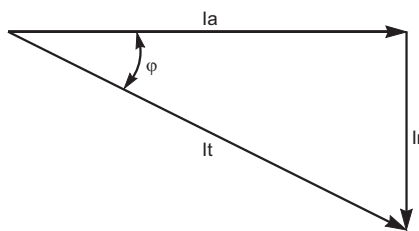


Рис. 1. Векторная диаграмма токов.

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi$$

$$I_r = I \cdot \sin \varphi$$

1.1.3. Активная и реактивная составляющие мощности.

Предыдущая диаграмма токов справедлива также для мощностей, если умножить токи на общее напряжение U .

Таким образом, можно определить:

- полную мощность $S = U \cdot I$ (кВА),
- активную мощность $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (кВт),
- реактивную мощность $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ (квар).

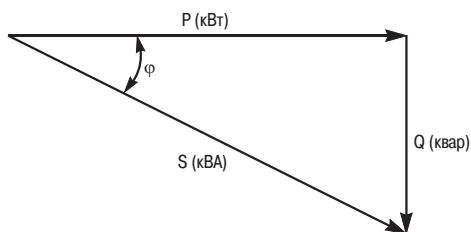


Рис. 2. Векторная диаграмма мощностей

Цель компенсации РМ уменьшить ток, потребляемый из сети.

При этом РМ поставляется конденсаторами, расположенными по возможности, ближе к индуктивным нагрузкам.

1.1.4. Коэффициент мощности

Коэффициент мощности КМ определяется:

$$KM = \frac{P}{S} = \frac{\text{активная_мощность_}(кВт)}{\text{полная_мощность_}(кВА)}$$

Если токи и напряжения синусоидальны, то $KM = \cos\varphi$.

При тех же условиях:

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\text{реактивная_мощность_}(квар)}{\text{активная_мощность_}(кВт)}$$

Для известного периода времени можно также записать:

$$\text{tg}\varphi = \frac{W_p}{W_a} = \frac{\text{реактивная_энергия_}(квар\cdot\text{ч})}{\text{активная_энергия_}(кВт\cdot\text{ч})}$$

1.2. Цели компенсации

Среднее значение РМ за период равно нулю, так как за это время она меняет свое направление четыре раза. Но циркуляция РМ по сети приводит к серьезным техническим и экономическим последствиям. На рисунке 3 показано, что чем больше величина РМ, тем больше передаваемые полная мощность и ток.

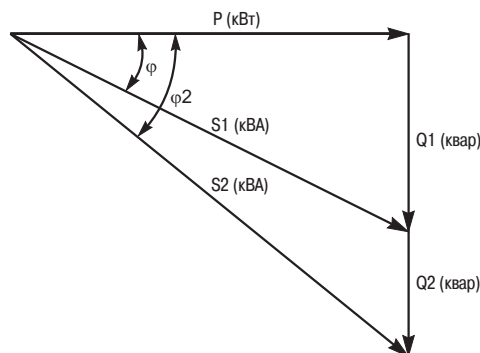


Рис.3. Зависимость полной мощности от реактивной.

Таким образом, циркуляция РМ по распределительной сети увеличивает потребляемый ток и вызывает:

- перегрузку трансформаторов,
- дополнительный нагрев питающих кабелей,
- дополнительные потери электроэнергии,
- значительные потери напряжения.

По этим причинам необходимо производить РМ по возможности ближе к нагрузкам, чтобы избежать ее потребления из сети. Такое решение называется «компенсация реактивной мощности».

Чтобы избежать повышенных расходов на сеть, электроснабжающая организация побуждает потребителей применять такие решения путем взимания штрафа при потреблении РМ выше определенного значения.

Чтобы выработать и поставить РМ индуктивным потребителям используются конденсаторы.

Чтобы уменьшить полную мощность, потребляемую из сети с величины S_2 до величины S_1 , нужно подключить конденсаторную батарею (КБ), вырабатывающую $PM Q_c$, такую, чтобы: $Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1)$.

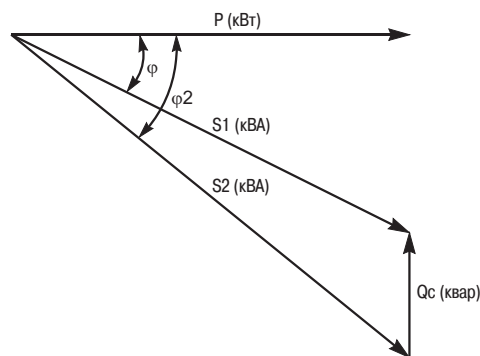


Рис.4. Принцип компенсации PM

1.3. Выбор типа компенсации

Самый выгодный вариант компенсации определяется в результате сравнения стоимости капиталовложений в конденсаторные батареи и полученного в результате их установки экономического эффекта.

Стоимость конденсаторных батарей зависит от многих параметров:

- установленная мощность,
- уровень напряжения,
- количество секций,
- способ управления,
- уровень качества защиты.

1.3.1. Выбор места компенсации

■ Централизованная компенсация

Батарея подключается в голове сети и обеспечивает компенсацию ее общей реактивной нагрузки. Этот способ используется, если требуется лишь разгрузить трансформатор и избежать уплаты штрафа за потребление значительной PM .

■ Групповая компенсация

Батарея устанавливается в голове участка сети, обслуживающего группу ЭП, требующих компенсации. Этот способ используется в протяженных сетях, содержащих участки с различными режимами работы ЭП.

■ Индивидуальная компенсация

Батарея подключается непосредственно к зажимам каждого индуктивного ЭП (электродвигатели, индукционные печи). Этот способ рекомендуется, когда мощность ЭП значительна по отношению к заявленному максимуму нагрузки. Экономический и технический эффект при этом максимален, так как PM вырабатывается в том месте, где она потребляется и в таком количестве, сколько требуется.

1.3.2. Выбор типа компенсации

■ Нерегулируемая (одноступенчатая) компенсация.

Конденсаторная батарея работает по принципу «всё или ничего». Включение может быть ручным (рубильник или выключатель) или полуавтоматическим (с помощью контактора, управляющего электродвигателем). Этот тип компенсации используется, если PM относительно невелика ($< 15\%$ мощности трансформатора), а график нагрузки ровный.

■ Ступенчатая автоматически регулируемая компенсация.

