

Конденсаторы.  
Конденсаторные установки.  
Гармоники.

# План

## Часть 1

- Основные соотношения при расчетах мощности
- Конденсаторы. Основные положения
- Параметры конденсаторов
- Применение конденсаторов
- Защита конденсаторных установок

## Часть 2

- Гармоники
- Вопросы проектирования конденсаторных установок

# Конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности

- Высокое напряжение
- Применение на подстанциях
- Коррекция коэффициента мощности

# Основные соотношения при расчетах мощности

# Основные соотношения при расчетах мощности

Часто задаваемые вопросы:

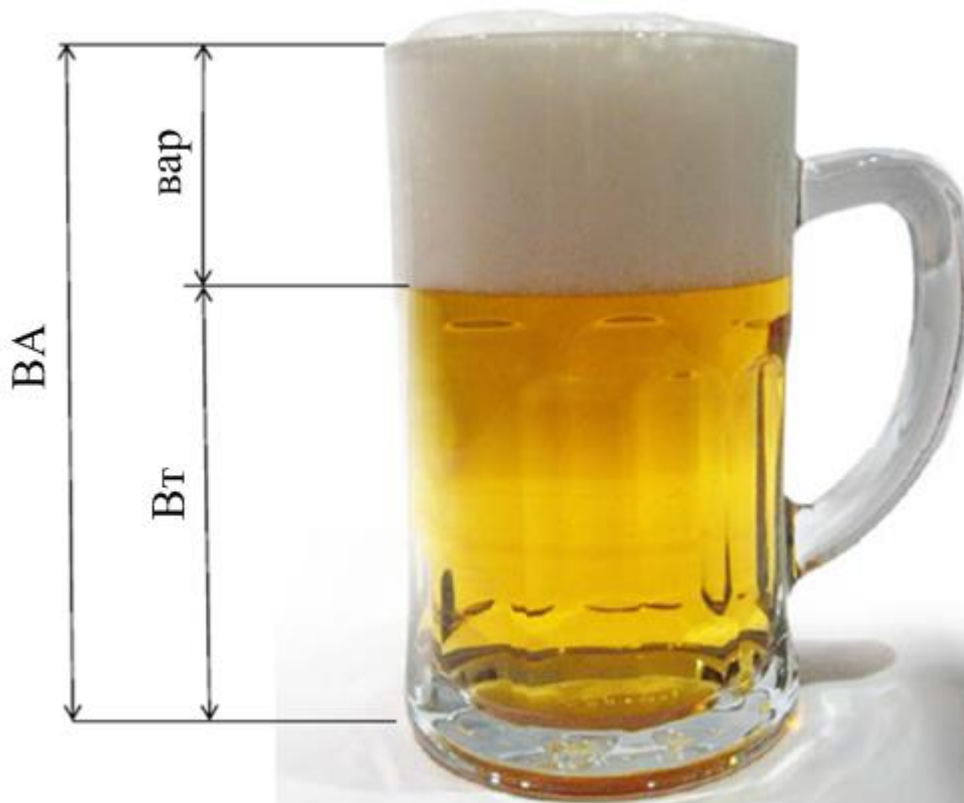
- Что такое реактивная мощность?
- Почему нас интересуют вопросы, связанные с реактивной мощностью?

# Основные соотношения при расчетах мощности

Значительная часть нагрузок на промышленных предприятиях (двигатели, трансформаторы и проч.) имеют индуктивный характер и для своей работы нуждаются в создании магнитного поля. Магнитное поле является необходимым для их функционирования, но оно не совершает **НИКАКОЙ ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ**. Энергосистема должна обеспечивать мощность для создания магнитного поля, а также мощность для выполнения **ПОЛЕЗНОЙ** работы.

**АКТИВНАЯ** составляющая мощности соответствует выполняемой **ПОЛЕЗНОЙ** работе, а **РЕАКТИВНАЯ** составляющая отвечает за создание магнитного поля.

# Основные соотношения при расчетах мощности



**Понятная большинству аналогия**

## Кружка

Мощность оборудования (т.е. трансформаторы, кабельные линии, распределительные устройства и т.д.)

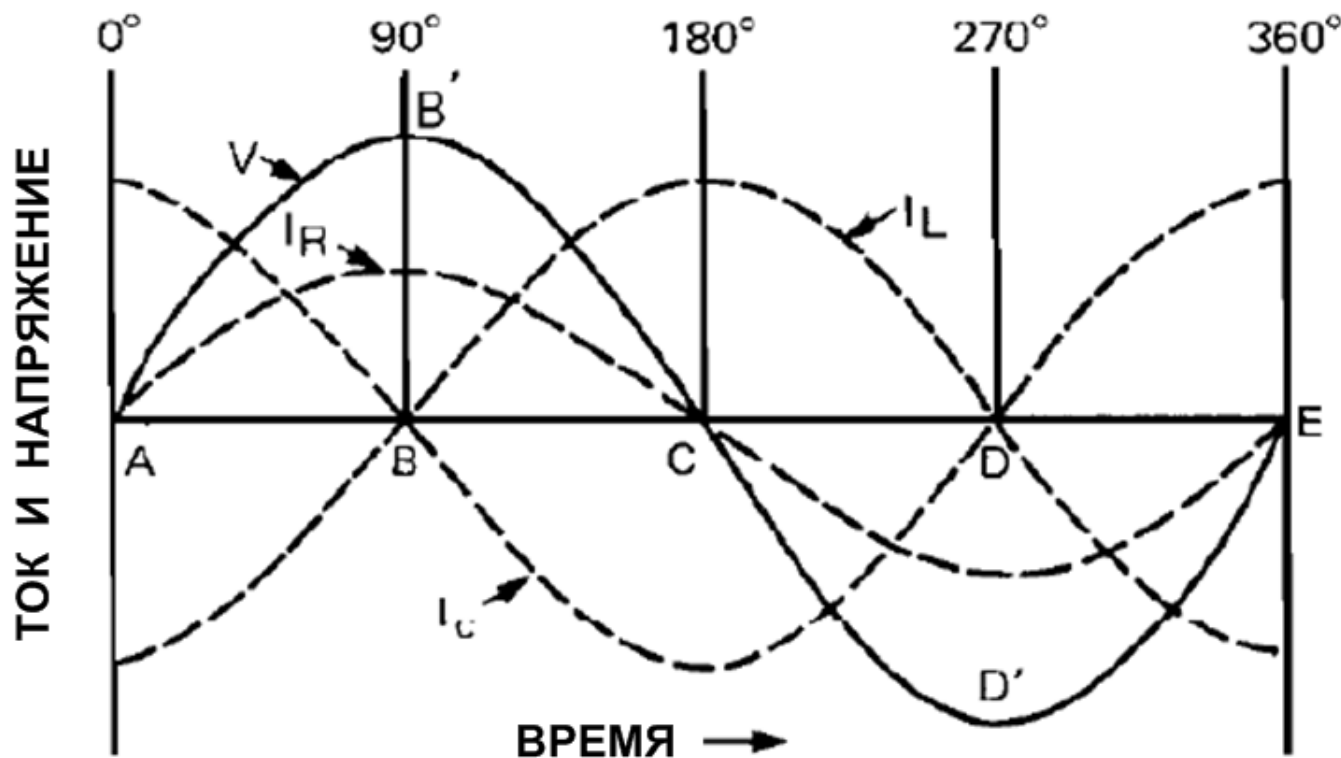
## Пиво

То, что вам нужно

## Пена (Шапка)

То, что не позволяет вам получить максимально возможное количество пива

# Основные соотношения при расчетах мощности



$V$ : Напряжение

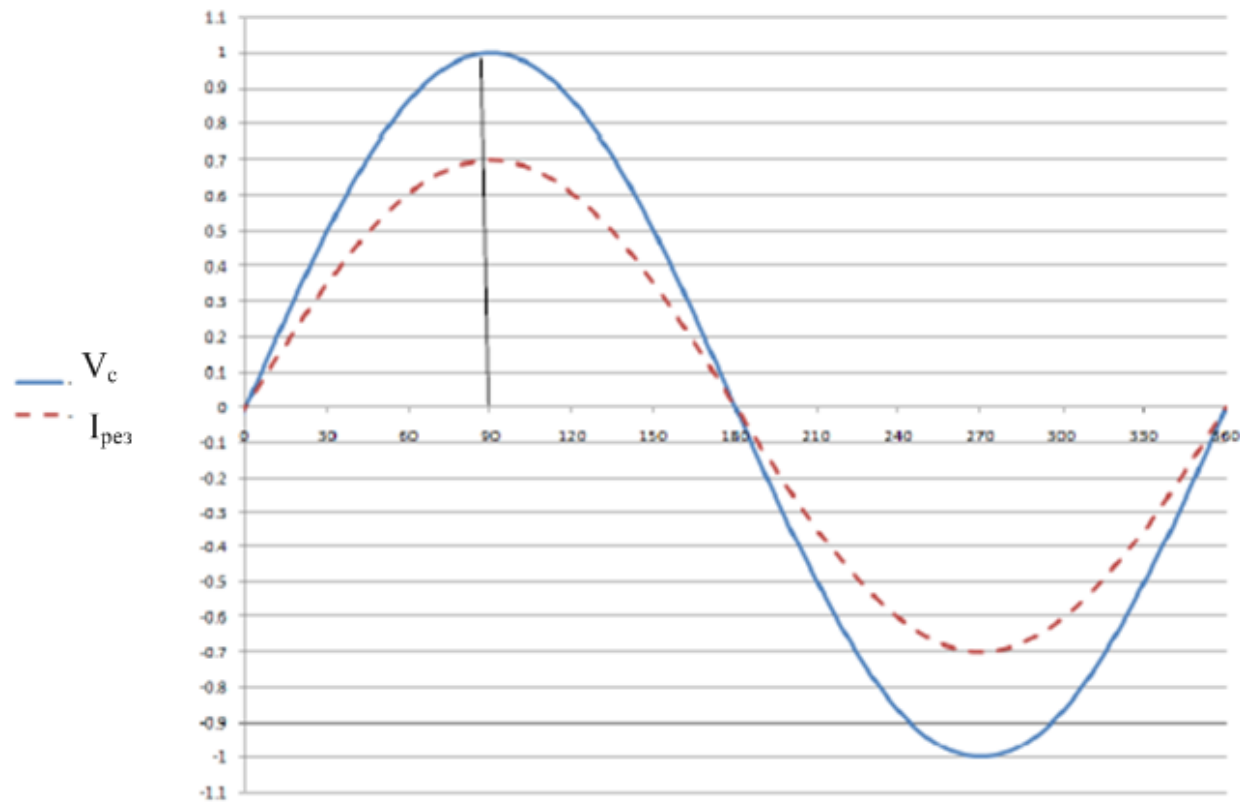
$I_R$ : Активная нагрузка

$I_L$ : Индуктивная нагрузка

$I_C$ : Емкостная нагрузка

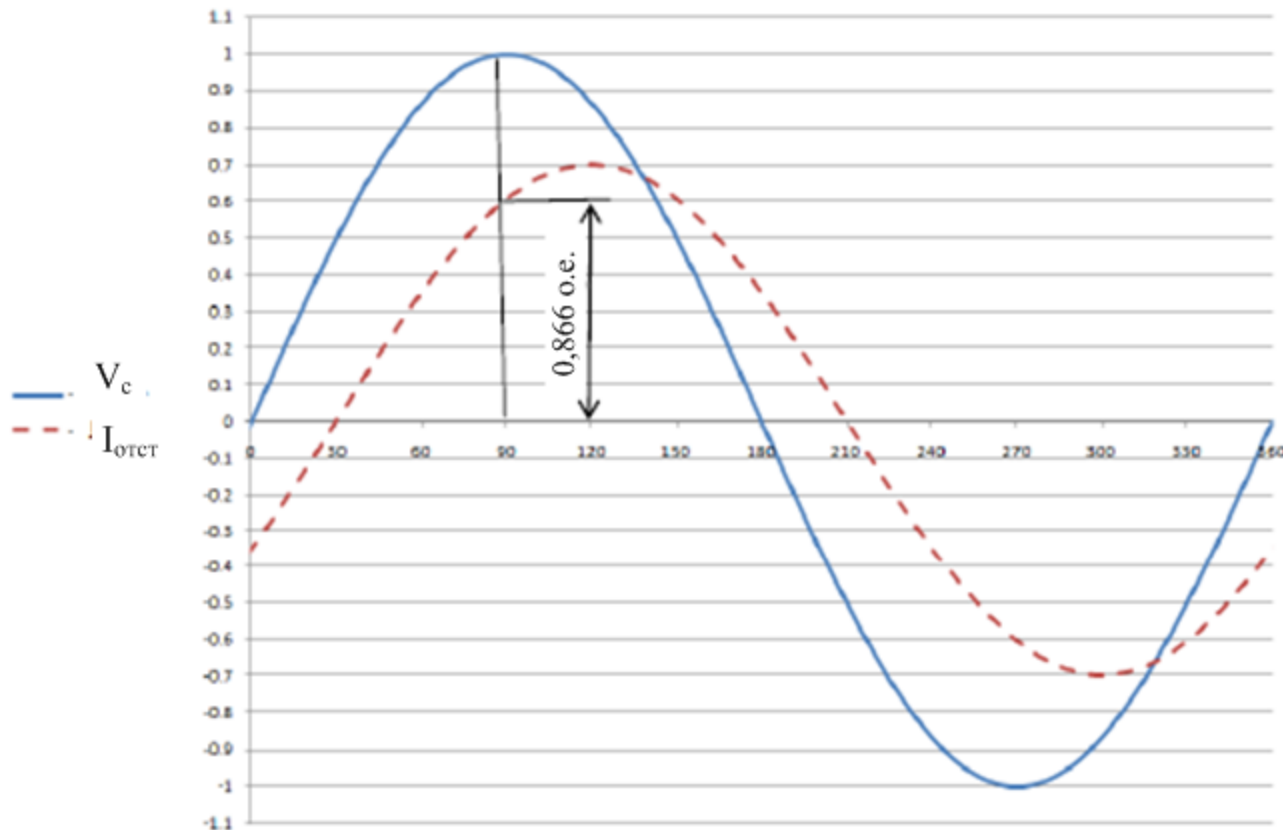


# Основные соотношения при расчетах мощности



$$\text{Мощность} = \text{Re}(\bar{V} \bar{I}^*)$$

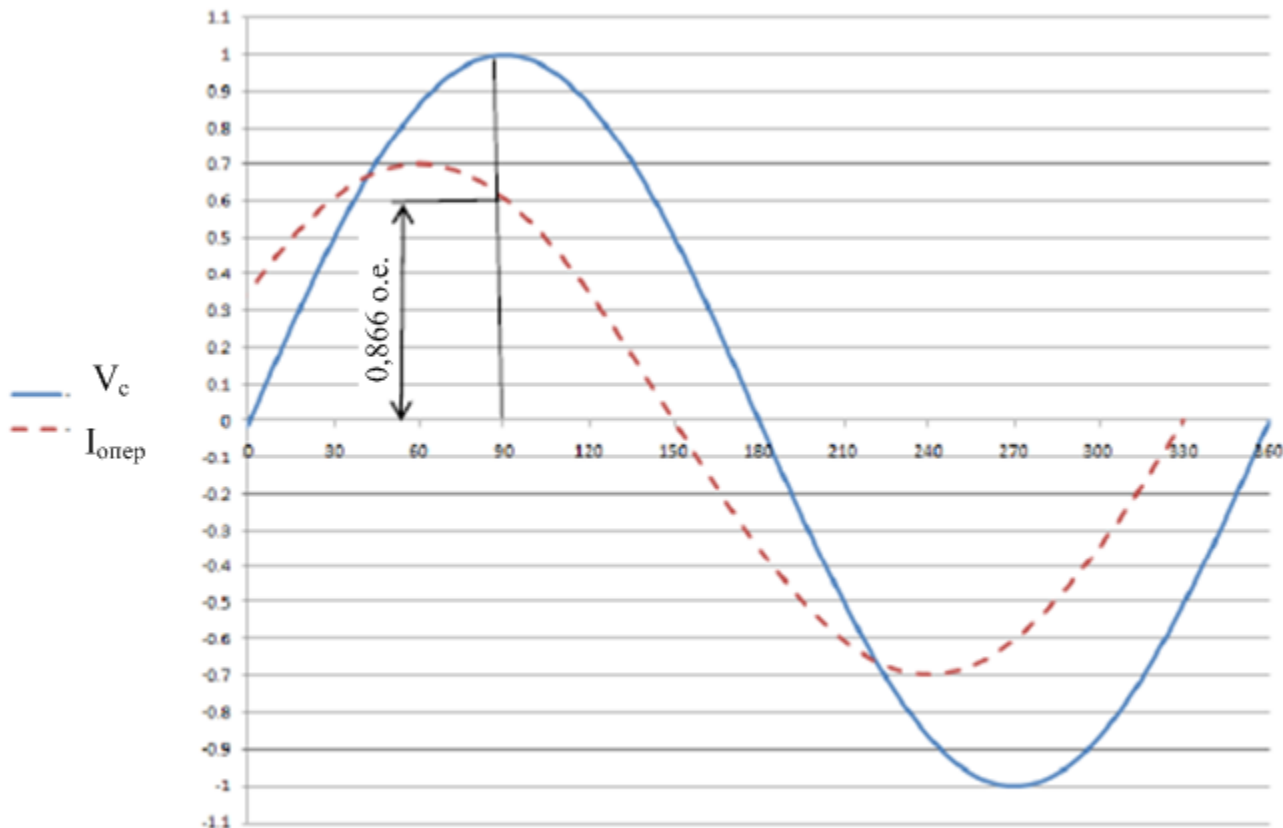
# Основные соотношения при расчетах мощности



$$\text{Мощность} = \text{Re}(\bar{V} \bar{I}^*)$$

Следует отметить, что из-за наличия фазового сдвига (30 градусов) только 86,66% величины тока используется при расчете полезной работы

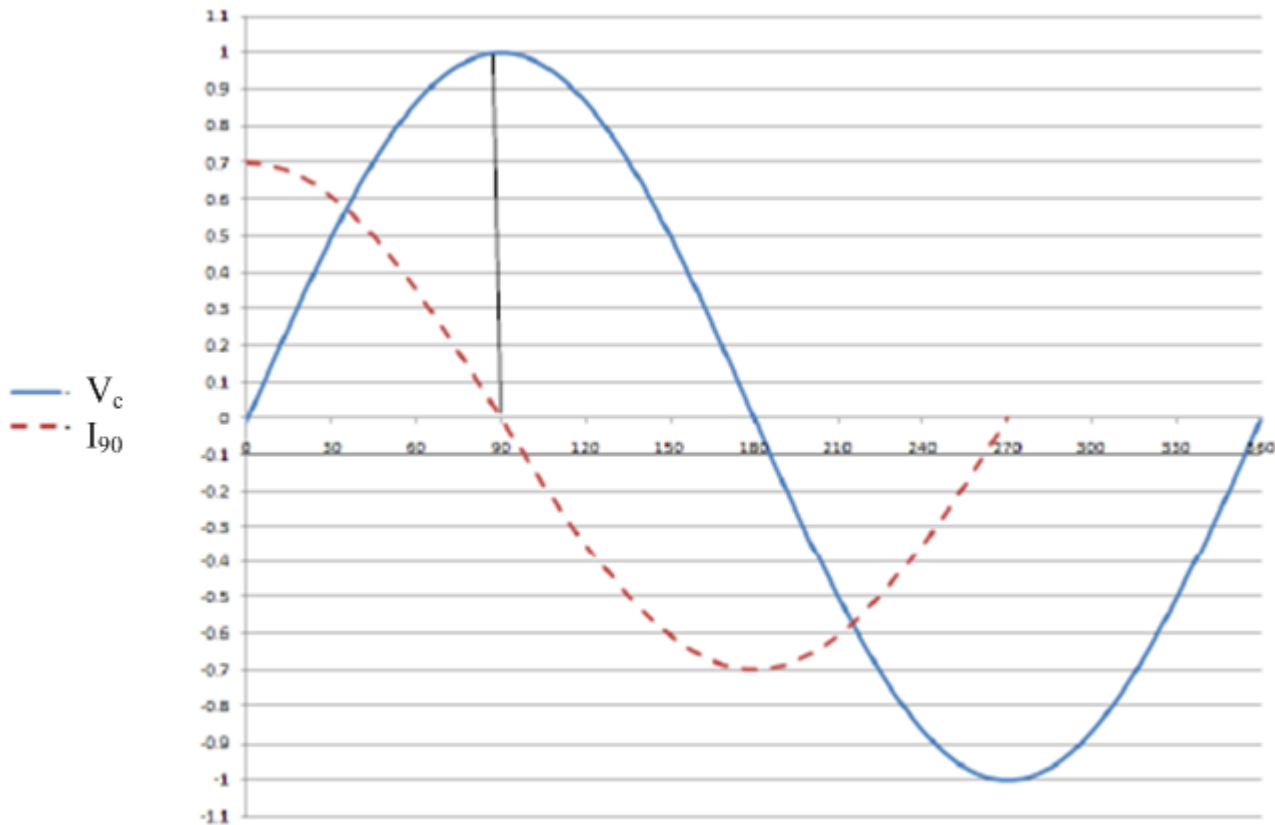
# Основные соотношения при расчетах мощности



$$\text{Мощность} = \text{Re}(\bar{V} \bar{I}^*)$$

Независимо от того, отстающий или опережающий характер имеет ток, расчет мощности приводит к аналогичному результату

# Основные соотношения при расчетах мощности

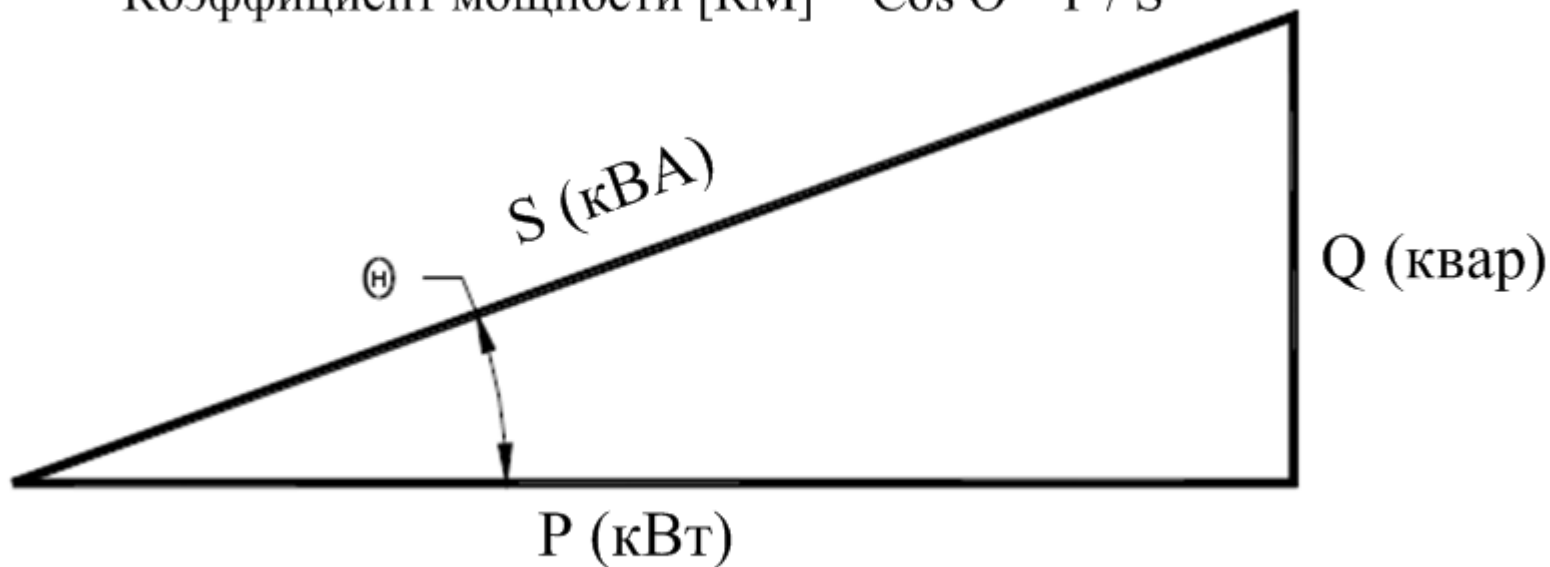


$$\text{Мощность} = \text{Re}(\bar{V} \bar{I}^*)$$

Если ток опережает или отстает по фазе от напряжения на 90 градусов, то активная мощность  $P = 0$

# Основные соотношения при расчетах мощности

Коэффициент мощности [КМ] =  $\cos \Theta = P / S$



Треугольник мощностей

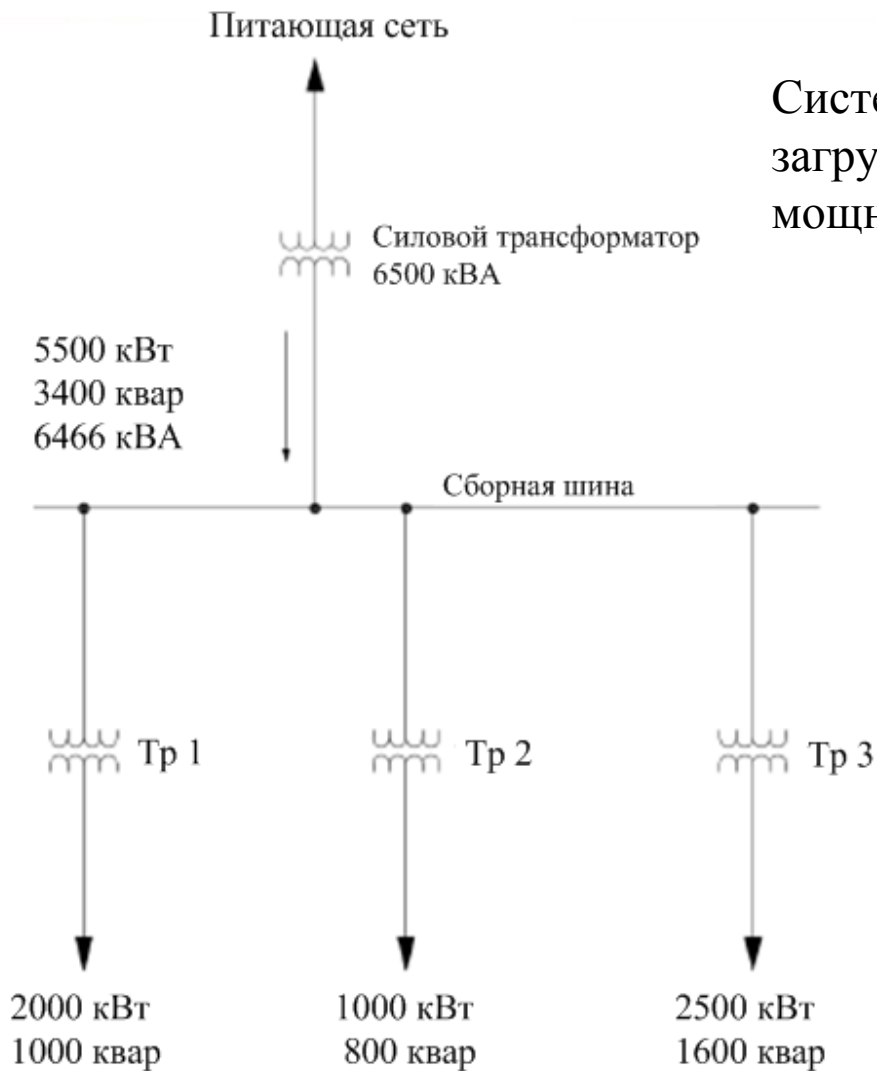
Соотношение между  $P$ ,  $S$  и  $Q$ . На этом рисунке изображен коэффициент мощности при отстающем характере тока. Если реактивная мощность  $Q$  будет отрицательной, то это приведет к опережающему характеру коэффициента мощности

# Основные соотношения при расчетах мощности

**Но как нам узнать, опережает ток напряжение или отстает от него, и что предпринять, чтобы исправить эту ситуацию?**

**Рассмотрим следующий пример**

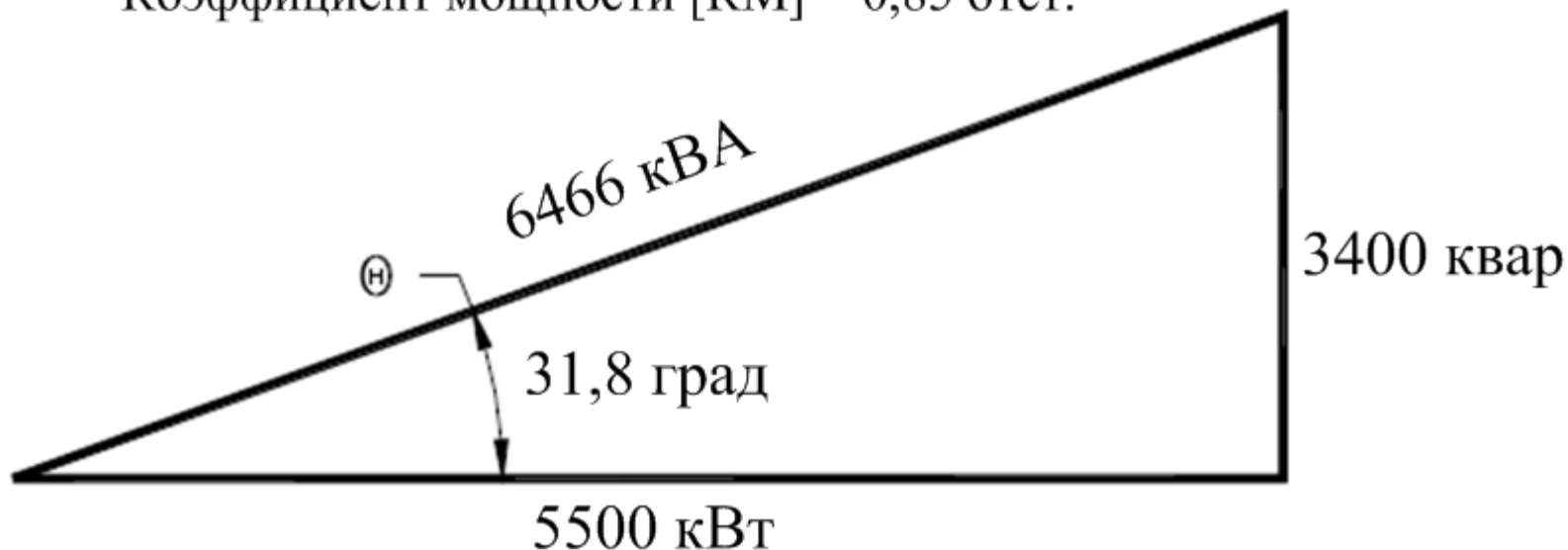
# Основные соотношения при расчетах мощности



Система энергоснабжения  
загружена на 99,5 % своей  
МОЩНОСТИ

# Основные соотношения при расчетах мощности

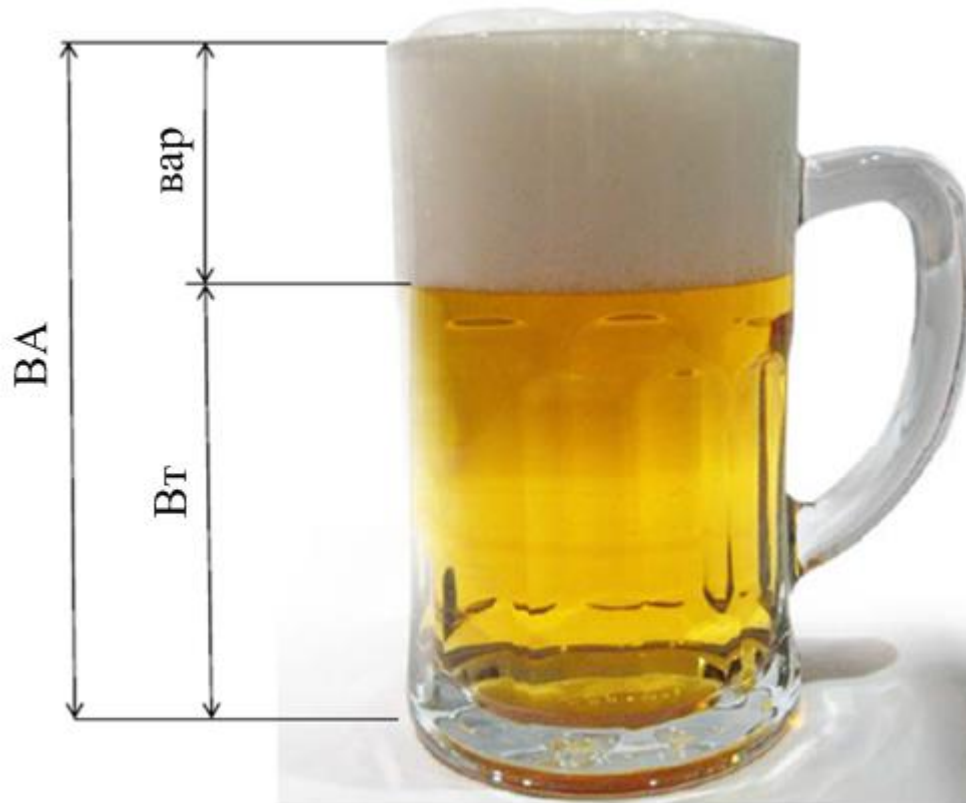
Коэффициент мощности [КМ] = 0,85 отст.



