

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки)

Техническое и информационное обеспечение интеллектуальных систем  
электроснабжения  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Система автоматической компенсации реактивной мощности  
нагрузки линии 6 кВ на ООО «Тольяттинский Трансформатор»

Студент

Е.И. Слотин

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

Научный

В.А. Шаповалов

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

руководитель

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Тольятти 2018

## Содержание

|   |     |
|---|-----|
| Введение.....   | 3   |
| 1. Обзор известных систем автоматического удержания коэффициента мощности.....      | 6   |
| 2. Выбор системы автоматического удержания коэффициента мощности на подстанции..... | 50  |
| 3. Техничко-экономическое обоснование .....   | 92  |
| Заключение .....  | 95  |
| Список используемых источников.....   | 97  |
| Приложение А .....  | 101 |

## Введение

Цель работы: Исследование экономического эффекта от внедрения автоматического компенсирующего устройства на подстанции 6/0,4 кВ на ООО «Тольяттинский Трансформатор»

Задачи:

1. Обзор известных систем автоматического удержания коэффициента мощности.
2. Выбор системы автоматического удержания коэффициента мощности для подстанции.
3. Определение экономического эффекта от внедрения автоматического компенсирующего устройства.

Основной государственной проблемой является рационального использования всех видов энергии, в том числе и электрической, а так же повышения экономичности работы электрических установок.

Электрическую энергию, можно считать особенным видом продукции, обладающую характеристиками, с помощью которых можно судить о её пригодности в разных тех. процессах. В совокупности, эти характеристики объединены одним общим понятием, как качество электроэнергии.

Сейчас, качеству электроэнергии уделяют особое внимание, потому что оно сильно влияет на надежность системы электроснабжения, также влияет на расходуемое количество электрической энергии, и на производственный технологический процесс.

Когда затрагиваются вопросы повышения качества электрической энергии, то затрагиваются математические, технические и экономические аспекты.

Математический подход обосновывает тот или иной метод расчёта показателей качества электрической энергии. За разработку спецсредств и мероприятий для улучшения качества электрической энергии, а также организации системы контроля управления качеством, отвечает технический

подход. При расчёте убытков из-за плохого качества электрической энергии в сети используют экономический подход.

Основные мероприятия проводимые по улучшению качества электрической энергии, это улучшение оборудования питающей сети, опираясь на опыт проектирования.

Так как технологический процесс на предприятиях стал более сложным, и сильно выросла производительность труда, из-за этого основная доля пала на нелинейные и резкоизменяющиеся нагрузки. Они стали потреблять на много больше реактивной энергии. Данными потребителями являются печи по переплавки металла (чёрные и цветные), аппараты для сварки различных металлов, а также полупроводниковые преобразователи. Особенностью данных потребителей является то, что они сильно влияют на качество электрической энергии питающей сети. При этом нормальная работа электрического оборудования как раз и зависит от качества электрической энергии питающей системы. Такое влияние электроэнергии питающей сети и электрического оборудования определяется термином «электромагнитная совместимость». Поскольку промышленность стала применять печи по переплавки металла (чёрные и цветные), аппараты для сварки различных металлов, а также полупроводниковые преобразователи, появилась такая проблема как электромагнитная совместимость. Это совместимость ЭП с питающей сетью.

Данные приёмники конечно экономичны и технологически эффективны, но они оказывают негативное влияние на качество электроэнергии питающей сети.

«В настоящее время взаимоотношения энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии рассматриваются широким кругом лиц неэнергетического образования (коммерческие менеджеры, юристы и другие специалисты). Использование понятия реактивная мощность (реактивная энергия) в практике денежных расчетов между поставщиками и потребителями электроэнергии и наличие отдельных счетчиков активной и реактивной энергии вызывает у многих представление о поставке потребителям двух видов

продукции. Это не так. По электрической сети не передаются электроны разного цвета — красные активной энергии и голубые реактивной»[3, с. 220].

Правильная компенсация приводит к уменьшению потерь электроэнергии из-за перетоков реактивной энергии, и поддержания качества электрической энергии с помощью регулирования и выравнивания уровня напряжения в энергосистеме, а также повышения технико-экономических показателей электроустановок.

Следующие причины показывают, насколько, имеет большое значение, компенсация реактивной энергии в нашей стране:

- 1) в промышленной индустрии наблюдается повышенный рост потребности в реактивной энергии, по сравнению, с активной.
- 2) повышается потребность в реактивной энергии у сельского хозяйства.
- 3) в городских электросетях повышается потребность в реактивной энергии из-за роста бытовых нагрузок.

С недавних пор происходят, как количественные, так и качественные изменения в промышленном электроснабжении. В данный момент увеличение потребления реактивной энергии, превосходит увеличение потребления активной энергии. Но в связи с этим, при увеличении расстояния, от места генерации до места потребления, ухудшаются технические и экономические показатели всей системы. Из-за этого вопросы по качеству электрической энергии, должны рассматриваться непосредственно с вопросами компенсации реактивной энергии. В основном все показатели качества электроэнергии, относящиеся к напряжению, зависят от потребления реактивной энергии промышленными электроприемниками. Проблему можно решить путём создания и овладение быстродействующими многофункциональными средствами компенсации реактивной энергии, повышающие качество электрической энергии по многим параметрам. В настоящее время предпринимаются меры, чтобы снизить влияние покупателей на качество электрической энергии в промышленных сетях. Внедрение данных устройств, приведет к уменьшению потерь электрической энергии.

# 1. Обзор известных систем автоматического удержания коэффициента мощности

## 1.1 Общие сведения

«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)»[17].

В электрических цепях, содержащих комбинированную нагрузку, в частности, активную (электроплиты, обогреватели, электропечи и др.) и индуктивную (асинхронные двигатели, электромагниты, дроссели, реакторы, трансформаторы, выпрямители, тиристорные преобразователи) составляющие, тогда их общую мощность, взятая из сети, возможно показать векторной диаграммой (рисунок 1).



Рисунок 1- Сущность возникновения реактивной мощности

Когда напряжение имеет положительный знак, а ток отрицательный, и наоборот, это и обуславливает интервал времени, в котором происходит отставания тока от напряжения по фазе в индуктивных элементах (рисунок 2). В этот момент реактивная энергия никуда не расходуется, а подается обратно в сеть, только уже в направлении генератора. Только в данном случае реактивная энергия, остающаяся в индуктивных элементах, уходит в сеть, не расходуемая активными элементами, а только совершая колебательные движения. Такая энергия и называется реактивной.

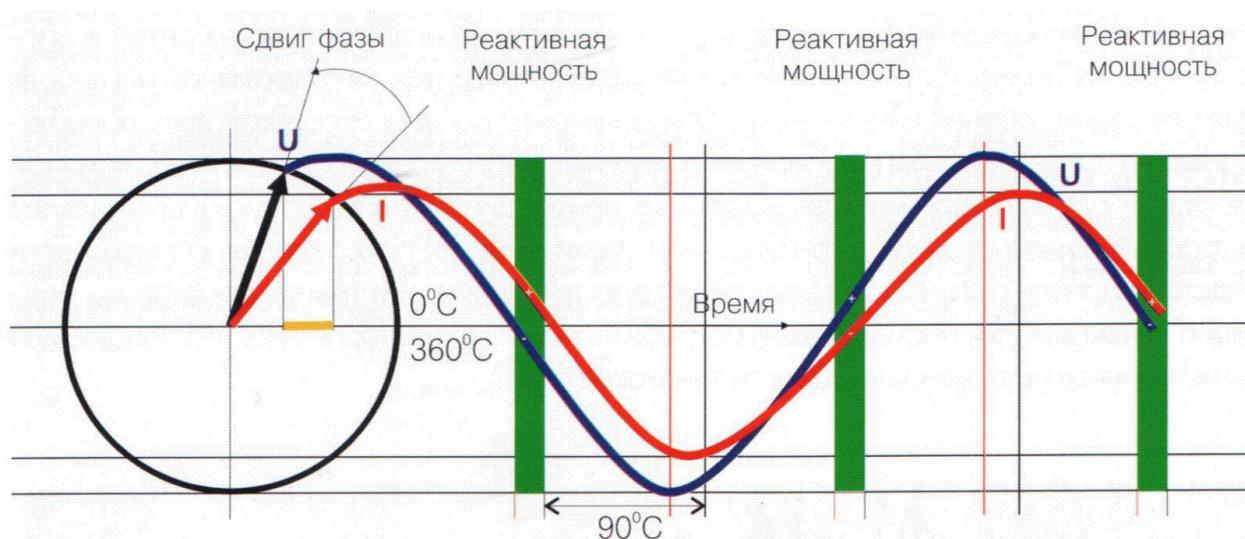


Рисунок 2- Сдвиг фаз между активной и реактивной мощностью

Если просуммировать активную энергию, совершающая полезную работу, и реактивную энергию, идущая для создания магнитного поля, то получится полная мощность. Отношение активной мощности к полной, выраженное через косинус угла сдвига фаз их векторов, которое называется коэффициентом мощности (рисунок 3).

$$\cos\varphi = P/S.$$

P – активная мощность;

S – полная мощность;

Q – реактивная мощность.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

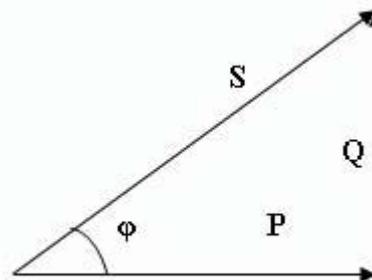


Рисунок 3- Треугольник мощностей

Вся активная энергия переходит в необходимую нам механическую, тепловую, и любую другую полезную работу. В свою очередь реактивная энергия не расходуется на полезную работу, единственное, для чего она необходима, это для создания электромагнитных полей, без которых не возможна работа трансформатора и электродвигателя. Из-за этих особенностей, получать реактивную мощность от организации по энергоснабжению нецелесообразно, потому что придется увеличивать мощность генераторов, сечение линий и кабелей, так как уменьшается их пропускная способность, и увеличиваются активные потери. Из-за этого реактивную мощность лучше генерировать прямо у потребителя. Для этого используют специальные устройства, называемые установками компенсации реактивной мощности. В основном это бывают конденсаторные батареи.

Реактивный ток, который протекает через индуктивные элементы, пропорционален реактивной мощности:

$$\dot{Q} = \dot{U} \cdot \dot{I}_L \quad (1.1)$$

где  $\dot{I}_L$  - индуктивный ток,  $\dot{U}$  – напряжение питающей сети.

Из этого следует, при сложении активной и индуктивной составляющей получаем полный ток, который питает нагрузку:

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L \quad (1.2)$$

Чтобы уменьшить количества реактивной мощности в системе генератор-нагрузка, делают параллельное подключение нагрузке компенсаторов типа КРМ. После такой установки реактивная мощность не двигается между нагрузкой и генератором, а только совершает колебания между реактивными элементами нагрузки и компенсирующим устройством. Такие меры по компенсации реактивной мощности в системе нагрузка-генератор, дают возможность передавать больше активной энергии при такой же номинальной мощности генератора и том же сечении линии.

«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». По этим причинам необходимо производить РМ по возможности ближе к нагрузкам, чтобы избежать ее потребления из сети. Такое решение называется «компенсация реактивной мощности»[17].

«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»[17].

В промышленной электросети основной нагрузкой считаются распределяющие трансформаторы и асинхронные электродвигатели. Они и являются источниками реактивной энергии, совершающие колебательные движения от этой нагрузки до генератора.

Поскольку в индуктивных элементах ток запаздывает по сравнению с напряжением, то реактивная энергия характеризуется задержкой между синусоидой фаз тока и напряжения сети. Коэффициент мощности, который численно равен  $\cos \varphi$  между  $I$  и  $U$ , показывает потребление реактивной

мощности из сети.  $\cos \varphi$ , у организации которая потребляет энергию, рассчитывается как: отношение  $P$  энергии, которая потребляется, к  $S$  энергии, потребленной из сети. Этот коэффициент характеризует количество всей  $Q$  энергии потребляемой предприятием. Чем косинус  $\varphi$  больше приближен к 1, тем меньше количества реактивной энергии взято из сети. Из этого следует, что протекания реактивной мощности по сети, неблагоприятно.

В результате:

- уменьшается пропускающая способность линий;
- увеличиваются потери в проводниках из-за возрастания проходящего тока;
- номинальные отклонения напряжения питающей сети.

Из-за выше перечисленных причин энергоснабжающая организация требует от потребителя уменьшения доли реактивной составляющей в сети.

Данная проблема решается компенсацией реактивной энергии - главное и нужное условие надежности в функционировании и экономичности предприятий. С поставленной задачей справляются компенсирующие устройства – конденсаторные установки, главным элементом собственно и являются конденсаторы. Правильно подобранные компенсирующие устройства реактивной мощности могут:

- снизить нагрузку на линии электропередач, трансформаторы и другие распределительные устройства, продлевая срок их службы;
- снизить потери;
- уменьшить затраты на электрическую энергию;
- увеличить пропускную способность сети, позволяющая увеличить нагрузку не увеличивая стоимость самой сети;
- снизить расходы на обновление электрооборудования;
- убрать ненужную генерацию реактивной составляющей в часы минимума нагрузки;
- при создании новых сетей уменьшить сечение линий и мощность подстанции.

Первоочередное направление снижение потерь электроэнергии и увеличение производительности электрооборудования промышленных предприятий - это увеличения коэффициента мощности вместе с увеличением качества электроэнергии прямо в самой сети предприятия. В свою очередь малое значение коэффициента мощности, при неизменной активной нагрузке, ведет к большим потерям мощности и понижению напряжения в системе. Из этого следует, что надо стараться получить значение  $\cos \varphi$  приближенного к единице. Чтобы справиться с данной проблемой, используют компенсирующие установки, так называемые устройства компенсации реактивной мощности, в качестве главного элемента применяемые конденсаторы. Их установка позволяет исключить потребление и генерацию реактивной энергии в сеть, что снижает затраты на оплату электроэнергии, к тому же, сокращается сумма платежа за электричество, определяемые тарифами энергосистемы.

Установка компенсирующих устройств эффективно на предприятиях, где работают сварочные аппараты, компрессоры, электролизные установки, плавильные печи и подобные им потребители с резкопеременной нагрузкой. Имеется ввиду на производствах металла, добычи горной руды, обработки дерева, т.е. там, где по различным производственным причинам  $\cos \varphi$  варьируется от 0,4-0,8.

В то время, как начали во всю использовать переменный ток, сразу с этим возникла проблема компенсации реактивной энергии. Именно реактивная энергия, которая необходима для работы некоторых электроустановок, является одной из причин потерь электрической энергии в сетях электроснабжения. Перетоки реактивной мощности в сети и обуславливает большую часть потерь активной мощности. Снизить перетоки реактивной энергии возможно при возрастании степени её компенсации.

При правильной компенсации реактивной энергии в электрической сети предприятий, возникает ряд вопросов, обращенные на повышение экономичности работы электрических установок. Они включают в себя: методика подбора компенсирующих устройств, их рациональное

месторасположение для безопасной эксплуатации, защита от аварий, а также регулирование реактивной мощности в автоматическом режиме. Из этого следует, что уменьшение потерь электрической энергии и соблюдение норм по её качеству, в значительной степени зависит от наличия устройств компенсации реактивной энергии и их конструктивным построением.

Для большинства электрических машин, которые преобразуют электрический вид энергии в другой вид энергии (механическую, тепловую, а даже и световую) требуется реактивная энергия. В таких устройствах она создаёт переменное электромагнитное поле.

Чтобы выработать реактивную мощность, нет необходимости затрачивать какую-либо энергию, но при этом для передачи по КЛ и ЛЭП требуется энергия. Грубо говоря, она занимает место в линиях электропередач.

Величину этих потерь можно выразить следующей формулой:

$$W_{TP} = \frac{Q^2}{U^2} \cdot R \cdot \tau \quad (1.3)$$

где  $\tau$  - временная характеристика графика передачи реактивной энергии.

При компенсации реактивной энергии преследуют несколько целей. Во-первых, это надо для выполнения условий баланса реактивной мощности в узлах потребителя. Во-вторых, применение компенсирующих устройств снижает потери. В-третьих, компенсирующие устройства используются при регулировании напряжения и повышении качества электрической энергии.

Нормальные режимы работы электросети, а также поставка качественной электрической энергии достигается только при соблюдении равенства производимой и потребляемой электроэнергии, то есть балансом полной мощности.

Изменение напряжения в сети, это следствие нарушения баланса реактивной мощности. Если реактивной мощности производится больше, чем потребляется, то напряжение питающей сети увеличивается, и наоборот, если

реактивной мощности не хватает - напряжение падает. Однако, нехватку реактивной энергии, в отличие от активной, будет лучше не передавать по линиям, а получать с помощью компенсирующих устройств, там, где имеется нехватка реактивной энергии.

«Отмечено, что без устройств компенсации, устанавливаемых в сетях энергосистем, режим баланса реактивной мощности при допустимых уровнях напряжений в узлах нагрузки неосуществим» [3].

Установка КУ, непосредственно на предприятиях, должно обеспечивать баланс реактивной энергии, стабилизация U, а также повышение резерва устойчивости в центрах нагрузки. «Для этого могут использоваться синхронные компенсаторы и электродвигатели, конденсаторные установки и устройства компенсации, содержащие индуктивность и емкость» [3].

Регулирование мощности КУ в автоматическом режиме, в зависимости от количества потребляемой реактивной энергии, даёт возможность снизить потери электрической энергии до минимальных показателей. При этом исключаются режимы перекомпенсации или недокомпенсации реактивной энергии.