Конденсаторная батарея набирается из отдельных секций с возможностью подключать (обычно автоматически) нужное их количество. Такая батарея устанавливается в голове сети или на участке достаточной мощности и имеет возможность ступенчатого регулирования вырабатываемой реактивной мощности. Включением и выключением секций управляет реле контроля PM .

Токи высших гармоник, генерируемые силовыми электронными установками, могут перегружать конденсаторы, служащие для компенсации РМ.

Предлагаются различные типы конденсаторов, адаптированные к таким условиям работы.

1.4 Компенсация РМ в присутствии гармоник

Все чаще используемые в настоящее время электроустановки, использующие силовую электронику (регуляторы скорости, выпрямители, инверторы) вызывают протекание токов высших гармоник в сетях. Эти гармоники нарушают работу многих устройств. Особенно чувствительны к ним конденсаторы, так как их сопротивление снижается пропорционально порядку (номеру) присутствующих гармоник.

В определенных условиях могут возникать резонансные явления, приводящие к значительным искажениям кривой напряжения и к перегрузке конденсаторов. Более подробно эти явления описаны в главе 2.2.

В зависимости от мощности источника гармоник, следует выбирать различные типы конденсаторов, которые при необходимости могут быть оснащены защитными реакторами.

В нижеследующей таблице представлены возможные варианты выбора:

Номинальная мощность трансформатора $S_T < 2 \text{ МВА}$

$G_h < 0,15S_T$	$0,15 \cdot S_T < G_h < 0,25S_T$	$0,25S_T < G_h < 0,5S_T$	$G_h > 0,5S_T$
Конденсаторная батарея типа Classic	Конденсаторная батарея типа Comfort	Конденсаторная батарея типа Harmony	Фильтры гармоник

■ G_h – мощность источника гармоник,

■ S_T – номинальная мощность трансформатора,

Если мощность источника гармоник значительна, то обычно требуется снижать уровень гармоник в сети. Соответствующее устройство (фильтрокомпенсирующее устройство или ФКУ) одновременно выполняет функции компенсации РМ и фильтрации гармоник.

1.5. Названия, используемые в установках компенсации РМ Schneider Electric

■ Конденсатор

Устройство, состоящее из двух пластин, разделенных диэлектриком, помещенных в пластмассовый корпус. В этом корпусе размещается также устройство защиты на весь срок службы, состоящее из реле давления и предохранителя НРС, который отключает конденсатор в случае повреждения.

■ Блок конденсаторов Varplus²

Комплект конденсаторов, объединенных в трехфазный блок. Существует в стандартной версии и с повышенным номинальным напряжением. Серия силовых конденсаторов Varplus² имеет полностью модульное исполнение. Различные варианты соединения конденсаторов позволяют выдавать любую требуемую реактивную мощность (квар) в зависимости от напряжения, частоты и содержания высших гармоник в сети.

■ Модуль компенсации Varpac

Серия функциональных модулей Varpac представляет собой готовое решение для установки в функциональные и универсальные шкафы. Каждый модуль Varpac включает в себя силовые конденсаторы Varplus², специальные контакторы и устройства защиты (в зависимости от исполнения). Модули компенсации существуют в стандартной версии (тип CLASSIC), с повышенным номинальным напряжением (тип COMFORT), с повышенным номинальным напряжением и защитным реактором (тип HARMONY).

■ Комплектная конденсаторная установка Varset

Конденсаторные установки Varset различаются по способу регулирования: нерегулируемые конденсаторные установки Varset Direct, конденсаторные установки с автоматическим регулированием Varset и конденсаторные установки с быстрым регулированием Varset FAST.

Конденсаторные установки Varset Direct (от 10 до 160 квар) оснащаются конденсаторами Varplus² и имеют два исполнения: с автоматическим выключателем и без него. Конденсаторные установки с автоматическим регулированием Varset (от 7,5 до 1200 квар) оснащаются конденсаторами Varplus², специальными контакторами, регулятором реактивной мощности Varlogic и имеют два исполнения: с автоматическим выключателем и без него. Конденсаторные установки с автоматическим регулированием Varset FAST (от 100 до 600 квар) оснащаются конденсаторами Varplus², специальными быстродействующими контакторами (тиристорными ключами), защитными реакторами и быстродействующим регулятором реактивной мощности (время срабатывания менее 40 мс).

Конденсаторные установки существуют в стандартной версии (тип CLASSIC), с повышенным номинальным напряжением (тип COMFORT), с повышенным номинальным напряжением и защитным реактором (тип HARMONY).

Использование конденсаторов сопровождается различными переходными процессами и помехами:

- большой бросок тока и перенапряжение в момент включения конденсаторов,
- резонансные явления и перегрузка токами высших гармоник.

Переходные процессы и помехи

2.1. Переходный процесс включения

Переходный процесс включения конденсаторной батареи сопровождается изменением токов и напряжений. Появляющиеся при этом сверхток и перенапряжение имеют амплитуду и частоту, зависящие от характеристик питающей сети и от количества конденсаторов в батарее.

Питающую сеть можно рассматривать, как чистую индуктивность L_a , так, что:

$$L_a \omega = \frac{U_n^2}{S_{sc}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{sc}}$$

где:

- U_n – номинальное линейное напряжение,
- I_{sc} – ток симметричного трехфазного короткого замыкания в точке присоединения батареи,
- S_{sc} – мощность короткого замыкания в точке присоединения батареи (по определению, $S_{sc} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{sc}$).

Сопротивление линии от коммутационного аппарата (контактор, выключатель или рубильник) до конденсаторной батареи рассматривается также как чисто индуктивное.

2.1.1. Случай нерегулируемой батареи

Эквивалентная схема одной фазы приведена на рисунке:

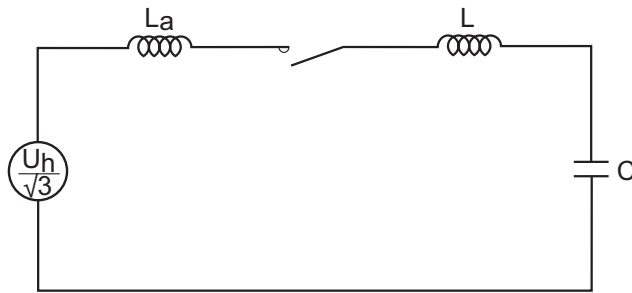


Рис.5. Упрощенная схема нерегулируемой батареи.