Даже если нашим потребителям требуется лишь 5500 кВт мощности для выполнения полезной работы, система энергоснабжения должна быть рассчитана на 6466 кВА.



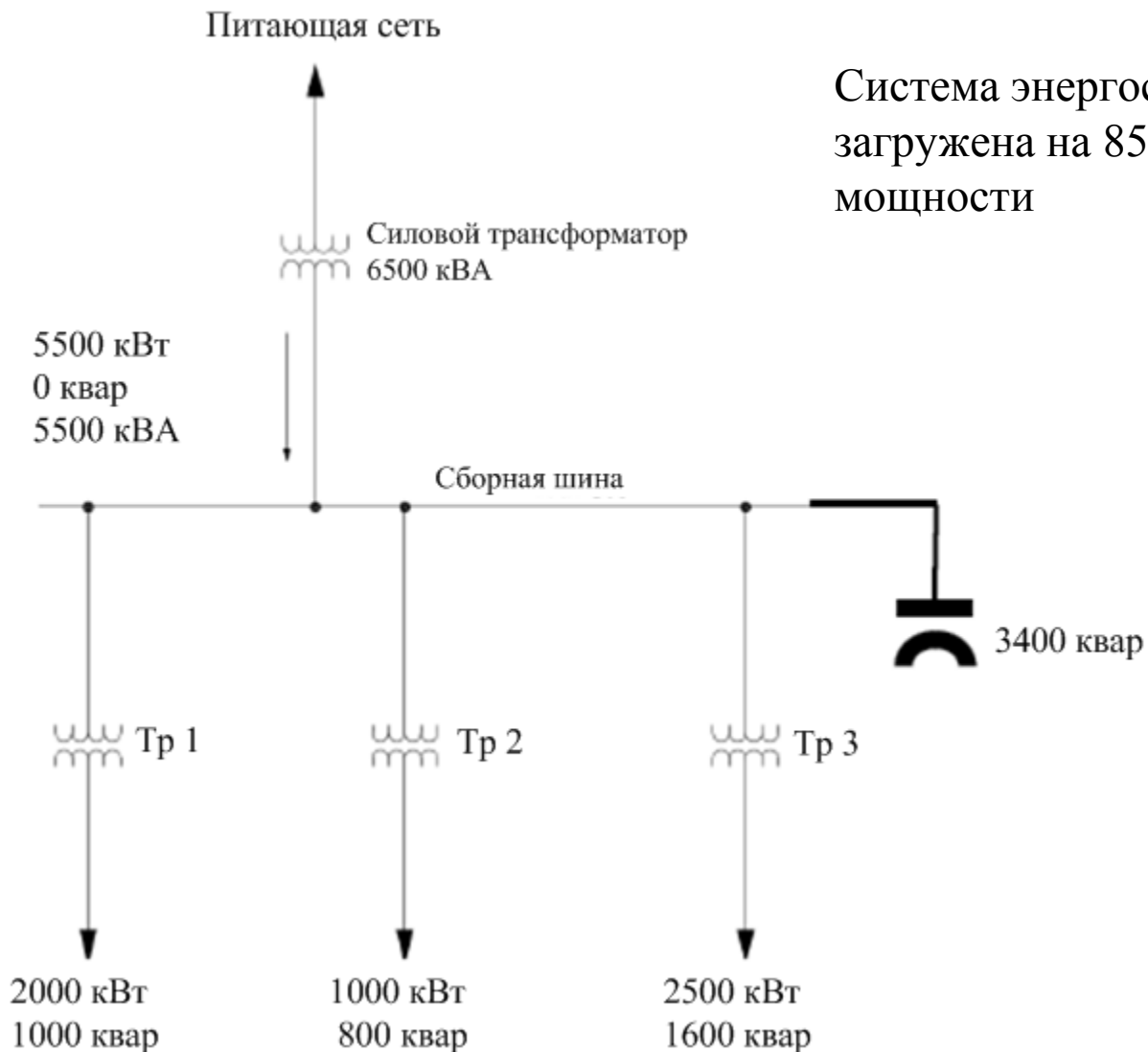
# Основные соотношения при расчетах мощности



У нас есть кружка объемом 6500 кВА, в которой содержится 5500 кВт и 3400 квар

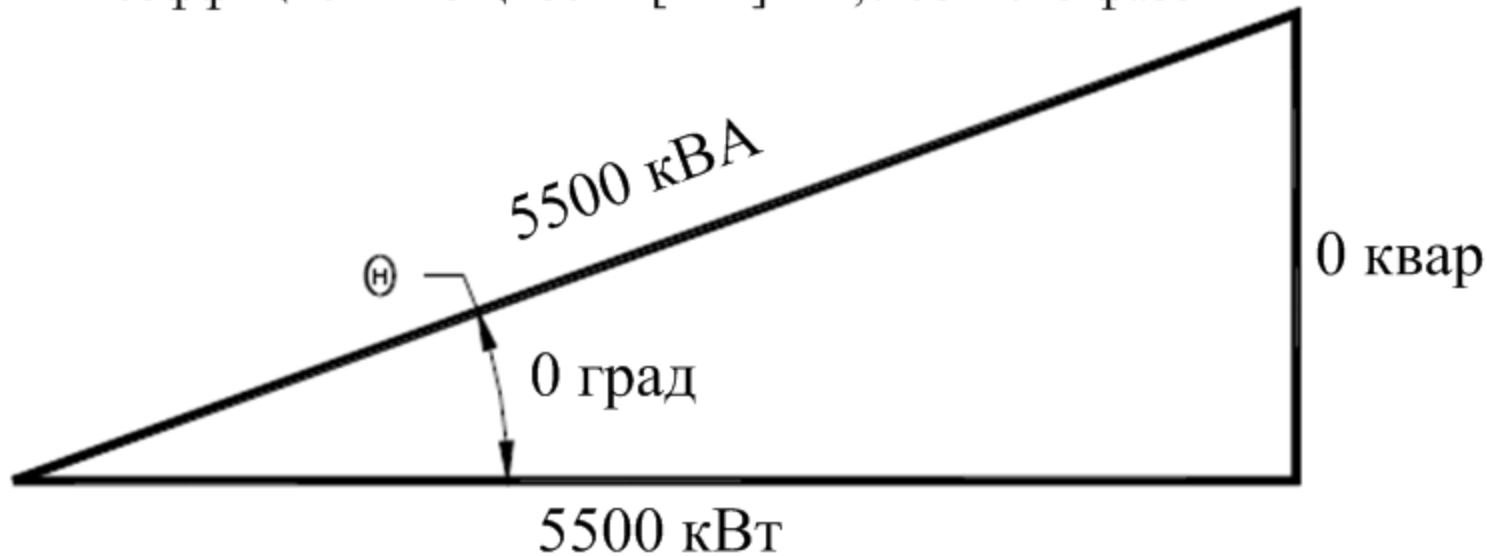
При таких условиях потребитель не может добавить более никаких нагрузок без модернизации системы энергоснабжения.

# Основные соотношения при расчетах мощности



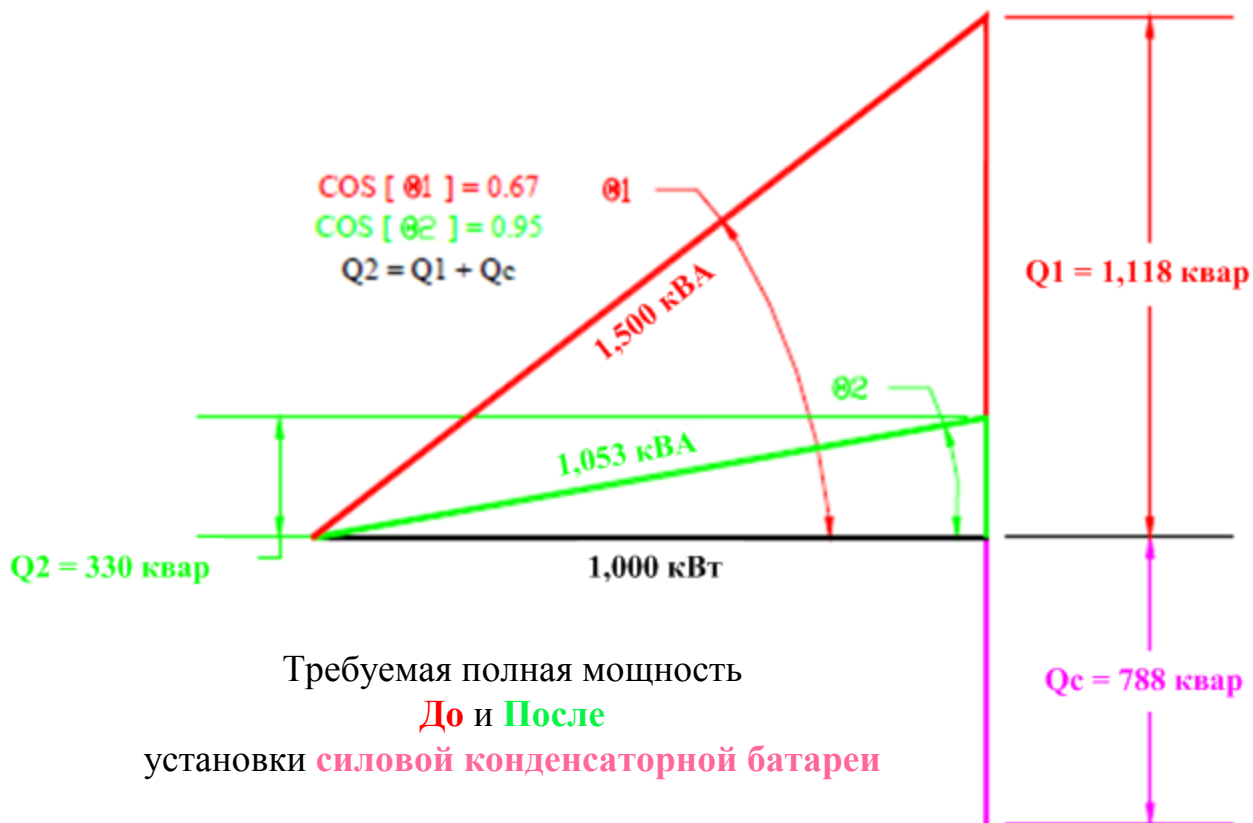
# Основные соотношения при расчетах мощности

Коэффициент мощности [КМ] = 1,0 совп.по фазе



Батарея конденсаторов обеспечивает 3400 квар реактивной мощности, поэтому теперь наша система энергоснабжения предоставляет лишь 5500 кВА мощности (меньше, чем требуемые ранее 6466 кВА)

# Основные соотношения при расчетах мощности

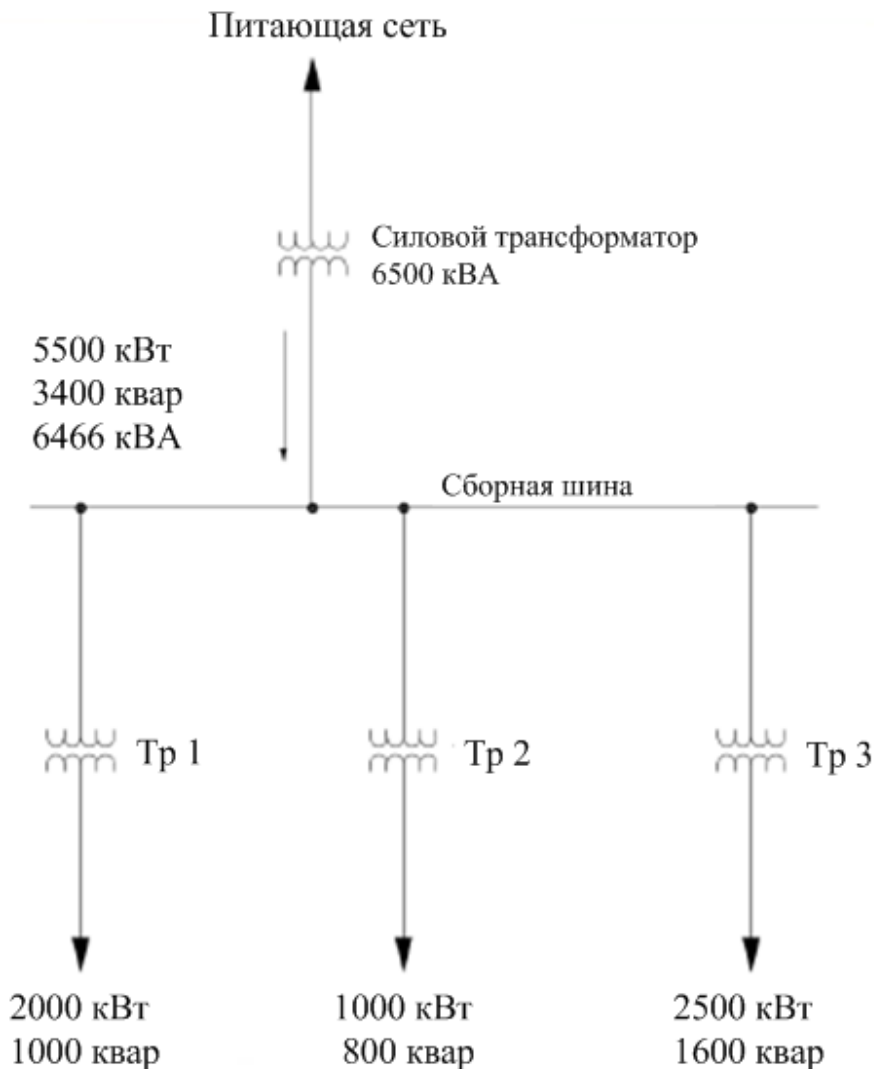


Пример расчета мощности конденсаторной батареи, необходимой для получения желаемого коэффициента мощности

# Основные соотношения при расчетах мощности

**Постойте, это еще не все...**

# Основные соотношения при расчетах мощности

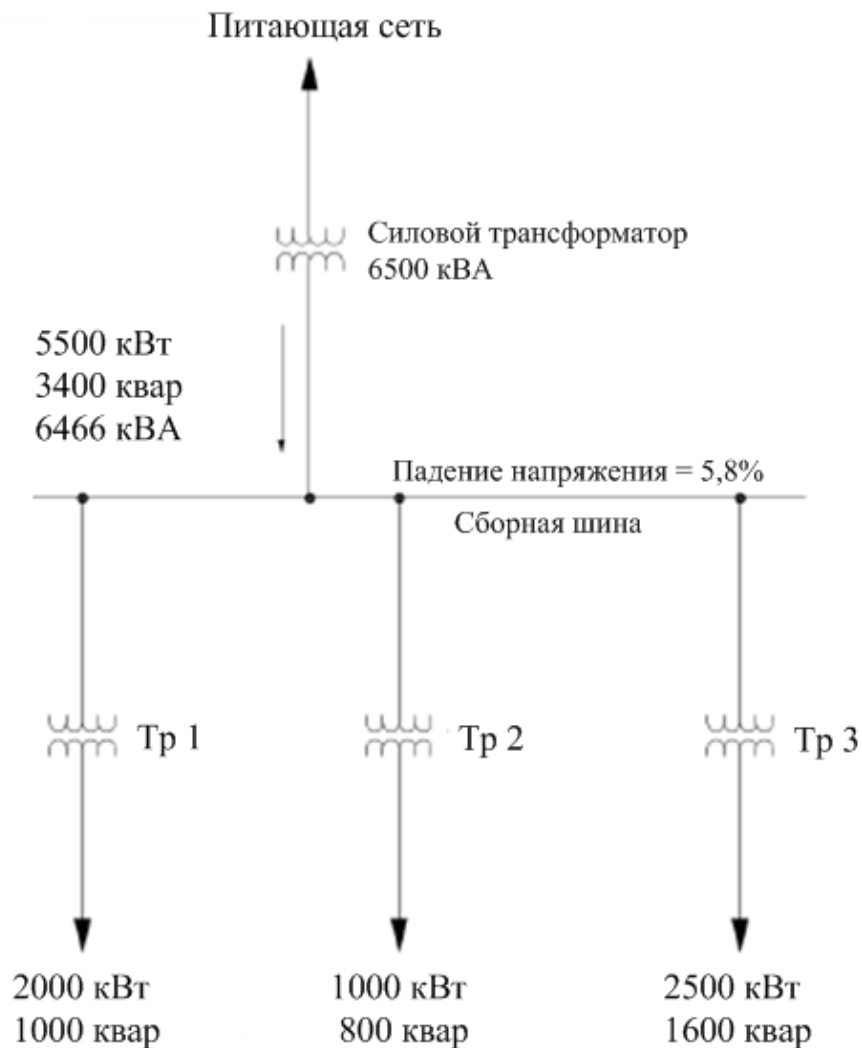


Весьма вероятно, энергоснабжающая компания накладывает на вас штрафные санкции за низкое значение коэффициента мощности

$$\frac{5500}{6466} = 0.85$$

Как правило, штрафные санкции применяются при значении коэффициента мощности ниже 0,95

# Основные соотношения при расчетах мощности



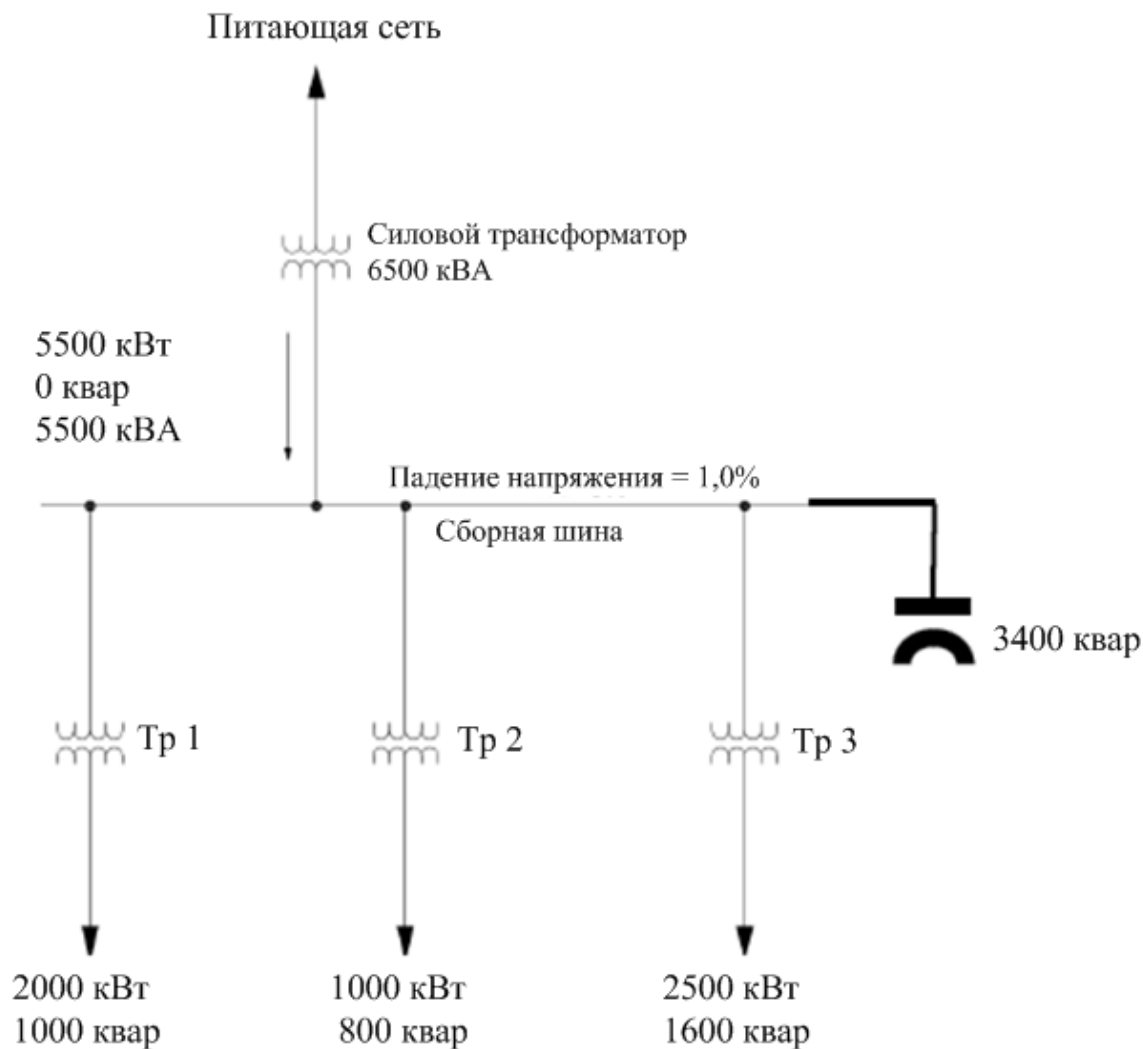
Кроме того, следует принять во внимание и вопросы, связанные с напряжением.

Зададимся типовым значением:

Сопротивление источника = 9% от 6500 кВА

Тогда предполагаемое падение напряжения на главной шине будет приближаться к **6%**!

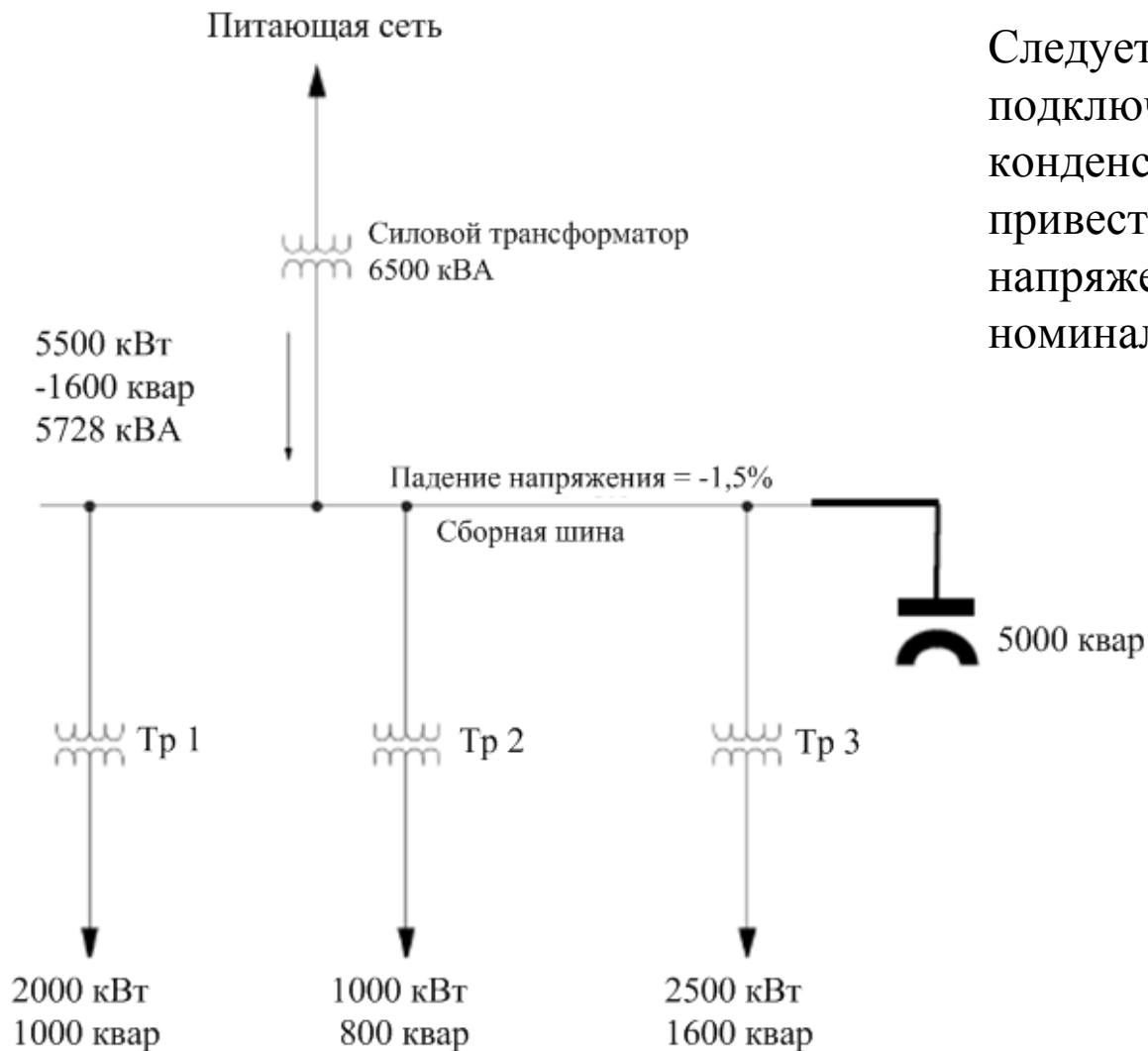
# Основные соотношения при расчетах мощности



Подключение конденсаторной батареи уменьшает падение напряжения на сборной шине на **5%!**

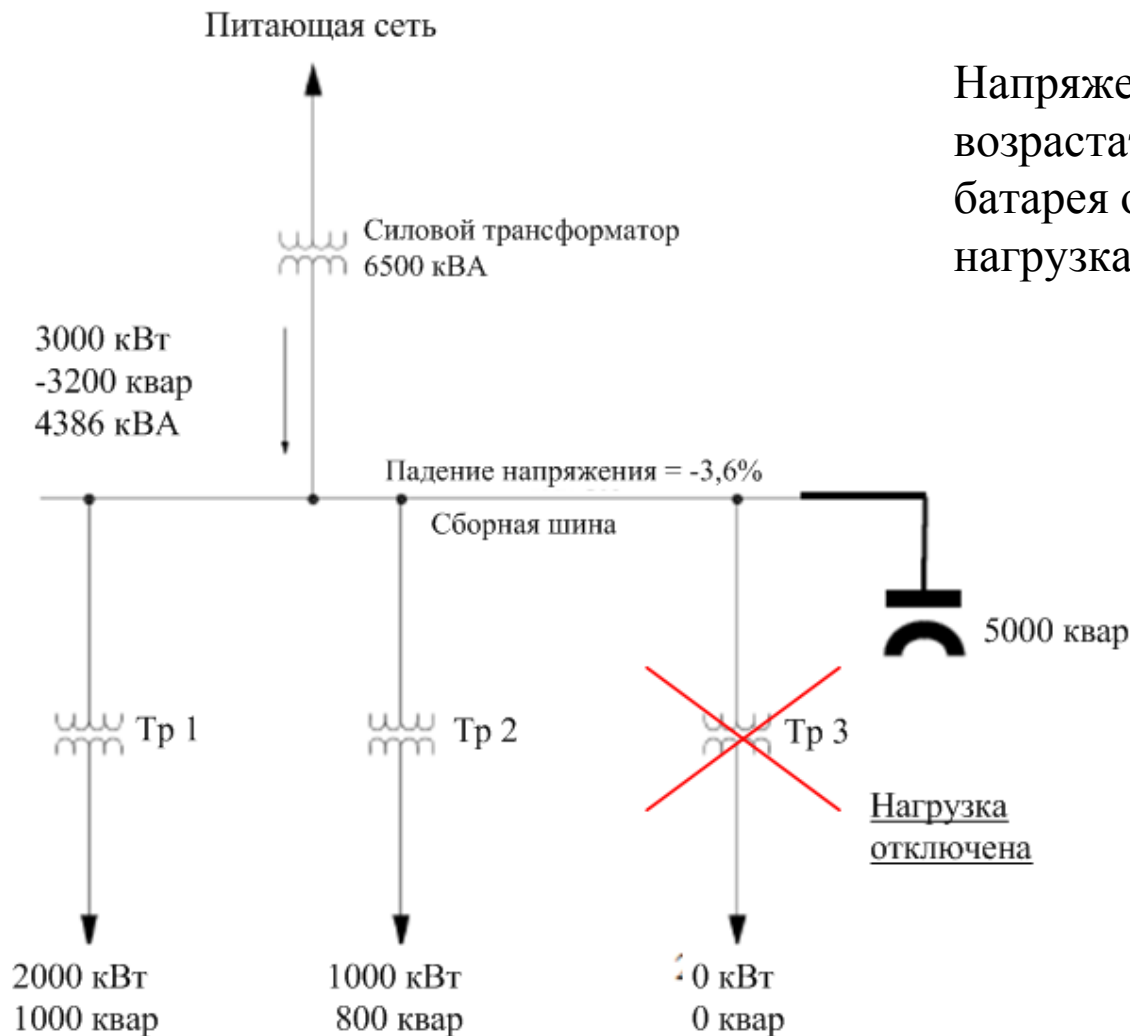


# Основные соотношения при расчетах мощности



Следует отметить, что подключение батареи конденсаторов может привести и к увеличению напряжения на шине выше номинального значения.