Монтирование комплектных компенсирующих устройств с автоматическим регулированием реактивной энергии дает возможность настроить компенсацию в часы минимума и максимума нагрузки.

В зависимости от того, какие получены данные о мощности электропотребления предприятия, будет производиться расчёт необходимой компенсации реактивной мощности. Рассчитывается он от действительного значения коэффициента реактивной мощности  $\cos \varphi_1$ , до необходимого коэффициента  $\cos \varphi_2$ . Для определения суммарной мощности компенсирующих устройств нужно воспользоваться следующей формулой:

$$Q_{KV} = P(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (1.4)$$

«где  $P$  - активная мощность нагрузки.

Удельная мощность компенсирующего устройства определяется по формуле:»[3]

$$k_{KV} = \frac{Q_{KV}}{S_{уст.}}, \quad (1.5)$$

где  $S_{уст.}$  - установленная мощность трансформатора.

В промышленной электросети основной нагрузкой считаются распределяющие трансформаторы и асинхронные электродвигатели. Они и являются источниками реактивной энергии, совершающие колебательные движения от нагрузки до генератора. Эти колебания не связаны с выполнением полезной работой, а только расходуется для создания электромагнитных полей и создаёт нагрузку на линии электропередач. В свою очередь, без электромагнитных полей не возможна работа трансформаторов и электродвигателей. и создаёт нагрузку на линии электропередач.

Правильно подобранные компенсирующие устройства реактивной мощности (КРМ), могут уменьшить затраты на электрическую энергию до 20%, уменьшить нагрузку на трансформаторы, снизить потери электрической энергии при перетоках реактивной энергии по линиям, а также значительно повысить качество электрической энергии.

Из-за выше перечисленных причин энергоснабжающая организация требует от потребителя уменьшения доли реактивной составляющей в сети.

### 1.1.2. 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 РМ

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 РМ»[17].

### 1.1.3. 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 РМ.

- 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 РМ вырабатывается в том месте, где она потребляется и в таком количестве, сколько требуется» [17].

### 1.1.4. Названия, используемые в установках компенсации РМ

-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»[17].

#### -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»[17].

#### -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) »[17].

#### -Комплектная конденсаторная установка Varset

«У конденсаторных установок Varset есть основные отличия: нерегулируемые КУ - это Direct, КУ с авто регулировкой и КУ с быстрой регулировкой FAST. КУ типа Direct имеют два исполнения: с автоматическим выключателем который отключается автоматически и не имеющие такого выключателя. КУ 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)» [17].

#### 1.1.5. 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 (рисунок 4), представляющую электроустановку, которая включает в себя:

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

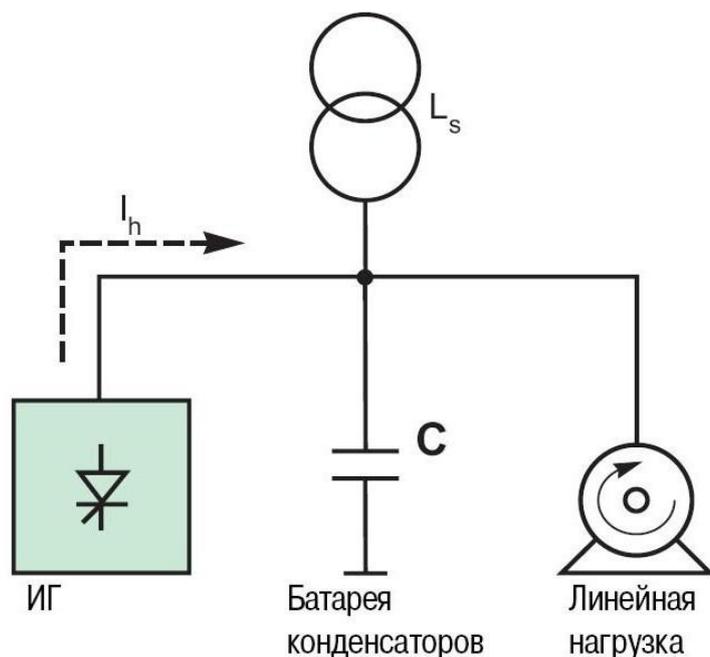


Рисунок 4- Упрощенная схема электроустановки.

Эквивалентная схема для анализа гармоник выглядит следующим образом:

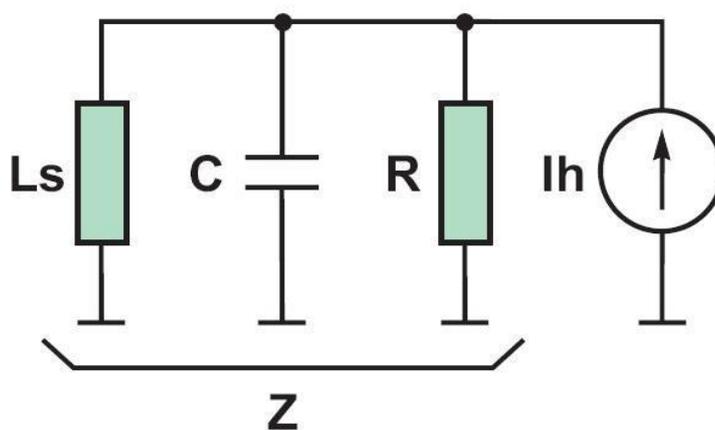


Рисунок 5- Эквивалентная схема для гармонического анализа.

- $L_s$  – 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:

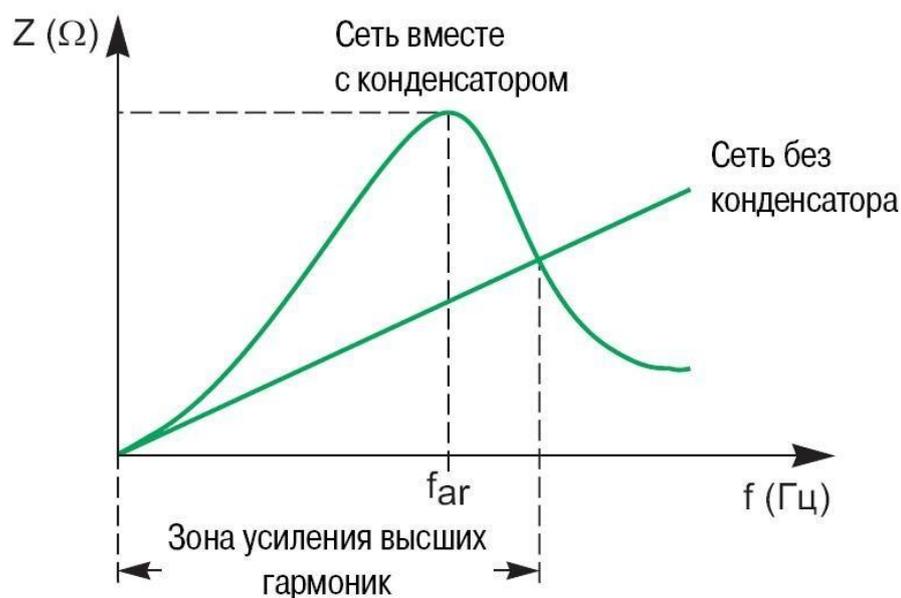


Рисунок 6- Модуль сопротивления  $Z$  в зависимости от частоты.

Физическая интерпретация:

- частота  $f_{ar}$  является резонансной частотой параллельной цепи ( $L_s - C$ ),
- на частоте  $f_{ar}$  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:

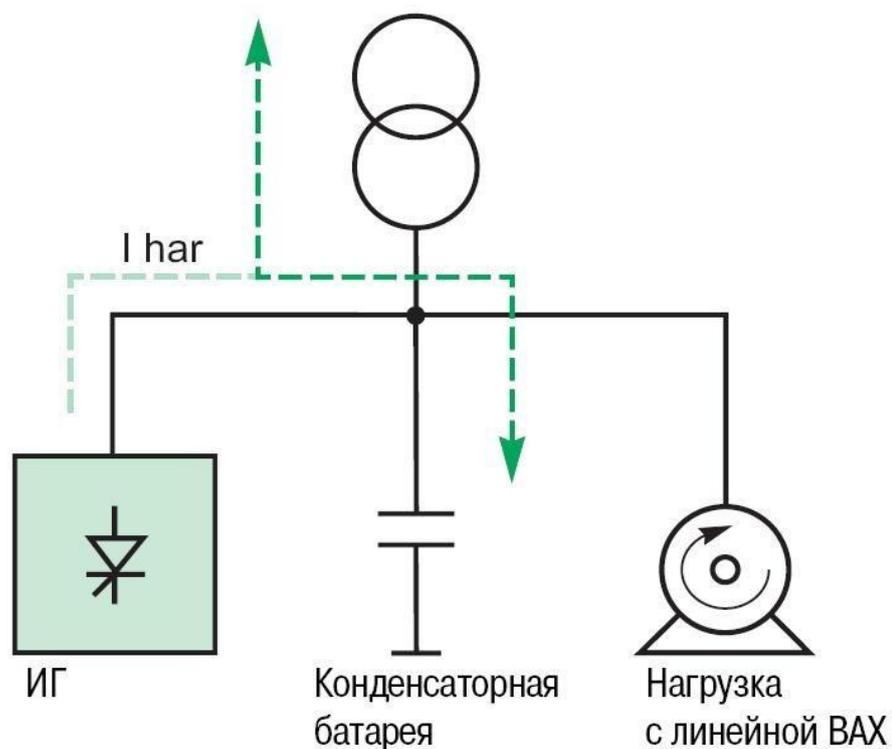


Рисунок 7- Циркуляция усиленных токов гармоник.

Питающая сеть и батарея для компенсации РМ нагружены значительными токами высших гармоник, что может привести к перегрузке»[17].

## 1.2 Новые технологии компенсации реактивной мощности в электрических сетях

Высокая надежность поставок не обязательно является синонимом высокого качества электроэнергии, что учитывает отклонения сетевого напряжения от идеальной формы синусоидальной волны или колебаний напряжения и частоты сети. Операционные сбои, отказ оборудования и связанная с этим потеря качества продукции или высокие затраты времени на восстановление, чаще всего обусловлены снижением качества электроэнергии, чем при отключении электроэнергии.

Множество электронных преобразователей энергии все чаще используются, как в промышленных, так и в городских сетях для обеспечения эффективного использования электроэнергии, от источников питания с коммутационным режимом и энергосберегающих ламп низкой мощности до роликовых приводов, электролиз и даже с высоким напряжением постоянного

тока. Доля этих систем в общей электроэнергетике неуклонно растет. Результирующие сетевые помехи, такие как изменения напряжения, дисбалансы, гармоники, коммутации или интергармоники, могут привести к резкому ухудшению качества электроэнергии и, в конечном счете, к вышеуказанным последствиям, если не будут приняты эффективные меры. В то же время происходит снижение мощности короткого замыкания линии за счет подачи питания через электронные компоненты.

Производители оборудования и систем для компенсации реактивной мощности вынуждены заниматься устойчивым улучшением качества электроэнергии. Новые устройства были сосредоточены, в частности, на том, как компенсировать увеличение гармонических нагрузок, которые очень чувствительны к системам компенсации реактивной мощности с неравномерными конденсаторами. Наиболее важные технологии будут рассмотрены в следующем:

- Ослабленная компенсация реактивной энергии (емкостная).
- Компенсация реактивной энергии с тиристорным переключением (емкостная и индуктивная).
- Пассивные схемы фильтра (емкостные).
- Активные электронные фильтры (емкостные и индуктивные, как 4 или 3-проводные версии).

Некоторые из этих технологий защищают систему компенсации реактивной мощности от опасных сверхтоков через резонансы; другие также улучшают качество электроэнергии. Прежде чем выбрать, какая система лучше всего подходит по технологии, местоположению и затратам, необходимо провести измерения качества электроэнергии и оценить сделанные в результате нарушения сети в плановой системе. Кроме того, постоянный мониторинг качества электроэнергии при работе системы компенсации защищает разработчиков, операторов системы и операторов сети от неожиданных ситуаций.

### 1.2.1 Классификация реактивной мощности

Когда мы говорим о реактивной мощности, мы обычно думаем о косинусе угла сдвига фаз, который относится к основной частоте 50/60 Гц и является результатом фазового сдвига токов по напряжению. Основными причинами являются двигатели и трансформаторы, но также играют роль приводы в преобразователях мощности, которые контролируются с помощью управления фазовым углом. 60 процентов электроэнергии, потребляемой в России, реализуется как механическая энергия через электродвигатели - с соответствующим отрицательным воздействием на реактивную мощность в сети. Этот процент показывает влияния коэффициента мощности, который является частью почти каждого технологического процесса.

Кроме реактивной мощности, имеются и другие эффекты, также создающие большую нагрузку на электрические сети:

- $\cos\varphi$  искажения из-за гармоник;
- $\cos\varphi$  дисбаланса с однофазными и двухфазными потребителями;
- $\cos\varphi$  модуляции с потребителями и с сильно изменяющимся потреблением нагрузки.

Нередко можно видеть, что все типы реактивной мощности используются в реальных установках, таких как электродуговые печи и сварочные установки.

Эти различные типы реактивной мощности основаны на следующих явлениях, которые всегда приводят к снижению качества электроэнергии:

- Гармоники тока и напряжения питания (текущий вид до 50-й гармоники).
- Коммутационные скачки напряжения из-за силовой электроники.
- Мерцание напряжения питания из-за периодических колебаний тока в диапазоне 9-10 Гц.
- Кратковременное падение напряжения из-за переключения работы оборудования, такого как трансформаторы и двигатели.

- Несбалансированность напряжения питания при работе одно- или двухфазных потребителей.

Последствия всех этих физических явлений, которые в значительной степени влияют на напряжение питания и, следовательно, на безопасное питание, ограничены соответствующими стандартами. Следует различать определение уровней совместимости для напряжения питания и определение импульсов, вызванных отдельными устройствами и системами, которые могут состоять или не состоять из множества различных устройств.

ГОСТ 32144-2013 важен для этой темы и описывает допустимые уровни совместимости в напряжении питания общественных сетей низкого, среднего и высокого напряжения. Этот стандарт содержит ограничения на гармонические уровни, а также заявления относительно допустимого диапазона напряжений, мерцания и многое другое.

В промышленных сетях ГОСТ 32144-2013 определяет разные уровни совместимости, например, для гармоник соответствующих классов. Здесь проводится различие между классами с очень чувствительными потребителями и «чистой» мощностью и классами с доминирующей мощностью преобразователя, такими как компрессорные станции и прокатные станы.

Здесь доля всего потребления энергии в сети пропорционально виду потребителя, например, доля гармонической или фликерной генерации. Если соответствующие выбросы превышают спецификации, которые были определены, то заказчик должен принять меры по снижению, например, гармоники, коммутационные переключения или мерцание и координировать их с сетевым оператором в отношении сетевой совместимости. Также важно обеспечить, чтобы влияние систем контроля пульсаций звуковой частоты соответствовало применимым стандартам. Настоящий норматив теперь применяется для низкого, среднего и высокого напряжения и является важной документацией для стандартизированной оценки соединения.

В дополнение к рассмотрению индивидуальных подключений клиентов в свете вышеприведенных стандартов и/или принципов оценки очень важно

ограничить броски, поступающие с устройств с рейтингами <16 А. Такие устройства массового рынка включают в себя источники питания с включенным режимом работы в телевизорах и компьютерах а также энергосберегающие лампы. Очень высокая частота использования телевизоров в вечерние часы ежедневно создает экстремальные гармонические нагрузки в наших общественных сетях, эффект которых может быть значительно увеличен как в сетях среднего и высокого напряжения (резонансная способность). Эта нагрузка представляет собой, так называемую предварительную нагрузку напряжения питания, которая также должна учитываться при планировании соединений с клиентами.

### 1.2.2 Решения по компенсации реактивной мощности

Решения, описанные ниже, являются современными технологиями в области компенсации реактивной мощности и представляют собой наиболее известные применения. С годами проблемы, с которыми приходится сталкиваться, изменились. Устройства и системы компенсации реактивной мощности и улучшения качества электроэнергии также продолжали развиваться. В то время как всего несколько лет назад основное внимание уделялось сокращению затрат на реактивную мощность и сокращению потерь электроэнергии - сегодняшние проблемы сложнее и связаны с полной интеграцией сетей.

#### - Неравномерная компенсация

При неравномерной компенсации конденсаторы используются как чисто емкостная ветвь (рисунок 8).

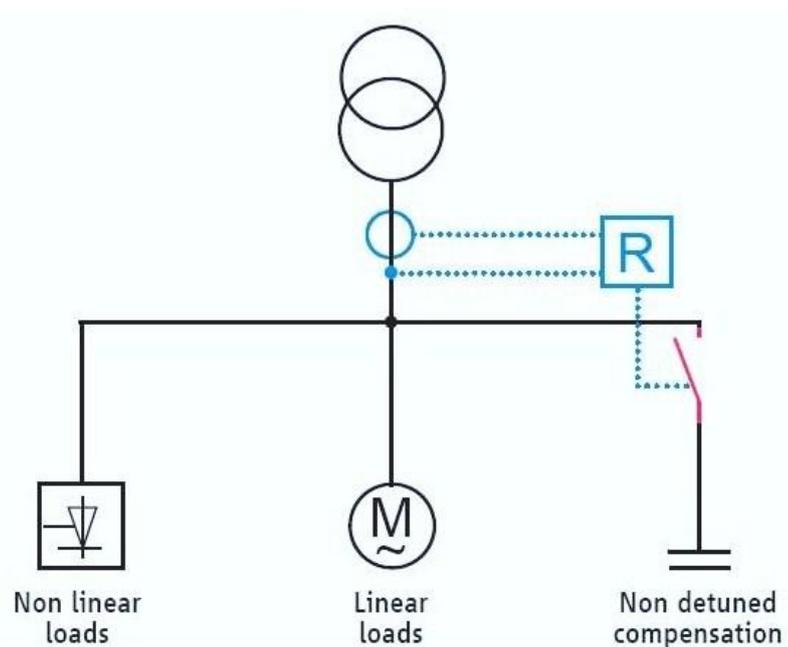


Рисунок 8 – Схема неравномерной компенсации

Раньше это было стандартное решение, используемое для экономии расходов на реактивную мощность, рассчитанных поставщиком электроэнергии. Это связано с уменьшением кажущейся мощности в линии питания и тем самым уменьшением потерь на линии и трансформатора. С изменением условий сети и нарастающим количеством гармоник увеличивается риск перегрузки мощности из-за резонансов. Это приводит к улучшению технологий компенсации.