- L_a – индуктивность питающей сети,
- L – индуктивность участка от коммутационного аппарата до конденсаторной батареи.

Амплитуда тока включения вычисляется в соответствии с выражением:

$$\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \sqrt{\frac{C}{L_a + L}}$$

Величиной L можно пренебречь по сравнению с L_a , откуда:

$$\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \sqrt{\frac{C}{L_a}}$$

Собственная частота свободной составляющей тока включения:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C}}$$

Длительность протекания свободной составляющей тока равна длительности переходного процесса короткого замыкания, то есть несколько десятков миллисекунд (мс).

Номинальный ток батареи:

$$I_{нсара} = C\omega \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

отношение амплитуды свободной составляющей к номинальному току батареи:

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{нсара}} = \sqrt{2} \times \frac{1}{\omega\sqrt{L_a C}}$$

Используя выражения:

$$L_a \omega = \frac{U_n^2}{S_{sc}} \quad \text{и} \quad Q = C\omega U_n^2$$

Получаем:

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{нсара}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

Сверток сопровождается также перенапряжением, максимальная величина которого может приближаться к двойному амплитудному значению напряжения сети.

■ **Пример**

Предположим, что нерегулируемая батарея $Q = 250$ квар, линейное напряжение $U_n = 400$ В подключается к точке сети, где мощность короткого замыкания составляет $S_{sc} = 20$ МВА.

Тогда:

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{нсара}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{нсара}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{20 \cdot 10^6}{250 \cdot 10^3}} = 12,6$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C}}$$

$$f_o = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{20 \cdot 10^6}{250 \cdot 10^3}} = 447 \text{ Гц}$$

Амплитуда свободной составляющей тока включения в данном примере в 12,6 раз превышает номинальный ток батареи, а ее собственная частота составляет 447 Гц.

На нижеприведенных рисунках представлены ток включения и напряжение сети в предположении, что включение происходит в момент прохождения напряжения через максимум.

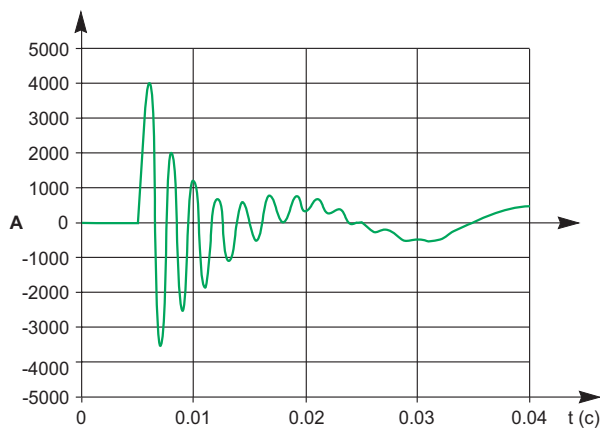


Рис. 6. Ток включения

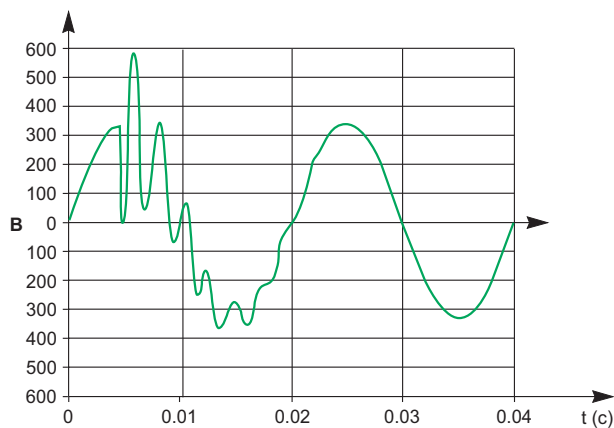


Рис. 7. Напряжение сети при включении.

2.1.2. Случай многосекционной батареи

Эквивалентная схема одной фазы для $(n+1)$ секции конденсаторов приведена на рисунке:

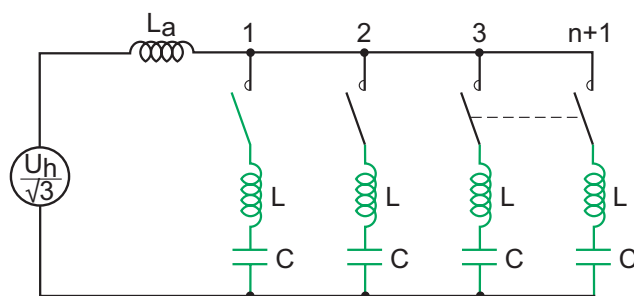


Рис. 8. Упрощенная схема многосекционной батареи.

- L_a – индуктивность питающей сети,
- L – индуктивность участка от коммутационного аппарата до секции батареи ($0,5 \mu\text{H/м}$).

Амплитуда тока включения I_e максимальна, когда n секций включены и $n+1$ -я секция включается. Работавшие секции разряжаются на включаемую. Индуктивности L очень малы и ток включения весьма велик (он не зависит от индуктивности сети L_a).

Амплитуда тока включения определяется следующим выражением:

$$\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{n}{n+1} U_n \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Номинальный ток секции Inсара:

$$I_{нсара} = C\omega \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

Сравнивая два тока, получим:

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{нсара}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{n}{n+1} U_n \cdot \frac{1}{\sqrt{Q\omega L}}$$

где Q – реактивная мощность одной ступени.

■ Пример

Предположим, что имеется батарея состоящая из 6 секций по 50 квар каждая с линейным напряжением 400 В, длина кабеля до ступени – 1 м. Имеем:

$$\frac{\hat{I}_e}{I_{нсара}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{n}{n+1} U_n \cdot \frac{1}{\sqrt{Q\omega L}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{5}{6} \cdot 400 \cdot \frac{1}{\sqrt{50 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 0,5 \cdot 10^6}} = 168$$

Амплитуда свободной составляющей тока включения в данном примере в 168 раз больше номинального тока секции.

Конденсаторы и коммутирующие аппараты не могут выдержать такой ток. Его необходимо ограничить с помощью специального устройства.

В компенсирующих установках Schneider Electric ограничение тока включения осуществляется специальными сопротивлениями, принцип действия которых показан на рис.9.