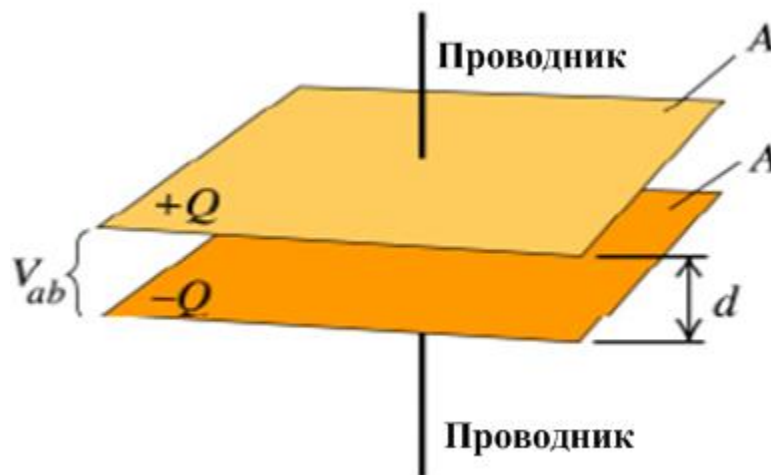
# Основные соотношения при расчетах мощности



Напряжение продолжает возрастать, если конденсаторная батарея остается подключенной, а нагрузка - уменьшается

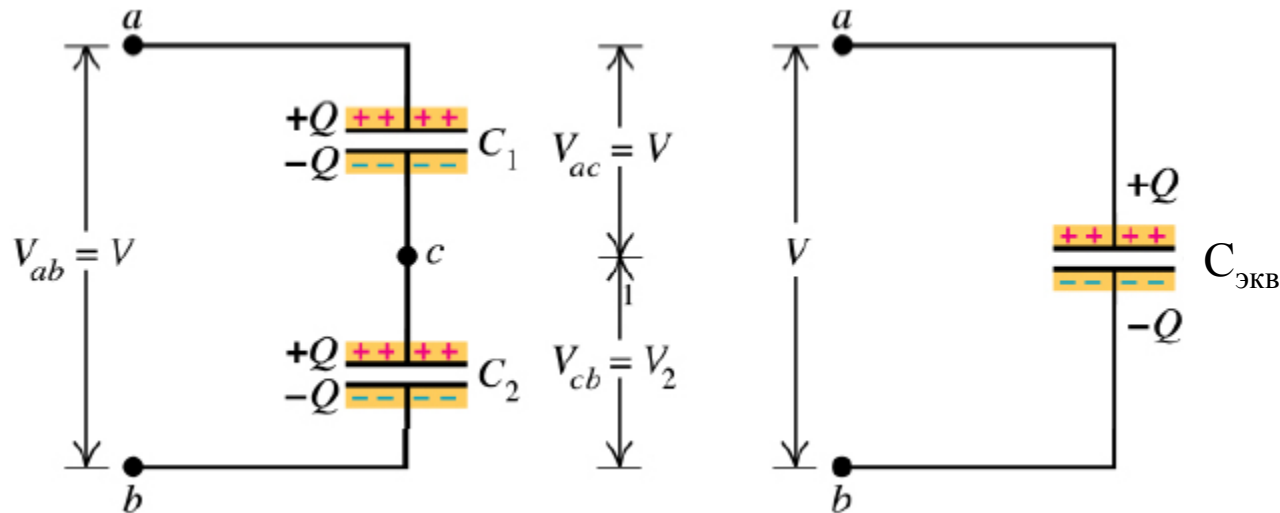
# Конденсаторы. Основные положения

# Конденсаторы. Основные положения



$C = \epsilon_0 A / d$  для конденсатора с параллельными обкладками,  
где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость изолирующего  
материала (диэлектрика) между пластинами

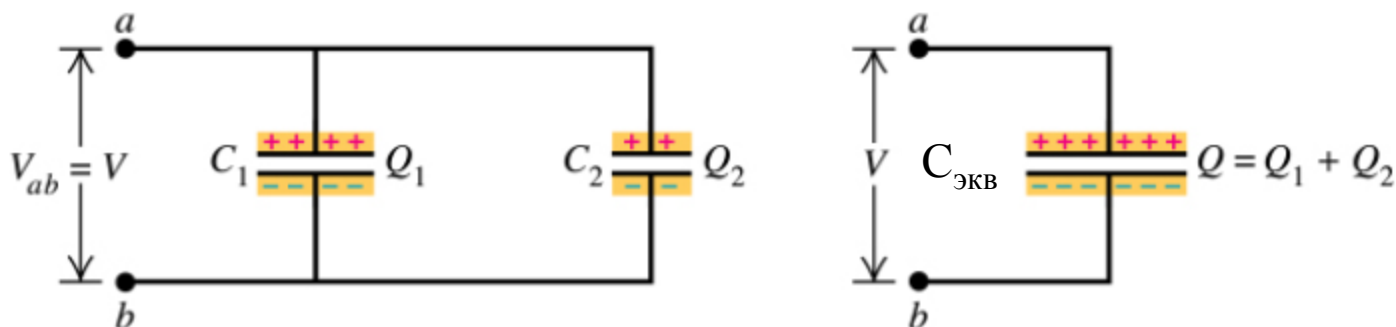
# Конденсаторы. Основные положения



Напомним, что можно соединить конденсаторы последовательно, получив при этом конденсатор с эквивалентной емкостью

$$1 / C_{\text{ЭКВ}} = 1 / C_1 + 1 / C_2$$

# Конденсаторы. Основные положения



Аналогично, можно добавить конденсаторы параллельно, получив при этом эквивалентную емкость

$$C_{\text{ЭКВ}} = C_1 + C_2$$

# Конденсаторы. Основные положения

... но, как правило, величина емкости не используется слишком часто. Поэтому мы используем преобразование емкости в значение емкостного сопротивления (импеданса)

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

# Конденсаторы. Основные положения

$$\bar{Z} = R + jX_c$$

$$\bar{Z} = \cancel{R} + jX_c$$

$$|Z| = X_c$$

$$Z = \frac{V^2}{S} \Rightarrow S = \frac{V^2}{X_c}$$



# Конденсаторы. Основные положения

$$S [ \text{квар} ] = \frac{V^2 [ \text{кВ} ]}{Z [ \text{Ом} ]} * 1000$$

Пример:

Емкость конденсатора составляет 6.22 мкФ, номинальное напряжение 8000 В. Рассчитать значение номинальной мощности.

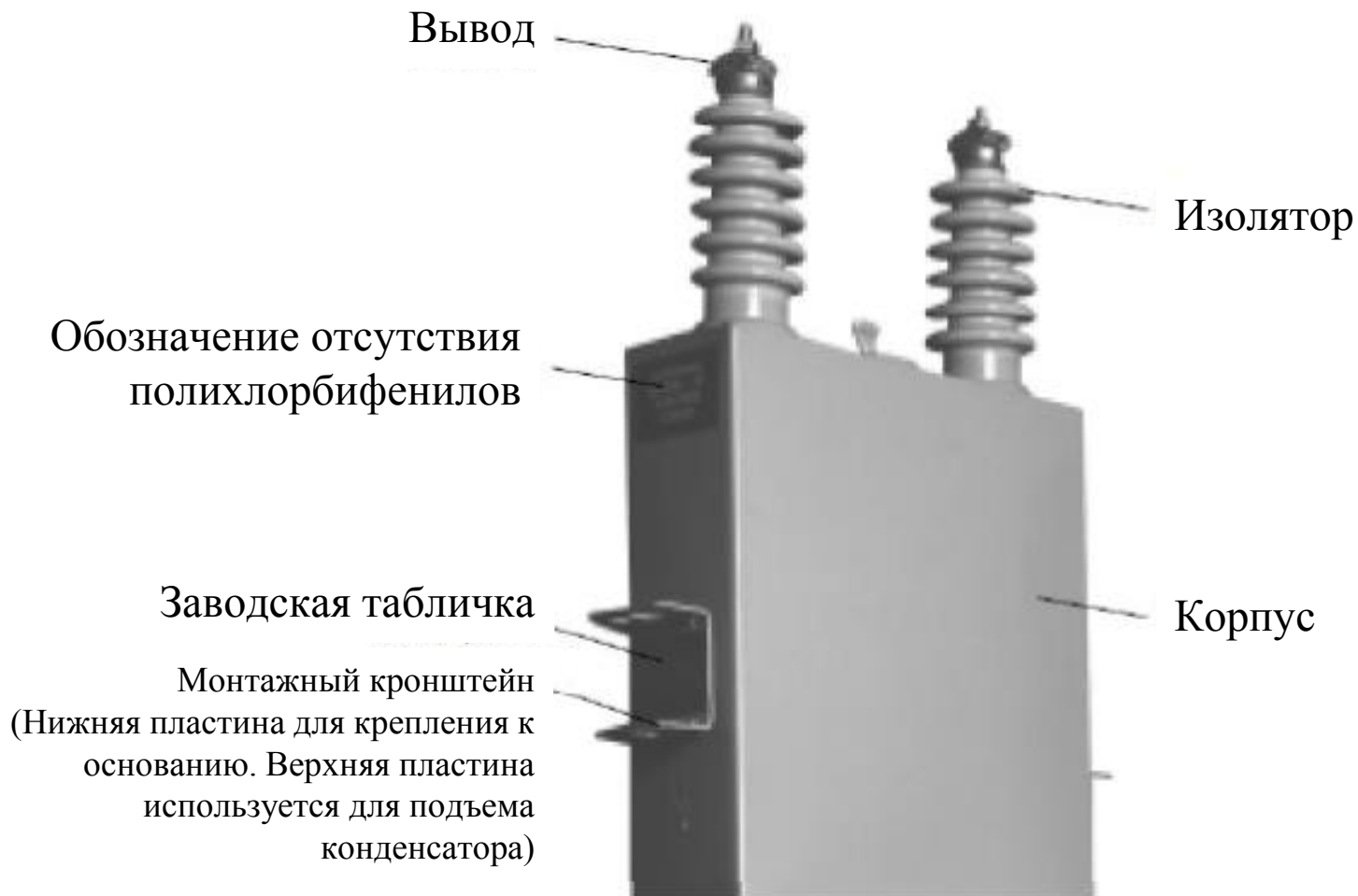
$$X_c = \frac{1}{2(3.14)(60)(6.22 \times 10^{-6})} = 426.7 [ \text{Ом} ]$$

$$S = \frac{(8)^2}{426.7} 1,000 = 150 [ \text{квар} ]$$

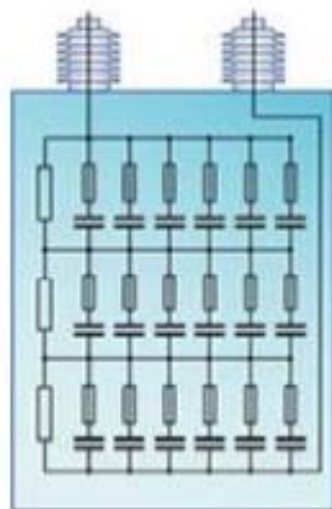
# Конденсаторы. Основные положения



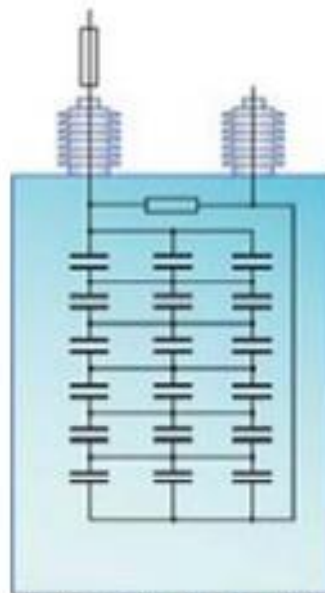
# Конденсаторы. Основные положения



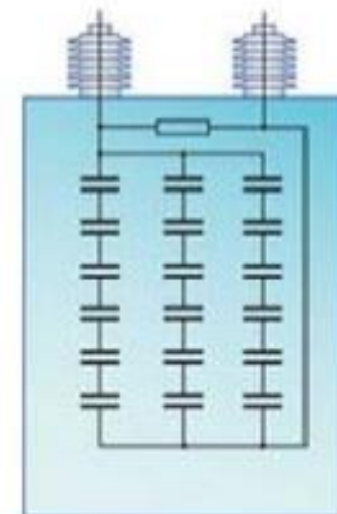
# Конденсаторы. Основные положения



Конструкция  
с встроенным  
предохранителем



Конструкция  
с внешним  
предохранителем



Конструкция  
без предохранителя

# Конденсаторы. Основные положения

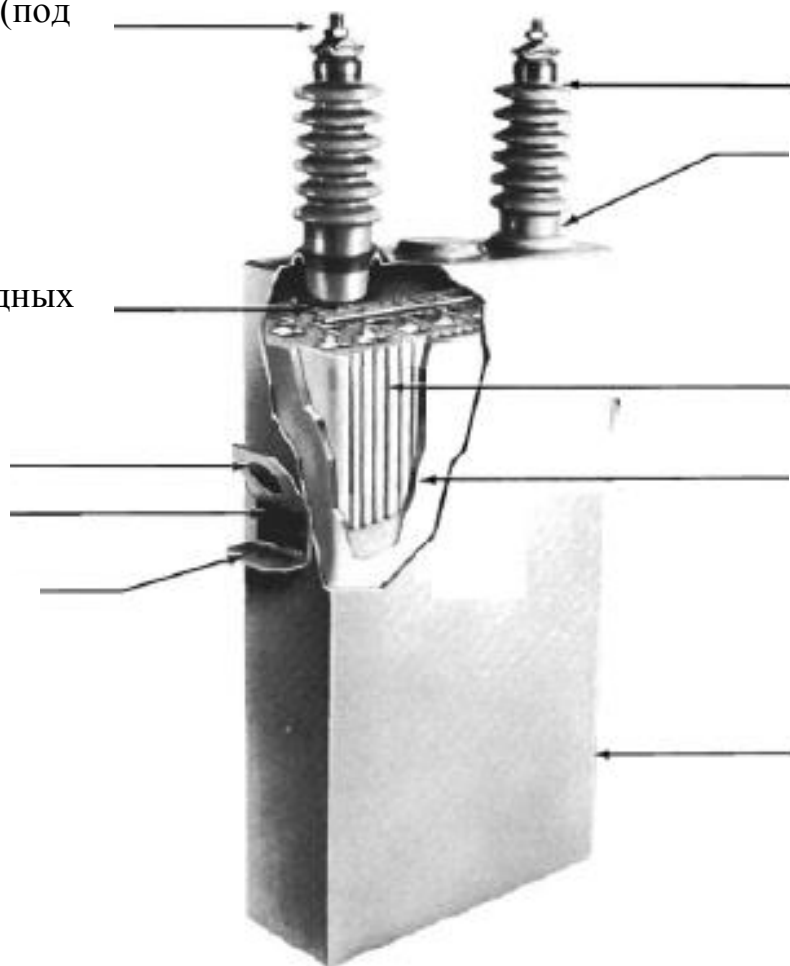
Выводы штыревого типа (под гайку) с плашечными зажимами

Встроенная сборка разрядных резисторов

Подъемная проушина на каждой стороне корпуса

Заводская табличка из нержавеющей стали

Монтажные кронштейны



Изоляторы

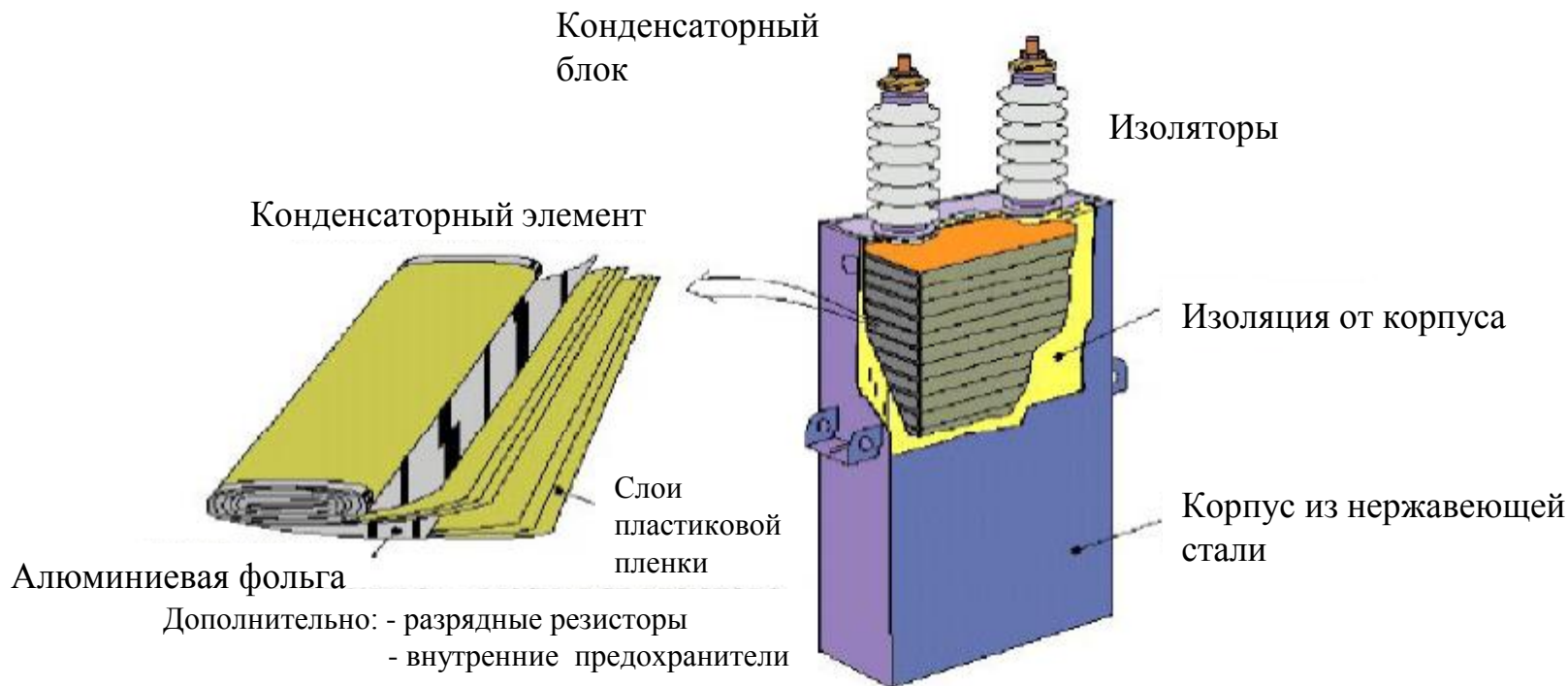
Паяное уплотнение для герметичного крепления изоляторов к крышке корпуса. Находится в диэлектрической жидкости и предохраняет от загрязнений

Пакеты конденсаторов

Равномерная слоистая изоляция пакетов конденсаторов от корпуса, полностью окружает пакеты для обеспечения высокой степени изоляции между блоками конденсаторов и корпусом

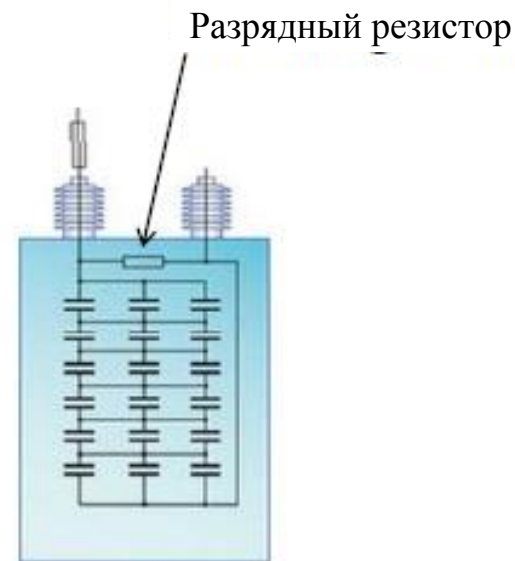
Корпус из нержавеющей стали

# Конденсаторы. Основные положения



# Конденсаторы. Основные положения

Следует отметить, что в соответствии с требованиями стандарта IEEE Std 18 необходима установка разрядного сопротивления для уменьшения напряжения на выводах конденсатора до 50 В за время, указанное в приведенной ниже таблице



Диапазон номинальных напряжений конденсатора (между выводами) В, действ.знач.	Максимальное время (минуты)
600 В и менее	1
выше 600 В	5

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Встроенные разрядные устройства, которыми оснащаются конденсаторы, не должны рассматриваться в качестве замены рекомендованной практики ручного разряда остаточного напряжения перед выполнением работ на конденсаторах.

# Параметры конденсаторов



# Параметры конденсаторов

Высоковольтные конденсаторы выпускаются в самых различных исполнениях.

Они отличаются друг от друга по следующим основным показателям:

- Номинальное значение напряжения
- Номинальное значение реактивной мощности
- С одним или двумя проходными изоляторами
- С внутренними предохранителями, внешними предохранителями или без предохранителей

# Параметры конденсаторов

Стандарт IEEE 81 устанавливает следующие номинальные параметры конденсаторов

- Напряжение, действующее значение (между выводами)
- Класс изоляции между выводом и корпусом (или землей)
- Реактивная мощность
- Число фаз
- Частота

# Параметры конденсаторов

Стандарт IEEE 18 устанавливает значения допусков на параметры конденсаторов

- Изменения емкости не должны превышать значения от -0% до +10% номинальной величины, рассчитанного при номинальной реактивной мощности, напряжении и частоте, измеренных при температуре 25°C.

Это означает, что новый конденсаторный модуль мощностью 150 квар может иметь значение в диапазоне от 150 квар до 165 квар.

# Параметры конденсаторов

В соответствии со стандартом IEC 18 конденсатор предназначен для работы при номинальном или ниже номинального уровне напряжения. Конденсатор должен быть способен работать в длительном режиме при условии, что не нарушено ни одно из этих ограничений:

- Действующее значение напряжения не превышает 110% от номинального
- Пиковое напряжение, включая гармоники, но без учета переходных составляющих, не превышает 120% от номинального
- Действующее значение тока не превышает 135% от номинального при номинальных реактивной мощности и напряжении
- Реактивная мощность не превышает 135% от номинального значения

# Параметры конденсаторов

Таблица 1 – Типовые значения напряжений и реактивных мощностей

Действ.знач. напряжения (между выводами)	Реактивная мощность квар	Число фаз	Уровень прочности изоляции, кВ*
216	5, 7 1/2, 13 1/3, 20, и 25	1 и 3	30**
240	2.5, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, и 50	1 и 3	30**
480, 600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, и 100	1 и 3	30**
2400	50, 100, 150, 200, 300, и 400	1 и 3	75, 95, 125, 150, и 200
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400, и 500	1 и 3	75, 95, 125, 150, и 200
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, и 800	1 и 3	75, 95, 125, 150, и 200
6640, 7200, 7620, 7960, 8320, 9540, 9960, 11 400, 12 470, 13 280, 13 800, 14 400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, и 800	1	95, 125, 150, и 200
15 125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, и 800	1	125, 150, и 200
19 920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, и 800	1	125, 150, и 200
20 800, 21 600, 22 800, 23 800, 24 940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, и 800	1	150 и 200

\* Импульсные испытания должны выполняться между выводами и корпусом при закороченных выводах. У конденсаторов с изоляторами, имеющими различные значения уровня прочности изоляции, это испытание проводится для изолятора с меньшим значением прочности. На заводской табличке с паспортными данными приводятся оба значения прочности изоляции, т.е. уровень прочности изоляции 150/95 кВ.

\*\* Не применимо для значений в помещении

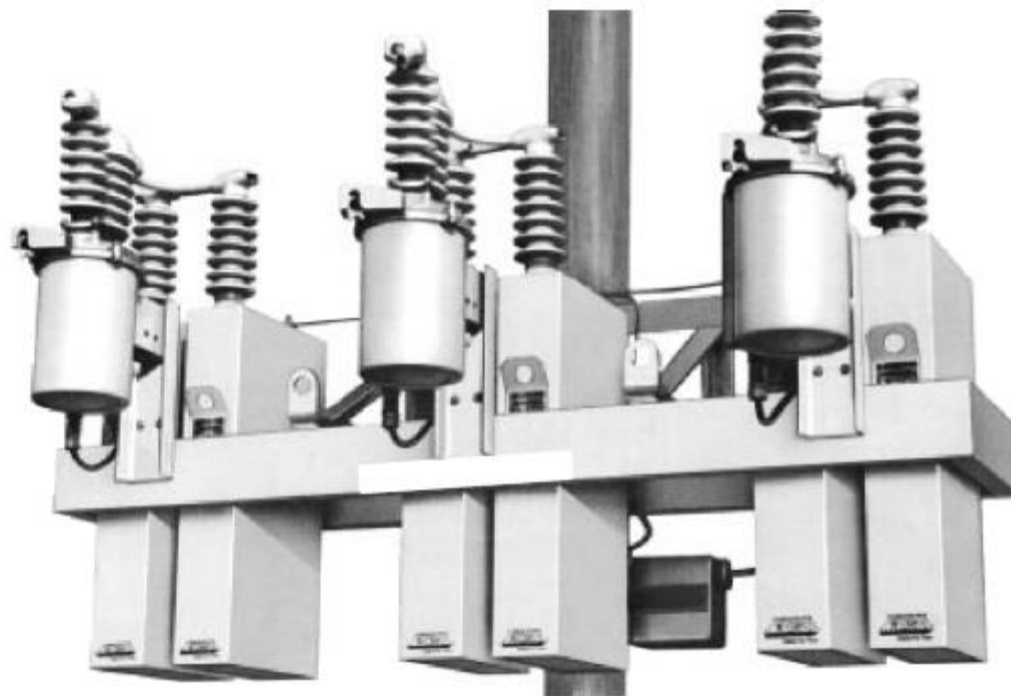
# Применение конденсаторов

# Применение конденсаторов

Батареи конденсаторов для коррекции коэффициента мощности традиционно монтируются следующим образом:

- Столбовой способ
- Полностью помещенные в металлический корпус / На бетонном основании
- На открытой стойке
- В ячейке (встроены в оборудование)

# Применение конденсаторов



**Монтаж на опоре ЛЭП**



# Применение конденсаторов



## Токоограничивающие реакторы



## Монтаж на опоре ЛЭП

# Применение конденсаторов



**Монтаж на бетонном основании**

# Применение конденсаторов



**Монтаж в металлическом корпусе на подстанциях**

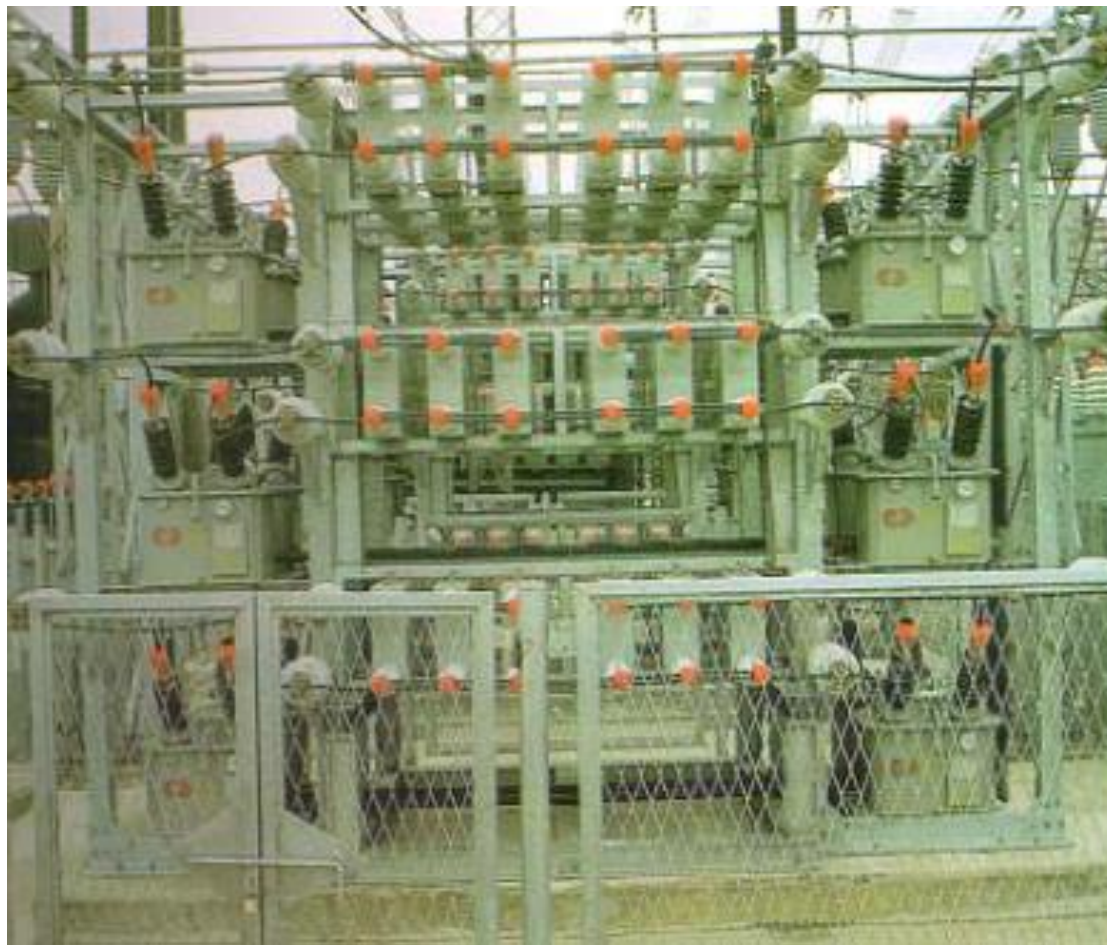
# Применение конденсаторов



Трехфазный реактор фильтра гармоник со стальным магнитопроводом

**Монтаж в металлическом корпусе на подстанциях**

# Применение конденсаторов



**Монтаж на открытой стойке, высоковольтная подстанция**

# Применение конденсаторов



**Монтаж на открытой стойке, высоковольтная подстанция**

# Применение конденсаторов



**Установка в оборудовании**

# Применение конденсаторов

Конденсаторные батареи для коррекции коэффициента мощности могут быть соединены следующими способами:

- В треугольник
- В звезду с глухозаземленной нейтралью
- В звезду с изолированной нейтралью

Распространенным заблуждением является мнение о том, что конденсаторные батареи должны быть соединены в треугольник, поскольку они подключаются к системе, включенной в треугольник или системе с заземлением через высокое сопротивление. Это не так.



# Применение конденсаторов

Главным фактором, определяющим выбор исполнения конденсаторной батареи для каждого конкретного случая, является СТОИМОСТЬ.

## Замечания по поводу напряжения

Стандарт IEEE 1036 говорит о том, что в треугольник следует соединять только конденсаторные батареи номиналом 2400 В и ниже. Главным образом, это обусловлено тем, что может не оказаться в наличии стандартных номинальных напряжений для батарей, соединенных в звезду.

Стоимость конденсаторов, выбираемых из расчета линейного напряжения против фазного при высоких значениях напряжений определяет тенденцию использования конденсаторов, соединенных в звезду, для более мощных батарей.

# Применение конденсаторов

Соединение в треугольник

Низкие значения напряжений ( $\leq 2400$  В)

- Шкала номинальных напряжений типовых конденсаторов не содержит значения 1380 В

Распределительная сеть (столбовое исполнение)

- Блоки набираются из одиночных последовательно соединенных групп конденсаторов, рассчитанных на линейное напряжение. Следовательно, необходимость в выявлении асимметрии отсутствует.