- Отложенная компенсация (схемы отстройки фильтра)

Помимо фактической основной задачи компенсации реактивной мощности, риск перегрузки по току из-за резонанса в значительной степени может быть исключен путем правильного выбора типа настройки для системы компенсации и конструкции используемых конденсаторов и катушек индуктивности. Сегодня расстроенная компенсация - это современная технология. Степень расстройки также может быть выбрана таким образом, чтобы уменьшить специфически выбранные низкочастотные гармоники в сети клиентов или не допустить, чтобы управление частотой пульсаций частоты не нарушалось в распределительной сети. Старение компонентов и увеличение

уровня гармоник из-за изменения технологий устройства означают, что оборудование и системы должны контролироваться, чтобы своевременно обнаружить риск перегрузки.

- Тиристорная коммутируемая компенсация

Когда динамика нагрузки не позволяет производить ступенчатую компенсацию, переключаясь через контактор, то это заменяется комбинацией тиристоров и диодов (рисунок 9).

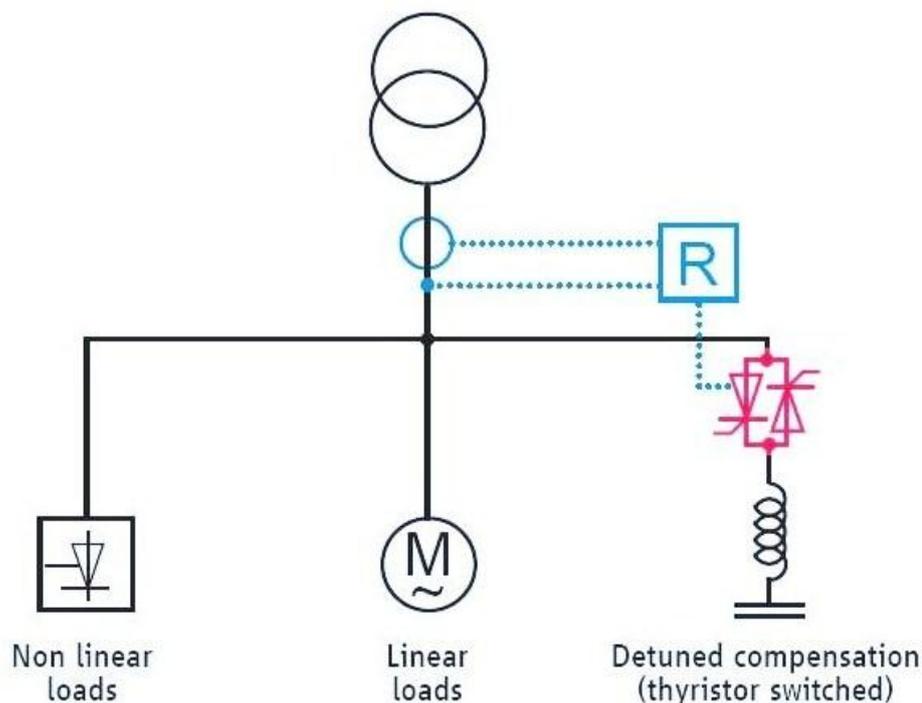


Рисунок 9 – Схема компенсации с помощью тиристоров

Вместе с быстрым сбором данных и контролем, возможны реальные операции переключения в диапазоне нескольких сетевых циклов без переключения переходных процессов. Это позволяет практически мгновенно корректировать быстрые изменения реактивной мощности, и в некоторых случаях это устраняет эффект мерцания от скачков нагрузки. Основным преимуществом такого типа коммутации полупроводников является то, что он предотвращает включение токовых нагрузок, таких как те, которые возникают при обычной расстройке компенсации. Это мягкое переключение имеет

значительные преимущества, особенно для чувствительных потребителей, подключенных к одному и тому же уровню мощности.

- Пассивные фильтры (настроенные схемы фильтров)

Пассивные фильтры имеют частоту естественного резонанса, очень близкую к частоте гармонического тока, подлежащей фильтрации от потребителя или группы потребителей, таких как преобразователи мощности питания.

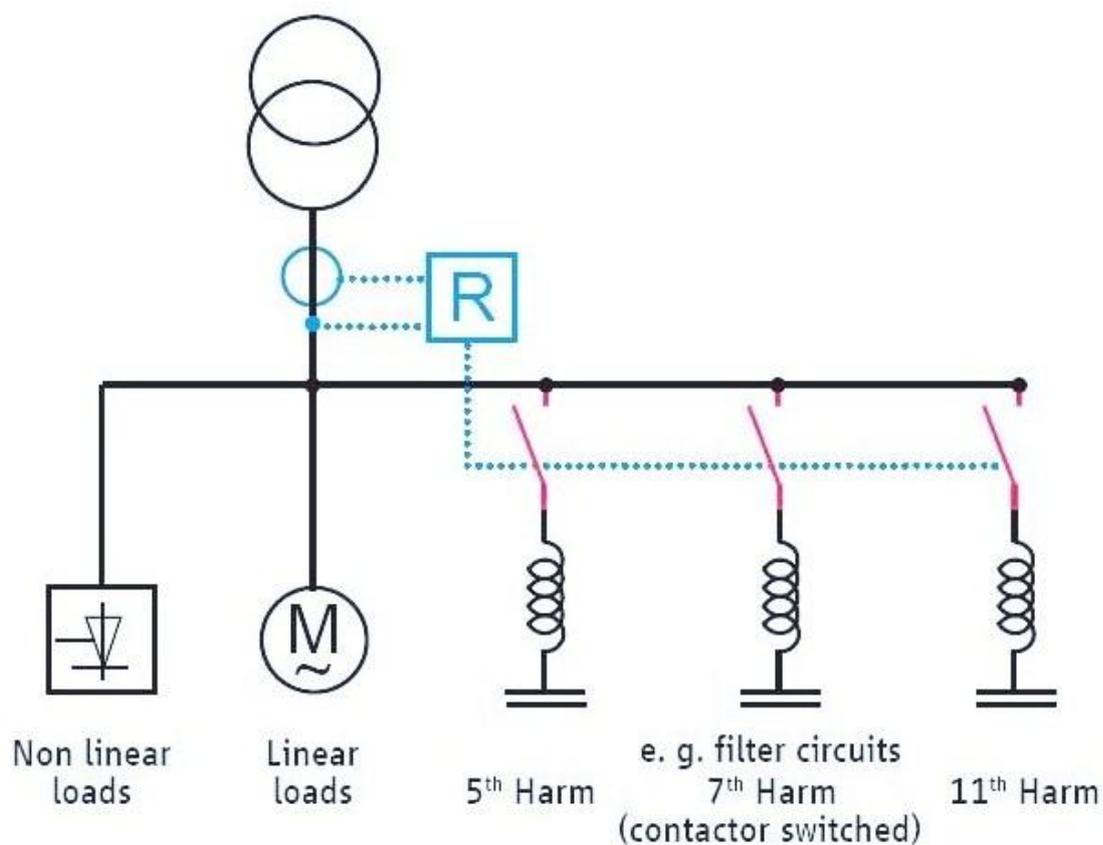


Рисунок 10 – Схема пассивных фильтров

Чтобы предотвратить переходные процессы в тех же фильтрах, частота настройки индуктивно расстраивается на 5-10 Гц.

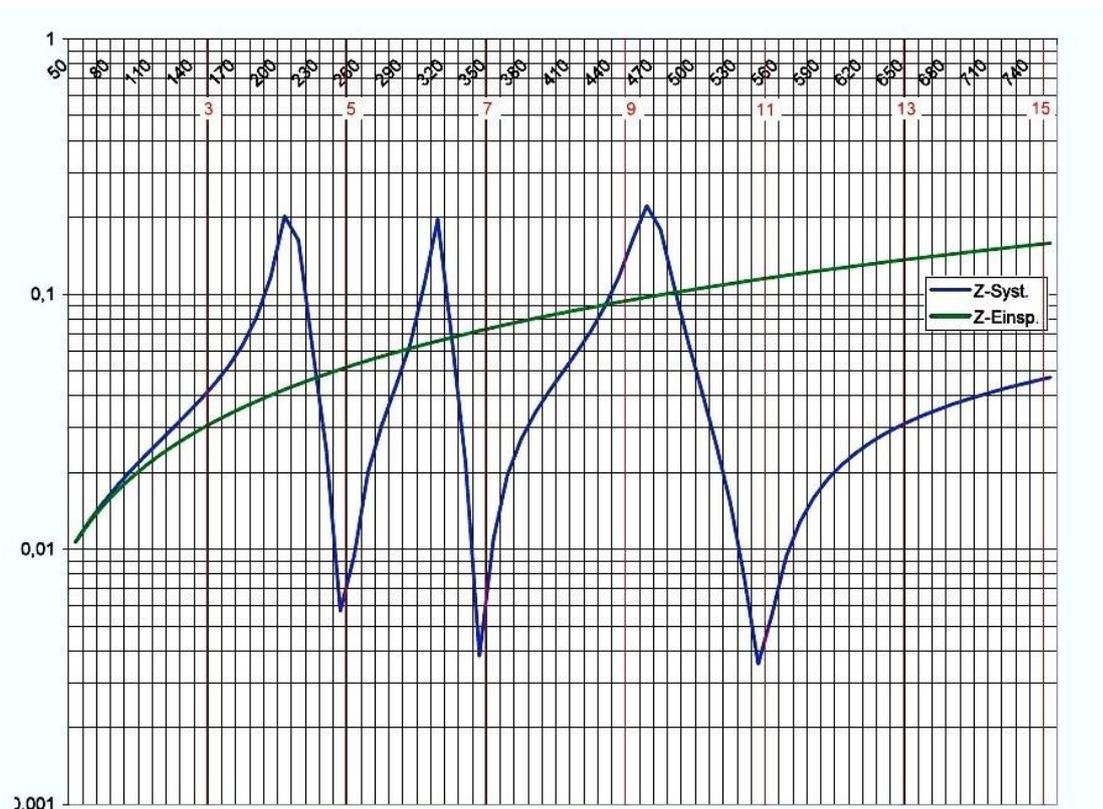


Рисунок 11 – Диаграмма работы пассивных фильтров

Это эффективно фильтрует гармонический ток, исходящий от источника, и предотвращает его передачу в распределительную сеть; это значительно снижает нагрузку от гармонического тока на линии питания / трансформатора (рисунок 10).

Этот метод работает в диапазоне от 3-й по 5-й гармоники и требует, по меньшей мере, один этап фильтрации для каждой гармоники сети. Риск перегрузки особенно высок с пассивными фильтрами. Необходим постоянный мониторинг и регулярное обслуживание. Кроме того, пассивные фильтры могут лишь частично адаптироваться к изменениям нагрузки. Объединив резисторы параллельно с реакторами с фильтром, для гармоник могут быть установлены фильтры высоких частот.

Пассивные схемы фильтров способны только уменьшать коммутирующие провалы в напряжении питания, если, например, одновременно включаются схемы фильтра для 5-й, 7-й и 11-й гармоник.

Точные расчеты влияния пассивных фильтрующих схем обычно требуют квалифицированных специалистов и использования мощного программного обеспечения для моделирования.

- Индуктивная компенсация

Резкое увеличение количества кабелей в наших сетях и особенно увеличение количества подключенных фотогальванических и ветровых устройств обуславливает необходимость компенсации емкостной грузоподъемности в определенное время суток с использованием катушек индуктивности (рисунок 12).

Подобно системам с контролируемой компенсацией, они могут быть контакторными или тиристорными, включенными на низком уровне напряжения, или включаться и выключаться на уровне среднего напряжения с помощью автоматических выключателей с цепями RC.

Емкостная реактивная мощность, удаленная из сети, также заряжается при превышении определенного коэффициента мощности, поэтому эти системы платят за себя в течение короткого периода времени.

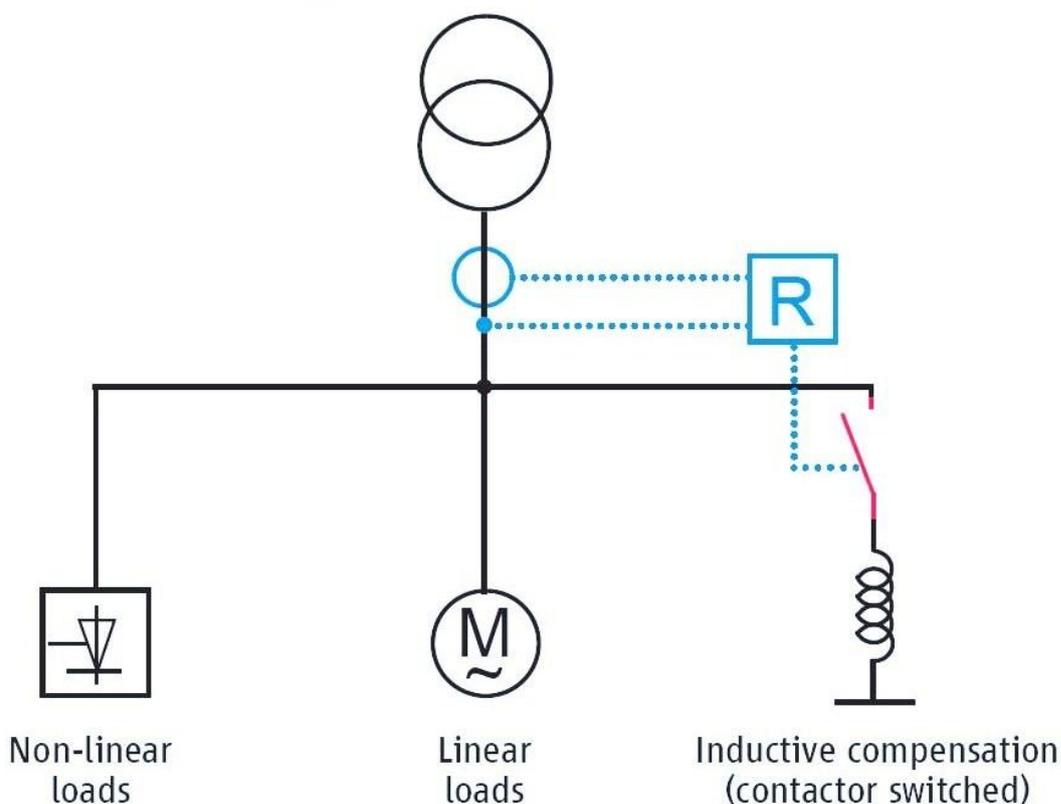


Рисунок 12 – Схема индуктивной компенсации

Это лишь незначительно влияет на полное сопротивление сети.

- Активные фильтры

Активный фильтр - это электронная система, которая используется для активного повышения качества электроэнергии. Активная фильтрация - это современная технология, которая очень универсальна. Она может убирать гармоники разных порядков, выполнять динамическую компенсацию реактивной мощности как емкостно, так и индуктивно или компенсировать дисбалансы напряжения.

Для гармонической компенсации каждой отдельной гармоники может быть задана определенная степень компенсации. Таким образом, фильтруются только установленные предельные значения, согласованные с сетевым оператором.

Благодаря высокой динамике некоторые активные фильтры даже способны эффективно корректировать изменения в текущей форме волны, которые представлены коммутационными провалами. В дополнение к компенсации трех проводников активные фильтры также обеспечивают возможность уменьшения гармоник на нейтральном проводнике. Третья гармоника складывается арифметически в нейтральном проводнике, что может привести к тяжелым нагрузкам или перегрузке нейтрального проводника. Активный фильтр реагирует немедленно с его степенью компенсации, установленной для конкретной точки измерения каждой гармоники. В принципе, это означает, что на него не влияют другие эффекты в сети и, таким образом, не изменяет структуру сети в резонансных точках. Он продолжает доставлять свои номинальные характеристики, когда он «перегружен», и равномерно ограничивает уровень компенсации. Это дает то преимущество, что максимальная эффективность компенсации фильтра доступна даже при чрезмерных гармонических нагрузках.

Компенсация реактивной мощности настолько динамична, что даже обеспечивает компенсацию мерцания. Также возможно компенсировать

емкостную операцию, которая часто возникает в компьютерных центрах или реализовать рабочую точку, например, для систем ИБП.

Активный фильтр мощности выполняет несколько функций одновременно. Благодаря целевому использованию можно решать особые проблемы с качеством электроэнергии практически независимо от существующей системы компенсации реактивной мощности. Перегрузка системы не приводит к отключению устройства и сбоям всего фильтра. Гармоники могут быть компенсированы по всему спектру вплоть до 50-й гармоники.