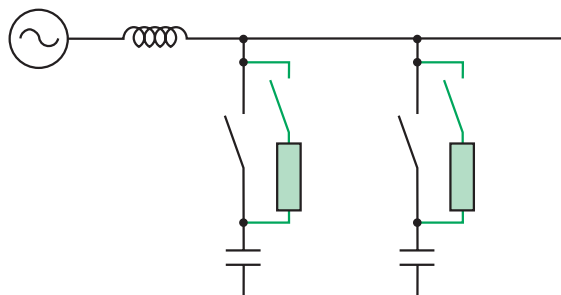


Рис.9. Принцип действия специальных сопротивлений, ограничивающих ток включения.

Каждая секция конденсаторов управляется контактором, имеющим, кроме главных, еще и вспомогательные контакты.

В момент включения вспомогательные контакты замыкаются мгновенно, что позволяет предварительно зарядить конденсаторы через ограничительные сопротивления. Спустя примерно 3 мс замыкаются главные контакты, шунтируя эти сопротивления.

На рисунках 10 и 11 приведена картина переходного процесса предыдущего примера со специальным сопротивлением, ограничивающим ток включения, величиной 3,2 Ом:

■ ток включаемой секции (рис.10),

■ напряжение на зажимах включаемой секции и напряжение сети (рис.11).

Амплитуда тока включения 6-й секции $I_e \approx 700$ А, то есть примерно в 10 раз больше номинального тока секции.

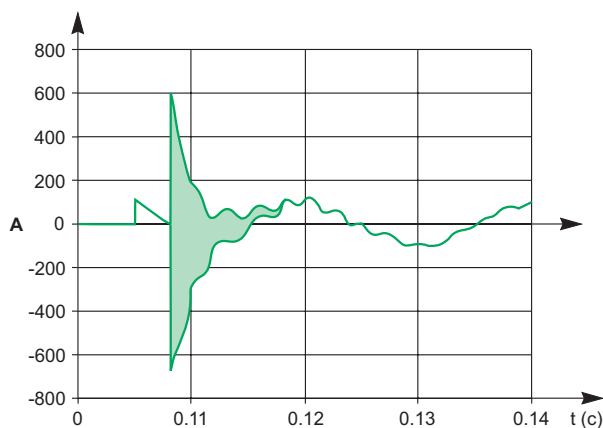


Рис. 10. Ток включаемой секции.

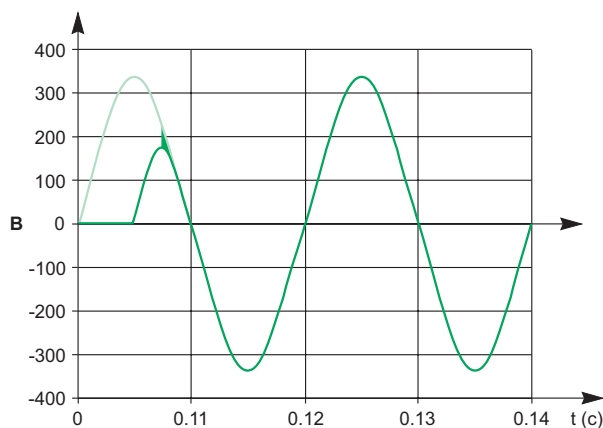


Рис. 11. Напряжение на зажимах включаемой секции и напряжение сети.

2.2. Резонанс

Резонансные явления на высших гармониках являются причиной больших искажений токов и напряжений в распределительных сетях и вызывают также перегрузку силовых конденсаторов.

Явления, описанные ниже, относятся к типу «параллельного резонанса» (резонанса токов).

Рассмотрим упрощенную схему (рис. 12), представляющую электроустановку, которая включает в себя:

- питающий трансформатор,
- линейную нагрузку,
- нелинейную нагрузку, являющуюся источником гармоник (ИГ),
- конденсаторы для компенсации РМ.

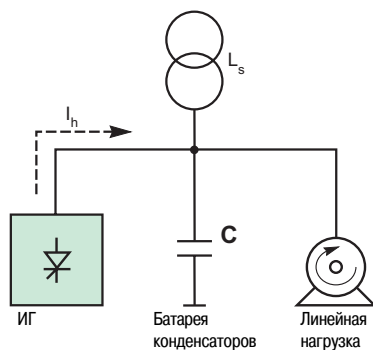


Рис. 12. Упрощенная схема электроустановки.

Эквивалентная схема для анализа гармоник выглядит следующим образом:

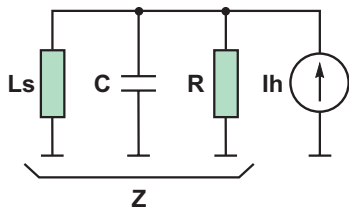


Рис. 13. Эквивалентная схема для гармонического анализа.

- L_s – индуктивность питающей цепи (сеть+трансформатор+линия),
- C – емкость силовых конденсаторов,
- R – сопротивление нагрузки, имеющей линейную вольтамперную характеристику (ВАХ),
- I_h – ИГ.

Зависимость модуля эквивалентного сопротивления Z для токов высших гармоник от частоты представлена на рисунке ниже:

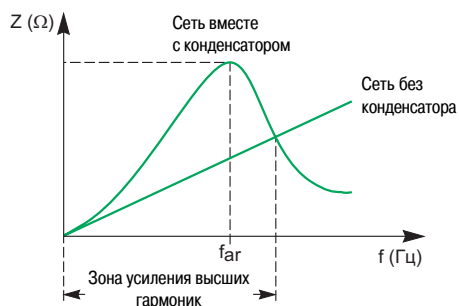


Рис. 14. Модуль сопротивления Z в зависимости от частоты.

Физическая интерпретация:

- частота $f_{ар}$ является резонансной частотой параллельной цепи ($L_s - C$),
- на частоте $f_{ар}$ модуль сопротивления цепи максимален. Следовательно, при неизменном токе напряжение соответствующих гармоник велико и имеет место значительное искажение кривой напряжения.
- токи гармоник, относящихся к зоне усиления, протекающие внутри цепи $L_s - C$ превышают по величине токи, протекающие в неразветвленной части цепи (то есть токи, посылаемые ИГ).