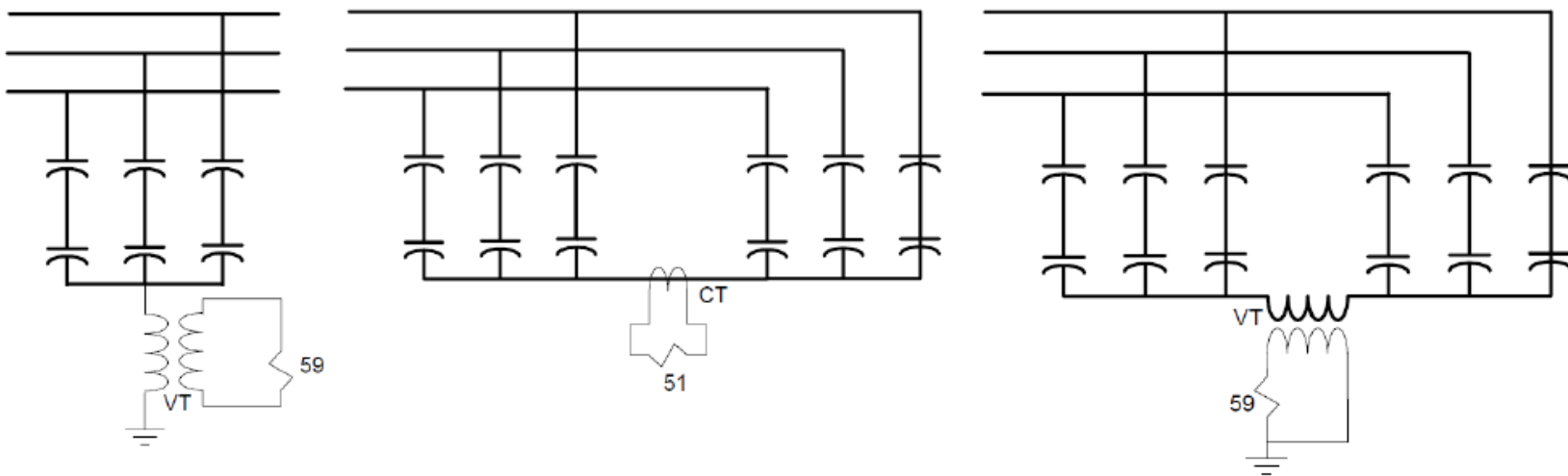
## Применение конденсаторов

### Соединение в звезду – с глухозаземленной нейтралью

- Капитальные затраты могут быть ниже, поскольку нет необходимости изолировать нейтраль от земли.
- Уменьшается значение напряжения восстановления при коммутации конденсаторов
- В контуре заземления могут возникать высокие значения пусковых токов
- Исполнение по схеме треугольника с заземленной нейтралью обуславливает наличие петли короткого замыкания с малым импедансом, что может потребовать пересмотра существующей системы защитного заземления. В незаземленных системах обычно не применяется.
- При использовании в системе с нейтралью, заземленной через сопротивление возникают проблемы согласования предохранителей конденсаторной батареи и вышестоящих реле защиты от замыкания на землю (согласование предохранителей на 40 А с 400 А системы заземления).
- Типовое исполнение для небольших установок (поскольку не требуется дополнительное оборудование)

# Применение конденсаторов

Наиболее распространенные схемы конденсаторных батарей для применения на крупных подстанциях используют соединение в звезду с изолированной нейтралью



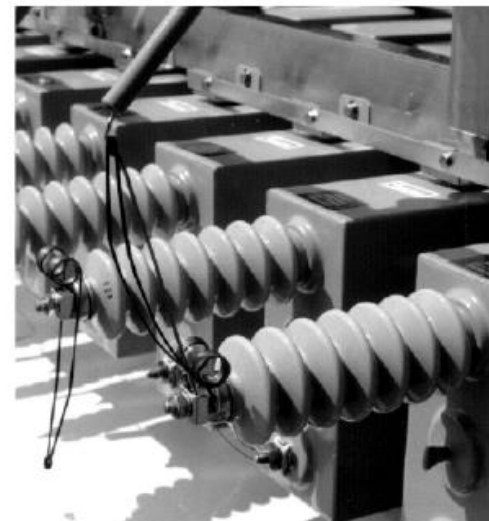
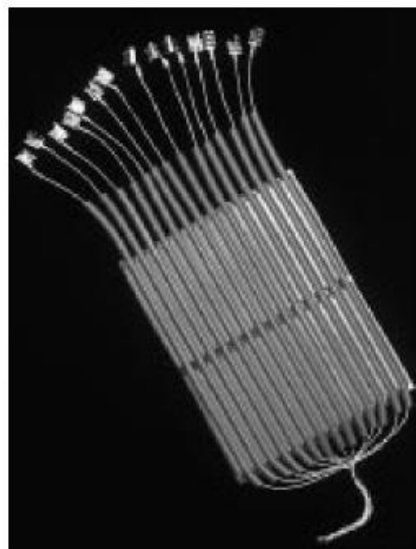
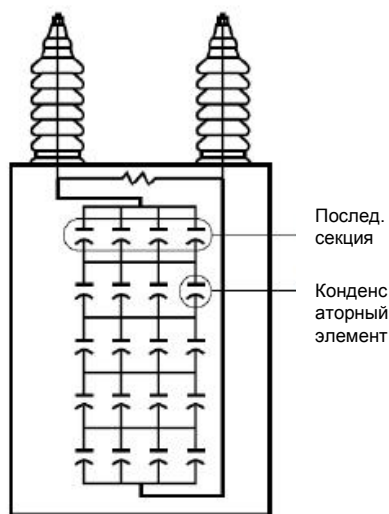
Здесь приведены три наиболее распространенные схемы с защитой от несимметрии.

Обсуждение схем защиты будет представлено далее.

# Защита конденсаторов

Использование предохранителей

- Без предохранителей
- С внутренними предохранителями
- С внешними предохранителями



# Защита конденсаторов

Защита батарей		
Условия	Тип защиты	Примечания
Неисправный конденсаторный элемент	Внешние или внутренние предохранители для конденсаторных батарей с предохранителями; сваривание слоев для батарей без предохранителей	Предохранители должны быть быстродействующими для согласования с быстродействующими уставками реле несимметрии; но они не должны срабатывать при коммутационных процессах и внешних замыканиях
Пробой конденсаторного элемента на корпус, повреждение проходного изолятора, обрыв соединения в конденсаторной группе	Предохранитель для конденсаторов с внешними предохранителями; защита от несимметрии для конденсаторов с внутренними предохранителями или конденсаторов без предохранителей	Для конденсаторных батарей с внешними предохранителями они должны быть быстродействующими для согласования с быстродействующими уставками реле несимметрии; но не должны срабатывать при коммутационных процессах и внешних замыканиях. Для конденсаторных батарей с внутренними предохранителями или без предохранителей защита от несимметрии должна срабатывать весьма быстро во избежание повреждения корпуса, но не должна реагировать на коммутационные процессы и внешние замыкания.
Неисправность в конденсаторной батарее, за исключением неисправностей в группе конденсаторов (дуговое замыкание в батарее)	Защита от несимметрии. Реле должно иметь полосовой фильтр для фильтрации основной гармоники тока и напряжения для безопасности	Защита от несимметрии должна срабатывать весьма быстро для минимизации неблагоприятного воздействия на другие блоки при замыкании в главной цепи. См. 7.1.4.
Длительное перенапряжение на конденсаторных элементах или группах из-за пробоя элементов или срабатывания предохранителей в батарее конденсаторов	Защита от несимметрии. Реле должно иметь полосовой фильтр для фильтрации основной гармоники тока и напряжения для безопасности	Батарея конденсаторов должна быть отключена при напряжении, более 110% от номинального значения или в соответствии с рекомендациями производителя для обеспечения целостности конденсаторных блоков. Возможно дополнительное срабатывание звукового сигнала при несимметрии 5% или при выходе из строя одной группы. (В некоторых особо критичных установках предупреждающий звуковой сигнал используется при напряжении более 110% от номинального с последующей задержкой перед отключением; см. 7.1.4)
Дуговой разряд между корпусами в двух конденсаторных батареях с последовательными группами соединенными пофазно по схеме одиночной звезды.	Реле максимально-токовой защиты или реле обратной последовательности; несимметрия тока конденсаторной батареи по схеме звезда-звезда	Необходимо быстрое срабатывание защиты для минимизации неблагоприятного воздействия. См. 7.1.4 и 7.1.5.

## Сводная таблица по защитам конденсаторных батарей

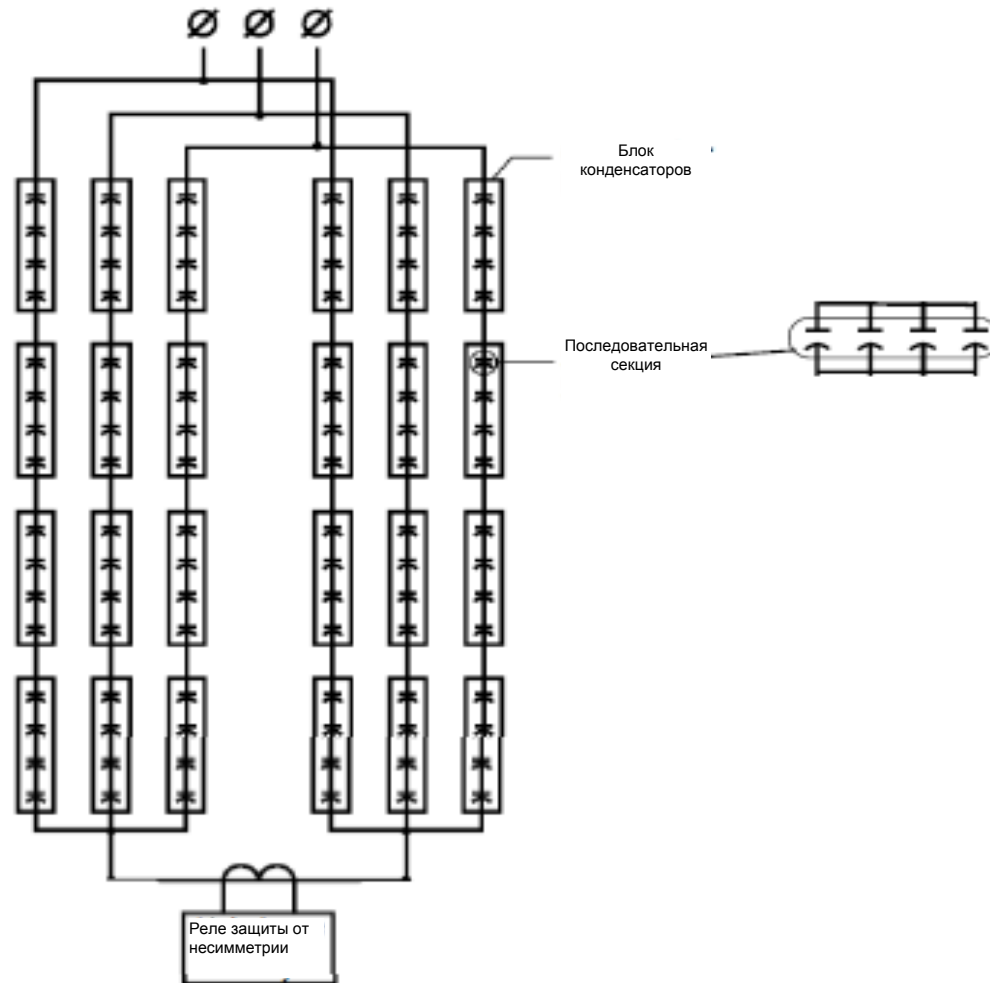
# Защита конденсаторов

## Конденсаторы без предохранителей

Выполнены на основе небольших конденсаторных элементов, соединенных последовательно и параллельно. Элементы выполнены из алюминиевой фольги с полипропиленовым диэлектриком. Такое конструкторское решение позволяет обеспечить режим безопасного отказа. В случае пробоя диэлектрика энергия возникающей при этом небольшой дуги пробивает несколько слоев тонкой пленки и фольги внутри элемента. Дуга приводит к уменьшению слоя пленки, позволяя нескольким слоям электродов из алюминиевой фольги соприкоснуться и привариться друг к другу, сформировав электрически устойчивое соединение. В результате вся последовательная секция оказывается закороченной.

# Защита конденсаторов

## Пример исполнения конденсаторов без предохранителей

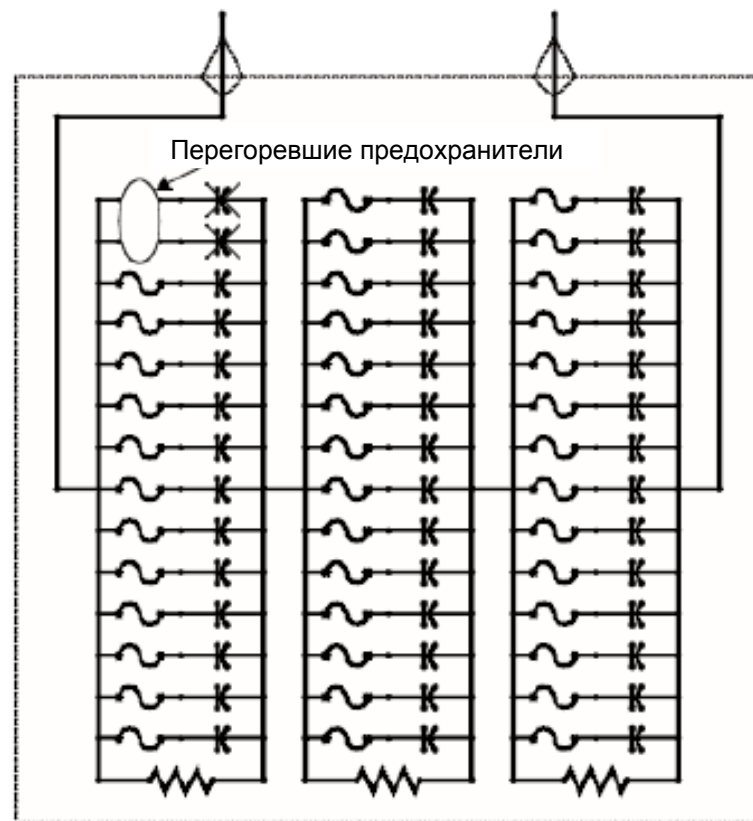




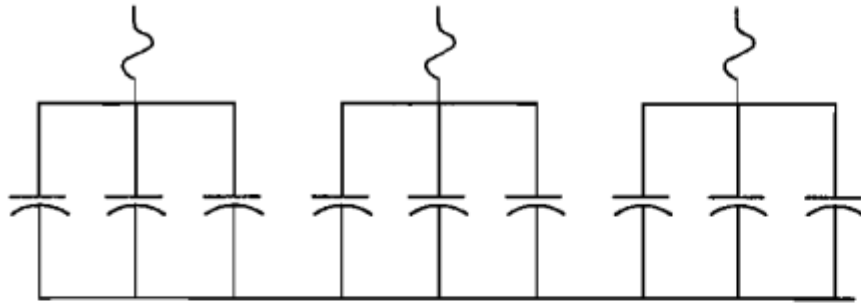
# Защита конденсаторов

## Конденсаторы с внутренними предохранителями

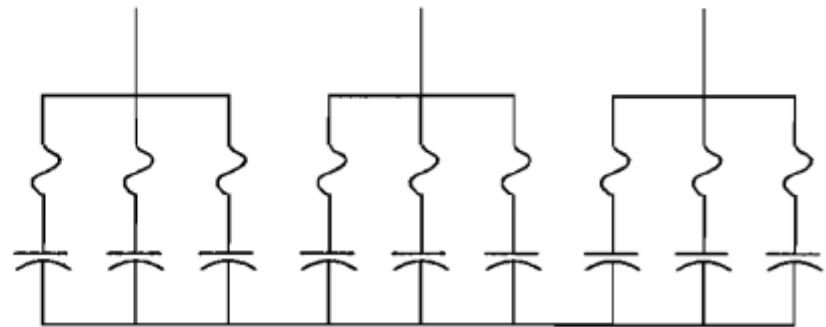
Конструкция предусматривает защиту каждого элемента последовательно соединенным токоограничивающим предохранителем. Проектное решение выполнено так, что перегорание отдельного предохранителя предотвращает потенциальную опасность для соседних элементов и предохранителей. Режим токоограничения прерывает ток короткого замыкания для предотвращения разряда энергии, запасенной в параллельно подключенных элементах, на неисправный элемент.



# Защита конденсаторов



Групповая защита предохранителями



Индивидуальная защита предохранителями

# Защита конденсаторов

## Групповая защита предохранителями – Рекомендации по выбору предохранителей

(типовое решение для распределительных стоек столбового исполнения)

- Длительно допустимый ток
- Ток в переходном процессе
- Ток короткого замыкания
- Согласование характеристики разрушения корпуса
- Напряжение на исправных конденсаторах

# Защита конденсаторов

## Длительно допустимый ток

- Для систем с соединением в звезду с глухозаземленной нейтралью:  
Предохранитель  $\geq 135\%$  номинального тока конденсатора (учитывая перенапряжение, допуски конденсаторов и гармоники)
- Для систем с соединением в звезду с изолированной нейтралью:  
Предохранитель  $\geq 125\%$  номинального тока конденсатора (учитывая перенапряжение, допуски конденсаторов и гармоники)

Следует соблюдать осторожность при использовании оловянных плавких вставок производства NEMA Типа Т и К, номиналы которых указаны из расчета 150%. В этом случае номинальное значение для предохранителя следует разделить на коэффициент 1,50.

# Защита конденсаторов

## Ток в переходном процессе

- Коммутация конденсаторов (особенно коммутация «друг за другом»)
- Грозовые перенапряжения

Коммутация вида «друг за другом», как правило, отсутствует в конденсаторных батареях столбового типа

Высокочастотные грозовые перенапряжения:

Использовать плавкие вставки производства NEMA Типа Т в диапазоне токов до 25 А;

Использовать плавкие вставки производства NEMA Типа К в диапазоне токов выше 25 А.

# Защита конденсаторов

## Ток короткого замыкания

Следует убедиться, что предохранитель может отключать ток короткого замыкания в системе.

## Согласование характеристики разрушения корпуса

Необходимо убедиться, что максимумы времятоковой характеристики предохранителя располагаются на графике ниже кривой разрушения корпуса. В случае высоких значений токов короткого замыкания кривая разрушения корпуса должна быть скомпенсирована для асимметрии.

## Напряжение на исправных конденсаторах

Для незаземленной системы, короткое замыкание на одной фазе приводит к перенапряжениям в 1,73 раза на неповрежденных фазах. Необходимо убедиться, что неисправность устранена до выхода из строя второго конденсатора.

# Защита конденсаторов

## Проблемы защиты предохранителями небольших незаземленных конденсаторных батарей

Рассмотрим конденсаторную батарею 12.47 кВ, 1500 квар, набранную из трех (3) однофазных блоков мощностью 500 квар.

$$\frac{1500[\text{ квар }]}{\sqrt{3} \cdot 12.47[\text{ кВ }]} = 69.44[\text{ A}] \Rightarrow 69.44 \cdot 1.5 = 104[\text{ A}] \Rightarrow 100[\text{ A}] \text{ Предохранитель}$$

В случае выхода конденсатора из строя ток будет равен величине приблизительно трехкратного линейного тока.

Для предохранителя на 100А потребуется примерно 500 секунд, чтобы ликвидировать короткое замыкание ( $3 \times 69.44 \text{ A} = 208.32 \text{ A}$ ). Корпус конденсатора разрушится задолго до того, как предохранитель устранит неисправность.

Решение об использовании менее мощных блоков (пояснения - далее)

# Защита конденсаторов

## Индивидуальная защита предохранителями – Рекомендации по выбору предохранителей

(типовое решение для конденсаторных батарей подстанций)

- Длительно допустимый ток
- Ток в переходном процессе
- Ток короткого замыкания
- Согласование характеристики разрушения корпуса
- Напряжение на исправных конденсаторах
- Выделение энергии на вышедшие из строя блоки
- Импульсный ток
- Согласование с системой определения несимметрии



# Защита конденсаторов

## Длительно допустимый ток

- Предохранитель  $\geq 135\%$  номинального тока конденсатора (учитывая перенапряжение, допуски конденсаторов и гармоники)

Следует соблюдать осторожность при использовании оловянных плавких вставок производства NEMA Типа Т и К, номиналы которых указаны из расчета 150%. В этом случае номинальное значение для предохранителя следует разделить на коэффициент 1,50.

# Защита конденсаторов

## Ток в переходном процессе

- Грозовые перенапряжения
- Коммутация конденсаторов (особенно коммутация «друг за другом»)

Грозовые перенапряжения с большими амплитудами и высокой частотой обычно не затрагивают установок на подстанции.

Коммутация вида «друг за другом» обычно осуществляется с использованием предзарядных резисторов или токоограничивающих реакторов.

В зависимости от типа установки параллельные предохранители также примут на себя часть переходного тока, и это не приведет к отключению.

# Защита конденсаторов

## Ток короткого замыкания

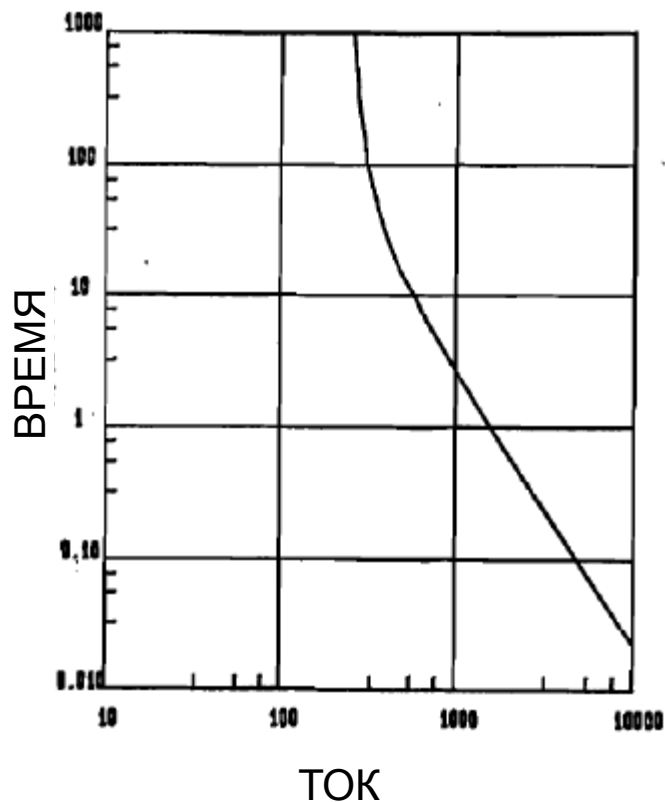
Следует убедиться, что предохранитель может отключать ток короткого замыкания в системе.

В батареях подстанций с несколькими последовательными группами ток короткого замыкания не будет протекать через поврежденный конденсаторный блок, если с другими блоками не произошел одновременный отказ. Поэтому обычно вместо токоограничивающих предохранителей используются выхлопные (стреляющие) предохранители.

## Согласование характеристики разрушения корпуса

Необходимо убедиться, что максимумы времятоковой характеристики предохранителя располагаются на графике ниже кривой разрушения корпуса. В случае высоких значений токов короткого замыкания кривая разрушения корпуса должна быть скомпенсирована для асимметрии.

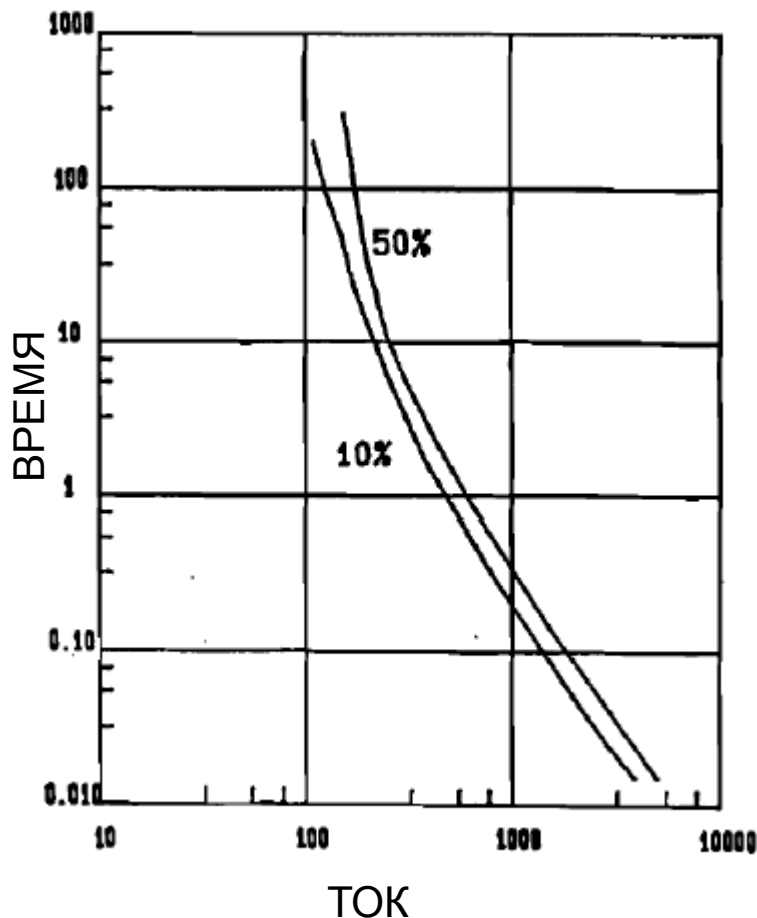
# Защита конденсаторов



Пример конкретной характеристики разрушения корпуса.

Время между кривой разрушения корпуса и максимальным значением времятоковой характеристики предохранителя называется запасом по селективности

# Защита конденсаторов



Пример 10% и 50% характеристики разрушения корпуса для конденсатора мощностью 100 квар.

Характеристики разрушения на вероятностной основе строятся в случае значительной разницы в данных испытаний на разрушение.

На основе приведенных кривых для 10% и 50% возможно экстраполировать кривые для любой вероятности.

# Защита конденсаторов

## Напряжение на исправных конденсаторах

Когда происходит короткое замыкание на одном конденсаторном блоке, на исправных фазах возникает перенапряжение.

Необходимо убедиться, что неисправная цепь отключена до выхода из строя второго конденсатора. Повышения напряжения на исправных фазах сведены в приведенную ниже таблицу.

Кол-во послед. групп	Звезда с глухозаземленной нейтралью			Звезда с изолированной нейтралью			Расщепленная звезда с изолированной нейтралью		
	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$V_A$	$V_B$	$V_C$
1	-	1.00	1.00	-	1.73	1.73	-	1.73	1.73
2	2.00	1.00	1.00	1.50	1.15	1.15	1.71	1.08	1.08
3	1.50	1.00	1.00	1.29	1.08	1.08	1.30	1.04	1.04
4	1.33	1.00	1.00	1.20	1.05	1.05	1.26	1.03	1.03
5	1.25	1.00	1.00	1.15	1.04	1.04	1.20	1.02	1.02

Напряжение в относительных единицах на неповрежденных конденсаторах

# Защита конденсаторов

## Разряд энергии в поврежденный блок

При повреждении конденсатора энергия, запасенная в параллельно подключенных исправных конденсаторах может разряжаться через поврежденный конденсатор и его предохранитель. Суммарная расчетная энергия, запасенная в параллельных конденсаторах, не должна превышать допустимую энергию (интеграл Джоуля) конденсатора и предохранителя. Если допустимая энергия превышена, то может произойти разрушение предохранителя и/или корпуса конденсатора.

Типовые значения пленочных конденсаторов составляют 15000 Дж (4650 квар в параллели) и 10000 Дж (3100 квар в параллели) для бумажно-пленочных конденсаторов. Выхлопные предохранители, как правило, имеют значение 30000 Джоулей. Если это значение будет превышено, то необходимо использовать токоограничивающие предохранители.

(1 Джоуль = 1 Вт x сек, для вычисления используется 0.2 периода времени отключения)

# Защита конденсаторов

## Импульсный ток

При повреждении конденсатора, параллельно подключенные конденсаторы могут создавать разрядный ток высокой частоты через поврежденный конденсатор.

Предохранители неповрежденных конденсаторов должны выдерживать эти высокочастотные разрядные токи. Подобные расчеты и измерения достаточно сложны и выполняются производителем.

## Согласование со схемой обнаружения несимметрии

Индивидуальные предохранители должны отключить цепь, в которой произошло короткое замыкание раньше, чем схема обнаружения несимметрии отключит всю конденсаторную батарею полностью.



# Защита конденсаторов

## Рекомендации по выбору предохранителей от МакГроу Эдисон

### Предлагаемые рекомендации по выбору предохранителей

Напряжение блока	Напряжение предохранителя		50 квар		100 квар		150 квар		200 квар		300 квар		400 квар		500 квар	
	Exp.	NXC	Exp.	NXC	Exp.	NXC	Exp.	NXC	Exp.	NXC	Exp.	NXC	Exp.	NXC	Exp.	NXC
2400	8.7	8.3	20T	30	40K	65	65K	90*	80K	-	-	-	-	-	-	-
2770	8.7	8.3	20T	30	40K	65	50K	80*	65K	-	-	-	-	-	-	-
4160	8.7	8.3	12T	25	25T	40	40T	65	50K	65	-	-	-	-	-	-
4800	8.7	8.3	12T	18	20T	30	30T	45	40T	65	-	-	-	-	-	-
6640	8.7	8.3	12T	18	15T	25	25T	40	30T	45	50T	65	65K	80*	80K	130*
7200	8.7	8.3	10T	18	15T	25	20T	30	25T	40	40T	65	50T	80*	65K	130*
7620	8.7	8.3	10T	18	15T	18	20T	30	25T	40	40T	65	50T	80*	65K	90*
7960	8.7	8.3	10T	18	15T	18	20T	30	25T	40	40T	65	50T	80*	65K	90*
8320	8.7	15.5	10T	10	15T	18	20T	25	25T	35	40T	50*	50T	70*	65K	90*
9960	15.0	15.5	8T	10	15T	18	20T	25	25T	30	30T	50*	40T	60*	50T	70*
12470	15.0	15.5	-	-	12T	12	15T	18	20T	25	25T	35	30T	50*	40T	60*
13280	15.0	15.5	-	-	12T	12	15T	18	20T	25	25T	35	30T	50*	40T	60*
13800	15.0	15.5	-	-	12T	10	15T	18	20T	25	25T	30	30T	50*	40T	50*
14400	15.0	15.5	-	-	10T	10	15T	18	20T	25	25T	30	30T	50*	40T	50*
19920	23.0	23.0	-	-	8T	12	12T	12	15T	18	20T	25	25T	36*	25T	36*
21600	23.0	23.0	-	-	8T	12	10T	12	15T	18	20T	25	25T	25*	25T	36*

+ Для конденсаторов мощностью 50 квар трудно подобрать подходящие предохранители, способные выдерживать импульсное воздействие  $I^2t$ . Дело в том, что характеристика стойкости к импульсному воздействию  $I^2t$  уменьшается по экспоненциальному закону в зависимости от номинала плавкой вставки, т.е. быстрее, чем по линейному закону. Следовательно, рекомендации по предохранителям для конденсаторов мощностью 50 квар распространяются только на те блоки, напряжение которых не превышает 9960 В.