- Вывод

Чтобы иметь возможность использовать реактивную мощность и гармоническую компенсацию в тех случаях, когда простые стандартные решения практически не влияют, важно придать больше энергии мышлению о новых решениях. Представленные выше технологии не всегда являются индивидуальными решениями, но также могут быть объединены в виде гибридных решений. Хорошим примером является пользователь с разной нагрузкой и различными характеристиками: обычные индуктивные потребители, установленные вместе со многими приводами, управляемыми частотными преобразователями. Таким образом, есть две проблемы, которые необходимо решить: уменьшение количества гармоник, которые могут быть получены преобразователями с одновременным коэффициентом высокой мощности, и компенсации индуктивной реактивной мощности других потребителей. Современные фильтры активной мощности способны одновременно решать обе проблемы. Чтобы снизить инвестиционные затраты, часто используется гибридное решение, в котором классические пассивные схемы фильтра для 5-й и 7-й гармоник одновременно компенсируют основную частотную реактивную мощность остальных потребителей. Только гармоники с более высокой частотой, которые намного меньше по размеру токов, затухают до совместимого уровня с активным фильтром. Однако такие решения требуют

детального анализа планируемого использования, измерений в точке подключения и технических расчетов сети.

Консультации и анализ экспертов имеют важное значение и помогают найти решение, которое быстро окупается.

### 1.2.3 Прогноз

Реактивная мощность, потребляемая сетью и сетевыми возмущениями в виде гармоник, вызывает дополнительные потери в сети передачи и распределения, которые должны покрываться за счет использования первичной энергии на электростанциях. Справедливое распределение расходов, связанных с источниками, несомненно, будет более актуальным в будущем.

Это делает емкостную и индуктивную компенсацию в определенной зоне покрытия - возможно, с подачей от местных электростанций - важным фактором. Транспортировка реактивной мощности на большие расстояния невозможна без значительного влияния на диапазон напряжений.

Таким образом, одной из будущих задач будет использование неиспользованного потенциала экономии за счет более широкого использования систем компенсации реактивной мощности для повышения качества электроэнергии.

Комплексный мониторинг сети может быть инструментом для этой цели, с постоянной регистрацией потока мощности, полным гармоническим искажением токов и напряжений и другими параметрами, связанными с качеством электроэнергии. Этот тип мониторинга эффективно поддерживает систему управления нагрузкой, которая интеллектуально координирует время запуска основных потребителей в периоды пикового спроса. Кроме того, становятся очевидными подходы, при которых с относительно небольшими усилиями в сети может быть достигнут большой эффект (предотвращение реактивной мощности, уменьшение гармоник). Это может также помочь выявить и исправить проблемные тенденции на раннем этапе, например, нагрузки на линии и трансформаторы.

Еще одна задача на будущее - это стандартизация и внедрение в форме нормативов для всех участников работы в сети. Существующие пробелы в стандартах должны быть закрыты, например, путем определения предельных значений для проводимых помех до 9 кГц. Более того, обсуждение распределения затрат на качество электроэнергии должно будет учитывать вопрос о том, должны ли затраты все чаще распределяться на соответствующих участников сети и, следовательно, на потенциальные источники, вызывающие снижение качества электроэнергии.

Оптимально разработанные системы компенсации, которые учитывают требования оборудования и систем, подлежащих компенсации:

- Сократить затраты на электроэнергию, соблюдая согласованный по контракту коэффициент мощности,
- Включить запланированное подключение потребителей с высоким уровнем колебаний нагрузки,
- Сокращение потерь оборудования в системах заказчика, таких как трансформаторы и кабели, а также в сети передачи и распределения сетевого оператора,
- Стабилизировать общественные и промышленные сети за счет уменьшения общего гармонического искажения.

Глубокие знания и современные, безопасные и сложные конфигурации системы для компенсации реактивной мощности могут быть использованы для повышения качества электроэнергии еще больше и помогают справиться со всеми задачами комплексной компенсации реактивной мощности для устройств с низким и высоким напряжением.

### **1.3 Схема динамического стабилизатора напряжения для улучшения качества электроэнергии на крупных промышленных предприятиях**

Крупные промышленные предприятия, потребление электроэнергии которых составляет 85% от общего потребления по всей стране, составляют основную часть системы распределения электроэнергии и предъявляют более

высокие требования к качеству электроэнергии, чем обычные пользователи. Во всех видах энергетических систем часто возникают фликеры напряжения, которые плохо влияют на нормальную работу нагрузки.

Динамический стабилизатор напряжения (ДСН) является своего рода устройством с управляемым источником напряжения, которое может компенсировать необходимую мощность. Он имеет высокую эффективность и стоит меньше, чем другие устройства, такие как источник бесперебойного питания, трансформатор постоянного напряжения и мотор-генератор. Помимо основной функции компенсации напряжения, ДСН также может выполнять функцию компенсации гармоник и компенсации реактивной мощности. Это наиболее эффективное и популярное силовое электронное оборудование, решающее проблему напряжения. Таким образом, ДСН может не только повысить надежность источника питания, но и повысить качество питания со стороны нагрузки.

В настоящее время существует три типа наиболее изученных ДСН. Динамический стабилизатор напряжения с конденсатором постоянного тока должен компенсировать только реактивную мощность, иначе при потреблении активной мощности его постоянное напряжение будет сильно снижаться. ДСН с системой аккумулирования энергии часто выбирает аккумуляторную батарею, сверхпроводящую магнитную энергию или накопление энергии маховика в качестве источника энергии. Таким образом, динамический стабилизатор напряжения способен компенсировать реактивную мощность, а также активную мощность. В динамическом стабилизаторе напряжения с выпрямительной системой, для завершения долговременной компенсации, конденсатор постоянного тока подключается к стороне питания или стороне нагрузки через выпрямительную схему. Когда со стороны питания возникает сбой напряжения, настолько трудно поддерживать постоянное напряжение в части постоянного тока, и есть вероятность, что на ДСН будет подано перенапряжение или напряжение гармоник. Кроме того, выпрямляющая схема не может получать энергию через электрическую сеть, если в сети серьезно

падает напряжение, и есть вероятность, что произойдет более серьезное падение напряжения.

Представленная новая схема компенсации напряжения ДСН, применяется для двойного источника питания с двойной нагрузкой, которая имеет достоинства как ДСН с системой хранения энергии, так и ДСН с выпрямительной системой. Модель общей схемы и модели Simulink в соответствии с новой схемой построена в MATLAB / Simulink, так что, мы можем сравнить достоинства или недостатки между ними. Результаты моделирования показывают, что предложенная схема может гарантировать устойчивость напряжения со стороны нагрузки, которая является эффективной схемой управления качеством электроэнергии.

### 1.3.1 Требования к качеству электроэнергии на крупномасштабных промышленных предприятиях

С непрерывным развитием науки и техники все более заметными становятся противоречия между чувствительными материалами и оборудованием, загрязняющим качество электроэнергии, на крупных промышленных предприятиях. С одной стороны, на крупномасштабных промышленных предприятиях часто имеется большое количество импортного оборудования и точных приборов, которые требуют высокой надежности электроснабжения и качества электроэнергии. Если напряжение в сети нестабильно, например, частота колебаний, изменения формы сигнала или кратковременные перебои в подаче электроэнергии, это, вероятно, окажет большое влияние на производственный процесс и качество продукции. Например, некоторые устройства с чувствительной релейной защитой могут автоматически переключаться, что приводит к полной перегрузке линии и огромным экономическим потерям. В последние годы наиболее серьезной проблемой, влияющей на безопасную работу нагрузки, на крупных

промышленных предприятиях, стало резкое повышение и падение напряжения в течение всего времени.

Если возникшая проблема не является серьезной, она может привести к остановке производственной линии и браку продукции; если проблема серьезная, то это может привести к несчастному случаю на производстве или человеческим жертвам. С другой стороны, нагрузки в крупных промышленных предприятиях всегда имеют характеристики, такие как нелинейные, ударные или прерывистые, а запуск или остановка одиночной нагрузки оказывает большое влияние на энергосистему.

Например, для предприятий черной металлургии электродуговая печь является типичной нелинейной нагрузкой, в то время как вращающаяся мельница является типичной ударной нагрузкой, и имеют единую мощность в мегаваттах. Электродуговая печь представляет собой трехфазную асимметричную нагрузку в период плавления, в то время как случайное изменение активной и реактивной мощности, которое может вызвать скачки напряжения, токи обратной последовательности, высшие гармоники и т. д. Когда двигатель начинает вращаться, ток двигателя очень большой, но активная мощность меньше номинальной активной мощности, тогда как реактивная мощность намного больше номинальной. В это время вращающаяся мельница потребляет большое количество реактивной и имеет самый низкий коэффициент мощности для энергосистемы.

Вообще, во всех видах проблем с качеством электроэнергии частота появления фликкера напряжения самая высокая, а ее влияние является самым серьезным. В настоящее время в промышленно развитых странах фликкер напряжения возрос до одной из наиболее важных проблем связанных с качеством электроэнергии. Согласно сообщениям, фликкер напряжения составляет более 80% всех жалоб от таможенных органов о проблемах с качеством электроэнергии, в то время как гармоники напряжения составляют менее 20%. Эффект фликкера напряжения настолько велик, что многие промышленные процессы в крупных промышленных предприятиях

чувствительны к нему. Эти промышленные процессы включают в себя множество областей, в том числе полупроводниковую, бумажную, пластиковую, нефтехимическую, текстильную, стеклянную и резиновую и т.д. Экономические потери, вызванные мерцанием напряжения, включают не только потери качества продукции и остановки производственной линии, но также затраты на всей производственной линии. Согласно сообщениям, в результате четырех циклов падения напряжения предприятиям требуется 72 минуты для восстановления производственной линии, что приводит к потере 700 тысяч долларов. Поэтому проблема повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии в крупных промышленных предприятиях является проблемой, которую необходимо решить.

### 1.3.2 Схема ДСН, применяемая для двойного источника питания с двойной нагрузкой

ДСН с очень высоким коэффициентом полезного действия является устройством с управляемым источником напряжения, используемым для решения проблем качества электроэнергии, таких как фликкер напряжения и гармоник. Он устанавливается между нагрузкой и источником питания, чтобы компенсировать напряжение на стороне нагрузки, когда происходит сбой питания, или со стороны источника питания имеющий фликкер напряжения или гармоники.

Для электроснабжения крупных промышленных предприятий используют двойную резервную систему электропитания, такую как источник бесперебойного питания, аварийный источник питания, автоматический переключатель передачи шины, систему статического переключателя и автоматический переключатель передачи, от критической нагрузки. Двухсторонний источник питания резервируется от другого источника по схеме ДСН, применяемой для двойного электроснабжения с двойной нагрузкой. Если происходит сбой питания или падение напряжения в одном направлении, ДСН может получить питание от другого источника. Напряжение компенсации

генерируется PWM инвертором, который подключен к цепи через трансформатор.

На крупных промышленных предприятиях часто появляются трехфазные несимметричные нагрузки, однофазный инвертор был принят так, что три фазы могут управляться независимо. В этой модели три фазы находятся в равном статусе, поэтому нам просто нужно проанализировать одну фазу, например фазу А, а две другие фазы аналогичны. Чтобы упростить работу, будет проанализирована только однофазная структура

Хотя фликер напряжения или гармоники часто происходят на крупных промышленных предприятиях, вероятность того, что двухстороннее электроснабжение не удастся в одно и то же время, намного ниже, чем только одностороннее электроснабжение. Когда источник S1 имеет падение напряжения, источник S2 может обеспечить нормальное электроснабжение. Однофазный инвертор, по способу S1, получает энергию от источника S2, для компенсации напряжения, так что напряжение, на стороне нагрузки LD1, можно постоянно поддерживать.

Эта схема не требует большого запоминающего устройства и способна решить проблему ДСН с выпрямляющей системой: когда напряжение сильно падает, оно не может быстро компенсировать падение напряжения. Кроме того, на крупных промышленных предприятиях всегда имеется несколько источников питания с несколькими нагрузками, схема может быть объединена в несколько источников питания с несколькими нагрузками. Например, если имеется источник питания с  $m$  нагрузкой, когда источник S1 имеет падение напряжения, другой источник питания  $m - 1$  будет обеспечивать энергию для однофазного инвертора S1, чтобы стабилизировать напряжение источника S1.

### 1.3.3 Топологическая структура и устройство DVR

Как уже упоминалось ранее, крупные промышленные предприятия часто представляют собой трехфазные несимметричные нагрузки. В трех однофазных ДСН с полной конфигурацией моста, каждая фаза не зависит друг от друга.

Несмотря на то, что было использовано большое количество коммутационных аппаратов, а также увеличилась стоимость, за счет этого управление может происходить пофазно, и таким образом можно компенсировать напряжение нулевой последовательности. Таким образом, ДСН является более гибким и подходит для широкого использования трехфазной сети с четырехпроводной структурой на крупных промышленных предприятиях.

Инвертор имеет множество методов управления и моделирования, управляющее ядро - это H-мостовая схема включения-выключения четырех IGBT транзисторов в однофазном режиме. Учитывая, что двухполюсное управление напряжением и током обладает хорошими статическими и динамическими характеристиками отклика способно удовлетворить потребность в быстром ответе ДСН на систему управления, была принята двойная схема управления с замкнутым контуром, основанная на выходном напряжении ДСН и индуктивном токе выходной фильтрации.

В этой схеме, с двойным замкнутым контуром, текущий внутренний контур принимает регулятор тока PI. Пропорциональный цикл регулятора тока используется для увеличения коэффициента демпфирования инвертора, обеспечения постоянной работы всей системы и обеспечения высокой надежности, а интегральный цикл используется для уменьшения установившейся ошибки токового контура. На внешнем контуре напряжения также используется регулятор напряжения PI, который используется для того, чтобы сигнала мгновенного выходного напряжения был задан определенным значением.

(В качестве сигнала возмущения инвертора, динамический стабилизатор напряжения компенсирует ток  $i_c$  и тока утечки выходит за пределы токового контура, поэтому качество управления системой для нарушения нагрузки плохо). Чтобы исключить нарушение нагрузки, ток компенсации  $i_c$  и напряжение  $v_c$  вводятся прямой подачей как управляющий сигнал, уменьшая степень медиации посредника PI и влияние внешних помех на производительность системы управления.

#### **1.4. Существующие системы автоматической компенсации реактивной энергии**

Одна из систем регулирования реактивной энергии в автоматическом режиме, является РРМГ-12.

Назначение:

- Удержание заданного параметра коэффициента мощности.
- Индикация и контроль параметров сети.
- Обеспечение оптимальной работы конденсаторов в тяжелых режимах эксплуатации, в том числе в режимах перенапряжения и при наличии гармонических составляющих.

Использование:

- В системах автоматического регулирования компенсации реактивной мощности в трехфазных сетях 0,4 кВ с симметричной, не быстроменяющейся нагрузкой, как с наличием гармонических составляющих, так и без них.

Принцип работы:

- Регулятор реактивной мощности РРМГ-12, применяемый в установках компенсации реактивной мощности (УКРМ), оснащен измерительными контурами тока и напряжения. После цифровой обработки измеренных величин с высокой точностью определяются значения коэффициента мощности, и, путем подключения или отключения необходимого числа батарей (ступеней) конденсаторов, осуществляется регулирование реактивной мощности.
  - Регулятор рассчитывает необходимые включения и отключения ступеней согласно различным алгоритмам:
    - задержки на включение/отключение,
    - задержки на повторное включение,
    - предотвращения резонансных явлений,
    - внешней последовательности.

- Регулятор обеспечивает следующие виды защит конденсаторов (ступеней):

- защита от гармонического искажения напряжения,
- защита от перенапряжения,
- защита от частых переключений,
- защита от мгновенных двойных включений.

#### Преимущества

- Отображение коэффициентов нелинейного искажения напряжения и тока.
- Отображение полного коэффициента мощности сети PF \*
- Отображения основного коэффициента мощности сети DPF \*\*
- Высокая точность измерений, 4-х разрядный дисплей.
- Ручной и автоматический режим работы.
- Автоматический режим расчета емкости C1.

Конденсаторные установки с автоматическим регулированием компенсации реактивной энергии на  $U=0,4$  кВ типа АУКРМ, показаны на рисунке 13. Они выпускаются номинальной мощностью от 5 до 1200 кВАр. В зависимости желания заказчика можно и больше.

В установки для компенсации РМ с авторегулированием устанавливаются только экологически безопасные конденсаторы. Конденсаторы в сухом исполнении устанавливаются разрядные резисторы, а также предохранители-прерыватели, которые срабатывают при давлении выше заданного.



Рисунок 13 – Установка для компенсации РМ с авторегулированием

При особом желании заказчика возможно изготовление конденсаторных установок с регулированием на разные значения мощности, и измененными габаритными размерами. К этому можно добавить различное число ступеней и автоматическое охлаждением или подогрев самой установки.

Конденсаторные установки с автоматическим регулированием компенсации реактивной энергии (АУКРМ) представлены в виде металлического шкафа (рисунок 13) напольного или навесного исполнения с воздушным охлаждением. Шкафы покрашены порошковой краской, что предотвращает появлению коррозии. Силовой кабель заводится снизу установки, но по желанию заказчика можно и сверху.

На передней панели КУ расположен регулятор РМ под управлением специального микропроцессора. КУ с авторегулированием «необходимой реактивной энергии даёт нужный нам коэффициент мощности» [3, с. 225] с высокой точностью и большим диапазоном:

- Отслеживание изменения реактивной энергии в той сети, которой идёт компенсация, с нужным значением  $\cos \varphi$ ;
- реактивная энергия не поступает в сеть от своих источников;
- появление перенапряжений практически не возможно, потому что используется АКУРМ;
- отслеживание всех параметров происходит в онлайн режиме, и выводится на экран;
- так же идёт полный контроль КУ и всех дополнительных элементов, необходимых для её работы;
- предусмотрена система аварийного отключения конденсаторной установки и предупреждения обслуживающего персонала;
- возможно автоматическое подключение принудительного обогрева или вентиляции конденсаторной установки.