На нижележащей схеме показаны элементы цепи, нагруженные усиленными токами высших гармоник:

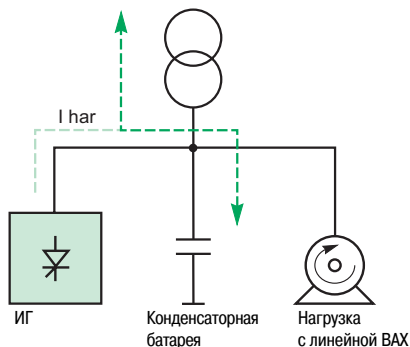


Рис. 15. Циркуляция усиленных токов гармоник.

Питающая сеть и батарея для компенсации РМ нагружены значительными токами высших гармоник, что может привести к перегрузке.

■ Пример

Случай 1. Рассмотрим сеть, состоящую из трансформатора, линейной нагрузки и конденсаторную батарею, служащую для компенсации РМ.

Параметры элементов сети:

- номинальная мощность трансформатора $S_n = 1000$ кВА,
- напряжение короткого замыкания трансформатора $U_k = 5\%$,
- линейная нагрузка:
 - мощность $P = 500$ кВт,
 - $\cos\phi = 0,75$,
 - конденсаторная батарея $Q = 250$ квар.

Случай 2. Предположим, что половина линейной нагрузки заменяется на нелинейную.

В этом случае будет иметь место значительное искажение синусоидальности кривой тока в конденсаторной батарее.

Резонансная частота составляет 447 Гц, что приводит к значительному усилению гармоник 11-го порядка.

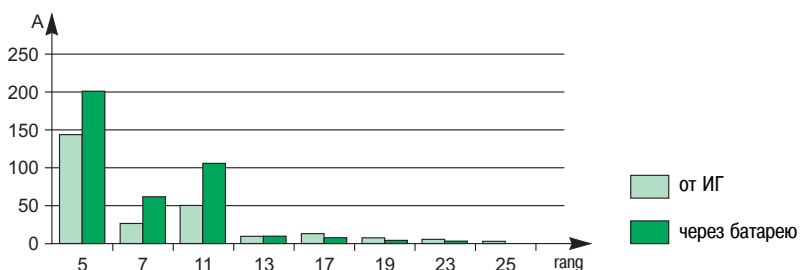


Рис. 16. Спектр токов высших гармоник.

■ Ток батареи в отсутствие ИГ

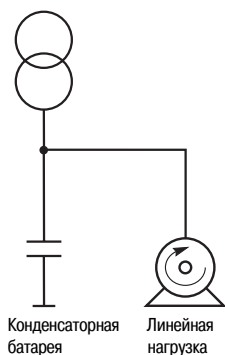
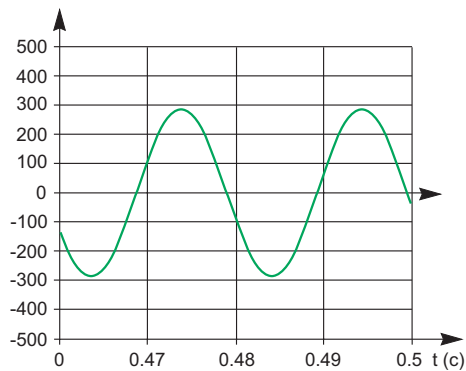


Рис. 17. Компенсация в отсутствие ИГ.



■ Ток батареи в присутствии ИГ

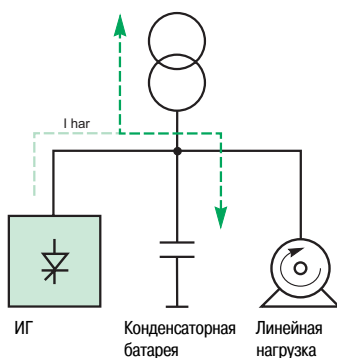
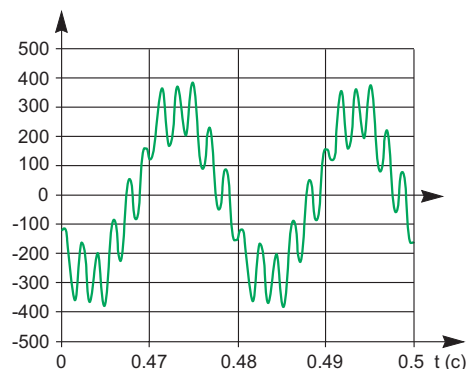


Рис. 18. Компенсация в присутствии ИГ



2.3. Перегрузка токами высших гармоник.

2.3.1. Общий случай

Напряжения высших гармоник, приложенные к конденсаторам, вызывают циркуляцию токов, величина которых пропорциональна частоте гармоник. Эти токи вызывают дополнительные потери. Напряжения гармоник, накладываясь на напряжение основной частоты, увеличивают амплитуду напряжения, что приводит к ускоренному старению изоляции.

■ Пример

□ Напряжение основной частоты U_1 ,

□ Напряжения высших гармоник:

- $U_5 = 8\%$,

- $U_7 = 5\%$,

- $U_{11} = 3\%$,

- $U_{13} = 1\%$,

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $TND_u = 10\%$.

$$I_1 = U_1 \cdot C \cdot \omega$$

$$I_5 = U_5 \cdot C \cdot 5 \cdot \omega = u_5 \cdot 5 \cdot I_1$$

$$I_7 = U_7 \cdot C \cdot 7 \cdot \omega = u_7 \cdot 7 \cdot I_1$$

$$I_{11} = U_{11} \cdot C \cdot 11 \cdot \omega = u_{11} \cdot 11 \cdot I_1$$

$$I_{13} = U_{13} \cdot C \cdot 13 \cdot \omega = u_{13} \cdot 13 \cdot I_1$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum I_h^2}$$

$$\frac{I_{rms}}{I_1} = \sqrt{1 + (u_5 \cdot 5)^2 + (u_7 \cdot 7)^2 + (u_{11} \cdot 11)^2 + (u_{13} \cdot 13)^2} = 1,19$$

В результате имеем перегрузку около 20% по сравнению с током, протекающим при чисто синусоидальном напряжении.

Конденсаторы стандартного типа могут выдерживать перегрузку по току до 30% (чтобы выдержать суммарное воздействие токов гармоник и флуктуации напряжения).

В случае более значительных искажений кривой напряжения следует использовать специальные конденсаторы, рассчитанные на повышенное напряжение, которые могут выдержать ток 1,43 In.

2.3.2. Перегрузка фильтров высших гармоник.