\* Требуется два параллельно включенных предохранителя

# Защита конденсаторов

Возвращаемся к проблеме защиты предохранителями небольших незаземленных конденсаторных батарей

Конденсаторная батарея 12.47 кВ, 1500 квар состоит из трех (3) однофазных блоков мощностью 500 квар.

$$\frac{1500[\text{ квар }]}{\sqrt{3} \cdot 12.47[\text{ кВ }]} = 69.44[\text{ A}] \Rightarrow 69.44 \cdot 1.5 = 104[\text{ A}] \Rightarrow 100[\text{ A}] \text{ Предохранитель}$$

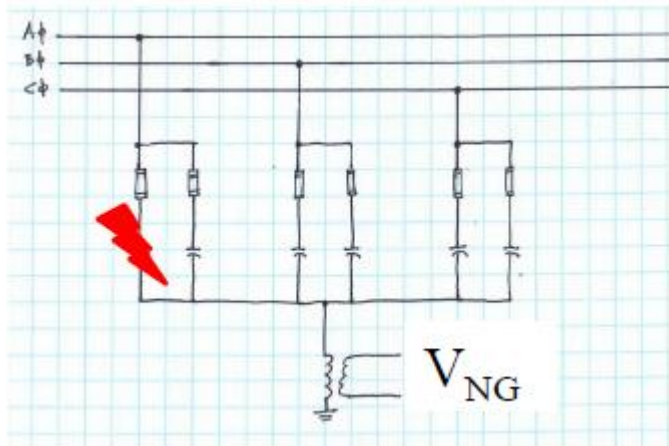
Для предохранителя на 100А потребуется примерно 500 секунд, чтобы отключить неисправную цепь (3 x 69.44 А = 208.32 А). Корпус конденсатора разрушится задолго до того, как сработает предохранитель.

Решение состоит в использовании менее мощных блоков с индивидуальными предохранителями.

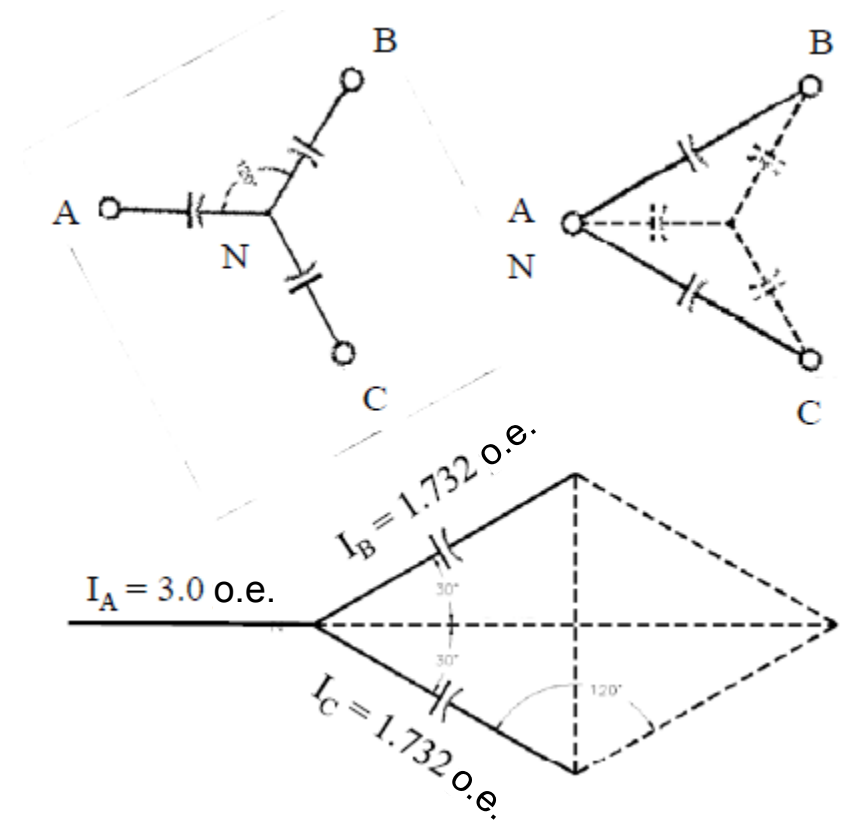
Рассмотрим пять (5) конденсаторов мощностью по 100 квар на фазу, каждый из которых оснащен предохранителем на 25 А. Время отключения 25-амперным предохранителем тока 208.32 А меньше, чем приведенная характеристика разрушения корпуса конденсатора.

# Защита конденсаторов

Почему для конденсаторной батареи, соединенной в звезду с изолированной нейтралью при замыкании между фазой и нейтралью ток будет равен 3-кратному номинальному линейному току?



Поскольку  $V = I \cdot Z$ , где  $Z$  постоянно (в предположении  $f = 60$  Гц)  $I_A = 3.0$  о.е.  
 Если напряжение на конденсаторе увеличивается в 1.732 раза, то и ток также возрастает в 1.732 раза.



# Защита конденсаторов

## Минимальное сечение проводов

Как было указано ранее, конденсаторы рассчитываются на величину 135% от номинального значения. Следовательно провода должны быть также рассчитаны на значение 135% от номинальной мощности конденсатора.

# Защита конденсаторов

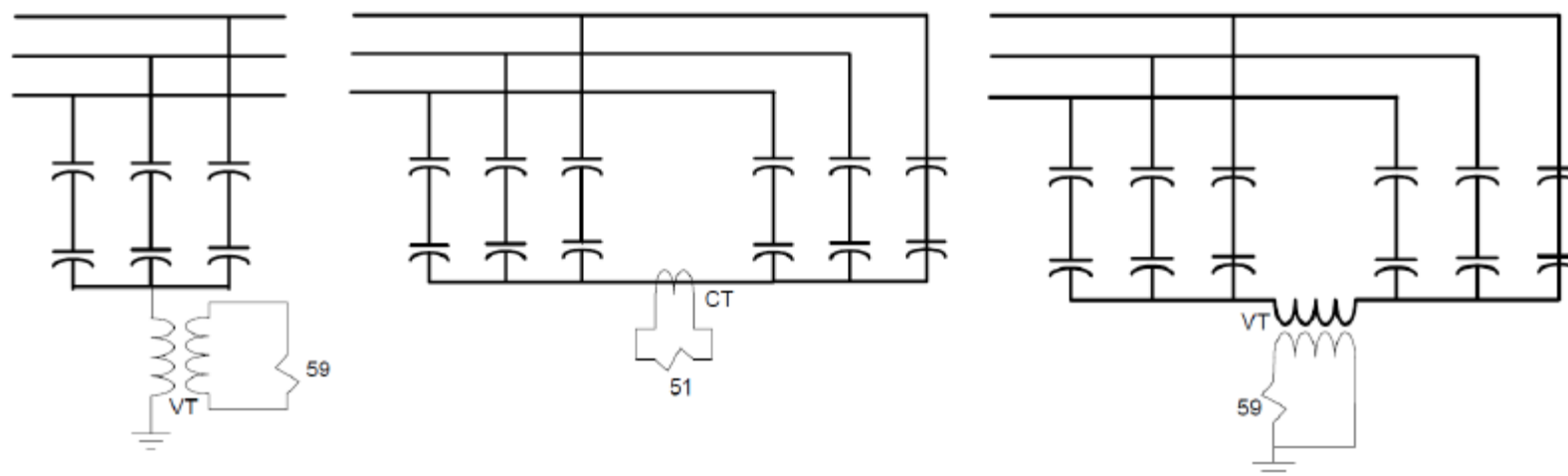
## Защита от несимметрии

Если однофазные блоки в многоблочной/многофазной установке выходят из строя и выводятся из эксплуатации, то оставшиеся блоки попадают под воздействие повышенного напряжения. Стандарт IEEE 1036 устанавливает ограничения на эти перенапряжения.

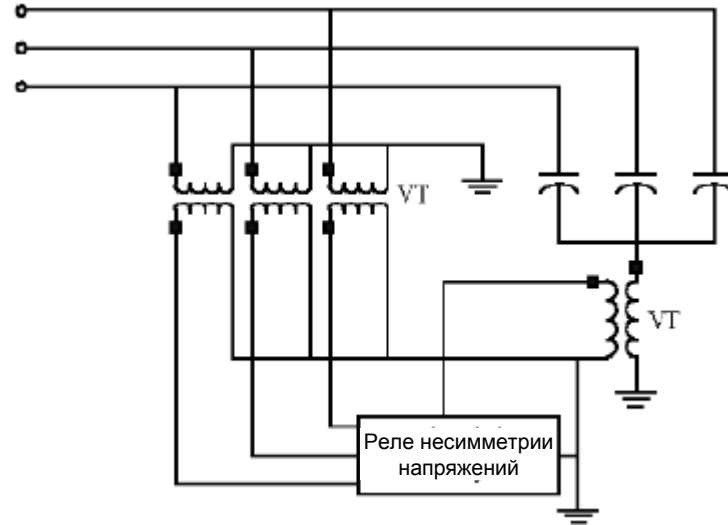
Длительность	Макс. напряжение (кратн.действ.знач)
6 периодов	2,20
15 периодов	2,00
1 сек.	1,70
15 сек	1,40
1 мин.	1,30

Для предотвращения выхода из строя блоков, испытывающих перенапряжения, необходимо использовать схему защиты от несимметрии.

# Защита конденсаторов

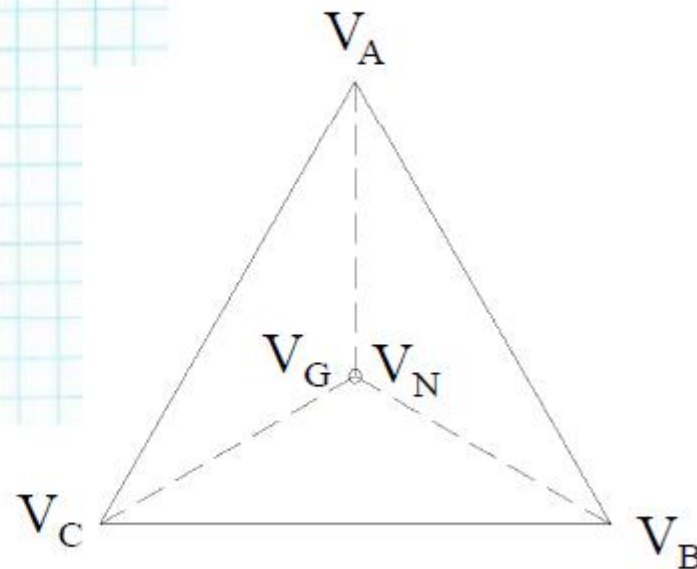
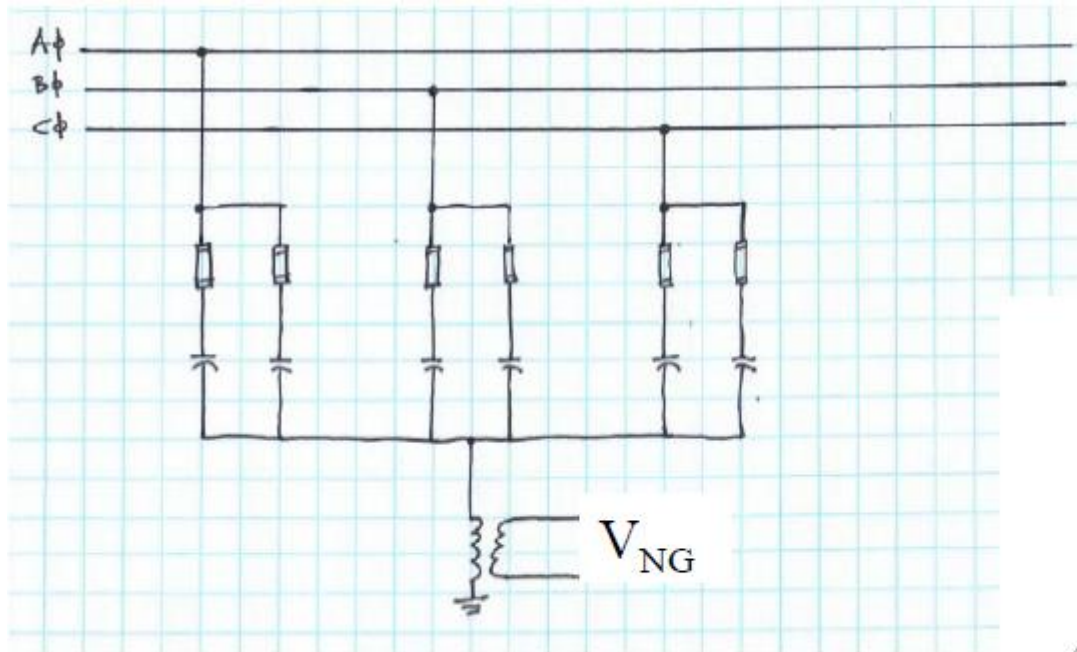


# Защита конденсаторов



Несимметрия напряжений и смещение нейтрали  
с компенсацией несимметрии

# Защита конденсаторов



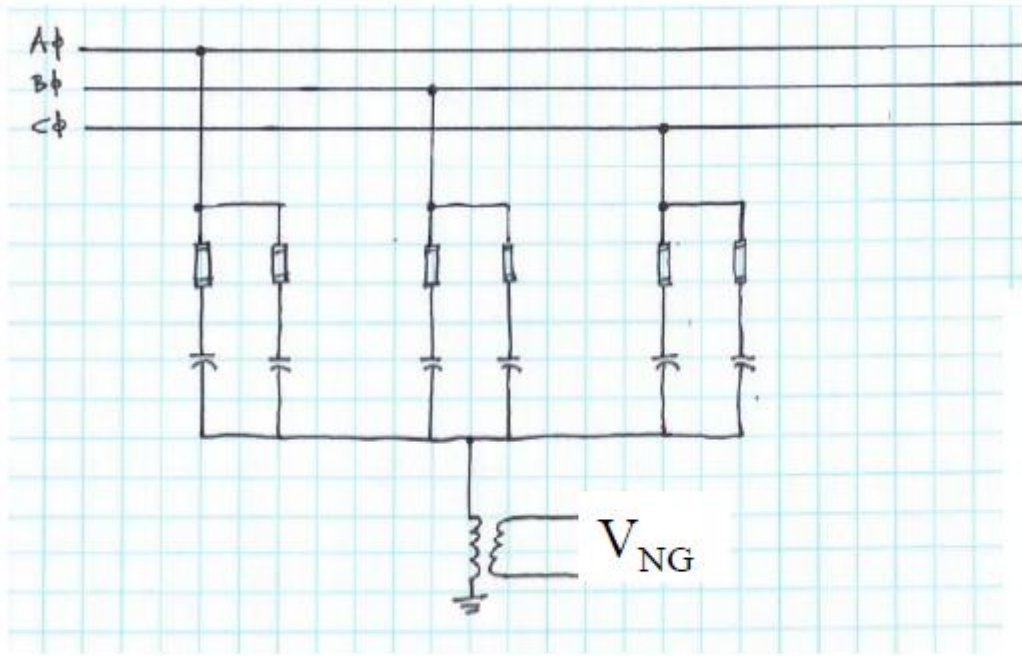
Нормальный режим

$$V_N = V_G$$

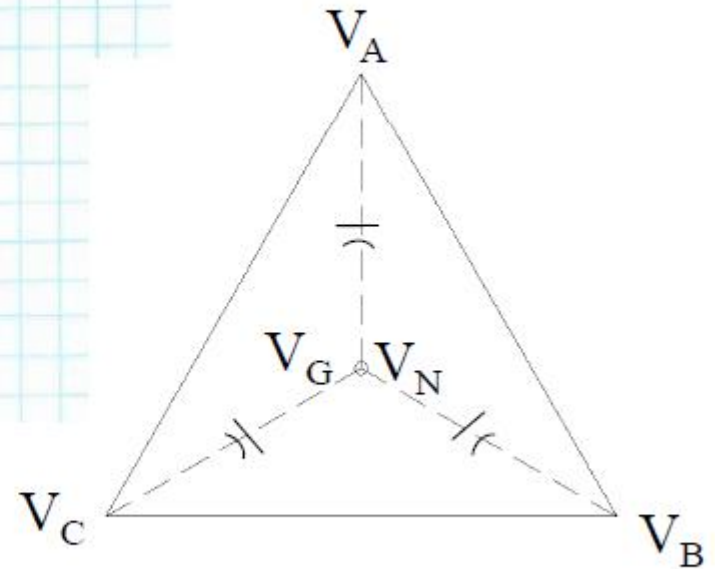
$$V_{AN} = V_{BN} = V_{CN}$$



# Защита конденсаторов



Система с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через сопротивление

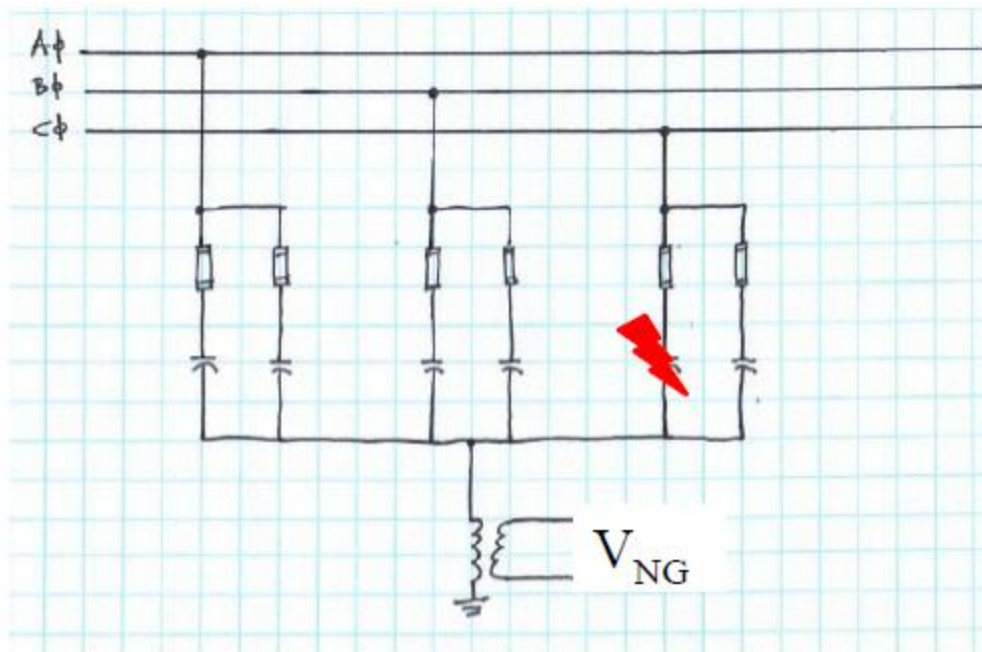


Нормальный режим

$$V_N = V_G$$

$$V_{AN} = V_{BN} = V_{CN} = 1.0 \text{ о.е.}$$

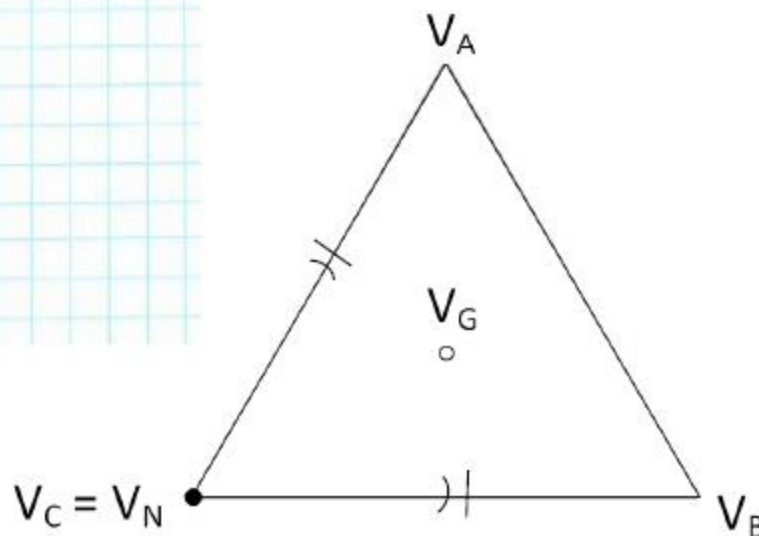
# Защита конденсаторов



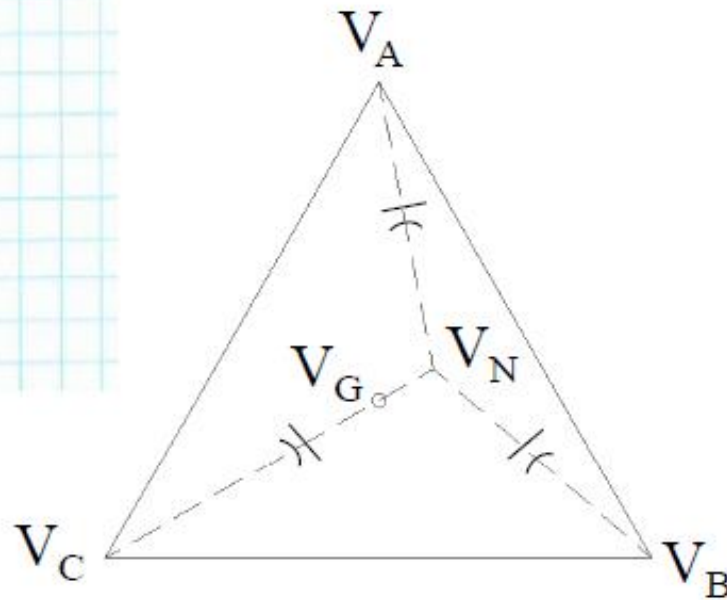
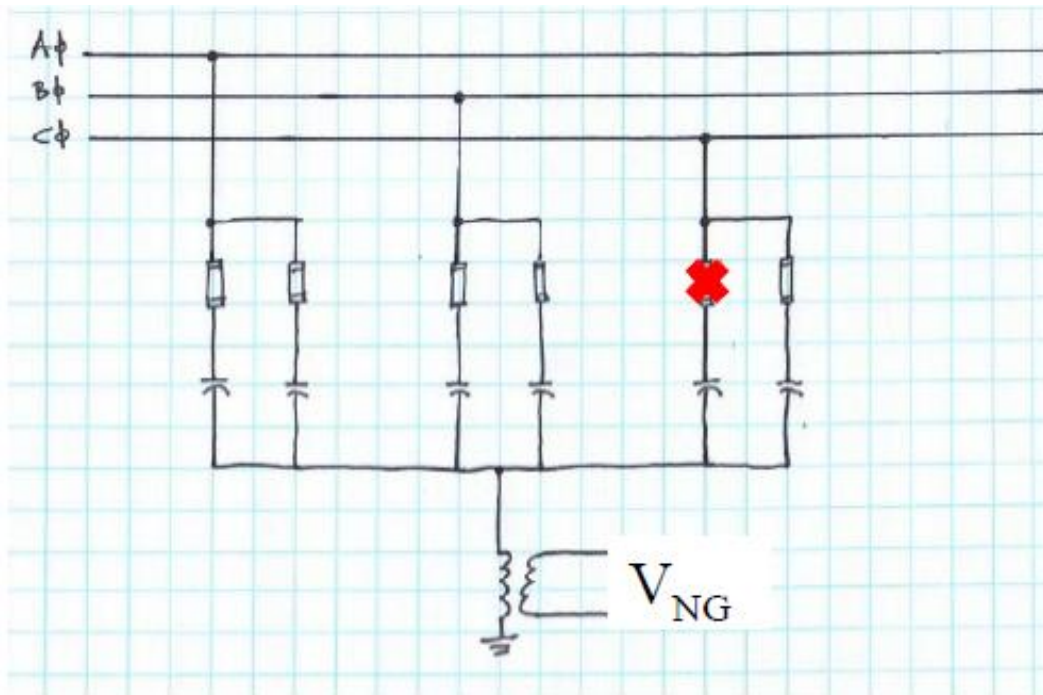
Замыкание между фазой и нейтралью

$$V_{NG} = V_{LN}$$

$$V_{AN} = V_{BN} = V_{LL} = 1.732 \text{ o.e.}$$



# Защита конденсаторов

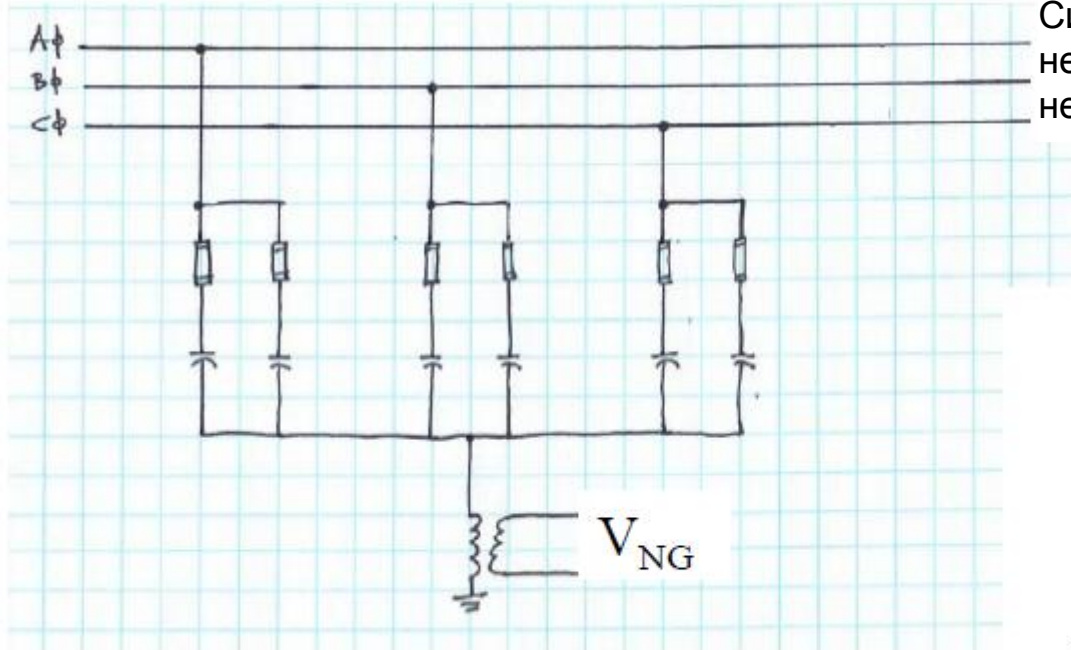


При выводе из работы одного конденсатора

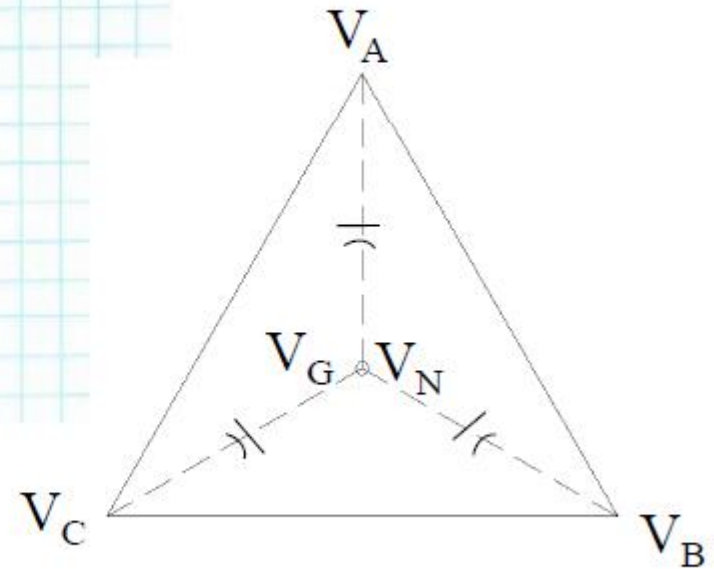
$$V_{NG} = 0.2 \text{ о.е.}$$

$$V_{CN} = 1.2 \text{ о.е.}$$

# Защита конденсаторов



Система с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через сопротивление

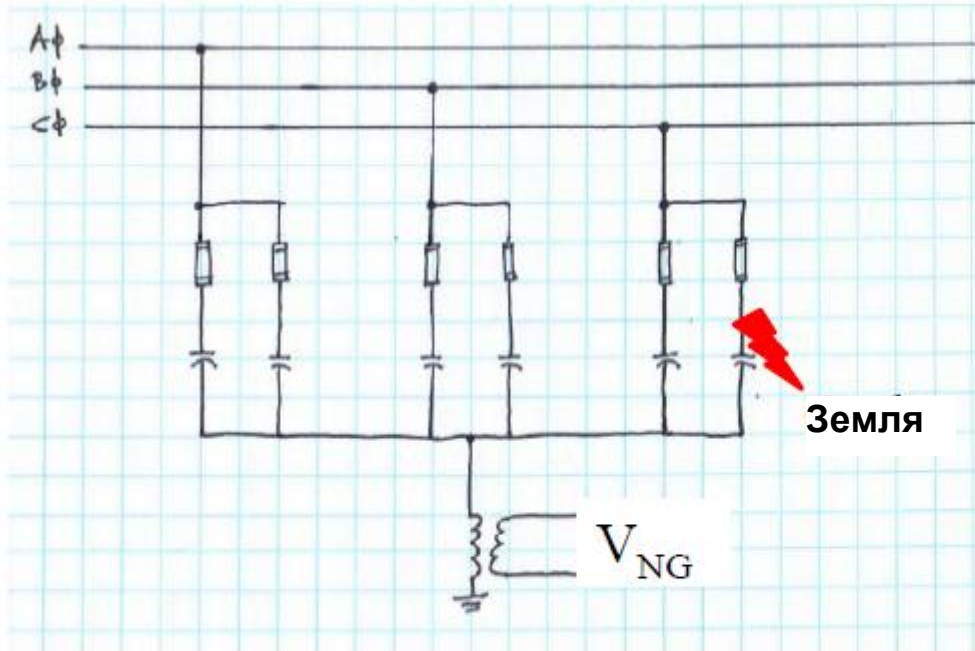


Нормальный режим

$$V_N = V_G$$

$$V_{AN} = V_{BN} = V_{CN} = 1.0 \text{ о.е.}$$

# Защита конденсаторов

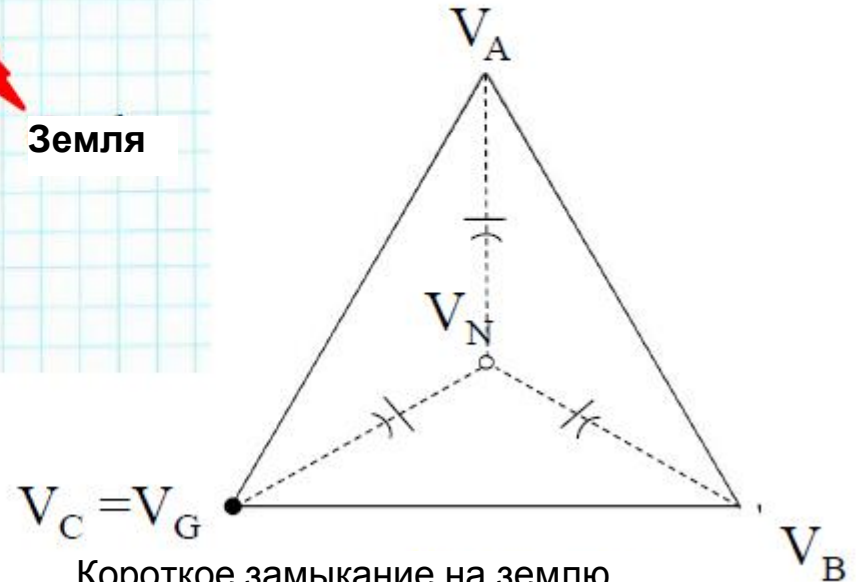


Система с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через сопротивление