Требуемый  $\cos \varphi$ , с высокой точностью и в большом диапазоне, компенсируемой реактивной мощности в установках АУКРМ обеспечивается микропроцессорным программируемым контроллером – регулятором реактивной мощности.

Регулятор реактивной мощности автоматически отслеживает изменение реактивной мощности нагрузки и, в соответствии с заданным значением

коэффициента мощности корректирует  $\cos\phi$  управляя коммутационными аппаратами секций конденсаторных батарей.

На панели управления отслеживаются все основные параметры компенсируемой сети. Вместе с этим, ведётся контроль за режимами эксплуатации и работой каждого элемента КУ, при этом учитывается время работы и количество подключенных секции, что даёт оптимизировать износостойкость контакторов и распределения нагрузки в сети.

Предусмотрена система аварийного отключения конденсаторной установки и предупреждения обслуживающего персонала.

Возможно автоматическое подключение принудительного обогрева или вентиляции конденсаторной установки.

#### 1.4.1 Микропроцессорный регулятор DCRK производства Lovato

«Данный микропроцессорный регулятор имеет индикатор тремя разрядами и разделен на 7 равных сегментов, задающие параметры сети, и четыре кнопки для задания этих параметров.

Микропроцессорный регулятор выпускают на двенадцать, а также на пять, семь и восемь ступеней регулирования. Регулятор оснащается интерфейсом RS-232/TTL для установки напряжения, тока и косинуса  $\phi$ . Всё это можно делать с помощью компьютера и удаленного подключения по промышленному интерфейсу RS-485. В комплекте с DCRK, может поставляться программное обеспечение DCRK - SOFTWARE CONTROL PANEL, для всестороннего использования всех предоставляемых регулятором функций.

Достоинства регулятора DCRK:

- внутри установле тепловой датчик, который даёт сигнал при высокой температуре КУ;
- одна из лучших функций, заложенных в процессор, для расчёта перегрузки КУ;
- расчёт  $\cos\phi$  за каждую неделю по среднему значению;

- установлены 2 дополнительных выходных реле, которые можно запрограммировать как «тревога и/или вкл. вентилятор»[2].

#### 1.4.1.1 Конструкция и подключение регулятора DCRK

Регулятор размещается в пластиковом корпусе, который можно прикрепить к электрическим шкафам, щитам. Соединительный кабель подключается к панели регулятора с задней стороны. Питающее и измеряющее напряжение идёт непосредственно на регулятор с фазы "В" и "С" и подключается, через соответствующие предохранители, к клеммам "9" и "10" или "15" и "16". Питающее напряжение находится в районе трёхсот восьмидесяти-четырёхсот пятнадцати вольт. Перед тем, как подсоединить регулятор, необходимо проверить  $U$  в питающей сети. Также на регулятор приходит измерительный ток, который приходит с трансформаторов тока. Трансформатор тока установлен на фазе А, которая не разрывается и не разветвляется на участке нагрузки-конденсаторная батарея.

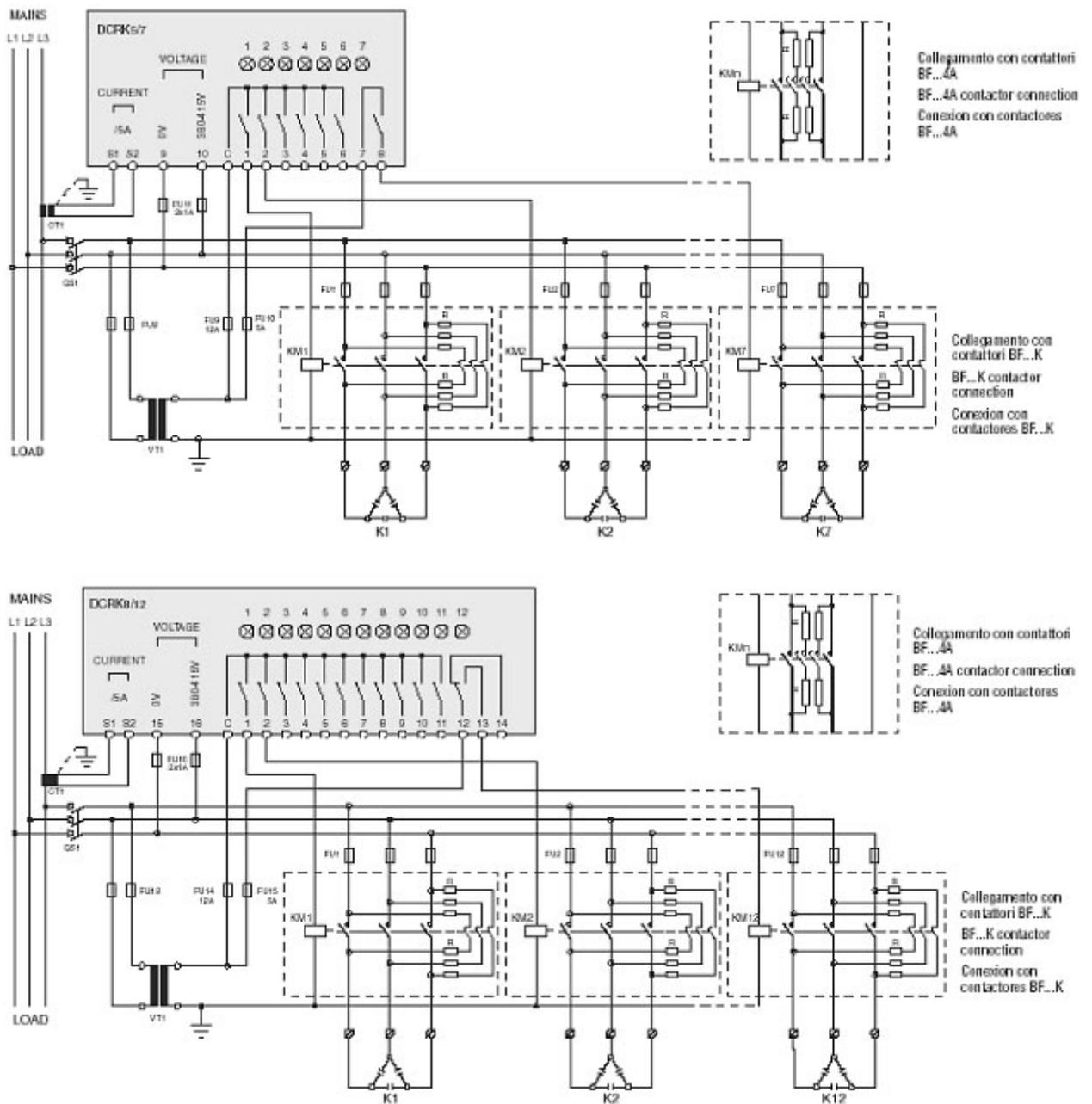


Рисунок 14 - Подключение регулятора DCRK

### 1.4.2 Регуляторы реактивной мощности Beluk

Технические характеристики микропроцессорного регулятора BLR-CX

- Компенсация реактивной мощности путем полностью автоматического распознавания и контроля мощности ступени регулирования

- Интеллектуальный алгоритм регулирования обеспечивает оптимальный выбор ступени и малую продолжительность процесса регулирования

- Функции регулирования настройки для запуска не требуется

Принцип действия микропроцессорного регулятора BLR-CX (рисунок 15)



Рисунок 15- Регуляторы реактивной мощности Beluk

Интеллектуальный алгоритм регулирования фирмы Beluk включает ступени регулирования оптимальным образом, благодаря чему обеспечивается малая продолжительность процесса регулирования в сочетании с минимальным числом включений. При этом частота включений распределяется равномерно по всем ступеням.

Все существенные для регулирования параметры задаются на заводе-изготовителе таким образом, что почти во всех случаях BLR-CX может начать регулирование сразу после подключения - без дополнительных настроек. Наряду с этим регулировочные характеристики компенсационного устройства можно согласовывать с местными условиями. При необходимости изменение параметров можно выполнять и в процессе регулирования.

Дополнительные настройки производятся в двух отдельных меню пользователя. В меню "Пуск" ("Start") доступны лишь существенные для ввода в эксплуатацию настройки: номинальное напряжение, коэффициенты трансформации тока и напряжения, автоматическая корректировка

подключения и включение/выключение регулирования. В расширенном меню настраиваются следующие параметры:

Измерение: Номинальное напряжение, трансформаторы тока и напряжения, допуск на напряжение, измерение L-L/L-N, угол фазовой коррекции, автоматическая подстройка подключения, синхронизация, сброс счетчика часов работы, сброс среднего значения  $\cos \varphi$ , сброс максимальной температуры.

Регулирование: Чувствительность регулирования, целевые значения  $\cos \varphi$  1 и 2, время переключения, время изменения ступени, изменение ступени, автоматическое распознавание конденсатора, блокирование заданных ступеней.

Программы регулирования: "максимальное соответствие (Best-Fit)", и "принцип LIFO", "комбинированное регулирование", "прогрессивное регулирование", "реактивная мощность сдвига", "асимметричное время переключения".

Ступени: Время разряда, величина ступени в кВА(p), число циклов переключения для данного типа ступеней (например, для фиксированных ступеней), сброс параметров ступени

Аварийная сигнализация: Сигнализация о сбое регулирования, о дефектной ступени, о потери мощности конденсатора, о нелинейных искажениях напряжения, о достижении предельного значения соотношения "температура 1/температура 2", о достижении предельного числа циклов переключения, о достижении предельной наработки устройства, о зависании регуляторов  $I = 0$

Для запуска регулирования необходимо лишь правильно задать номинальное напряжение. В противном случае регулирование блокируется для защиты конденсаторов. Если не будет задан коэффициент трансформации тока, то будут отсутствовать измеренные значения, зависящие от величины тока. Неправильное подключение устраняется благодаря автоматической активизации фазового корректора. При техобслуживании устройства все выходы могут переключаться вручную.

## Измерительные входы микропроцессорного регулятора BLR-CX

По измеренным значениям напряжения и тока BLR-CX определяет коэффициент мощности в сети. При этом не имеет значения, в каких фазах подключены измерители тока и напряжения, поскольку ошибка исправляется за счет автоматической активизации корректировки подключения. Порог срабатывания измерения тока составляет менее 20 мА, благодаря чему достигается надежное и точное регулирование. Могут применяться как 1 А-, так и 5 А-преобразователи. Для этого ручная настройка не требуется. Благодаря широкодиапазонному блоку питания становится возможным измерение напряжения в пределах 90 - 550 В.

С помощью датчика температуры регулятор реактивной мощности BLR-CX может измерять температуру внутри коммутационного шкафа и, в случае необходимости, непосредственно через одно из выходных реле активировать подключенный вентилятор или отключать конденсаторы для их защиты. Замыкающие контакты внешних термостатов, включенные параллельно датчику температуры, делают возможным отключение выходов при перегреве в параллельно установленных шкафах.

## **2 Выбор системы автоматического удержания коэффициента мощности на подстанции**

### **2.1 Оптимизация конструкции силового трансформатора: потери, регулирование напряжения и тесты**

«Трансформаторы относятся к числу наиболее важного оборудования энергосистем. В настоящее время уровень надежности, требуемый от электроэнергетических компаний, обуславливает то, что они обладают высокой степенью функциональных характеристик информации об их оборудовании, в частности, их трансформаторах. Экономические последствия, связанные с эксплуатацией отказов оборудования в электросети, огромны, поэтому целостность работы каждого из ее компонентов должна быть гарантирована. Эта целостность может быть достигнута с внедрением новых технологий для мониторинга и оценки их работы. Однако со временем и схемой загрузки электрическая система подвергает это оборудование нагрузкам, которые со временем могут привести к сокращению их мощности, что приведет к невозможности определения её реальной эксплуатационной мощности. Поэтому тщательная оценка эксплуатационного состояния комплекта оборудования, несомненно, приведет к значительному повышению надежности электрической системы, заметному сокращению затрат на обслуживании, включающее надлежащее выполнение профилактического обслуживания и возможность избежать сбоев в работе такого оборудования.

Чтобы избежать незапланированных перерывов в работе сложных систем, из-за внеплановых непредвиденных обстоятельств, в течение последних сорока лет были разработаны систематические процедуры технического обслуживания. Первоначально использовались только процедуры, связанные с корректирующим обслуживанием. То есть, если происходит сбой оборудования и оборудование перестает работать, начинается процедура ремонта. Это связано с перебоями в доступности рассматриваемого оборудования. С течением времени и накоплением знаний, связанных с эксплуатацией

оборудования, инженеры электросетей разработали процедуры профилактического обслуживания, которые запускают процесс технического обслуживания до аварии, основываясь на истории каждого оборудования.

Несмотря на то, что он дает удовлетворительный результат, с точки зрения сокращения перебоев в подаче электроэнергии для потребителей, эта процедура иногда приводит к ненужному предварительному запрограммированному обслуживанию, так как оборудование, на которое было выполнено вмешательство, находится в идеальном рабочем состоянии, хотя оно работает в течение нескольких часов, всё равно среднее значение одного и того же типа оборудования будет указывать на близость отказа.

В последнее время, с развитием цифровых систем сбора и обработки цифровых сигналов, разрабатывается другая стратегия обслуживания. Эта новая методика, называемая профилактическим обслуживанием, направлена на разработку диагностического процесса поднадзорного оборудования, так что указание на техническое обслуживание указывается только в том случае, если рабочее состояние оборудования будет обеспечивать значительное ухудшение состояния, с указанием его уровня ухудшения и показ оценки того, как долго оно может продолжать функционировать без сбоев.

В данном документе речь идет именно об этом типе обслуживания трансформаторов. В предлагаемой методологии используются сигналы частичных разрядов, возникающие внутри трансформаторов. Использование частичных разрядов является одним из видов отказа, который заслуживает упоминания, поскольку он содержит много информации о проблемах внутри трансформаторов.

Частичные разряды представляют собой отказы, которые развиваются бесшумно и могут привести к непредвиденному сбою в трансформаторе. Явление частичного разряда является проблемой в системе изоляции, которая проявляется через крошечные электрические дуги внутри диэлектрического материала, в результате чего его разрушение завершается полным пробоем и возможным разрушением оборудования. Необходимо отслеживать активность

частичных разрядов в трансформаторах, чтобы следить за развитием этой проблемы, и спланировать вмешательство до катастрофического отказа. Поэтому тщательная оценка эксплуатационного состояния трансформаторов приводит к значительному повышению его надежности, заметному сокращению затрат в отношении правильной обработки, включающей должное выполнение профилактических мер и возможность избежать эксплуатационных отказов оборудования.

Таким образом, устройство, которое обнаруживает внутренние дефекты на раннем этапе, позволяет спланировать мероприятия по обслуживанию, чтобы смягчить эти перерывы. Это планирование может быть включено в культуру прогнозирования технического обслуживания и нацелено на разработку процесса диагностики поднадзорного оборудования, так что указание на техническое обслуживание указывается только в том случае, если рабочее состояние оборудования обеспечивает значительное ухудшение состояния. Их дальнейшее использование создает параметры, на уровне ухудшения, в которых то же самое, и представляет прогноз того, как долго он может продолжать функционировать без отказа. Поскольку процесс частичных разрядов изначально проявляется как единичный отказ, иногда с микроскопическими размерами, он может развиваться в любой точке изоляции.

Поскольку частичные разряды, возникающие внутри обмоток, представляют собой важную точку информации об условии их старения и износа, предлагаемое устройство полезно для любой компании с трансформаторами.

Предложенная методология оценки рабочих условий трансформатора была реализована в надлежащей разработанной системе сбора данных, чтобы сделать выборку переменных, участвующих в процессе ухудшения наблюдаемого оборудования.

Разработанная система основана на цифровой обработке сигналов информации, содержащейся в электрических переменных, связанных с работой трансформатора, особенно информации, непосредственно получаемой от тока,

протекающего через обмотки трансформатора. Вейвлет преобразование было выбрано цифровым методом из-за его качества для распознавания информации, внутри других бесчисленных сигналов, содержащихся в потоке. На основании информации, полученной специально для токов трансформатора, с использованием датчиков типа катушек Роговского, предполагается, что они смогут определять условия эксплуатации изоляции оборудования. Этого можно ожидать, потому что стандарт, включающий в себя наблюдение за поведением частичных разрядов, имеет сильную степень корреляции с ухудшением условий их изоляции. Таким образом, посредством информации, содержащейся в полученных сигналах, извлекаемой после адекватной цифровой обработки сигнала, можно получить оценку состояния обмоток наблюдаемого оборудования.

#### 2.1.1 Старение изоляции частичными разрядами

Нормальное или ускоренное старение изоляции, вызванное частичными разрядами и масляным загрязнением, вызывают изменения в динамических характеристиках системы, образованных металлической структурой трансформатора и его изоляцией. Учитывая тот факт, что частичные разряды вызваны неоднородностью в изоляции, загрязнении и перегрузке, электрические сигналы частичных разрядов, полученные этим процессом, могут быть подтверждены путем анализа распределения напряжения в фазе и его формы, которые необходимо диагностировать. Итак, установив хронологию измерений, можно смоделировать развитие этих проблем и спрогнозировать возможное нарушение изоляции, не допуская этого путем надлежащего вмешательства.

Частичный разряд представляет собой электрический импульс или электрический разряд, который возникает внутри изолирующего материала под электрическим полем. Этот импульс или разряд, лишь частично замыкает цепь между изолированными токопроводящими частями, отсюда и название, частичный разряд. Частичные разряды могут генерироваться различными

типами механизмов. В общем, это происходит из-за быстрого изменения конфигурации электрического поля, какой-то внутренней электрической активности в присутствии загрязнений или включений. Это изменение приводит к возникновению электрического тока, протекающего в проводнике, подключенном к внешней стороне устройства, что является наиболее распространенным эффектом и наиболее часто используется для измерения частичных разрядов.