Целью применения фильтра высших гармоник является отвести токи гармоник в цепь малого сопротивления, чтобы они не протекали по питающей сети. Этот принцип иллюстрируется рисунком 19:

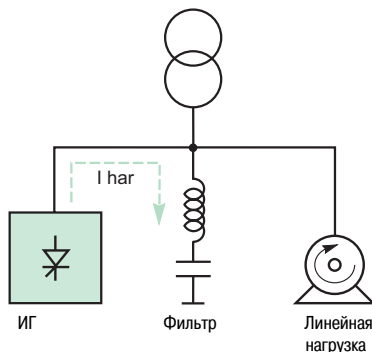


Рис. 19. Упрощенная схема установки с фильтром высших гармоник.

15.4 I гарм
15.5 ИГ
15.6 Фильтр
15.7

Если из питающей сети также поступают токи высших гармоник, вызванные источниками гармоник, подключенными в головной части сети (выше питающего трансформатора), то существует опасность перегрузки фильтра, как это показано на следующем рисунке:

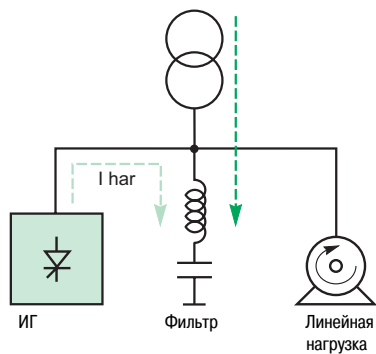


Рис. 20. Опасность перегрузки фильтра высших гармоник.

Искажения напряжения, существовавшие в питающей сети, должны быть учтены при выборе мощности фильтров высших гармоник.

Фильтры высших гармоник принято оснащать защитой от перегрузки.

На выбор типа и уставки защиты влияют различные ограничивающие условия:

- ток включения,
- гармонические составляющие,
- изменения напряжения сети,
- разброс характеристик оборудования.

Выбор защит

3.1. Ток включения

Выше было показано, что амплитуда тока включения конденсаторной батареи может быть очень большой, особенно в случае многосекционной автоматически регулируемой батареи. На практике автоматически регулируемые батареи низкого напряжения Schneider Electric оснащаются контакторами с сопротивлениями, ограничивающими ток включения.

Эти сопротивления позволяют:

- не допустить, чтобы максимальная амплитуда тока включения достигала уровня, допустимого для конденсаторов,
- не допустить, чтобы ток включения батареи достигал максимально допустимого тока включения коммутационного аппарата (контактора, выключателя или неавтоматического выключателя),
- увеличить срок службы контакторов.

3.2. Выбор электрооборудования по нагреву (отключающие аппараты и кабели)

Допустимые изменения напряжения основной и высших гармоник могут привести к увеличению тока конденсаторов на величину от 30 до 45%.

Разброс емкости конденсаторов может привести к дополнительному увеличению тока на 15% (в соответствии с нормами NFC 15-104). Для конденсаторов Schneider Electric это дополнительное увеличение сведено до 5%.

Учет этих двух факторов приводит к необходимости выбирать оборудование на ток в:

- $1,3 \times 1,15 = 1,5$ раза выше номинального тока обычных конденсаторов,
- $1,3 \times 1,05 = 1,36$ раза выше номинального тока стандартных конденсаторов Schneider Electric,
- $1,45 \times 1,05 = 1,5$ раза выше номинального тока специальных конденсаторов Schneider Electric, рассчитанных на повышенное напряжение.

3.3. Выбор типа и уставки защиты для конденсаторных батарей Schneider Electric

Защита конденсаторов низкого напряжения может быть выполнена при помощи предохранителей или выключателей.

- Защита конденсаторов выключателем

Как было показано выше, номинальный ток выключателя для защиты стандартных конденсаторов должен быть больше, чем 1,36-Ином, а номинальный ток теплового расцепителя может быть принят 1,36-Ином.

Защита должна быть чувствительна к действующему значению тока, включая высшие гармоники. Уставка мгновенного срабатывания должна быть на уровне 10-Ином.

■ Тип расцепителя

Может быть использован комбинированный (магнитотермический) расцепитель.

В случае использования электронного расцепителя уставка мгновенного срабатывания должна быть 10-1г, чтобы пропустить пик тока включения.

■ Согласование выключателя с конденсаторной установкой.

В том случае, когда батарея защищена токоограничивающим выключателем, отпадает необходимость рассчитывать батарею на такой же ток короткого замыкания, на который рассчитана электроустановка (см. кривые токоограничения выключателей Compact и Masterpact).

■ Использование УЗО

В момент включения батареи конденсаторов три фазных тока неодинаковы, хотя их сумма равна нулю. Эти токи имеют большую величину. Следовательно, для снижения тока небаланса УЗО, который может вызвать ложное отключение, нужно располагать 3 фазных проводника точно в геометрическом центре тороидального сердечника трансформатора тока нулевой последовательности УЗО.

■ Защита устройств компенсации автоматическими выключателями и предохранителями

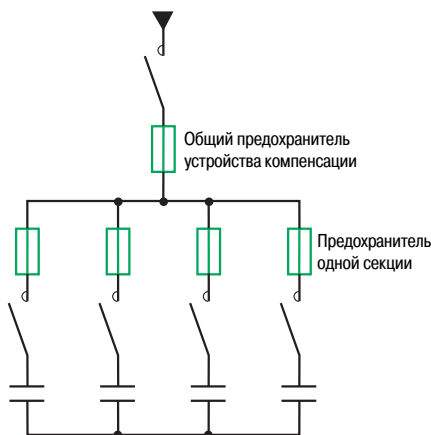


Рис. 21. Защита устройства компенсации (многосекционной батареи)

■ Защита устройства компенсации автоматическим выключателем

Все устройства компенсации реактивной мощности должны иметь надежную защиту от перегрузок и коротких замыканий.

Автоматический выключатель устройства компенсации должен быть выбран таким образом, чтобы защита от перегрузок имела уставку:

- 1,36 Inom. для оборудования типа CLASSIC;
- 1,5 Inom. для оборудования типа COMFORT;
- 1,12 Inom. для оборудования типа HARMONY (с реактором), частота настройки 2,7 (135 Гц);
- 1,19 Inom. для оборудования типа HARMONY (с реактором), частота настройки 3,8 (190 Гц);
- 1,31 Inom. для оборудования типа HARMONY (с реактором), частота настройки 4,3 (215 Гц).