## Короткое замыкание на землю

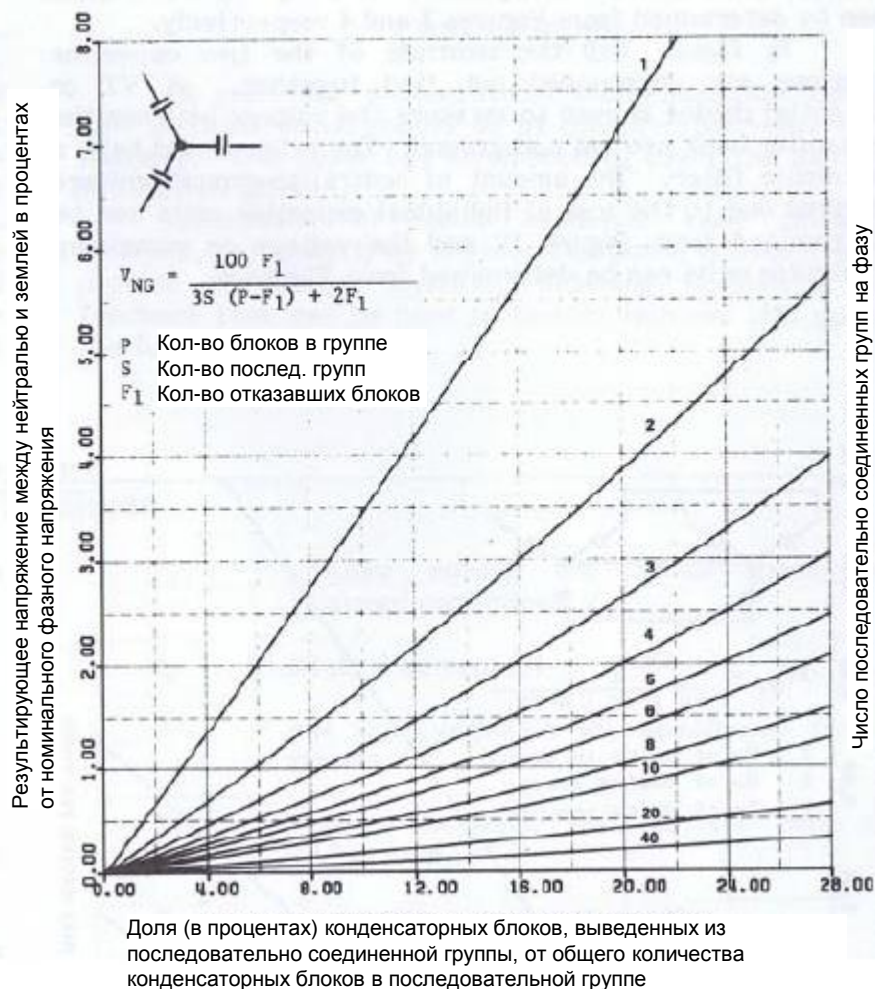
$$V_{NG} = V_{LN}$$

$$V_{AG} = V_{BG} = V_{LL} = 1.732 \text{ о.е.}$$



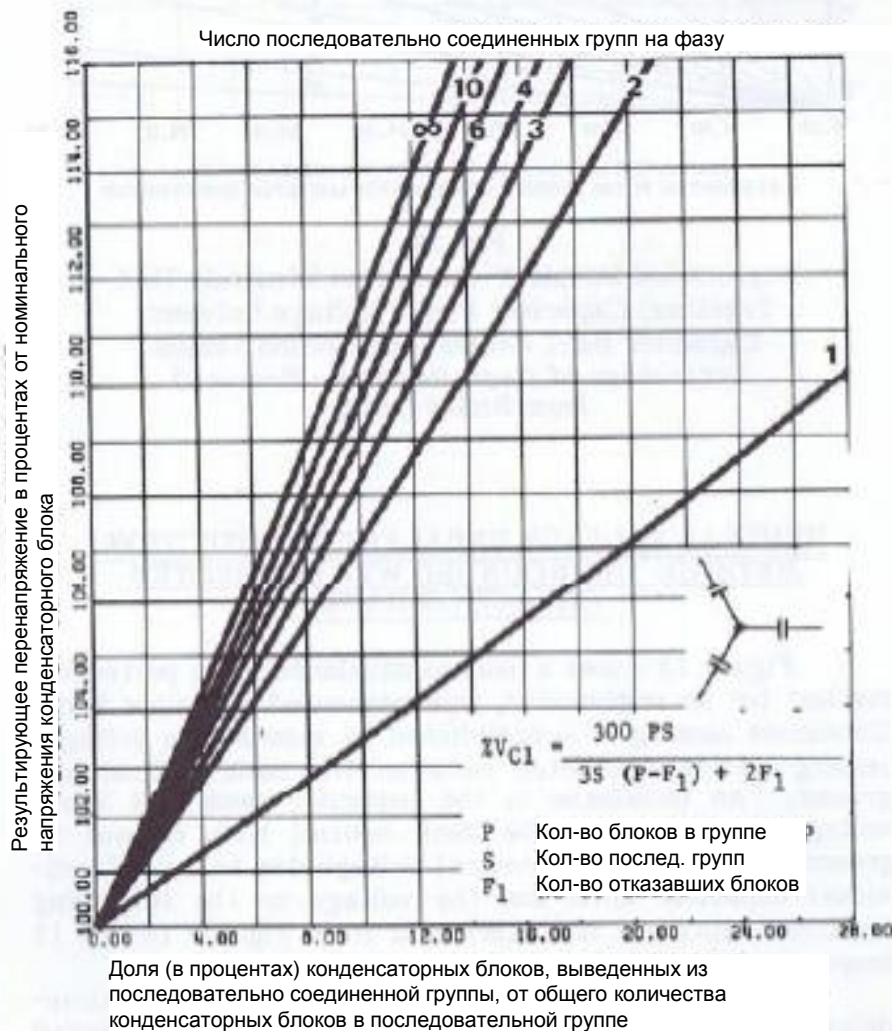
Короткое замыкание на землю конденсаторной батареи или где-либо в системе

# Защита конденсаторов



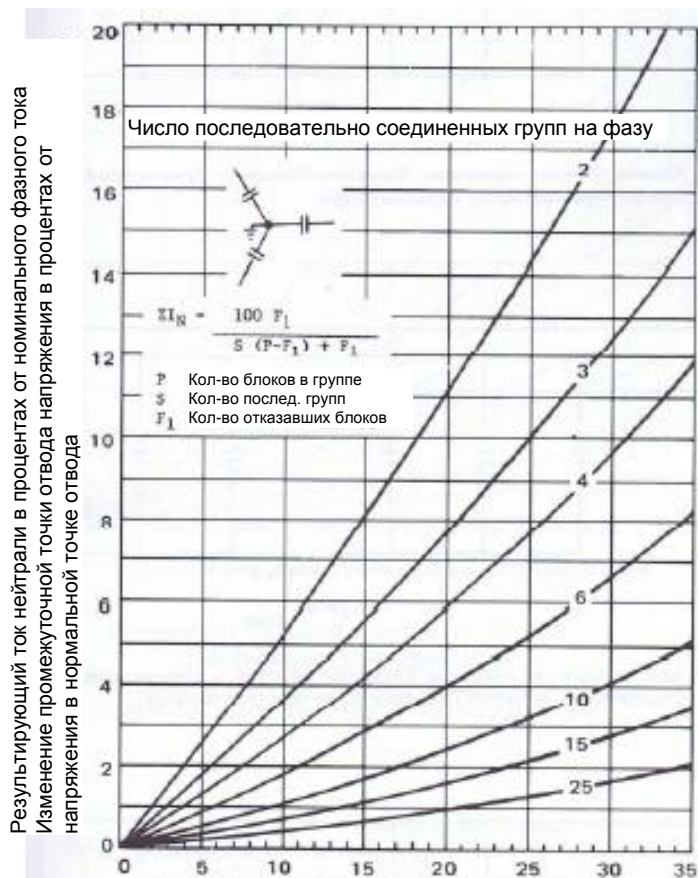
Соединение в звезду с изолированной нейтралью: Зависимость напряжения между нейтралью конденсаторной батареи и землей от доли (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы

# Защита конденсаторов



Соединение в звезду с изолированной нейтралью:  
Зависимость напряжения на оставшихся конденсаторных блоках от доли (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы

# Защита конденсаторов

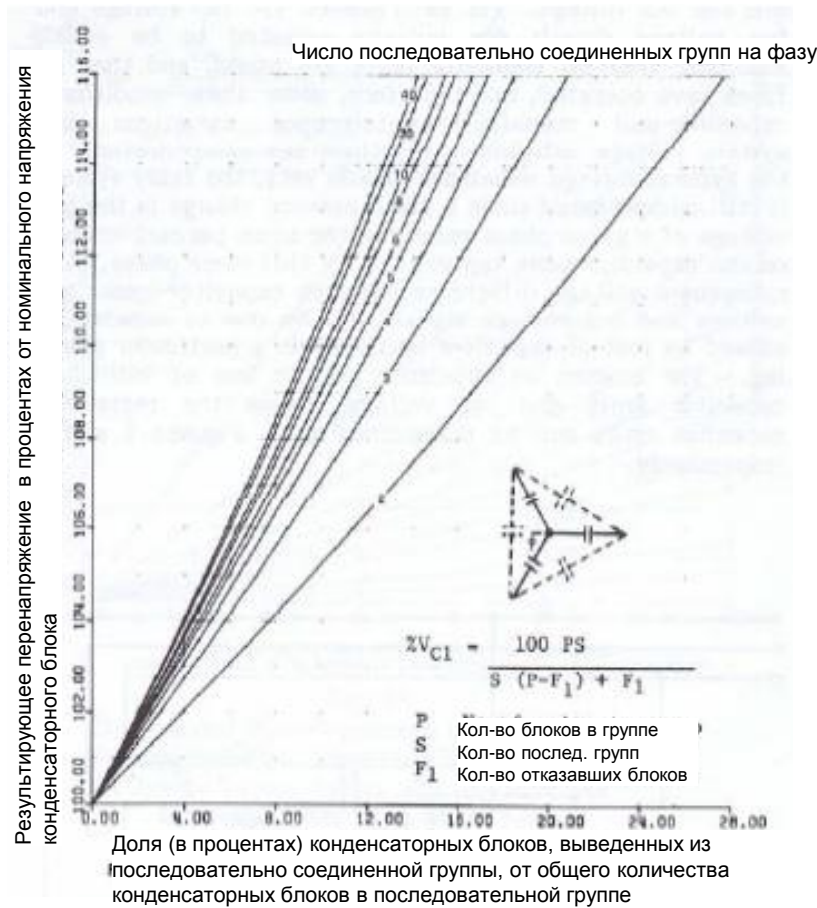


Доля (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы, от общего количества конденсаторных блоков в последовательной группе

Соединение в звезду с заземленной нейтралью:  
Зависимость тока нейтрали от доли (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы



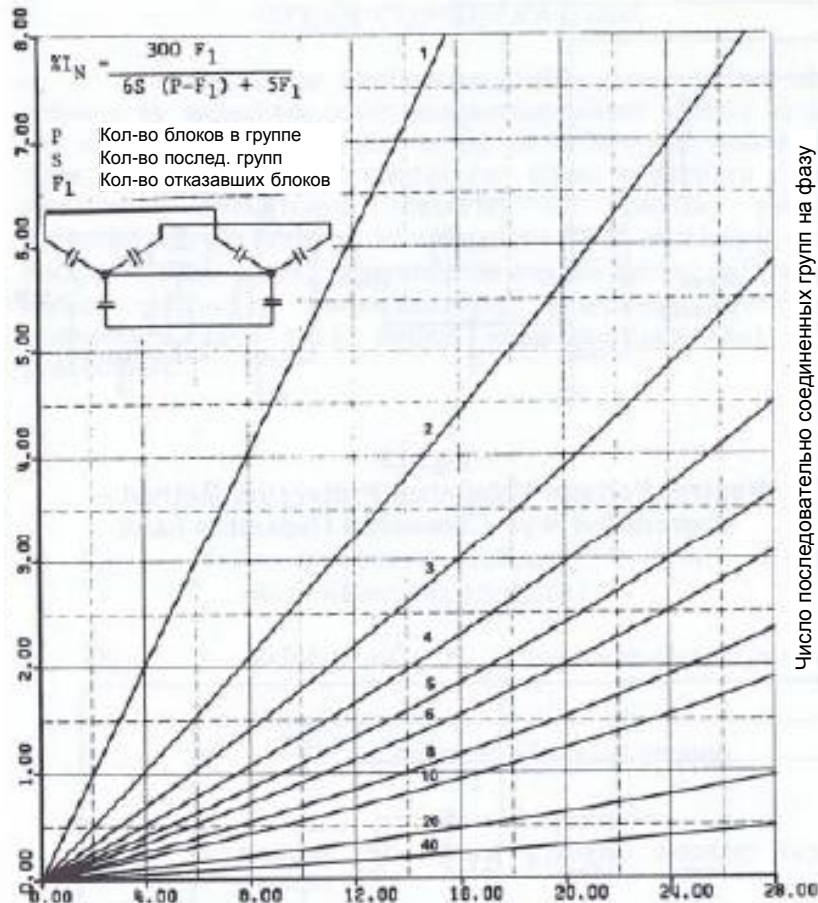
# Защита конденсаторов



Соединение в звезду с заземленной нейтралью или в треугольник:  
Зависимость напряжения на оставшихся блоках в последовательной группе от доли (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы

# Защита конденсаторов

Результирующий ток нейтрали в процентах от номинального фазного тока

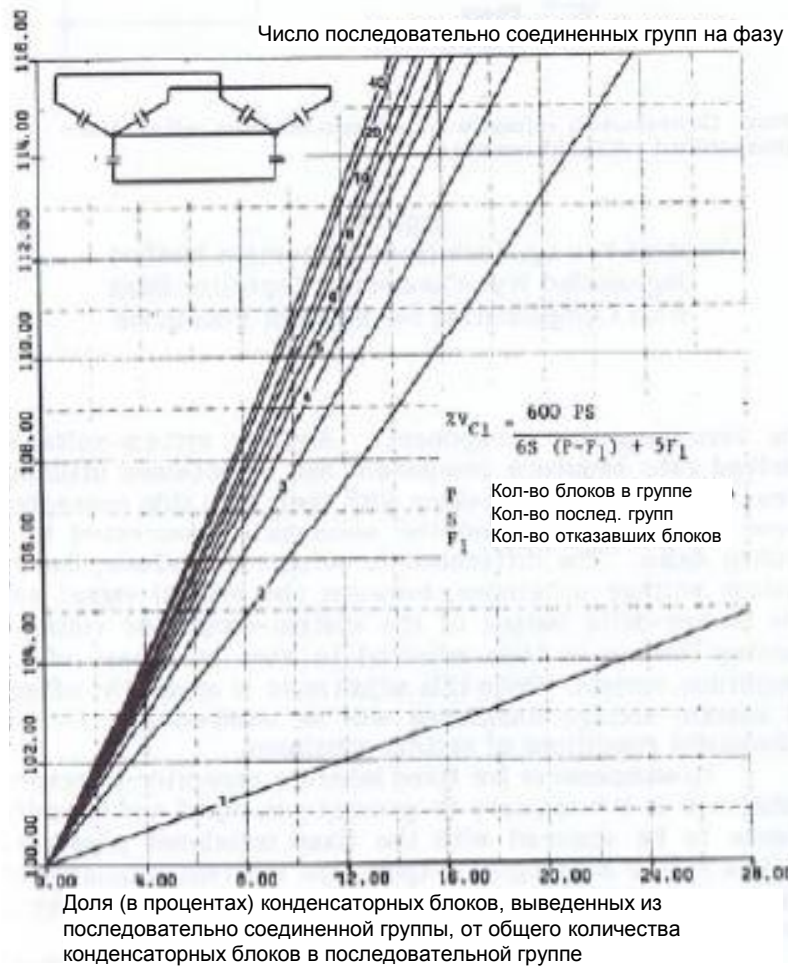


Доля (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы, от общего количества конденсаторных блоков в последовательной группе

Соединение в двойную звезду с изолированной нейтралью, нейтрали связаны друг с другом: Зависимость тока нейтрали от доли (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы

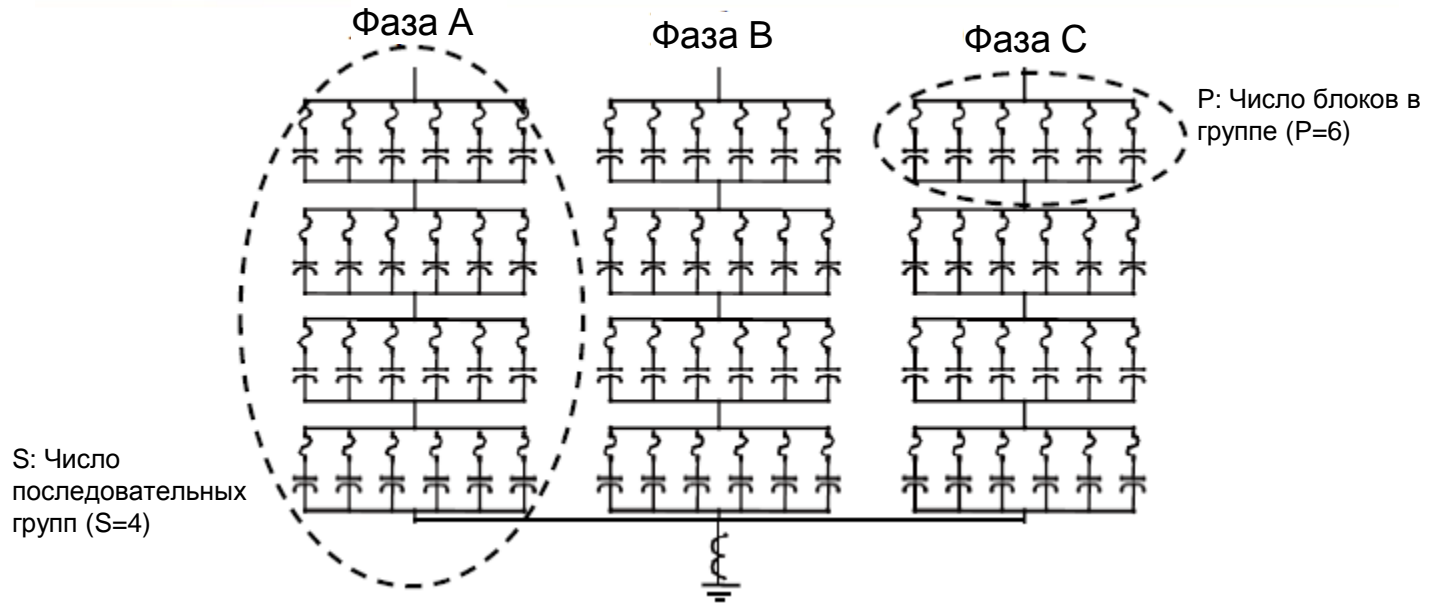
# Защита конденсаторов

Результатирующее перенапряжение в процентах от номинального напряжения конденсаторного блока



Соединение в двойную звезду с изолированной нейтралью, нейтрали связаны друг с другом:  
Зависимость напряжения на оставшихся конденсаторных блоках в последовательной группе от доли (в процентах) конденсаторных блоков, выведенных из последовательно соединенной группы

# Защита конденсаторов



Вспомогательный рисунок для дальнейших вычислений

# Защита конденсаторов

Кол-во послед. групп	Глухозаземл. звезда или треугольник	Звезда с изолир.нейтралью	Расщепл.звезда с изолир.нейтралью
1	-	4	2
2	6	8	7
3	8	9	8
4	9	10	9
5	9	10	10
6	10	10	10
7	10	10	10
8	10	11	10
9	10	11	10
10	10	11	11
11	10	11	11
12 и более	11	11	11

Минимально рекомендуемое количество блоков в параллели на последовательно соединенную группу для ограничения напряжения на оставшихся блоках до 110% при одном выведенном из работы блоке

# Защита конденсаторов

Дополнительные технические решения  
и расчеты приведены в IEEE C37.99

# Часть 2

# Конденсаторы. Основные положения

Продолжим обсуждение характеристик напряжения конденсаторов:

В системе с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через сопротивление, короткое замыкание на землю в одной фазе приводит к тому, что напряжение на двух других фазах увеличивается в 1.732 раза.

Означает ли это, что конденсаторы должны быть рассчитаны на линейное напряжение?

В общем-то, ничего плохого в этом нет, однако, стоимость установки значительно возрастет.



# Конденсаторы. Основные положения

Напомним:

$$S = \frac{V^2}{X_c}$$

Это означает, что конденсаторный блок мощностью 150 квар на 12470 В, включенный на 7200 В обеспечит лишь 50 квар.

$$S_{\text{НОВ}} = \frac{7200[\text{В}]^2}{12470[\text{В}]^2} \cdot 150[\text{квар}]$$

$$S_{\text{НОВ}} = 50[\text{квар}]$$

# Конденсаторы. Основные положения

Применение конденсаторов на 12470 В в системах на 12470 В с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через сопротивление, потребует в три раза большего количества конденсаторов.

Следует отметить, что конденсаторы на 12470 В будут также больше по габаритам, чем конденсаторы на 7200 В.

В результате имеем завышенные габариты и более высокую стоимость установки.

Такое решение было бы обоснованным, если замыкание на землю не прекращалось в течение длительных периодов времени.

# Конденсаторы. Основные положения

Возможно, блоки мощностью 150 квар или 200 квар на 7620 В или 7960 В, включенные на 7200 В были бы лучшим решением

$$S_{\text{НОВ}} = \frac{7200[\text{В}]^2}{7620[\text{В}]^2} \cdot 150[\text{квар}] \quad S_{\text{НОВ}} = \frac{7200[\text{В}]^2}{7620[\text{В}]^2} \cdot 200[\text{квар}]$$

$$S_{\text{НОВ}} = 134[\text{квар}]$$

$$S_{\text{НОВ}} = 178[\text{квар}]$$

ИЛИ

ИЛИ

$$S_{\text{НОВ}} = \frac{7200[\text{В}]^2}{7960[\text{В}]^2} \cdot 150[\text{квар}] \quad S_{\text{НОВ}} = \frac{7200[\text{В}]^2}{7960[\text{В}]^2} \cdot [\text{квар}]$$

$$S_{\text{НОВ}} = 123[\text{квар}]$$

$$S_{\text{НОВ}} = 163[\text{квар}]$$

Следует обратить внимание, что блок на 7620 В обеспечивает дополнительно 6% величины напряжения.

Блок на 7960 В обеспечивает дополнительно 11%

# Конденсаторы. Основные положения

Выхлопные предохранители:

Обеспечивают возможность отключения неисправного конденсатора из схемы путем расплавления оловянно-свинцовой слаботочной вставки. Закороченный конденсаторный блок вызывает значительное увеличение тока через предохранитель. Величина тока ограничивается лишь реактивным сопротивлением питающей сети и других конденсаторных блоков, соединенных последовательно с неисправным. Горячая дуга соприкасается с фибровыми стенками патрона предохранителя, повышая в результате давление в трубке предохранителя. Дуга охлаждается и вытягивается по мере ее вывода из трубки. Предохранитель все еще продолжает проводить тока, пока ток не достигает естественного нулевого значения. Ноль тока вызван тем, что ток короткого замыкания питающей сети перешел через ноль. Если другие конденсаторы подключены параллельно неисправному, то вся запасенная в этих конденсаторах энергия будет поглощена либо срабатыванием предохранителя, либо неисправным конденсаторным блоком. Большая часть этой энергии поглощается неисправным конденсатором.

# Конденсаторы. Основные положения

Токоограничивающие предохранители:

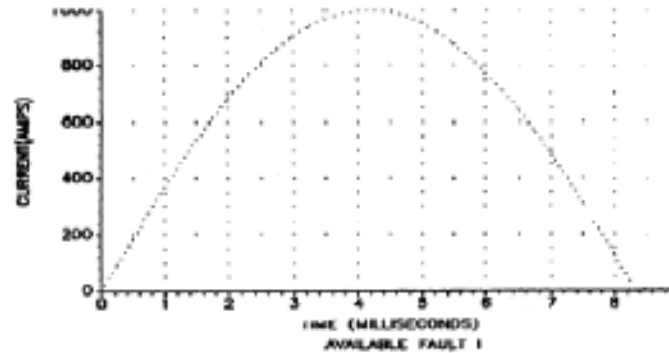
Используют элемент с постоянным поперечным сечением по длине. Такая конструкция придает предохранителю свойства ограничения тока. В процессе плавления развивается противоЭДС на дюйм элемента по всей его длине. Когда это напряжение превысит напряжение на предохранителе, дуга начинает гаснуть. В результате фиксированное напряжение может и, скорее всего, будет оставаться на других конденсаторах в последовательной группе. Предохранитель, в силу своей конструкции, не поглощает всю энергию последовательной группы. Такой предохранитель применяется для конденсаторных батарей с большим числом параллельных конденсаторов. Он может найти применение в приложениях с практически бесконечным запасом энергии в параллельных элементах, поскольку за счет достаточной величины противоЭДС гашение дуги будет проходить эффективно. Такие предохранители могут применяться с последовательными, шунтовыми конденсаторами и на постоянном токе.

Из-за высокого значения обратного напряжения в процессе работы такие предохранители должны применяться с несколькими конденсаторами в параллели для ограничения повышения напряжения, иначе пробой может произойти где-то в другом месте конденсаторной сборки

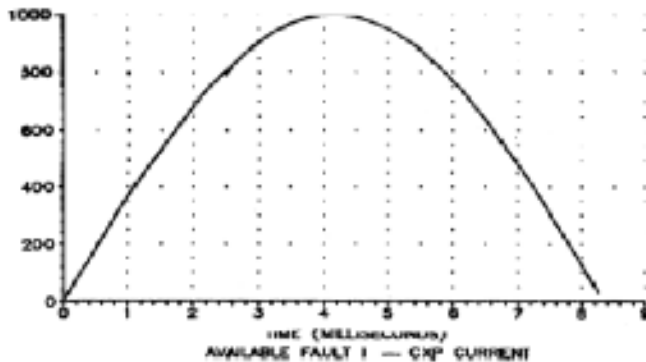
# Конденсаторы. Основные положения

Токоограничивающие против выхлопных предохранителей

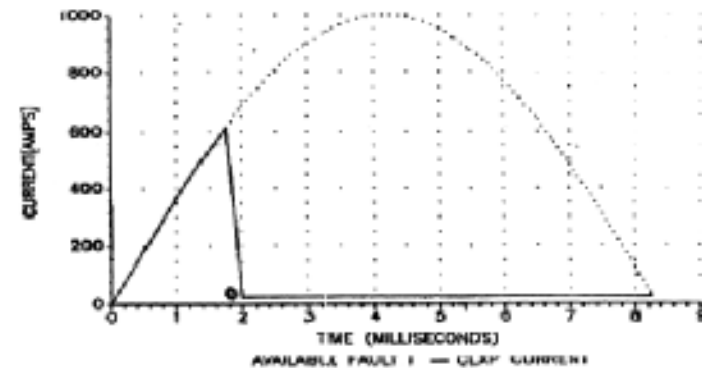
Ток короткого замыкания в системе



Выхлопной предохранитель



Токоограничивающий предохранитель



# Конденсаторы. Основные положения

Токоограничивающие против выхлопных предохранителей

## Выхлопные предохранители

Работают механически и обеспечивают визуальную индикацию срабатывания

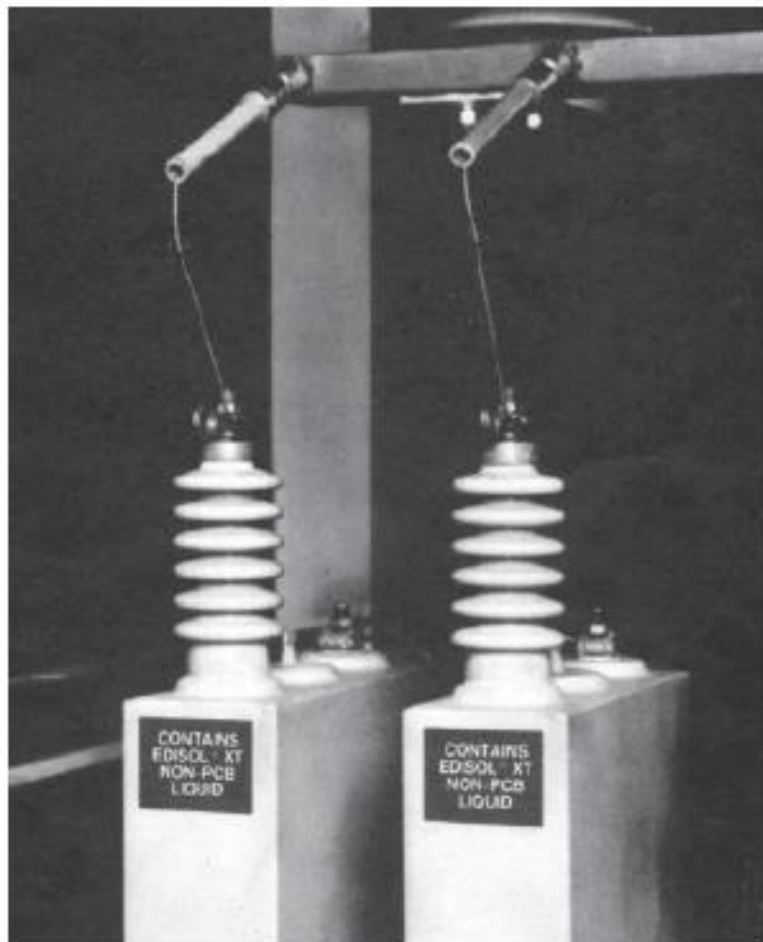
Требуют дополнительного пространства для функционирования

Обычно применяется в наружном исполнении из-за выброса ионизированного газа

Сочетание выхлопных и токоограничивающих предохранителей может быть использовано в помещении в оборудовании с металлическим корпусом.

Дешевле

# Конденсаторы. Основные положения





# Конденсаторы. Основные положения

## Токоограничивающие предохранители

Не выделяют ионизированных газов во время работы. Наличие ионизированных газов нежелательно, поскольку они могут вызвать перекрытие по поверхности изолятора и привести к дополнительным повреждениям. Не требуют вентиляции.

Быстрое ограничение тока

Высокая отключающая способность, бесшумная работа

Могут использоваться как для наружного, так и внутреннего применения.

Принцип работы без давления, следовательно, не требуется никаких клапанов или специальных усиленных стоек.