Силовые трансформаторы относятся к более дорогому оборудованию энергосистемы. Таким образом, они также созданы и эксплуатируются в качестве наиболее надежного оборудования, которое необходимо для функционирования всей системы. Доказательством этого является наличие силовых трансформаторов с более чем 30-летней давностью. Однако эта репутация поддерживается за счет поддержания высокого качества, что включает в себя строгий контроль их состояния. Это очень необходимо, потому что трансформаторы являются стратегическими частями электрической системы, а неисправности в их работе могут вызывать огромные проблемы, такие как, прерывание питания для больших групп населения и для важных производственных секторов. Их разрушение может привести к повреждению другого оборудования, травмам у работников электроснабжения, загрязнению окружающей среды токсичными веществами, что приводит к штрафам, согласно природоохранному законодательству. Все эти проблемы представляют собой высокие затраты, которых можно избежать при надлежащем обслуживании, основанном на мониторинге состояния. В этом контексте, система изоляции трансформатора является критическим аспектом этого мониторинга.

Крупные силовые трансформаторы изолированы маслом, бумагой и фарфором (втулки). Масло, в общем, не имеет высокой степени очистки, что приводит к образованию частичных разрядов, вязанными такими примесями, как пузырьки газа (лунки) и твердые частицы (корона в жидкостях). Наличие на бумаге изоляционных полостей, является основной причиной частичных

разрядов, а износ, вследствие присутствия влаги и даже действия частичной разрядки, ведет к уменьшению ее диэлектрических свойств. Таким образом, не только старение элементов системы изоляции способствует активности частичных разрядов в трансформаторах, но и несоблюдение конструкции или эксплуатации оборудования, может привести к повреждению, поскольку загрязнение в масле, приводит к увеличению интенсивности разрядов и сокращение срока службы.

Поэтому, зная, как частичные разряды появляются не только в определенной точке, но и во многих точках внутри трансформатора, и зная его поведение во времени, можно сделать вывод о состоянии контролируемого трансформатора и даже предугадать потенциальные сбои, что ведёт за собой, значительную экономию затрат на техническое обслуживание.

В целом, в зависимости от того, как проявляется частичная разрядка, можно сделать вывод не только о серьезности проблемы и ее возможных причинах. Частичные разряды происходят преимущественно в первой и третьей четверти цикла напряжения. В этих четвертях происходит значительный рост напряжения. Электрическая система, образованная проводами и изоляцией, действует как конденсатор, нагружаемый до точки, в которой начинают появляться частичные разряды. Они могут быть измерены как импульсы напряжения высокой частоты и низкой интенсивности. В первой четверти напряжения, разрядный цикл приводит к отрицательному импульсу (или вниз). Это называется частичным разрядом отрицательной полярности. В третьей четверти цикла частичный разряд приводит к импульсному движению вверх или к положительному, называемому, частичным разрядом положительной полярности. Эти импульсы имеют значение от милливольт до нескольких вольт. Хотя они появляются как импульс для каждой четверти цикла, на самом деле, они появляются в больших количествах, являясь количественной оценкой в пределах цикла коммутации, измеряемых параметрами.

В общем случае частичный разряд имеет продолжительность не более одного или двух наносекунд. Однако сигнал, обнаруженный вне тестируемого

оборудования, зависит от характера соединения между точкой, в которой возникает частичный разряд и снаружи. В хорошем состоянии (в случае коаксиальных кабелей с изоляцией SF6) потерь очень мало (из-за хорошего отклика на высоких частотах), сигнал, обнаруженный за рубежом, сохраняется почти неизменным, так как он будет испытывать незначительное затухание или рассеяние. Но бывают случаи, когда происходят серьезные изменения в форме кривой из-за огромных потерь на высоких частотах и из-за сложности соединения между местами, где частичный разряд и внешнее, внутреннее обнаружение для каждого типа тестируемого оборудования.

### 2.1.2 Дискретное волновое преобразование

Дискретное волновое преобразование является формой расширения. Основное различие для большинства расширений заключается в организации их коэффициентов, которые меняются в зависимости от двух параметров, а не только одного, как в рядах Фурье.

Функции формируют базу волновых сигналов, которые могут быть организованы для формирования ортогональных множеств. Коэффициенты дискретного волнового преобразования расположены на разных уровнях, которые представляют различные разрешения или масштабы, и заданы как функция времени. Получение этих коэффициентов можно интерпретировать через корреляцию, между знаком и функциями базы, усиливая концепцию мультиразрешения.

Элементарная волна возбуждения, представляют собой, формы волны ограниченной продолжительности, среднее значение, равное нулю, и единичный стандарт. Эти сигналы концентрируют свою энергию во времени, что дает возможность использовать в системах расширения для нестационарного анализа, то есть, для анализа, где сигнал не стационарен или нестационарные компоненты имеют (переходный режим).

Использование всплесков в качестве набора расширений - это то, что обычно называют системой Вейвлета. Этот набор расширений не является

уникальным, как, например, случай разложения в ряд Фурье, который формируется только сложными экспонентами. На самом деле существует множество различных систем вейвлета, и их общие функции:

А) Может формировать набор «строительных блоков»: этот набор может использоваться для построения или представления знаков и функций;

Б) Обеспечивая частоту сигнала местоположения и времени, вейвлет-разложение представляет наибольшую часть энергии сигнала с небольшим коэффициентом;

С) Расчет коэффициентов разложения осуществляется эффективно;

Г) Вейвлет-системы или различные семейства вейвлетов имеют волновые формы, которые балансируют в зависимости между тем, как функции компактно расположены во времени или в пространстве (продолжительность) и насколько они мягкие;

Е) Мультиразрешение;

Е) Значение коэффициентов разложения быстро убывает до нуля;

Г) Способность выполнять более точное описание местоположения и разделение характеристик сигнала; коэффициенты всплеска представляют собой корреляцию между растяжением сигнала и вейвлета; «Растягивание», потому что вейвлет - волна ограниченной поддержки (ограниченная длительность), таким образом, коэффициенты представляют компоненты, которые сами по себе;

Н) Возможность определения вейвлет-систем «персонализированными» для конкретных приложений.

Существует линия исследований, в которой изучаются характеристики и система вейвлетов. В настоящем исследовании используются существующие системы, например семейство вейвлет Добеши.

Расширение составлено из «версий» материнских вейвлетов, масштабированных и смещенных во времени. Это означает, что имеется волна с форматом, определяемым характеристиками вейвлета (материнского вейвлета), и из него создается все расширение, изменяющее его положение во

времени или пространстве (независимая переменная) и изменяющее его диапазон, т.е. «растяжение» или «сжатие» формы волны. Шкала представляет собой параметр, обратно пропорциональный частоте.

### 2.1.3 Презентация предполагаемого устройства

Система состоит из преобразователей тока, с соответствующей полосой пропускания, основанной на технологии катушки Роговского, схемы формирования сигнала, схемы сбора данных измерения сигнала, схемы аналого-цифрового преобразования,

для высокой скорости и разрешения компьютера, для цифровой обработки и хранения переменных электрических величин, а также осуществляет интеллектуальную консолидацию данных, оценку и диагностику рабочего состояния оборудования. Техника обработки сигналов, которая дала важные результаты в обнаружении частичных разрядов - это метод, называемый вейвлет-преобразованием, который используется в этой разработке. Этот тип преобразования был также реализован в процессе разрушения основных характеристик, связанных с условиями изоляции трансформатора.

В ходе разработки, анализируется характеристика токового сигнала с учетом частичных разрядов, циркулирующих в корпусе оборудования, которые измеряются в конкретной точке соединения с землей.

### 2.1.4 Обнаружение частичных разрядов с использованием катушки Роговского

Используют датчик, основанный на эффекте Роговского, и вычислительную мощность дискретного вейвлет-преобразователя для обнаружения частичного разряда в трансформаторах.

Парциальные импульсы разряда генерируются на высоких частотах, но в зависимости от схемы, которая расположена от трансформатора до места, где он детектируется, могут иметь сглаживания, что значительно изменяет форму

волны и, особенно, их диапазон значительно уменьшает, вызывая импульсы малой амплитудой.

И еще, к проблеме с малыми амплитудами импульса, также должна быть добавлена проблема с шумом. На подстанции есть несколько источников шума, таких как радиоволны, электростатический разряд, короны, молния, в дополнение к тепловым шумам. Сама по себе аппаратура обнаружения сигналов, имеющая высокую пропускную способность для признаков частичных разрядов, также способствует загрязнению белым шумом. Таким образом, простой визуальный анализ сигнала, собранного, например, на клемме заземления трансформатора, может не выявить ничего, связанного с частичными разрядами. Поэтому важно использовать более точный анализ с использованием методов цифровой обработки сигналов.

Принимают во внимание наземные терминалы трансформатора, в качестве одного из путей, через который импульсы частичных разрядов, в виде электрического тока, может быть обнаружен. Для этого выбранный датчик, кроме того, что он способен обнаруживать высокочастотные токи, должен также обеспечивать хорошую электрическую изоляцию. Идеальным устройством для этой задачи является катушка Роговского.

#### 2.1.5 Состав катушки Роговского

Катушка Роговского должна состоять из круглой пластиковой формы, установленной таким образом, чтобы плотность распределения витков была равномерно распределена. Сечения должны также сохранять свои однородные области. Катушка должна быть установлена вокруг проводника, где измеряется ток. Напряжение, пропорциональное изменению тока, появляется между клеммами обмотки в соответствии с уравнением (3), где  $N$  связано с чувствительностью катушки. Таким образом, интегрируя этот сигнал напряжения, появляется требуемый токовый сигнал.

Катушка Роговского обладает большой чувствительностью к высоким частотам, а его конструкция обеспечивает отличную электрическую изоляцию.

Она также способна измерять высокие уровни тока, от нескольких сотен миллиампер до сотен тысяч ампер.

При установке катушки Роговского в клеммы заземления трансформатора, можно контролировать текущий сигнал в этой точке. Использование надлежащих методов обработки сигналов позволяет извлекать импульсы частичного разряда, которые в конечном итоге существуют в этих терминалах.

#### 2.1.6 Обработка сигнала

Учитывая характеристики импульсов частичного разряда, которые могут быть обнаружены в наземных терминалах трансформатора, он должен установить хорошую стратегию обработки сигналов, собранную с учетом всех затронутых проблем.

Основной методикой математической обработки сигналов, является дискретным вейвлет-преобразованием. Оно обеспечивает подавление шума и упрощает обнаружение переходных процессов. Подробное описание стратегии приводится ниже.

Разделение функций для частотных диапазонов может быть полезным, когда требуется снижение уровня сигнала. Для этого необходимо использовать обратное, дискретное вейвлет-преобразование. Обратное преобразование способно восстановить исходную функцию (или сигнал) из коэффициентов при преобразовании в обратном направлении. Однако, как и при дискретном вейвлет-преобразовании, двумерный набор коэффициентов, которые представляют разные знаки, составляющие исходный сигнал, может перестроить исходный сигнал (или его часть) путем простого выбора присвоенных коэффициентов.

Таким образом, если некоторые уровни разложения соответствуют паразитным сигналам, соответствующие коэффициенты могут падать и восстанавливать сигнал без шумовой части. Чтобы проиллюстрировать уменьшение шума, на рисунке 3 показан синусоидальный сигнал, загрязненный

белым шумом. Разложение этого четырехуровневого сигнала, показанного на рисунке 4, отмечаем, что коэффициенты уровней детализации содержат почти всю энергию шума.

Чтобы применить дискретное вейвлет-преобразование к знаку, содержащему относительно высокую частоту перехода, исходный сигнал разделяется на различные уровни (или диапазоны частот, как объяснялось ранее), отделяя стационарный сигнал и переходный сигнал. Правильная восстановление уровней, содержащих переходный процесс, позволяет просматривать его и определять, когда и как долго оно продолжалось.

Важный факт, который нужно учитывать, состоит в том, что тот же знак, где вы хотите найти импульсы частичного разряда, также подвергся шумоподавлению, используя дискретное вейвлет-преобразование. В этом случае, если этот процесс не выполняется правильно, импульсы, которые вы хотите найти, могут быть устранены вместе с шумом, так как они имеют очень малую амплитуду, почти полностью погруженными в шум.

Таким образом, удаление шума с использованием дискретного вейвлет-преобразования, в сочетании с поиском соответствующих импульсов частичного разряда, во многом зависит от выбора формы волны вейвлета, которая должна быть хорошо коррелирована с импульсом. Это заставляет коэффициенты, связанные с вашими запястьями, иметь более высокие значения и оставаться выше порогового снижения шума.

#### 2.1.7 Предлагаемое устройство

Разработанное оборудование, показанное на рисунке 6, использует методику сбора сигналов, которая исследует эффект связи катушки Роговского, чтобы минимизировать шум и уделить особое внимание признакам частичных разрядов. Кондиционирование подсистем (микрокомпьютер, система закупок, аккумулятор, фильтры, интегратор зондов Rogowski) прогнозировало полное экранирование, чтобы минимизировать помехи, характерные для измерительной области.

В эту версию программы добавлен графический интерфейс пользователя (ГИП), предназначенный для облегчения его обработки, а также для более интуитивного анализа собранных сигналов.

В области 4 пользователь выбирает вейвлет и количество уровней разложения дискретного вейвлет-преобразования для применения к сигналу. Пороговое значение указывается парой красных линий, разделяющих каждый график коэффициентов, показанных на графиках области 2. Когда пользователь воздействует на кнопки порога, эти красные линии замыкаются на коэффициентах, так что часть сигнала между ними считается шумом, и алгоритм удаляет его.

В области 5 пользователь выбирает параметры поиска переходных сигналов. Этот алгоритм также использует технологию вейвлета и, следовательно, зависит от выбора вейвлета и количества уровней разложения, которые будут использоваться. Кроме того, чтобы сделать выборочный поиск, необходимо предоставить пороговое значение усиления. Это означает, что если значение выше, то наибольшие амплитуды выбирают переходный процесс. Например, помимо визуализации волновой формы переходного процесса, пользователь может видеть положение в исходном сигнале»[30].

## **2.2 Принципы проектирования интеллектуальной подстанции**

«По сравнению с обычной ТП, существуют большие различия в интеллектуальной структуре подстанции. Вторичная система интеллектуальной подстанции обычно содержит электронный трансформатор, объединяющий блок (MU), выключатель, защиту, устройства мониторинга и т.д.

Комплексный кабель, соединяющий трансформаторы, защиту и автоматический

выключатель был заменен на оптоволоконный. Входящие значения напряжения и тока защиты и устройство управления преобразуют из аналоговых сигналов в цифровые сигналы. Аналоговый сигнал защиты и дисплей поставляется в виде объединенного блока вместо самого устройства.

Эти преобразования увеличивают время на синхронизацию интеллектуальной системы подстанции.

Обычные трансформаторные подстанции принимают сгруппированные сигналы датчиков. Вне зависимости от задержки передачи для данного устройства, первичные и вторичные электрические параметры, релейной защиты устройства и другие устройства автоматизации могут обеспечить одновременность выборки данных путем выборки соответствующих  $T_A$ ,  $T_V$  вторичные параметры в определенный момент времени, в соответствии импульса выборки.

После того, как с помощью электронного прибора трансформатор, модуль сбора данных реле, устройства защиты и других устройств автоматизации двигаться вперед к объединяющему устройству. После этого первичные электрические параметры катушки взаимной индуктивности поступают для выборки входного модуля и обработки присоединяемого блока. Сбор и обработка каждой катушки взаимной индуктивности является независимым и не имеет единой координации. А задержка передачи первичных и вторичных электрических параметров, приводит к задержке времени.

Итак, вторичные электрические параметры не имеют синхронности между различными трансформаторами и, следовательно, не могут быть непосредственно использованы для расчета автоматического устройства. Высокая точность синхронизация часов может быть использован, чтобы убедиться, что каждый блок объединения осуществляет сбор данных в определенный интервал времени. Синхронизация часов стала важной частью релейной защиты, и его производительность влияет на нормальную работу релейной защиты.

По требованию интеллектуальной подстанции, этот отчет представляет интеллектуальную синхронизацию времени подстанции. Технология, выдвигает принцип синхронизации системы по времени. Затем, анализируются примеры неисправности подстанции, вызванные синхронизации времени неисправность и дает соответствующую команду системе.

Принципы проектирования синхронизации системы по времени.

Для обеспечения надежности работы системы синхронизации по времени, проектирование интеллектуальной системы синхронизации по времени подстанции должны следовать следующим принципам.

Дублирующие конфигурации с GPS и Компас.

Система поддерживает дублирующие часы GPS и компас и горячий резерва IRIG-B, и часы, настроенные с высокой точностью. Прибор, настраивающий синхронизацию часов, может получить доступ к GPS + компас и сигнал от двух внешних линий синхронизатора IRIG-B. Оба сигнала действуют в качестве взаиморезервирования. Для синхронизации времени усилитель имеет доступ к двум линиям IRIG-B, которые выступают в качестве взаиморезервирования. Резервирующая конфигурация может поддерживать высокую надежность и стабильность работы системы синхронизации времени.

Высокая стабильность автоматической самосинхронизации.