Уставка защиты от короткого замыкания должна быть отстроена от броска тока при включении конденсаторов: 10 Inom. для оборудования CLASSIC, COMFORT или HARMONY (с реактором).

Номинальный ток можно рассчитать по формуле

$$I_{ном} = Q_c / (1,732 \times U_{ном})$$

■ Защита устройства компенсации предохранителем

Необходимо использовать предохранители с высокой отключающей способностью типа Gg:

- тип CLASSIC: 1,4 Inom.;
- тип COMFORT: 1,6 Inom.;
- тип HARMONY: 1,4 Inom..

Для устройства компенсации типа HARMONY номинальный ток автоматического выключателя или плавкой вставки выбирается по действующему значению номинального тока устройства с учетом токов высших гармоник.

Действующее значение тока с учетом высших гармоник: $I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \dots + I_i^2 + \dots}$,

где

- I_1 – ток основной гармоники 50 Гц,
- I_i – ток гармоники номер i .

Можно заметить, что повышающие коэффициенты токов автоматических выключателей и предохранителей устройств компенсации типа HARMONY меньше по величине, чем в случае устройств типа COMFORT, поскольку реактор ограничивает ток включения.

■ **Защита ступеней предохранителем**

Необходимо использовать предохранители с высокой отключающей способностью типа Gg с номинальным током не менее:

- Тип Classic или Comfort: 1,6 Inом.;
- Тип Harmony (с реакторами): 1,5 Inом.

Примечание: когда для защиты двух ступеней используется один комплект предохранителей, коэффициенты должны быть следующие:

- для ступени типа Classic или Harmony: 1,4 Inом.;
- для ступени типа Comfort: 1,6 Inом.

■ **Защита кабелей**

Питающие кабели должны выбираться по нагреву таким же образом, как и аппараты защиты и коммутации. Они должны быть также защищены от коротких замыканий в самих кабелях и в конденсаторах.

Для заметок

Технические приложения

Компенсация асинхронных двигателей	22
Компенсация трансформаторов	23
Сечение кабелей	24



Компенсация асинхронных двигателей

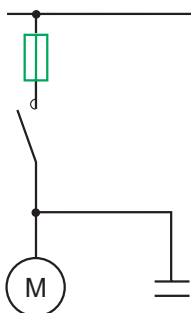


Сosφ асинхронных двигателей весьма низок при работе на холостом ходу и с малой нагрузкой и невысок в номинальном режиме. Поэтому установка конденсаторов для этого типа ЭП дает хороший эффект.

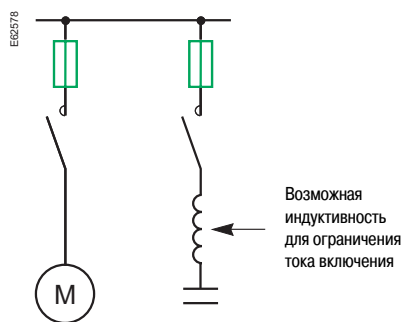
Нижеприведенная таблица дает приближенные значения мощности рекомендуемых к подключению конденсаторных установок в квар в зависимости от мощности двигателей.

Номинальная мощность двигателя кВт		Мощность батареи (квар) Количество пар полюсов			
CV	1	2	3	4	
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	240	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

Особенности компенсации асинхронных двигателей



Подключение конденсаторов к зажимам двигателя



Параллельное подключение конденсатора через отдельный выключатель.

Если двигатель приводит механизм с большим моментом инерции, то после отключения напряжения питания он продолжает вращаться, используя свою кинетическую энергию и возбуждается от конденсаторной батареи, подключенной к его зажимам. Конденсаторы поставляют ему реактивную мощность, необходимую для его работы в режиме асинхронного генератора. Такое самовозбуждение приводит к поддержанию напряжения и иногда к перенапряжению.

Вариант подключения конденсаторов к зажимам двигателя

Чтобы избежать опасных перенапряжений, вызванных самовозбуждением двигателя, нужно убедиться, что мощность батареи отвечает следующему условию:

$$Q_c \leq 0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0, \text{ где}$$

I_0 – ток холостого хода двигателя. Приблизительно его величина может быть определена по формуле:

$$I_0 = 2I_n \cdot (1 - \cos\varphi_n), \text{ где}$$

I_n – номинальный ток двигателя,
 $\cos\varphi_n$ – номинальный cosφ двигателя,
 U_n – номинальное линейное напряжение.

Вариант параллельного подключения конденсаторов через отдельный выключатель

Чтобы избежать опасных перенапряжений из-за самовозбуждения, а также в случае использования специальных схем пуска двигателя (через сопротивление, реакторы, автотрансформаторы) конденсаторы подключают через отдельный коммутирующий аппарат только после завершения пуска, отключают раньше снятия питания с двигателя.

При этом во время работы двигателя под нагрузкой его РМ полностью компенсируется. Следует быть внимательным, если несколько таких конденсаторных батарей работают в одной сети. В этом случае нужно предусмотреть реакторы для ограничения тока включения или предварительно включаемые активные ограничительные сопротивления.

Компенсация трансформаторов



Трансформатор потребляет реактивную мощность, которая может быть определена приближенно, как сумма двух частей:

■ постоянная часть, которая зависит от намагничивающего тока холостого хода I_0 :

$$Q_0 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0,$$

■ переменная часть примерно пропорциональная квадрату передаваемой полной мощности:

$$Q = U_{sc} \cdot S^2 / S_n,$$

U_{sc} – напряжение короткого замыкания трансформатора,
 S – полная мощность, передаваемая через трансформатор,

S_n – номинальная мощность трансформатора,
 U_n – номинальное линейное напряжение.

Суммарная реактивная мощность, потребляемая трансформатором: $Q_t = Q_0 + Q$.

Индивидуальная компенсация этой РМ осуществляется прямо на зажимах трансформатора.

Если принят вариант централизованной компенсации, то РМ трансформатора компенсируется вместе с РМ потребителей путем подключения батареи к шинам главного распределительного щита (ГРЩ).

Эта батарея может быть нерегулируемой, если общая РМ не превышает 15% от номинальной мощности трансформатора или автоматически регулируемой в противном случае.

Мощность батареи индивидуальной компенсации трансформатора в зависимости от его номинальной мощности приведена в таблице ниже.