Дороже

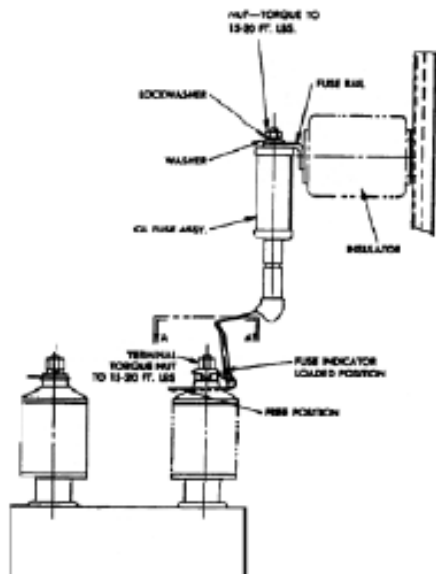
# Конденсаторы. Основные положения

Отметим отсутствие гибкого вывода  
и индикации сгоревшего предохранителя

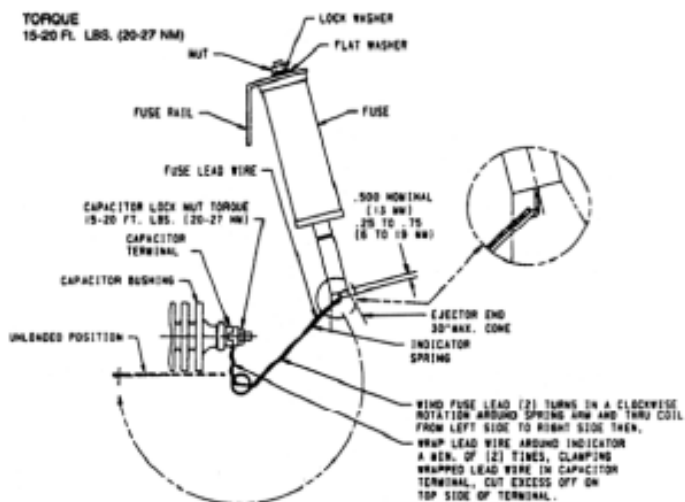


# Конденсаторы. Основные положения

## Ограничение тока с выхлопным принципом



Indoor Installation



Outdoor Installation Type CLXP Fuse  
Edge Mount Capacitor with Torsion Spring

# Конденсаторы. Основные положения

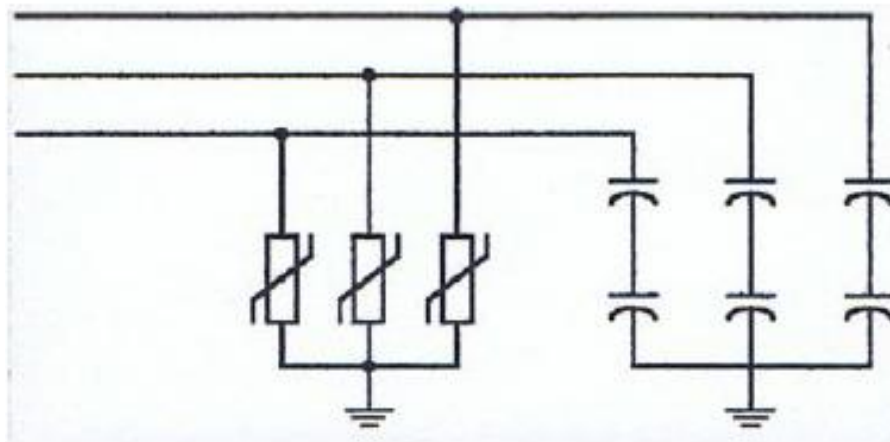
Несколько слов о разрядниках. Как и где следует их применять?

В зависимости от области применения, параметров окружающей среды, подверженности коммутационным процессам и т.д., разрядники могут оказаться просто необходимым элементом системы.

Напомним, что когда бегущая волна встречает на своем пути высокой сопротивление, она может увеличиться вдвое. Поэтому разрядники (в случае их применения) следует устанавливать по возможности ближе к конденсаторным батареям. Установка разрядников у выключателей, коммутирующих конденсаторную батарею, будет неэффективным для ее защиты.

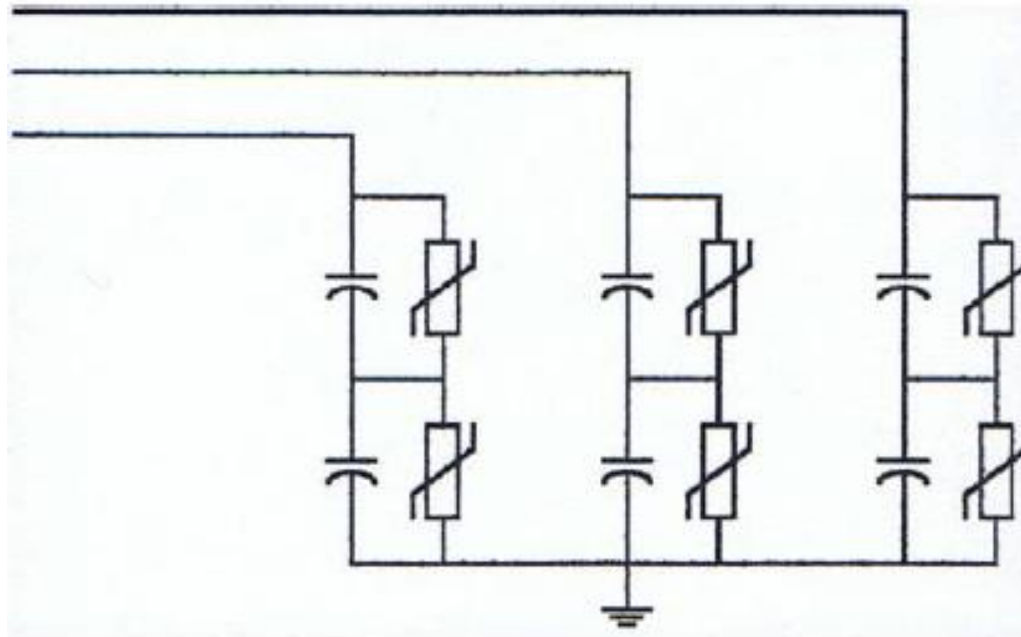
## Защита конденсаторов

Ниже приведен способ подключения с тремя (3) разрядниками, распространенный для систем с глухозаземленной нейтралью и соединенных в звезду с заземленной нейтралью конденсаторных батарей.



## Защита конденсаторов

В зависимости от типа установки, параметров системы и требуемого уровня защиты может применяться способ подключения с шестью (6) разрядниками.



# Защита конденсаторов

В системах с изолированной нейтралью или системах с нейтралью, заземленной через высокое сопротивление для незаземленной конденсаторной батареи, соединенной в звезду, можно использовать подключение четырех (4) разрядников с заземлением.

## Короткое замыкание Фаза-Нейтраль

$$V_{NG} = V_{LN}$$

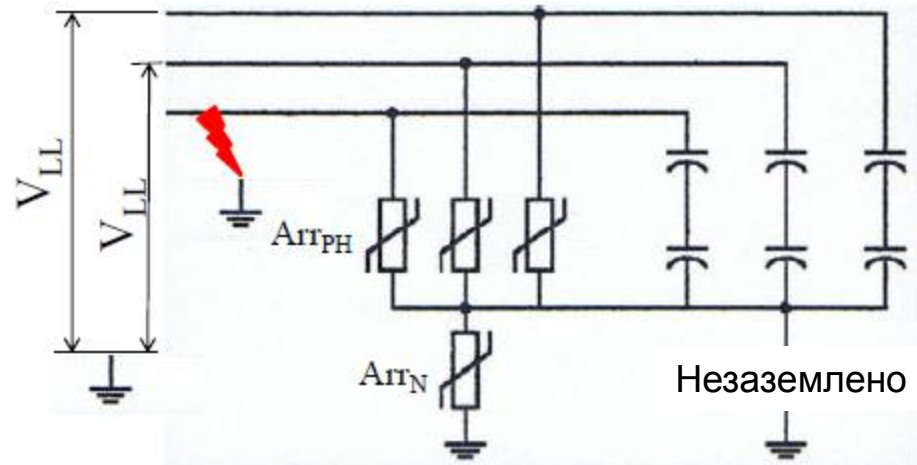
$$V_{AN} = V_{BN} = V_{LL} = 1.732 \text{ о.е.}$$

## Короткое замыкание на землю

$$V_{NG} = V_{LN}$$

$$V_{AG} = V_{BG} = V_{LL} = 1.732 \text{ о.е.}$$

Если замыкание может быть **устранено**,  
 $A_{гPH}$  должен быть рассчитан на  $V_{LL}$   
 $A_{гN}$  должен быть рассчитан на  $V_{LN}$   
 Действующее значение максимально допустимого длительного рабочего напряжения разрядника равно  
 $V_{LL} + V_{LN}$



# Защита конденсаторов

Отметим, что если к незаземленной конденсаторной батарее применить распространенный способ включения с тремя (3) разрядниками, то разрядники придется выбирать достаточно высокого номинала, чтобы выдержать временные перенапряжения при однофазном замыкании на землю, что может не обеспечить требуемого уровня защиты конденсаторов.

## Короткое замыкание Фаза-Нейтраль

$$V_{NG} = V_{LN}$$

$$V_{AN} = V_{BN} = V_{LL} = 1.732 \text{ о.е.}$$

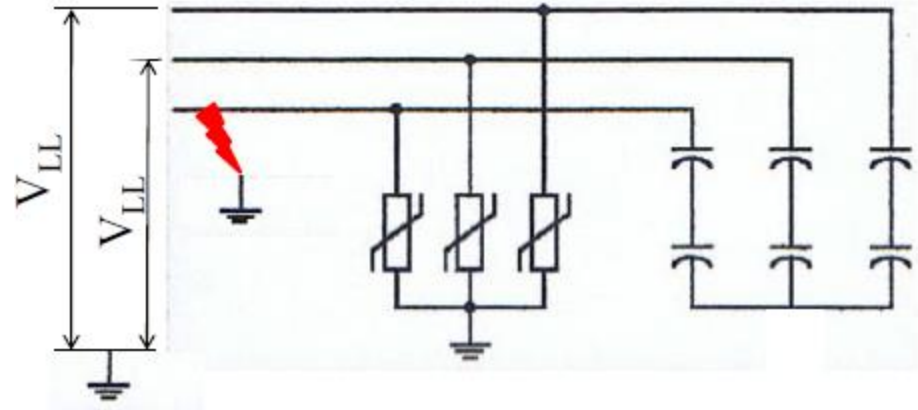
## Короткое замыкание на землю

$$V_{NG} = V_{LN}$$

$$V_{AG} = V_{BG} = V_{LL} = 1.732 \text{ о.е.}$$

Если замыкание может быть **устранено**, разрядники должны быть рассчитаны на  $V_{LL}$

Разрядники не обеспечивают защиту изоляторов конденсатора. Отметим, что параметр BIL (уровень прочности изоляции) характеризует прочность изоляции между проходным изолятором и корпусом.





# Защита конденсаторов

Интересные презентации на тему применения разрядников в конденсаторных установках

“Руководство по выбору ограничителей перенапряжений в конденсаторных установках для коррекции коэффициента мощности” – Техническая информация компании АВВ

“Применение ограничителей перенапряжений с высоковольтными конденсаторными батареями для уменьшения проблемы повторных пробоев при коммутации” – 19-я международная конференция по системам распределения электроэнергии CIRED, Вена, 21-24 мая 2007 г.

Обе презентации затрагивают также вопросы междофазного включения разрядников.

# Гармоники

# Гармоники

Напомним, что емкостное реактивное сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте питающей сети.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Гармоники протекают в точке цепи с наименьшим сопротивлением. Чем выше частота гармоники, тем меньше сопротивление конденсатора.

Принимая на себя гармоники, конденсатора нагревается, что сокращает срок его службы. Гармоники оказывают воздействие на диэлектрик конденсатора, что также сокращает срок службы конденсатора.

# Гармоники

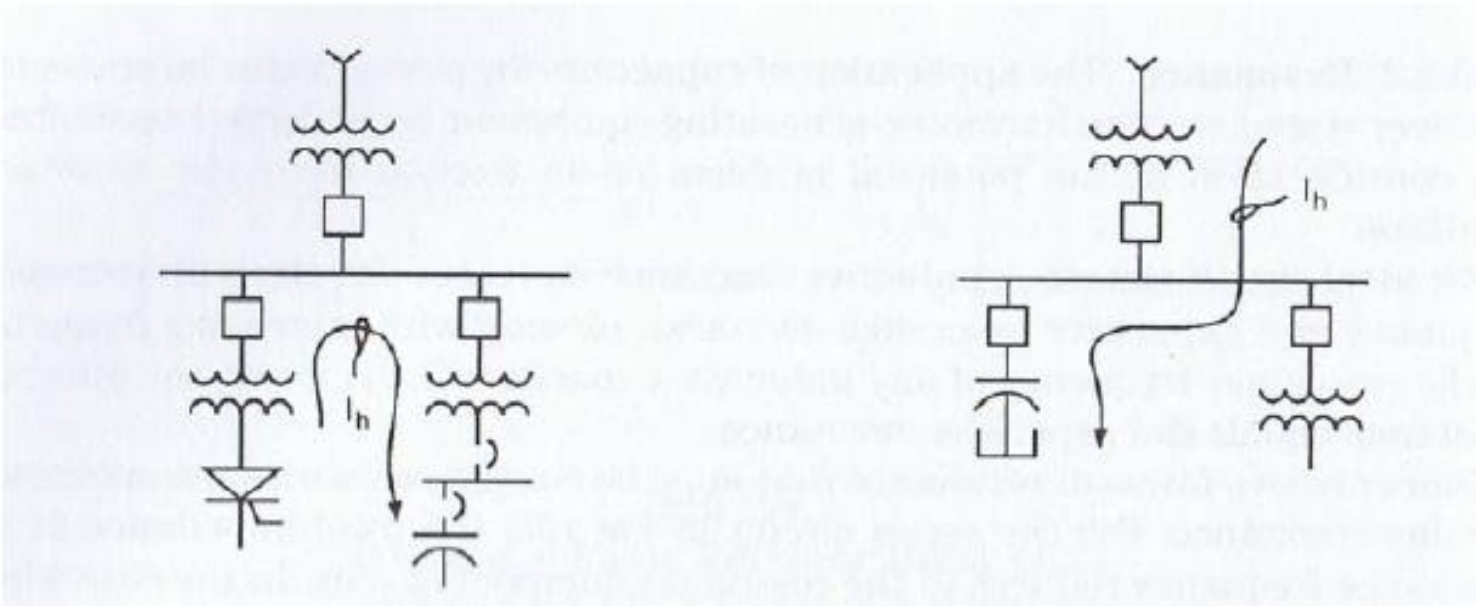


Рис.107

Последовательный контур (источник питания не содержит гармоник)

Рис.108

Последовательный контур (источник питания содержит гармоники)

# Гармоники

Откуда берутся гармоники?

- Элементы силовой электроники (электроприводы, выпрямители, источники питания компьютеров и т.д.)
- Оборудование с использованием дугового разряда (сварочные аппараты, дуговые печи, лампы дневного света и т.д.)
- Устройства с насыщением магнитопровода (трансформаторы)
- Вращающиеся машины (генераторы)
- **Явление параллельного резонанса** (между конденсаторной батареей и силовым оборудованием)

Стандарт IEEE Std 519 устанавливает рекомендуемые пределы гармонических искажений в точке общего подключения к сети.

# Гармоники

Максимальное искажение напряжения в % в точке общего подключения			
	$\leq 69$ кВ	69 кВ – 161 кВ	$> 161$ кВ
Максимальное для отдельной гармоники	3.0	1.5	1.0
Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD) %	5.0	2.5	1.5

**Таблица 1(а) – Стандарт IEEE 519-1992**  
**Пределы гармонических искажений напряжения**

# Гармоники

Максимальное гармоническое искажение тока в % от $I_H$						
	Номер отдельной гармоники (нечетные)					
$I_{K3}/I_H$	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	% TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20–50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50–100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100–1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Четные гармоники ограничиваются на уровне 25% от предела для нечетных

Искажения тока, которые приводят к смещению постоянной составляющей, т.е. однополупериодные преобразователи, недопустимы

\* Эти значения пределов искажений тока установлены для всего силового генерирующего оборудования, независимо от величины  $I_{K3}/I_L$

Здесь  
 $I_{K3}$  – максимальный ток короткого замыкания в точке общего присоединения  
 $I_H$  – максимальный ток нагрузки (основная гармоника) в точке общего присоединения

**Таблица 1(б) – Стандарт IEEE 519**  
**Пределы гармонических искажений тока в распределительной сети**  
**(от 120 В до 69,000 В)**

# Гармоники

## Явление резонанса

Когда несколько источников гармонических токов вводят эти токи в питающую сеть и частота одной из гармоник совпадает с резонансной частотой контура, образованного силовым трансформатором и конденсаторами для коррекции коэффициента мощности, в системе возникает резонанс и между этими элементами начинают циркулировать большие значения гармонического тока. В результате большое значение резонансного тока протекает через силовой трансформатор, что приводит к большим величинам гармонических искажений напряжения, накладываемых на напряжение нагрузки.



# Гармоники

Необходимо выяснить уровни гармоник в системе, чтобы определить, необходимы ли какие фильтры при установке конденсаторных батарей.

Следует определить, не возникнет ли в конденсаторной батарее с фильтром каких-либо проблем с явлением резонанса. Если таковые проблемы существуют. Необходимо скорректировать конструкцию фильтра.

# Гармоники



Пример фильтра гармоник на 13.8 кВ

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Итак, как же рассчитать мощность конденсаторной батареи?

Нужно определиться с главной целью

- Поддержание напряжения
- Меньшие платежи за электроэнергию (предотвращение штрафов)
- Увеличение мощности системы

Можно преследовать все три цели, или любую их комбинацию.

Отметим, что коррекция коэффициента мощности до единицы при максимальной нагрузке будет дорогостоящей и не всегда необходимой.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Для нагрузки 20 МВА при коэффициенте мощности 0.88 (17.6 МВт 9.5 Мвар)

Для получения коэффициента мощности 95% требуется конденсаторная батарея мощностью 3.72 Мвар

Для получения коэффициента мощности 98% требуется конденсаторная батарея мощностью 5.93 Мвар

Для получения коэффициента мощности 100% требуется конденсаторная батарея мощностью 9.50 Мвар

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Определите, нужны ли токоограничивающие или антирезонансные реакторы.

Наличие гармоник и явления резонанса могут привести к необходимости применения антирезонансных реакторов

Переключение «друг за другом» может потребовать применение токоограничивающих реакторов (если не используется иной способ снижения коммутационных перенапряжений, т.е. предзарядных резисторов/реакторов, выключателей при нулевом напряжении и т.д.)

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Определите требуемую величину напряжения.

Конденсаторы очень чувствительны к напряжению в переходном процессе и к гармоникам. Увеличение номинального напряжения повышает предел защиты изоляции.

При использовании реакторов напряжение на выводах конденсатора может быть выше напряжения на шине питания. Эту разницу в напряжениях очень важно учитывать.

Определите перепады напряжения в системе. Будут ли конденсаторы оставаться включенными при малой нагрузке сети.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Мы перечислили несколько оснований для выбора более высокого номинала напряжения конденсаторов, чем напряжение на шине питания. Однако, следует позаботиться о том, что бы величина реактивной мощности при этом осталась соответствующей требуемому значению.

Три (6) соединенных в звезду конденсатора мощностью 150 квар на 7960 В обеспечивают значение 901 квар при подключении к шине 13.8 кВ.

Три (6) соединенных в звезду конденсатора мощностью 150 квар на 8320 В обеспечивают значение 825 квар при подключении к шине 13.8 кВ.



# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Определите оптимальную мощность и количество ступеней.

В виду колебаний напряжения нагрузки предприятия выбор одиночной конденсаторной батареи на всю требуемую мощность для этого предприятия будет неверным подходом.

Стандарт IEEE 1036 рекомендует ограничиться величиной изменений напряжения на уровне 2-3%. Отклонение напряжения может быть вычислено как:

$$\Delta V = \frac{MVAR}{MVA_{SC}} \cdot 100\%$$

Включение конденсатора вызывает интенсивные воздействия на изоляцию. Ограничение числа ступеней и ограничение частоты переключений увеличит срок службы. В идеале, конденсатор включается и остается включенным.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Определите наилучшее место для установки. Наиболее эффективно размещение конденсаторных батарей для коррекции коэффициента мощности возле нагрузки. Однако, это не всегда реализуемо на практике и экономически эффективно.

Как правило, конденсаторная батарея устанавливается на каждой шине главного распределительного устройства.

Если конденсаторы установлены в клеммной коробке двигателя (рабочие конденсаторы), следует убедиться, что реактивная мощность конденсатора не превышает 90% реактивной мощности ненагруженного двигателя. В противном случае, возможно повреждение двигателя из-за перевозбуждения.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Будьте осторожны при выборе рабочих конденсаторов двигателя.

Логично было бы предположить, что имеет смысл установка конденсатора для коррекции коэффициента мощности на зажимы двигателя, выбранного из расчета обеспечения единичного коэффициента мощности.

**ЭТО НЕ ТОТ СЛУЧАЙ.** Не превышайте значения 90% потребляемой двигателем вхолостую реактивной мощности. Превышение этого значения приведет к повреждению изоляции двигателя из-за перевозбуждения.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

В качестве примера рассмотрим двигатель на 4000 В, 4000 л.с.:

100% ток нагрузки = 495 А @ 89.7% коэф.мощн.

100% реактивная нагрузка = 1516 квар

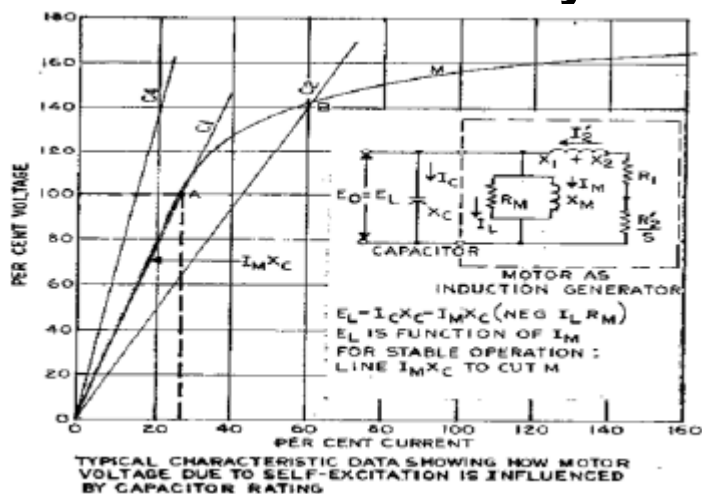
Ток без нагрузки = 117 А @ 6.3 % коэф.мощн.

Реактивная мощность без нагрузки = 809 квар

Максимальная мощность рабочего конденсатора составляет

0.90 x 809 квар = 728 квар

# Вопросы проектирования конденсаторных установок



- М: Кривая намагничивания двигателя
- С1: Конденсатор, рассчитанный на 100% тока намагничивания двигателя
- С2: Конденсатор, рассчитанный на > 100% тока намагничивания двигателя
- С4: Конденсатор, рассчитанный на < 100% тока намагничивания двигателя

Пусть емкостное сопротивление конденсатора много меньше реактивного сопротивления двигателя (такое бывает, когда выбран конденсатор большой мощности). Такая комбинация реактивных сопротивлений приводит к появлению резонансной частоты, меньшей 60 Гц. Таким образом, при уменьшении скорости двигателя частота напряжения на зажимах двигателя будет уменьшаться примерно от 60 Гц до нуля. Когда частота напряжения на зажимах двигателя проходит резонансную частоту, определяемую соотношением реактивных сопротивлений двигателя и конденсатора, напряжение на зажимах двигателя станет очень большим и будет ограничиваться лишь свойствами стали. В зависимости от инерции двигателя, этот резонанс (или высокое напряжение) может сохраняться в течение длительного периода времени.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Определите наиболее оптимальный тип установки.

Конденсаторная батарея будет установлена внутри огороженной подстанции?

Приемлемым решением являются исполнение в металлическом корпусе, на бетонном основании или на открытой стойке

Конденсаторная батарея будет установлена в производственном помещении?

Приемлемым решением являются исполнение в металлическом корпусе или на бетонном основании

Конденсаторная батарея будет смонтирована на распределительной линии?

# Вопросы проектирования конденсаторных установок



# Вопросы проектирования конденсаторных установок

При выборе между металлическим закрытым исполнением и исполнением в виде открытой стойки следует учесть влияние исполнения на степень безопасности персонала расположенного рядом оборудования.

При повреждении изолятора конденсатора фарфор может разлететься, подобно шрапнели.



# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Определим наиболее оптимальный вариант.

Более высокая надежность обходится дороже.

Батарея на 2400 квар, 13800 В, звезда с заземленной нейтралью (1) 800 квар на фазу будет занимать меньше места и дешевле, чем

Батарея на 2400 квар, 13800 В, звезда без заземления (8) 100 квар на фазу.

Однако, надежность батареи по схеме звезда с изолированной нейтралью значительно выше.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Определим коммутационное оборудование

Когда выключатели используются для коммутации конденсаторов (одиночной батареи или коммутации «друг за другом»), то они должны быть рассчитаны на условия коммутации конденсаторов.

Стандарт IEEE C37.99 устанавливает соотношения для расчета пускового тока и частоты.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

## D.1 Включение отдельной предварительно незаряженной батареи

$$i_{\max}(\text{A}) = \sqrt{2 \times I_{sc} \times I_1} \text{ or}$$

$$i_{\max}(\text{A}) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \text{kV}_{LL} \times 10^3 \sqrt{\frac{C_B}{L_s}} \text{ or}$$

$$i_{\max}(\text{A}) = 10^3 \times \sqrt{\frac{1000}{3 \times \pi \times f_s}} \times \sqrt{\frac{\text{kvar}}{L_s}}$$

$$f(\text{Hz}) = f_s \sqrt{\frac{I_{sc}}{I_1}} = \frac{10^6}{2\pi \sqrt{L_s \times C_B}}$$

## D.1 Коммутация батареи с другой на той же шине, коммутируемая батарея предварительно не заряжена

$$i_{\max}(\text{kA}) = \sqrt{\frac{10^3}{3 \times \pi \times f_s}} \times \sqrt{\frac{\text{kvar}_1 \times \text{kvar}_2}{L_{eq} \times \text{kvar}_T}}$$

$$f(\text{kHz}) = 9.5 \times \sqrt{\frac{f_s \times \text{kV}_{LL} (I_1 + I_2)}{L_{eq} \times (I_1 \times I_2)}}$$

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Рассмотрим коммутируемую одиночную батарею, соединенную в звезду без заземления мощностью 4800 квар (с номинальной индуктивностью оборудования):

3253 А пик при 600 Гц, результат  $0.20 \times 10^7$

Подключение второй такой же батареи на ту же шину без токоограничивающего реактора:

24,058 А пик при 7.66 кГц, результат  $18.4 \times 10^7$

Добавим токоограничивающий реактор на 100 мГн, тогда пусковой ток:

7254 А пик при 2.31 кГц, результат  $1.7 \times 10^7$

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Таблица А1А – Предпочтительные номинальные характеристики токов коммутации конденсаторов для автоматических выключателей внутреннего исполнения с коэффициентом диапазона напряжений  $K > 1.0$

Линия Line No.	Номинальное напряжение, кВ, действ.знач.	Номинальный ток короткого замыкания, кА, действ.знач.	Автоматический выключатель общего назначения Номинальный ток переключения конденсаторов (1) (2)			Автоматический выключатель специального назначения Номинальный ток переключения конденсаторов (2)				
			Номинальный длительный ток, кА, действ.знач.	Ток воздушной линии, А, действ.знач.	Шунт.конт.батарея или кабель Изолированный ток (3), А, действ.зн.	Шунт.конт.батарея или кабель		Включение «друг за другом»		
						Ток воздушной линии, А, действ.знач.	Изолированный ток (3), А, действ.зн.	Ток (3), А, действ.зн.	Пусковой ток (4)	
									Пиковый ток, кА (4)	Частота, Гц Hz
Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	
1	4.76	8.8	1200	1	400	1	630	630	15	2000
2	4.76	29	1200	1	400	1	630	630	15	2000
3	4.76	29	2000	1	400	1	1000	1000	15	1270
4	4.76	41	1200, 2000	1	400	1	630	630	15	2000
5	4.76	41	3000	1	400	1	1000	1000	15	1270
6	8.25	33	1200	1	250	1	630	630	15	2000
7	8.25	33	2000	1	250	1	1000	1000	15	1270
8	15.0	18	1200	2	250	2	630	630	15	2000
9	15.0	18	2000	2	250	2	1000	1000	15	1270
10	15.0	28	1200	2	250	2	630	630	15	2000
11	15.0	28	2000	2	250	2	1000	1000	15	1270
12	15.0	37	1200	2	250	2	630	630	15	2000
13	15.0	37	2000	2	250	2	1000	1000	18	2400
14	15.0	37	3000	2	250	2	1600	1600	25	1330
15	38.0	21	1200, 2000, 3000	5	50	5	250	250	18	6000
16	38.0	40	1200, 3000	5	50	5	250	250	25	8480

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

## Примечания к Таблице А1А

(Номера в круглых скобках в таблице соответствуют нумерации примечаний)

- (1) Для автоматических выключателей общего назначения не приводятся номинальные данные конденсаторных батарей по типу back-to-back или коммутируемых кабельных линий. Конденсаторная батарея или кабель должны быть электрически изолированы в соответствии с требованиями 5.13.2 стандарта ANSI/IEEE C37.04-1979.

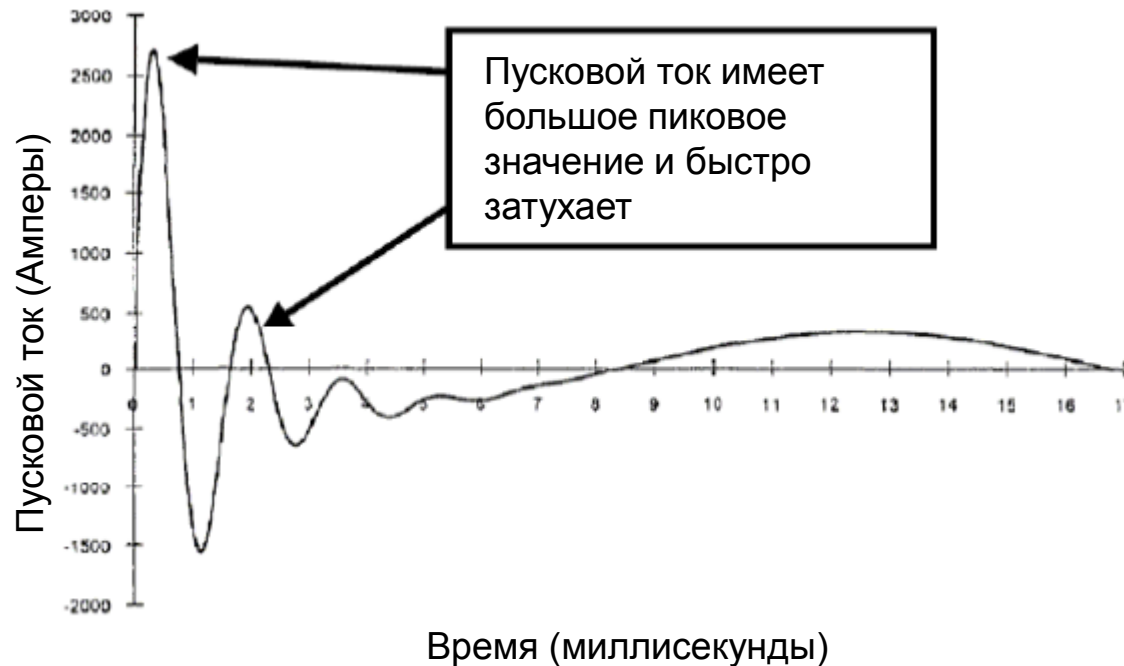
Для автоматических выключателей общего назначения, подвергающихся воздействию переходного пускового тока от расположенных рядом конденсаторных батарей в случае аварийной ситуации, пиковое значение переходного пускового тока конденсатора при закрытии не должно превышать меньшей из двух величин:  $2^{0,5} K$  значений номинального тока короткого замыкания или 50,000 пиковых ампер. Произведение пика переходного пускового тока на частоту переходного пускового тока не должно превышать значения  $2 \times 10^7$ . Условия работы автоматического выключателя для этого режима должны соответствовать стандарту ANSI/IEEE C37.012-1979, 4.10.2.