Система принимает информацию от рубидиевых атомных часов для самостоятельного поддержания синхронизации с высокой точностью. Точность самостоятельного поддержания синхронизации рубидиевых атомных часов может достигать 3 мкс/ день, что гораздо лучше, чем стандартное требование 55 мкс / день. Система принимает синхронизации управления с обратной связью самостоятельно поддерживать теорию и технологию цифровой фильтрации Калмана и использует внешний источник эталонного времени для управления рубидиевых часов. 1PPS сигнал о том, что система выводит достигаются с частотным разделением внутреннего источника частоты. Они синхронизированы с долгосрочным средним сигналом 1PPS, что при выходе за пределы, дает второй импульс сигналов для перехода на внешнее эталонное время. Сигнал синхронизации времени имеет очень высокую точность и стабильность, с точностью до  $\pm 0,1$  мкс.

Непрерывность скачкообразного изменения во времени.

Часовой контроллер и усилитель сигналов синхронизируются самостоятельно по уставке. Часовой контроллер осуществляет синхронизацию с внешнего опорного сигнала, когда синхронизация самостоятельно поддерживается приемными блоками, внешней уставкой по времени. После этого сохраняется определенный уровень точности времени, чтобы гарантировать точность входного сигнала синхронизации времени, когда блоки не могут получить эталонный сигнал времени от внешнего источника. Когда восстанавливается внешний эталонный сигнал времени, стандартное время синхронизации часового контроллера и переключения усилителя сигнала к нормальному режиму работы, составляет менее 0,5 с. Система принимает меры поэтапного перехода во время переключения, для поддержания непрерывности времени скачкообразной перестройки и предотвращения ложного срабатывания.

Время сигнала с единым выходом.

Внутренняя задержка времени возникает при попытке синхронизации локальных PPS с внешним источником информации. Технология опережения времени может быть использована для преодоления задержки. Каждый выходной канал имеет свою собственную компенсацию задержки. Как правило, система синхронизации времени может реализовать синхронизацию с различными видами портов, таких как RS232, RS485, оптический порт, порт электроэнергии и сетевой порт, все из которых имеют различную временную задержку. С технологией опережения времени выходные сигналы, различных портов, могут реализовать синхронизацию с тем же внешним источником тактового сигнала. Multi-порт опережения времени может использовать различные уставки задержки в соответствии с внутренним стандартом PPS и конфигураций сигнальных каналов. Это дает устройствам полностью реализовать синхронизацию с внешним источником синхронизации, преодолевает сдвига между всеми выходными платами, а также усиливает мгновенность и стабильность системы.

Схема резервирования электроснабжения.

Силовой модуль реализован в виде платы, принимает резервирование двойного источника питания и имеет широкий диапазон постоянного и переменного тока. Если одна часть источника питания выходит из строя, другие по-прежнему могут поддерживать энергию, что позволяет сделать горячую замену.

ШИМ - выпрямитель с регулированием коэффициента мощности, имеет следующие преимущества: высокий коэффициент мощности, низкое гармоническое содержание тока на стороне сетки, двунаправленная передача энергии и т. д., широко используется в приводах переменного тока, для компенсации реактивной мощности, фильтра активной мощности, унифицированного управления потоком мощности, а также бесперебойного электропитание и т. д.

В настоящем документе представлена топология трехфазного выпрямителя ШИМ и описывается метод управления выпрямителем в трехфазной статической системе координат. На основе анализа преимуществ и недостатков этого метода управления, предложен метод управления в двухфазной синхронной вращающейся системе координат. Затем устанавливается математическая модель трехфазного выпрямителя ШИМ в координатах  $d$ ,  $q$  и реализуется единый контроль активного тока и относительного тока»[28].

### **2.3 Разработка структуры, системы автоматического удержания коэффициента мощности**

Устройство предназначено для электротехнических систем и комплексов. Оно обеспечивает быстродействующую компенсацию реактивной мощности и стабилизацию трехфазного синусоидального напряжения в системах энергоснабжения промышленных предприятий, объектов агропромышленного и оборонного комплексов, городского жилищно-коммунального хозяйства и электрифицированного транспорта. Система содержит вольтодобавочный трансформатор, вторичная обмотка которого соединяется через реверсивный

выпрямитель, фильтр и двухмостовой инвертор напряжения подключена к нагрузке, а его первичная обмотка соединена последовательно с первичной обмоткой главного трансформатора подстанции. В автоматической системе для выравнивания  $U$  на нагрузке применено смешанное регулирование добавочного высоковольтного напряжения (амплитудное и широтно-импульсное). Широтно-импульсное регулирование реализовано двухмостовым инвертором напряжения в функции отклонения напряжения на нагрузке, а амплитудное - реверсивным выпрямителем в функции отклонения напряжения сети или нагрузки. Компенсация РМ сети осуществляется дискретным и плавным путем. Дискретная ступень представлена в виде батареи косинусных конденсаторов на зажимах сети и/или фильтрокомпенсирующие цепи на зажимах нагрузки. Ступень плавного регулирования потребляемой или генерируемой реактивной мощности организована двухмостовым инвертором путем отстающего или опережающего регулирования фазы его выходного напряжения в функции реактивной мощности сети. Предлагаемую систему отличают улучшенное качество выходного напряжения и входного тока, высокие энергетические показатели и быстродействие, что является техническим результатом.

Устройство относится к энергетической электронике и может быть использовано для компенсации реактивной мощности на входе и стабилизации напряжения на выходе трансформаторной подстанции.

За прототип взята система автоматической компенсации отклонений напряжения трансформаторной подстанции, которая содержит главный и вольтодобавочный трансформаторы и тиристорный преобразователь со звеном постоянного напряжения, в состав которого входят реверсивный выпрямитель, LC-фильтр и двухмостовой инвертор напряжения (Патент N 2117981 РФ, G 05 F 1/30, H 02 M 5/45, 20.08.98, Бюл. N 23). Обмотки главного трансформатора подстанции включены по схеме  $U/U_n$ . Вторичная обмотка вольтодобавочного трансформатора через тиристорный преобразователь подключена к нагрузке, а его первичная обмотка включена последовательно с первичной обмоткой главного трансформатора. Реверсивный выпрямитель работает с

фиксированными углами  $\alpha_{\text{в}}$  и  $\pi\alpha_{\text{в}}$ , прямого и обратного трехфазных мостов при формировании соответственно положительной и отрицательной вольтодобавки. Углы управления  $\alpha_{\text{и}}$  и  $\pi\alpha_{\text{и}}$  первым и вторым трехфазными мостами инвертора напряжения регулируются от 0 до 180 градусов.

В результате отдельного согласованного управления мостами выпрямителя с фиксированным  $\alpha_{\text{в}}$  и совместного согласованного управления мостами инвертора достигается широтно-импульсное регулирование вольтодобавки в шести поддиапазонах.

Это регулирование выходного напряжения производится вверх и вниз относительно напряжения сети без сдвига первой гармоники и со сравнительно высоким быстродействием.

К недостаткам известного устройства следует отнести низкие значения коэффициентов мощности и полезного действия трансформаторной подстанции, которые вызваны тем обстоятельством, что при наличии в прототипе потребителей реактивной мощности и источников мощности искажения в нем отсутствуют средства и элементы управления для компенсации этих составляющих полной мощности.

В известном устройстве имеются два источника нелинейных искажений, вызывающих потери активной мощности у потребителей, в сети, на элементах трансформаторной подстанции.

Во-первых, это искажения выходного напряжения, вносимые двухмостовым инвертором. Они имеют наибольшие значения при отсутствии амплитудного регулирования, особенно при изменении  $\alpha_{\text{и}}$  в пределах от 0 до 15 град. и от 165 до 180 град.

Во-вторых, это искажения тока на низкой и высокой стороне подстанции, обусловленные наличием реверсивного выпрямителя.

Кроме того, при работе подстанции в условиях резких качаний напряжения в сети и резкопеременном характере нагрузки возникают дополнительные искажения формы токов и качания их первых гармонических составляющих по фазе.

Задачей изобретения является повышение качества, эффективности потребления и использования электроэнергии.

В результате решения поставленной задачи улучшаются форма выходного напряжения и форма входного тока, повышаются коэффициенты мощности и полезного действия подстанции.

Решение поставленной задачи при неполной и нерегулируемой компенсации реактивной мощности сети достигается тем, что к входным зажимам реверсивного выпрямителя подключены фильтрокомпенсирующие цепи, система совместного согласованного управления двухмостовым инвертором напряжения выполнена с возможностью изменения угла управления в пределах от 15 до 165 град., а система отдельного согласованного управления реверсивным выпрямителем выполнена с ограничением минимального уровня выпрямленного напряжения и ее управляющий вход подключен к выходу того же датчика отклонения напряжения нагрузки или к выходу введенного датчика отклонения напряжения сети, а также тем, что реверсивный выпрямитель выполнен по мостовой схеме с искусственной коммутацией и с неизменным 120-градусным интервалом между углами включения и выключения каждого вентиля, синхронизирующий вход системы управления реверсивным выпрямителем подключен к нагрузке через одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов, выполненную с изменением направления регулирования фазы синхроимпульсов относительно напряжения нагрузки по знаку управляющего сигнала или знаку выпрямленного тока, а управляющий вход одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов подключен к выходу датчика отклонения напряжения нагрузки или датчика отклонения напряжения сети.

Решение поставленной задачи при достижении полной компенсации реактивной мощности подстанции с обеспечением высокого качества выходного напряжения и входного тока подстанции достигается тем, что в входным зажимам трансформаторной подстанции подключена батарея косинусных конденсаторов и синхронизирующий вход системы совместного

согласованного управления двухмостовым инвертором напряжения подключен к сети через дополнительную одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов, выполненную с возможностью изменения направления регулирования фазы относительно напряжения сети по знаку управляющего сигнала, а управляющий вход дополнительной одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов подключен к выходу введенного реверсивного датчика реактивной мощности сети, а также тем, что введен логический блок задания направления регулирования фазы, выход которого подключен к входу контроля одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов, а первый и второй его входы - соответственно к выходу реверсивного датчика реактивной мощности сети и к выходу датчика отклонения напряжения нагрузки.

На рисунках 17-20 приведены схемы предлагаемой системы, выполненные до уровня известных функциональных элементов. Схемы с управляемым реверсивным выпрямителем с естественной и искусственной коммутацией представлены на рисунках 17 и 18, а с добавлением к ним четырехквadrантного амплитудно-фазового регулирования - на рисунках 19 и 20. На рисунке 16 представлена векторная диаграмма токов и напряжений, иллюстрирующая работу системы при R- и RL-нагрузках.

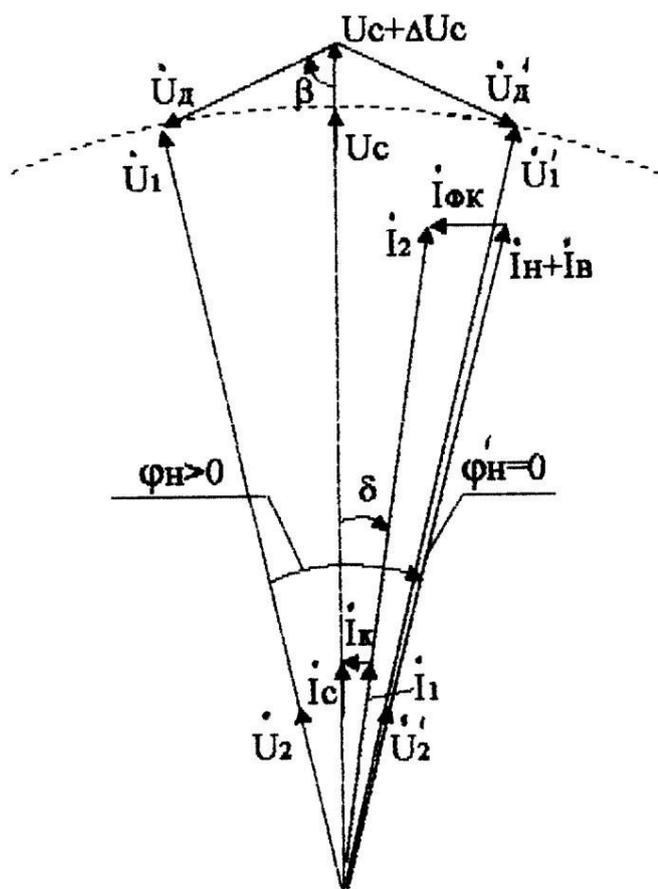


Рисунок 16 – Векторная диаграмма

На векторной диаграмме (рисунок 16) показаны следующие обозначения:  $\dot{U}_C$  и  $\Delta\dot{U}_C$  - напряжение сети и его отклонение от номинального уровня;  $\dot{U}'_1$  и  $\dot{U}_1$  - напряжение на первичной обмотке главного трансформатора при RL- и R-нагрузке соответственно;  $\dot{U}'_2$  и  $\dot{U}_2$  - напряжение на вторичной обмотке главного трансформатора при RL- и R-нагрузке соответственно;  $\dot{U}'_д$  и  $\dot{U}_д$  - добавочное напряжение трансформатора при RL- и R-нагрузке;  $\varphi_H$  и  $\varphi'_H$  - фаза тока нагрузки при RL- и R-нагрузке;  $\beta$  - фаза добавочного напряжения;  $\dot{I}_C = \dot{I}_1 + \dot{I}_K$  - ток сети и его составляющие (ток первичной цепи и конденсаторной батареи);  $\dot{I}_2 = \dot{I}_H + \dot{I}_B + \dot{I}_{\Phi K}$  - ток вторичной цепи и его составляющие (ток нагрузки, выпрямителя и первой гармоники фильтрокомпенсирующих цепей).

Система автоматической компенсации реактивной мощности и отклонений напряжения трансформаторной подстанции (рисунок 17, 18, 19 и 20) содержит следующие элементы: главный и вольтодобавочный трансформаторы 1 и 2, двухмостовой инвертор напряжения 3 с системой совместного согласованного управления 4, мостовой реверсивный выпрямитель 5 с системой управления 6, фильтр 7, фильтрокомпенсирующие цепи 8, датчики отклонения напряжения нагрузки 9 и сети 10, сеть 11 и нагрузку 12, одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов 13, дополнительную одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов 14, реверсивный датчик реактивной мощности 15, батарею косинусных конденсаторов 16, логический блок задания направления регулирования фазы синхроимпульсов 17.

Элементы схемы (рисунок 17) соединены следующим образом.

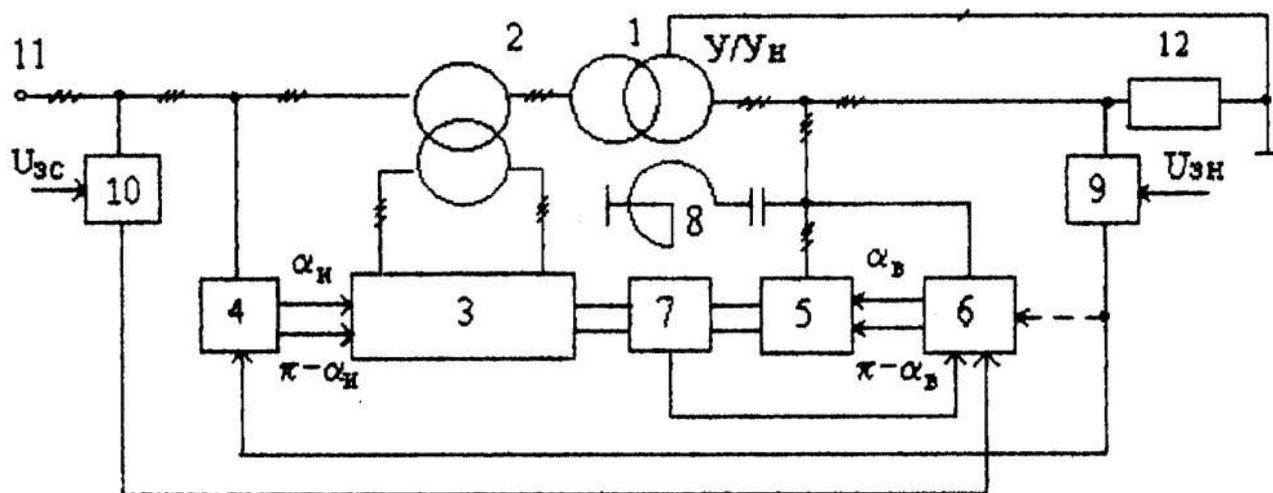


Рисунок 17 – Первая схема с управляемым реверсивным выпрямителем с естественной и искусственной коммутацией

Обмотки главного трансформатора 1 соединены по схемам У/У<sub>н</sub>. Вторичная обмотка вольтодобавочного трансформатора 2 пофазно подключена к выходу тиристорного преобразователя со звеном постоянного напряжения, вход которого подключен к нагрузке 12. Первичные обмотки главного и вольтодобавочного трансформаторов 1 и 2 соединены последовательно и подключены к сети 11. В тиристорном преобразователе между выходом

реверсивного выпрямителя 5 и входом двухмостового инвертора напряжения 3 включен LC-фильтр 7 со встроенным в него датчиком направления входного тока инвертора, а выход этого датчика подключен к системе раздельного согласованного управления 6 мостами реверсивного выпрямителя 5. К входным зажимам реверсивного выпрямителя 5 подключены фильтрокомпенсирующие цепи 8 и синхронизирующий вход его системы раздельного согласованного управления 6. Синхронизирующий вход системы совместного согласованного управления 4 двухмостовым инвертором напряжения 3 подключен к сети 11. Выход датчика 9 отклонения напряжения нагрузки подключен к управляющему входу системы управления 4 двухмостовым инвертором напряжения 3, а управляющий вход системы управления 6 реверсивным выпрямителем 5 подключен к выходу датчика 10 отклонения напряжения сети 11.

На рисунке 18, 19 и 20 введены дополнительные элементы и связи между ними. На рисунке 17 синхронизирующий вход системы раздельного согласованного управления 6 через одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов 17 подключен к нагрузке 12.