Номинальная мощность трансформатора в кВА (400 В)	РМ, подлежащая компенсации, квар	
	на холостом ходу	под нагрузкой
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	126,2
2000	37,8	176

При выборе сечения кабелей следует учитывать:

- токи высших гармоник + 30%
- разброс емкости конденсаторов, составляющий + 15% или + 5% для конденсаторов Schneider

Electric.

Допустимые отклонения напряжения основной гармоники и присутствие высших гармоник могут привести к возрастанию тока на 30%.

Разброс емкости конденсаторов приводит к увеличению тока на 15% (в случае конденсаторов Schneider Electric это увеличение не превышает 5%).

Следовательно, питающие кабели, а также устройства коммутации и защиты этих батарей должны быть рассчитаны на повышенный ток $1,3 \cdot 1,15 = 1,5$ In или на ток $1,3 \cdot 1,05 = 1,36$ In для конденсаторов Schneider Electric.

В нижеследующей таблице приведены минимальные сечения питающих кабелей в зависимости от мощности конденсаторной батареи Schneider Electric.

В случае использования конденсаторов другого типа следует выбирать ближайшее большее

стандартное сечение по отношению к указанному в таблице.

Сечение кабелей присоединения конденсаторных батарей средней и большой мощности (1) (кабели U 1000 Ro2V)

Мощность батареи, кВар	Сечение		
	медь, мм ²	алюмин., мм ²	
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

(1) Приводится минимальное сечение, не учитывающее поправок ни на способ прокладки, ни на температуру окружающей среды и т.п. Сечение приведено для однопроволочных кабелей, прокладываемых открыто (в воздухе) при температуре +30 °С.

Для заметок

Для заметок

Schneider Electric в странах СНГ

Азербайджан

Баку
AZ 1008, ул. Гарабах, 22
Тел.: (99412) 496 93 39
Факс: (99412) 496 22 97

Беларусь

Минск
220006, ул. Белорусская, 15, офис 9
Тел.: (37517) 226 06 74, 227 60 34, 227 60 72

Казахстан

Алматы
050050, ул. Табачнозаводская, 20
Швейцарский Центр
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

Астана

010000, ул. Бейбитшилик, 18
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002», офис 402
Тел.: (3172) 91 06 69
Факс: (3172) 91 06 70

Атырау

060002, ул. Абая, 2-А
Бизнес-центр «Сутас - С», офис 407
Тел.: (3122) 32 31 91, 32 66 70
Факс: (3122) 32 37 54

Россия

Волгоград
400089, ул. Профсоюзная, 15, офис 12
Тел.: (8442) 93 08 41

Воронеж

394026, пр-т Труда, 65, офис 267
Тел.: (4732) 39 06 00
Тел./факс: (4732) 39 06 01

Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104, офисы 311, 313
Тел.: (343) 217 63 37
Факс: (343) 217 63 38

Иркутск

664047, ул. 1-ая Советская, 3 Б, офис 312
Тел./факс: (3952) 29 00 07, 29 20 43

Казань

420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7
Тел./факс: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

Калининград

236040, Гвардейский пр., 15
Тел.: (4012) 53 59 53
Факс: (4012) 57 60 79

Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268 В, офисы 316, 314
Тел.: (861) 210 06 38, 210 14 45
Факс: (861) 210 06 02

Красноярск

660021, ул. Горького, 3 А, офис 302
Тел.: (3912) 56 80 95
Факс: (3912) 56 80 96

Москва

129281, ул. Енисейская, 37
Тел.: (495) 797 40 00
Факс: (495) 797 40 02

Мурманск

183038, ул. Воровского, 5/23
Конгресс-отель «Меридиан», офис 739
Тел.: (8152) 28 86 90
Факс: (8152) 28 87 30

Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, этаж 8
Тел./факс: (831) 278 97 25, 278 97 26

Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501
Тел.: (383) 358 54 21
Тел./факс: (383) 227 62 53

Пермь

614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11
Тел./факс: (342) 290 26 11 / 13 / 15

Ростов-на-Дону

344002, ул. Социалистическая, 74, литер А
Тел.: (863) 200 17 22, 200 17 23
Факс: (863) 200 17 24

Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27
Тел./факс: (846) 266 41 41, 266 41 11

Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А
Тел.: (812) 320 64 64
Факс: (812) 320 64 63

Сочи

354008, ул. Виноградная, 20 А, офис 54
Тел.: (8622) 96 06 01, 96 06 02
Факс: (8622) 96 06 02

Уфа

450098, пр-т Октября, 132/3 (Бизнес-центр КПД)
Блок-секция № 3, этаж 9
Тел.: (347) 279 98 29
Факс: (347) 279 98 30

Хабаровск

680000, ул. Муравьева-Амурского, 23, этаж 4
Тел.: (4212) 30 64 70
Факс: (4212) 30 46 66

Туркменистан

Ашгабат

744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»
Тел.: (99312) 45 49 40
Факс: (99312) 45 49 56

Узбекистан

Ташкент

100000, пр-т Мустакиллик, 75
Тел.: (99871) 140 11 33
Факс: (99871) 140 11 99

Украина

Днепропетровск

49000, ул. Глинки, 17, этаж 4
Тел.: (380567) 90 08 88
Факс: (380567) 90 09 99

Донецк

83087, ул. Инженерная, 1 В
Тел.: (38062) 385 48 45, 385 48 65
Факс: (38062) 385 49 23

Киев

03057, ул. Смоленская, 31-33, кор. 29
Тел.: (38044) 538 14 70
Факс: (38044) 538 14 71

Львов

79015, ул. Тургенева, 72, кор. 1
Тел./факс: (38032) 298 85 85

Николаев

54030, ул. Никольская, 25
Бизнес-центр «Александровский», офис 5
Тел.: (380512) 58 24 67
Факс: (380512) 58 24 68

Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213
Тел.: (38048) 728 65 55
Факс: (38048) 728 65 35

Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11
Тел.: (380652) 44 38 26
Факс: (380652) 54 81 14

Харьков

61070, ул. Академика Проскуры, 1
Бизнес-центр «Telesens», офис 569
Тел.: (38057) 719 07 79
Факс: (38057) 719 07 49



ЦЕНТР ПОДДЕРЖКИ КЛИЕНТОВ

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)
(495) 797 32 32
Факс: (495) 797 40 02
ru.csc@ru.schneider-electric.com
www.schneider-electric.ru