- (2) Номинальное значение тока коммутируемого конденсатора является максимальной величиной, которую автоматический выключатель должен быть способен коммутировать при любом уровне напряжения вплоть до номинального максимального напряжения.
- (3) В приложении к конденсаторным батареям, номинальное значение тока будет выбираться так, чтобы учесть эффекты положительных допусков в значении емкостей, системы и заземления конденсаторной батареи, а также дополнительной величины тока и нагрева из-за гармоник.
- (4) Пиковое значение номинального переходного пускового тока – это максимальная величина, которую автоматический выключатель должен будет коммутировать при любом напряжении вплоть до номинального максимального напряжения, так, как это определяется системой и не изменено действием автоматического выключателя. Частота номинального переходного пускового тока – это собственная частота, которую автоматический выключатель должен коммутировать при 100%-ном коммутационном токе его конденсаторной батареи или кабеля.

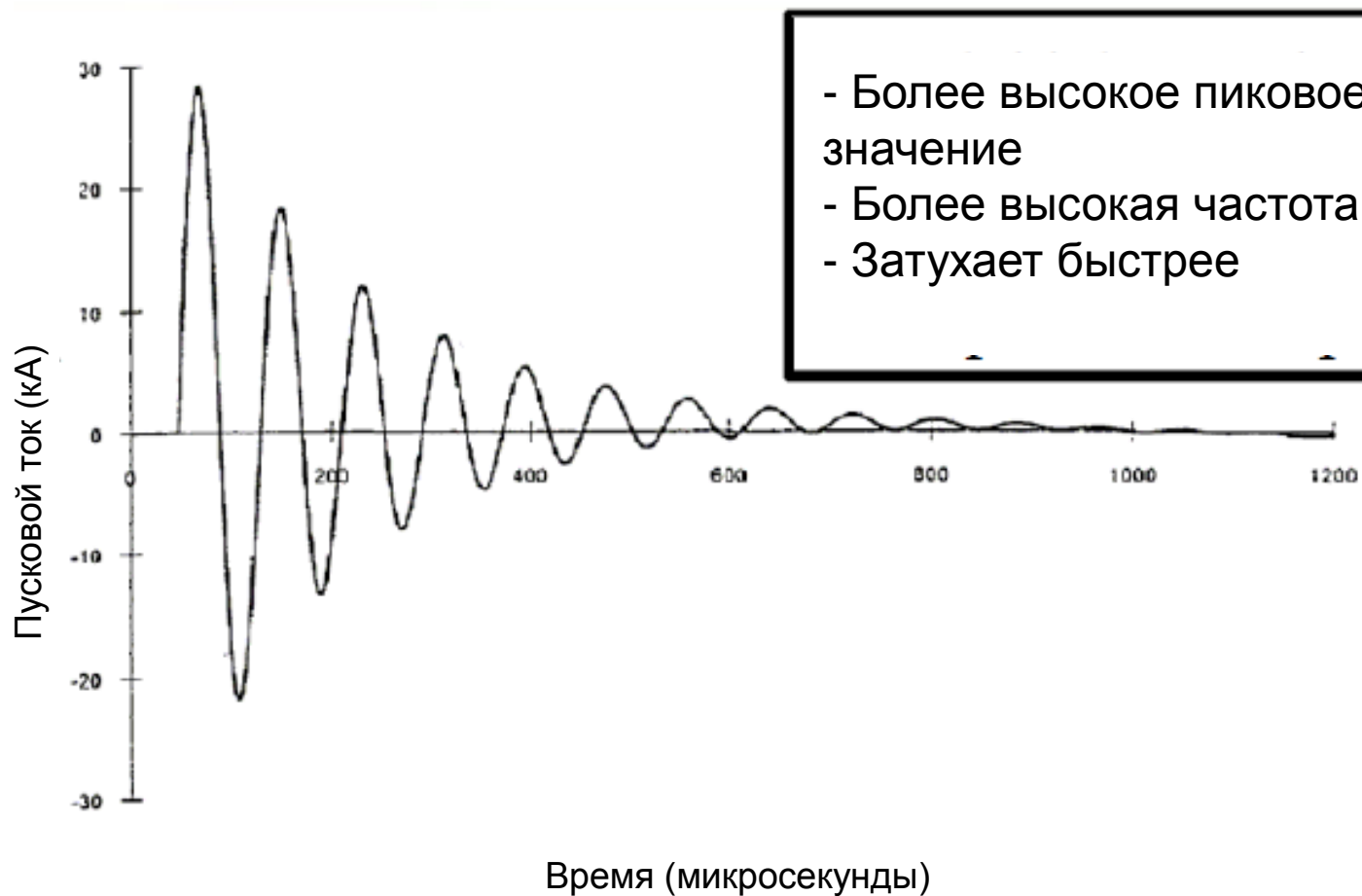
Для случаев, не превышающих 100% номинальных значений, произведение пика пускового тока и собственной частоты не должно превышать произведения пика номинального переходного тока и частоты номинального переходного пускового тока. (Это произведение определяет максимальную скорость изменения пускового тока и минимальную индуктивность между батареями и кабелями).

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Включение отдельной конденсаторной батареи



# Вопросы проектирования конденсаторных установок



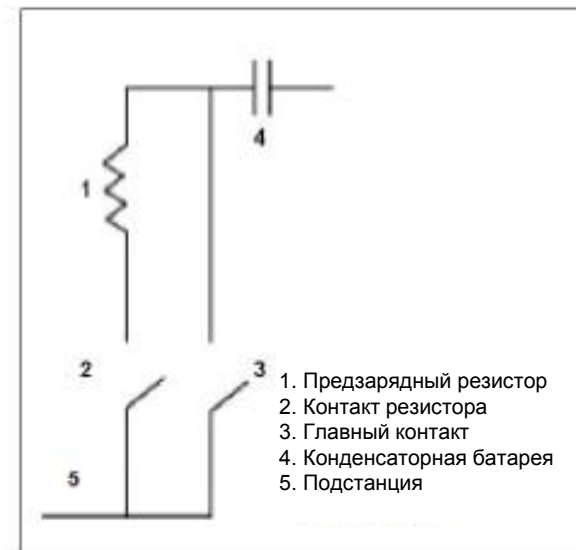
Коммутация «друг за другом» в том же блоке



# Вопросы проектирования конденсаторных установок

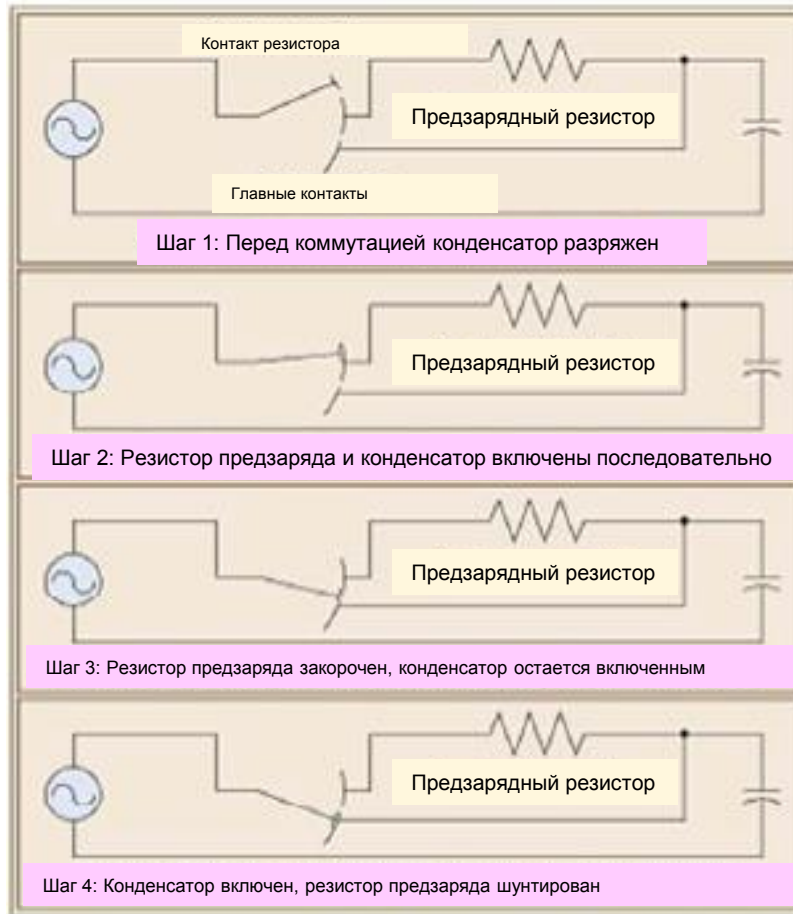


1. Предзарядный резистор
2. Контакт резистора
3. Главный контакт
4. Конденсаторная батарея
5. Подстанция



Пример выключателя с предзарядным резистором

# Вопросы проектирования конденсаторных установок



Другой вариант

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

	Описание	Выключатель нулевого тока	Предзарядный резистор
1	Специально разработан и прошел испытания для устройств коммутации конденсаторов	Нет	Да
2	Количество рабочих механизмов (подпружиненные системы, шунтовые выключатели, приводные устройства)	3 (один на фазу)	1 (один на 3 фазы)
3	Позволяет скоммутировать одну или две фазы конденсаторной батареи (в случае неисправности рабочего механизма)	Да	Нет
4	Главный фактор успешного подавления переходных процессов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Конденсаторная батарея должна быть скоммутирована точно в момент пересечения напряжением нуля</li> <li>• Электроника должна точно определить момент, когда синусоида напряжения переходит через ноль и дать сигнал рабочему механизму на замыкание прерывателя цепи</li> <li>• Необходимы усложненные расчеты для учета эффекта внешних воздействий, механического износа и т.д.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Простой электрический принцип – сопротивление в цепи</li> <li>• Главный фактор – простота физических процессов</li> </ul>
5	Показатели надежности	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Трудно обеспечить синхронное замыкание всей системы с требуемой точностью</li> <li>• Высокоточная электронная система, связанная с механическим устройством (прерыватель), не гарантирует надежное функционирование</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Высоконадежная система</li> </ul>

## Обзор производителей предзарядных устройств

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Другая проблема связана с усилением напряжения в результате коммутации второй конденсаторной батареи

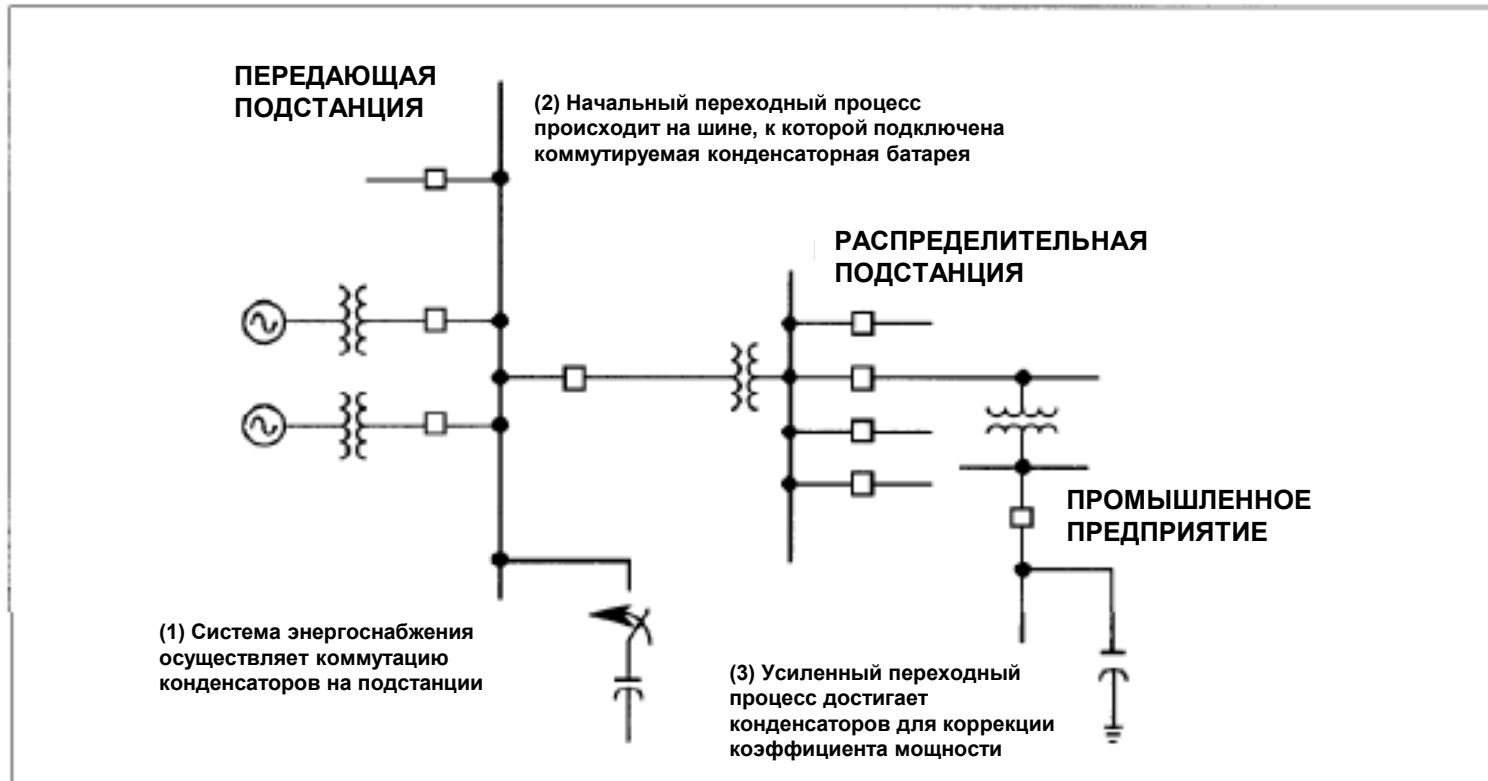


Рис.2. Однолинейная схема типовой системы энергоснабжения. Коммутация конденсаторной батареи на подстанции возбуждает L-C-контур, образованный индуктивностью понижающего трансформатора, линии, кабелей и емкостью конденсаторов для коррекции коэффициента мощности промышленного предприятия

# Вопросы проектирования конденсаторных установок



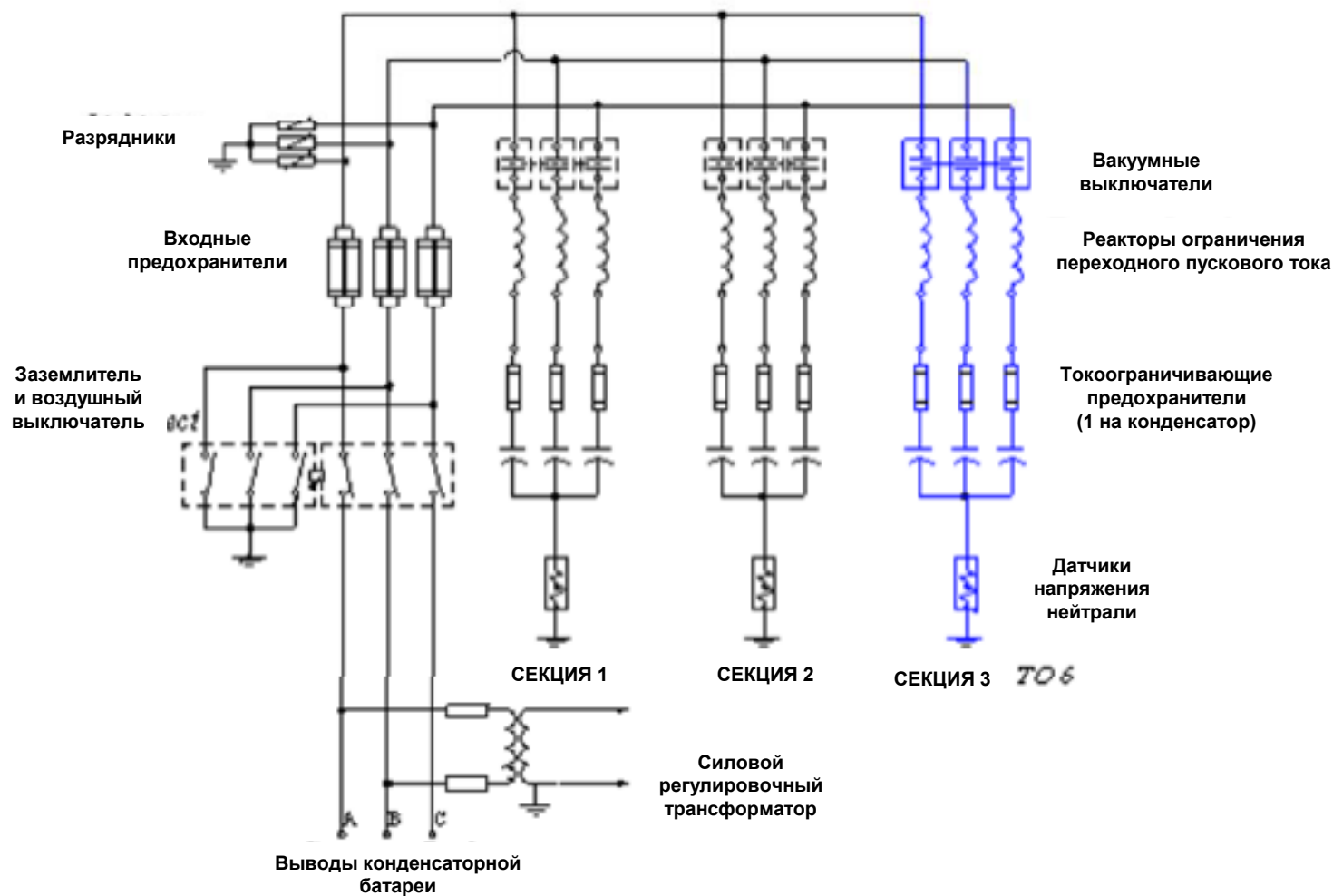
Рис.3. Усиление напряжения на конденсаторах для коррекции коэффициента мощности промышленного предприятия в процессе коммутации конденсаторной батареи на сетевой подстанции

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Рассмотрим другое вспомогательное оборудование:

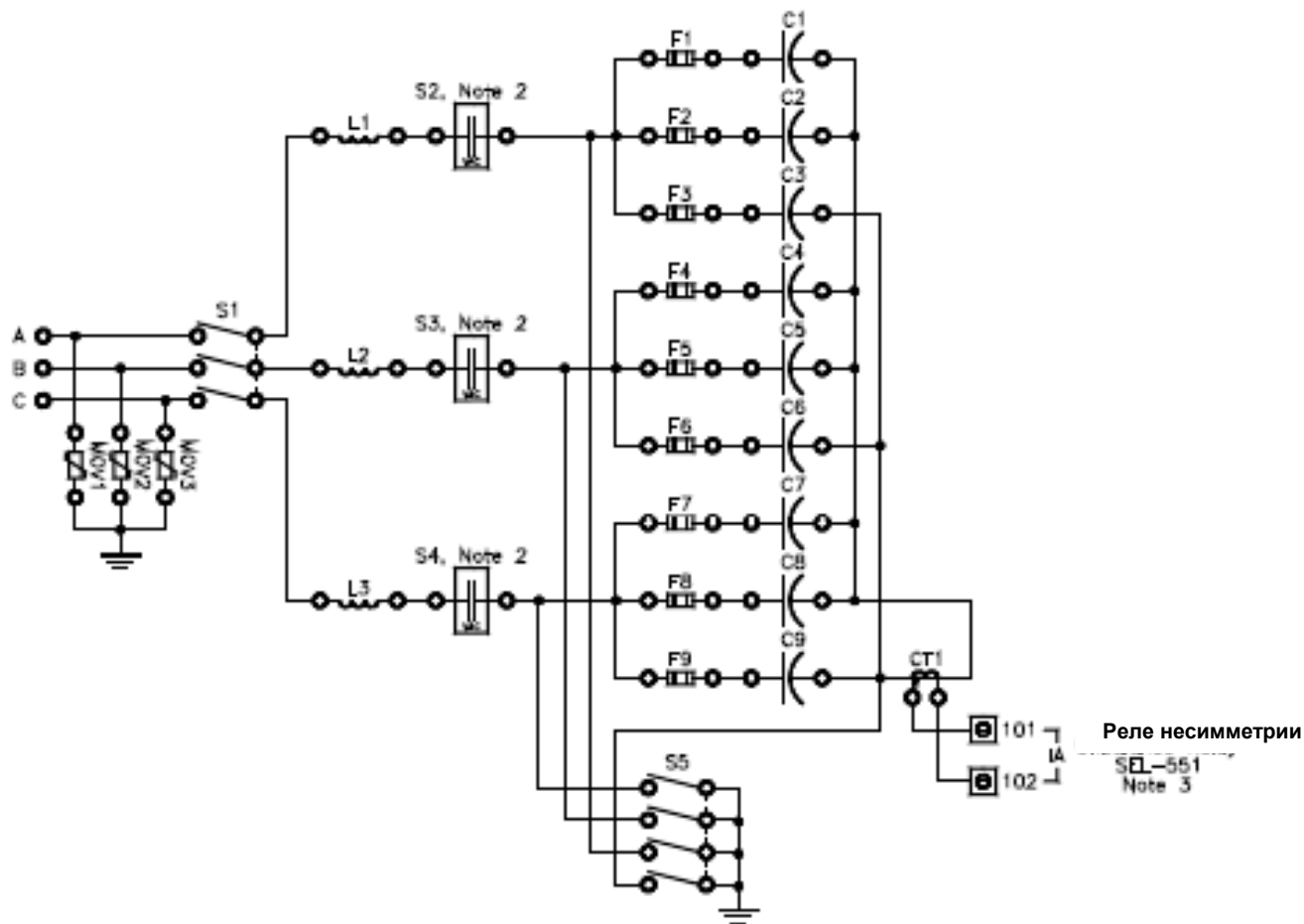
- Разъединитель
- Заземлитель
- Механическая блокировка ключом Kirk-key
- Требования к системе вентиляции
- Питание цепей управления

# Вопросы проектирования конденсаторных установок



# Вопросы проектирования конденсаторных установок

13,8 кВ действ., 60 Гц, 3 фазы





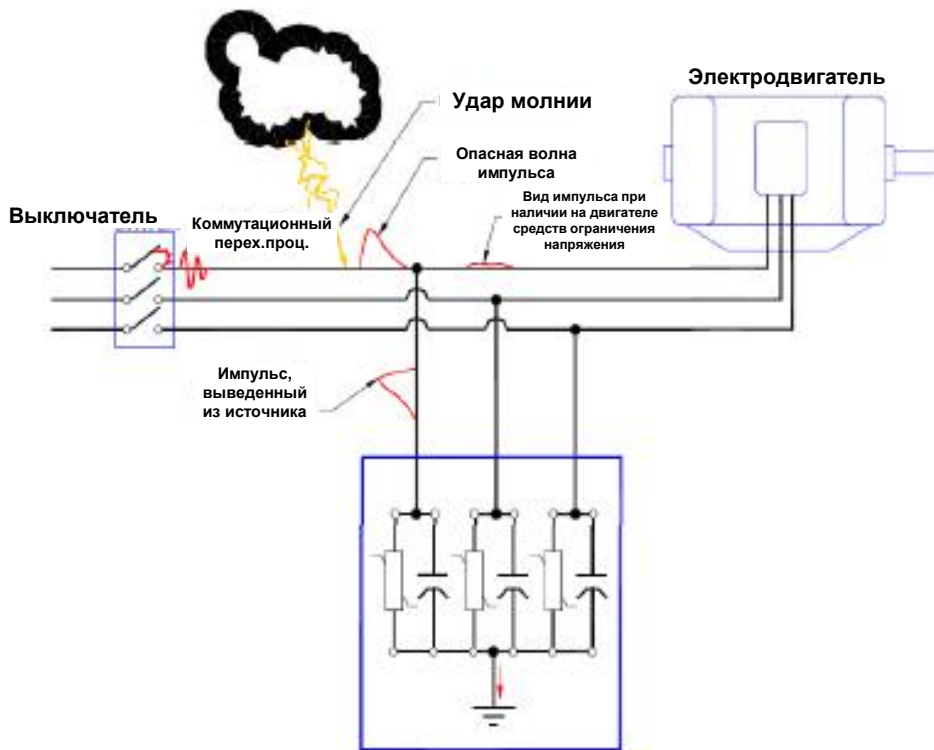
# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Следует помнить, что мощные высоковольтные двигатели могут быть оснащены средствами ограничения напряжения.

Эти средства уменьшают пиковое значение напряжения и скорость нарастания надвигающегося импульса. Высокая скорость нарастания вредна для лобовых частей обмотки, а высокое пиковое значение может повредить изоляцию обмотки от сердечника.

Обычно значение емкости здесь невелики, такие, что ими можно пренебречь, но это необходимо проверить.

# Вопросы проектирования конденсаторных установок



Типовое пример средств ограничения напряжения двигателя

# Вопросы проектирования конденсаторных установок

Не следует путать батареи фильтров гармоник и батареи для коррекции коэффициента мощности.

Класс напряжений батарей гармонических фильтров значительно выше, поскольку они подключены к выводам антирезонансного реактора, где напряжение существенно выше. В результате большей величины напряжения, установленная реактивная мощность может быть примерно на 25-40% выше номинального значения.

Конденсаторы должны быть способны выдержать это напряжение.

# Заземление конденсаторных батарей, соединенных в звезду

Если несколько конденсаторных батарей, соединенных в звезду с заземленной нейтралью, находятся в непосредственной близости, то следует использовать схемы заземления: полуостровное заземление или одноточечное заземление.

## Одноточечное заземление

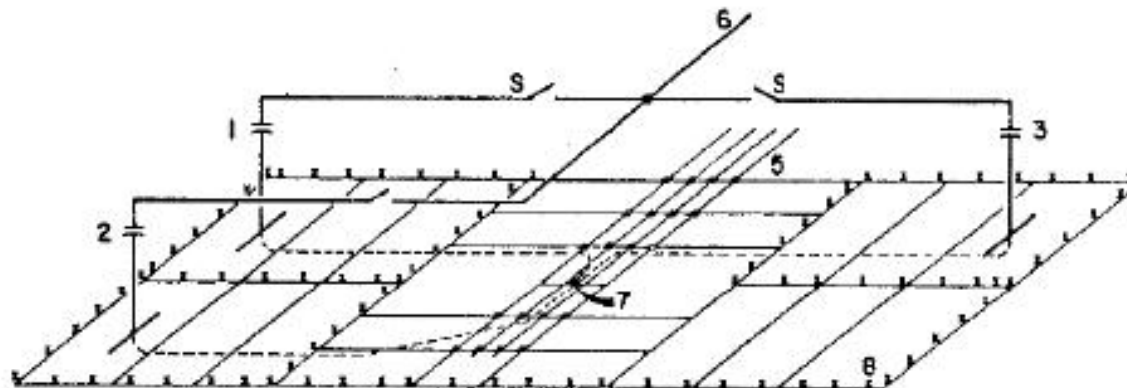
Нейтрали всех батарей конденсаторов данного напряжения собираются вместе с помощью изолированного кабеля или шины и подключаются к контуру заземления только в одной точке. Это предотвращает протекание высокочастотных токов (от коммутации «друг за другом») по контуру заземления.

# Заземление конденсаторных батарей, соединенных в звезду

## Полуостровное заземление

Один или более изолированных проводников контура заземления протягивается под стойкой конденсаторов в каждой фазе и крепится к контуру заземления станции в одной точке на краю зоны конденсаторов. Все подключения нейтралей конденсаторных батарей осуществляются к этому изолированному проводнику полуостровного контура заземления.

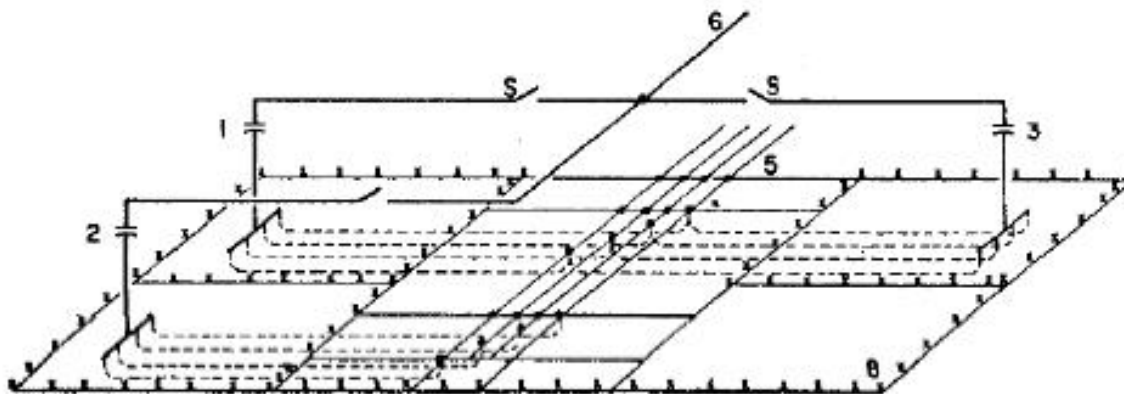
# Заземление конденсаторных батарей, соединенных в звезду



- ..... Изолированные нейтрали конденсаторов
- 1, 2, 3 Трехфазные конденсаторные группы
- 5 Контур заземления подстанции
- 6 Высоковольтная шина
- 7 Одноточечная земля нейтралей конденсаторов
- 8 Ограждение конденсаторной группы

Кабели нейтралей конденсаторных батарей изолированы, скреплены вместе и подключены к контуру заземления подстанции в одной точке: земли всего оборудования подключены к контуру заземления подстанции

# Заземление конденсаторных батарей, соединенных в звезду



..... Полуостровной контур заземления  
(неизолированный)

- 1, 2, 3 Трехфазные конденсаторные группы
- 5 Контур заземления подстанции
- 6 Высоковольтная шина
- 8 Ограждение конденсаторной группы

Нейтрали конденсаторных батарей и земли  
всего оборудования соединены вместе и  
подключены к контуру заземления подстанции в  
одной точке; проводники нейтралей проходят  
ниже фазных проводов.

## Справочная литература

- IEEE Std. 18
- IEEE C37.99
- NEMA CP-1
- IEEE Std 1036
- IEEE Std 399 (Brown Book)