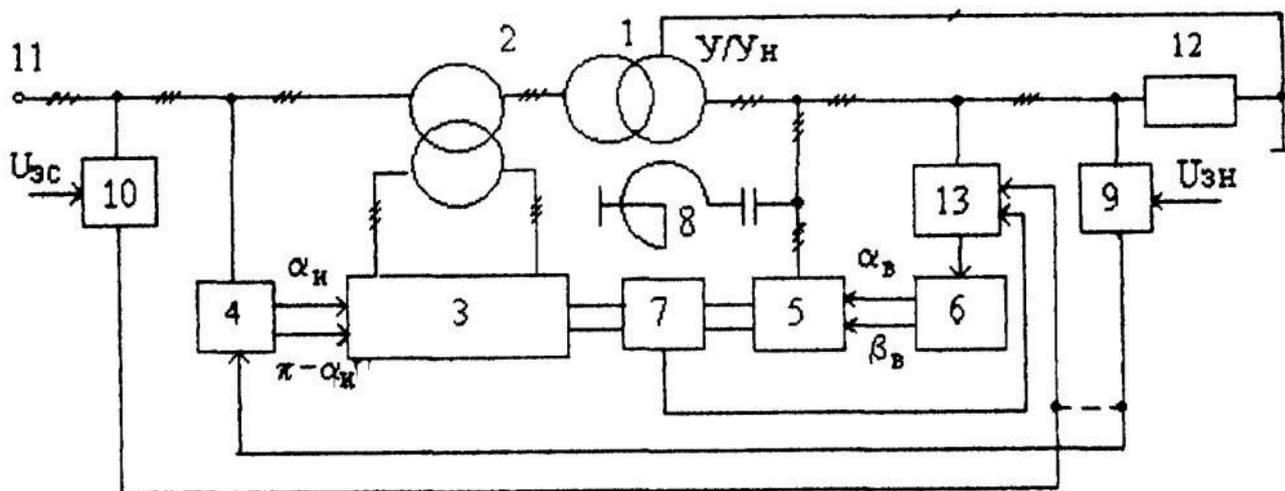


Рисунок 18- Вторая схема с управляемым реверсивным выпрямителем с естественной и искусственной коммутацией

На рисунке 19 синхронизирующий вход системы совместного согласованного управления 4 через дополнительную одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов 14 подключен к сети, к которой также подключены введенная батарея косинусных конденсаторов 16 и реверсивный датчик 15 реактивной мощности сети, выход которого подключен к управляющему входу дополнительной одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов 14.

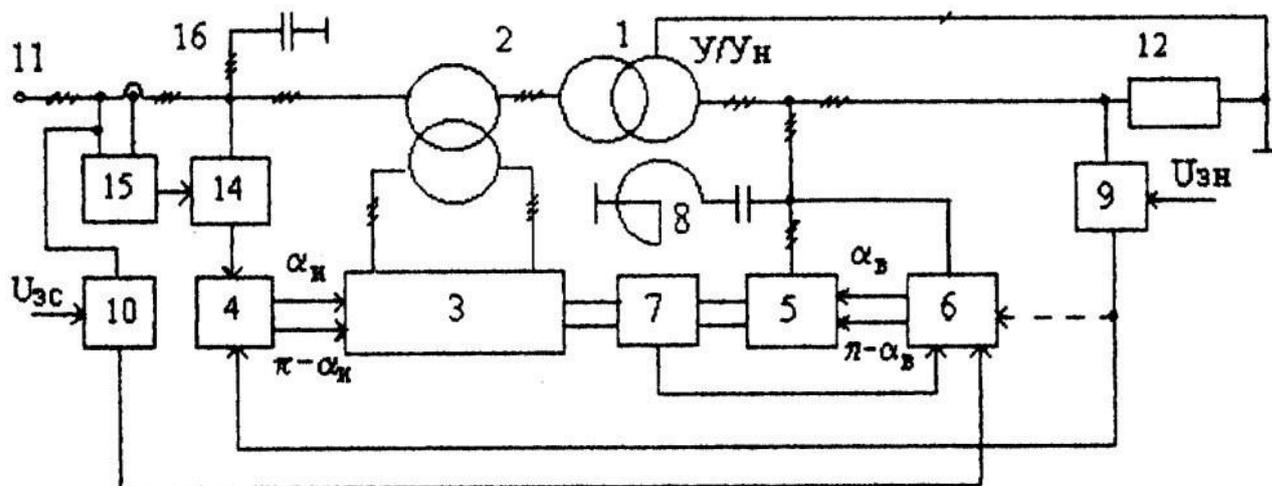


Рисунок 19- Первая схема с добавлением четырехквadrантного амплитудно-фазового регулирования

На рисунке 20 выход логического блока задания направления регулирования фазы 17 подключен к входу контроля одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов 13, а первый и второй его входы - соответственно к выходу реверсивного датчика 15 реактивной мощности сети 11 и к выходу датчика 9 отклонения напряжения нагрузки 12.

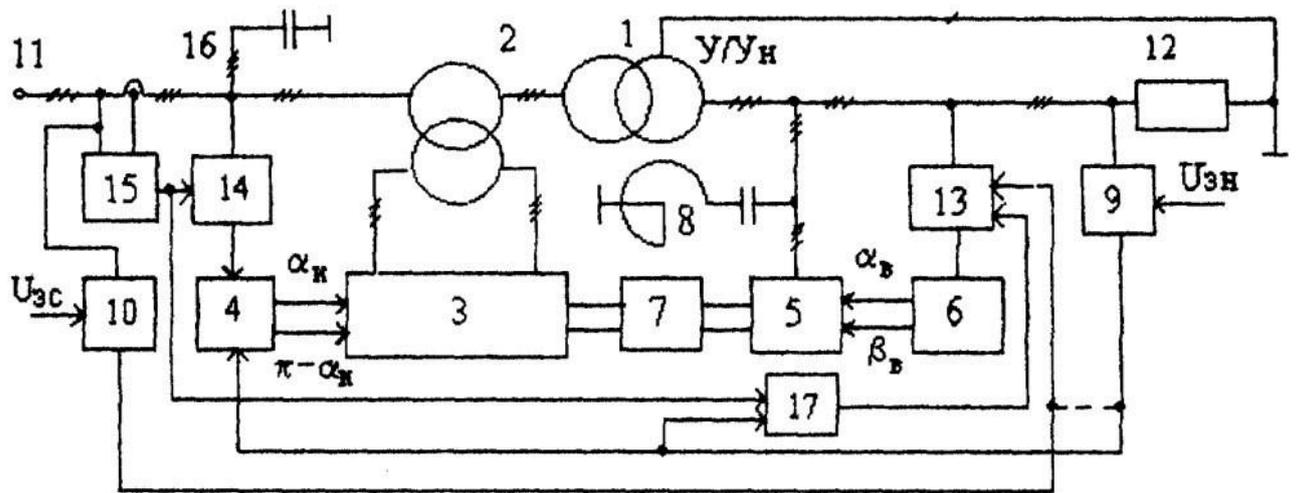


Рисунок 20- Вторая схема с добавлением четырехквadrантного амплитудно-фазового регулирования

Принцип действия предлагаемой системы основан на суммировании напряжения сети с модулированным добавочным напряжением и четырехквadrантном векторном формировании добавочного напряжения при помощи тиристорного преобразования амплитуды и фазы со звеном постоянного напряжения.

Вектор действующего значения первой гармоники модулированного добавочного напряжения формируется из напряжения нагрузки  $U_2$  и определяется выражением:

$$\dot{U}_D = \left( \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \cos \alpha_B \right) \cdot \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \cos \alpha_{II} \right) \cdot k_{BT} \cdot U_2 \cdot e^{j\beta_{II}}, \quad (2.1)$$

где  $\alpha_B$ ,  $\alpha_{II}$  - углы управления тиристорами реверсивного выпрямителя и двухмостового инвертора напряжения;  $\beta_{II}$  - фаза выходного напряжения двухмостового инвертора;  $k_{BT}$  - коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора.

Здесь при учете падения напряжения в тиристорном преобразователе и условия ограничения начального и конечного значений  $\alpha_{II}$  на 15 град. будем полагать, что

$$\frac{6\sqrt{12}}{\pi^2} \cdot \cos \alpha_H = 2,106 \cdot \cos \alpha_H \approx 2 \cdot \cos \alpha_H,$$

и тогда выражение (2.1) запишется в виде

$$\dot{U}_D = 2 \cdot \cos \alpha_H \cdot \cos \alpha_B \cdot \kappa_{BT} \cdot U_2 \cdot e^{j\beta_H}. \quad (2.2)$$

Напряжение  $U_I$  на первичной обмотке главного трансформатора определяется суммой напряжения сети  $U_C$  и добавочного напряжения  $U_D$ :

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_C + \dot{U}_D = \dot{U}_C + 2 \cdot \kappa_{BT} \cdot U_2 \cdot \cos \alpha_H \cdot |\cos \alpha_B| \cdot e^{j\beta_H}. \quad (2.3)$$

Главный трансформатор 1, уменьшая свое входное напряжение  $U_I$  в коэффициент трансформации  $k_{ГТ}$  раз, формирует напряжение нагрузки:

$$\dot{U}_2 = \frac{U_1}{k_{ГТ}} = \frac{U_C}{k_{ГТ}} + \frac{\kappa_{BT}}{k_{ГТ}} \cdot 2 \cdot U_2 \cdot \cos \alpha_H \cdot |\cos \alpha_B| \cdot e^{j\beta_H},$$

или с учетом отклонений напряжения в сети  $\pm \Delta U_C$  и падения напряжения  $\Delta UK$  на трансформаторах окончательно получим:

$$\dot{U}_2 = \frac{U_C \pm \Delta U_C - \Delta UK}{k_{ГТ} - 2 \cdot \kappa_{BT} \cdot \cos \alpha_H \cdot |\cos \alpha_B| \cdot \exp(j \cdot \beta)}. \quad (2.4)$$

Из выражения (4) и диаграммы (рисунок 16) видно, что при изменении  $\alpha_u$ ,  $\beta_u$  и  $\alpha_v$  вектор  $\dot{U}_2$  регулируется по амплитуде и фазе. Регулирование амплитуды  $U_2$  обеспечивает компенсацию отклонений напряжения, вызванных изменениями напряжения в сети  $\pm \Delta U_C$ , а также изменениями величины и характера нагрузки, выраженными вектором  $\Delta UK$ .

Регулирование фазы вектора напряжения  $\dot{U}_2$  в сторону опережения при RL-нагрузке и в сторону отставания при R-нагрузке позволяет совместно с фильтрокомпенсирующими цепями 8 обеспечить ориентацию вектора тока вторичной цепи подстанции  $\dot{I}_2$  практически на неизменную величину угла  $\delta$  относительно напряжения сети  $\dot{U}_C$  и при необходимости с применением в первичной цепи батареи косинусных конденсаторов 16 обеспечить полную компенсацию реактивной мощности на входных зажимах подстанции.

Ток вторичной цепи  $\dot{I}_2$  (рисунок 12) складывается из тока нагрузки  $\dot{I}_H$  с током реверсивного выпрямителя  $\dot{I}_B$  и первой гармоники тока фильтрокомпенсирующих цепей  $\dot{I}_{ФК}$  :

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_H + \dot{I}_B + \dot{I}_{ФК}. \quad (2.5)$$

При использовании в устройстве реверсивного выпрямителя 5 с искусственной коммутацией фазу вектора тока  $\dot{I}_B$  можно регулировать углами включения и выключения тиристоров (см. п. 2.2 формулы), сохраняя при этом между ними интервал 120 град. В режиме вольтодобавки фазу тока  $\dot{I}_B$  целесообразно регулировать в сторону опережения, а в режиме вольтовычета - в сторону отставания относительно синхронизирующего напряжения  $\dot{U}_2$ . Это дополняет решение задачи компенсации реактивной мощности, уменьшает искажения тока, потребляемого выпрямителем из вторичной цепи подстанции (облегчает фильтрокомпенсирующие цепи 8), и уменьшает искажения выходного напряжения.

При управлении углом  $\beta$  в функции реактивной мощности сети, а углами  $\alpha_H$  и  $\alpha_B$  в функции отклонения напряжения нагрузки (см. п. 2.3 формулы) вектор напряжения  $\dot{U}_1$  является радиусом заданной окружности, а фаза тока сети равна нулю (рисунок 16). Это позволяет в одном устройстве совместить

две взаимно дополняющие друг друга функции - стабилизировать напряжение нагрузки и компенсировать реактивную мощность сети.

При совмещении п. 5.2 и п. 5.3 формулы вопрос рационального регулирования фазы тока выпрямителя  $\dot{I}_B$  может быть решен при помощи логического блока 17 задания направления регулирования фазы синхроимпульсов (см. п. 2.4 формулы) по совпадению знаков выходных сигналов с датчиков обратной связи в процессе четырехквadrантного формирования вектора  $\dot{U}_d$ .

Предлагаемое устройство отличают высокое быстродействие, улучшенная форма входного тока и выходного напряжения. Оно, как более совершенное, может заменить в системах электроснабжения известные устройства автоматической компенсации реактивной мощности и стабилизации трехфазного напряжения.

1. Система автоматической компенсации реактивной мощности и отклонений напряжения трансформаторной подстанции, содержащая главный и вольтодобавочный трансформаторы, первичные обмотки которых соединены последовательно и подключены к входным зажимам трансформаторной подстанции, предназначенным для подключения сети, вторичная обмотка главного трансформатора подключена к нагрузке, к которой также через реверсивный выпрямитель, фильтр и двухмостовой инвертор напряжения подключена вторичная обмотка вольтодобавочного трансформатора, при этом в реверсивном выпрямителе применена синхронизированная с напряжением нагрузки система отдельного согласованного управления с переключением мостов по знаку тока через фильтр, а в двухмостовом инверторе напряжения - синхронизированная с напряжением сети система совместного согласованного управления с управляющим входом. Данный вход подключается к выходу датчика отклонения напряжения нагрузки, отличающийся тем, что к входным зажимам реверсивного выпрямителя подключены фильтрокомпенсирующие цепи. Система совместного согласованного управления двухмостовым

инвертором напряжения выполнена с изменяющимся углом управления в пределах от 10 до 160°, а система отдельного согласованного управления реверсивным выпрямителем выполнена с ограничением минимального уровня выпрямленного напряжения. Её управляющий вход подключен к выходу того же датчика отклонения напряжения нагрузки или к выходу вновь введенного датчика отклонения напряжения сети.

2. Система автоматической компенсации по п.1, отличающаяся тем, что реверсивный выпрямитель выполнен по мостовой схеме с искусственной коммутацией и с неизменным 120-градусным интервалом между углами включения и выключения каждого вентиля, синхронизирующий вход системы управления реверсивным выпрямителем подключен к нагрузке через одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов, выполненную с изменением направления регулирования фазы синхроимпульсов относительно напряжения нагрузки по знаку управляющего сигнала или знаку выпрямленного тока, а управляющий вход одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов подключен к выходу датчика отклонения напряжения нагрузки или датчика отклонения напряжения сети.

3. Система автоматической компенсации по п.1, отличающаяся тем, что к входным зажимам трансформаторной подстанции подключена батарея косинусных конденсаторов и синхронизирующий вход системы совместного согласованного управления двухмостовым инвертором напряжения подключен к сети через дополнительную одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов, выполненную с возможностью изменения направления регулирования фазы относительно напряжения сети по знаку управляющего сигнала, а управляющий вход дополнительной одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов подключен к выходу вновь введенного реверсивного датчика реактивной мощности сети.

4. Система автоматической компенсации по п.2, отличающаяся тем, что к входным зажимам трансформаторной подстанции подключена батарея косинусных конденсаторов и синхронизирующий вход системы совместного

согласованного управления двухмостовым инвертором напряжения подключен к сети через дополнительную одноканальную систему регулирования фазы синхроимпульсов, выполненную с возможностью изменения направления регулирования фазы относительно напряжения сети по знаку управляющего сигнала, а управляющий вход дополнительной одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов подключен к выходу вновь введенного реверсивного датчика реактивной мощности сети.

5. Система автоматической компенсации по п.4, отличающаяся тем, что введен логический блок задания направления регулирования фазы, выход которого подключен к входу контроля одноканальной системы регулирования фазы синхроимпульсов, а первый и второй его входы соответственно к выходу реверсивного датчика реактивной мощности сети и к выходу датчика отклонения напряжения нагрузки.

#### **2.4 Пример использования АКРМ в механосборочном цехе на ООО «Тольяттинский трансформатор»**

Участок механосборочного цеха (УМЦ) предназначен для выпуска устройства РПН для трансформаторов.

Цех является составной частью производства трансформаторного завода.

Механосборочный цех предусматривает производственные, вспомогательные, служебные и бытовые помещения.

Механосборочный цех получает электроэнергию от собственной цеховой трансформаторной подстанции (Т1), которая располагается на расстоянии 0,7 км от главной понизительной подстанции (ГПП 2) завода.

ГПП 2 подключена к энергосистеме, расположенной на расстоянии 8 км от завода.

Потребители электрической энергии относятся ко II и III категории надежности ЭСН.

Рабочий график распределен на две смены.

В районе цеха грунт глинистый с температурой +10 °С. Здание сооружено из блоков-секций длиной 6 и 8 м каждый.

Размеры участка А х П х Н - 50 х 30 х 9 м.

Все помещения, кроме станочного отделения, двухэтажные высотой 4,2 м

Мощность электропотребления ( $P_{эл}$ ) указана для одного электроприемника.

Графические зависимости изменения потребления активной энергии и реактивной энергии, УМЦ от времени суток, представлены на рисунке 21.

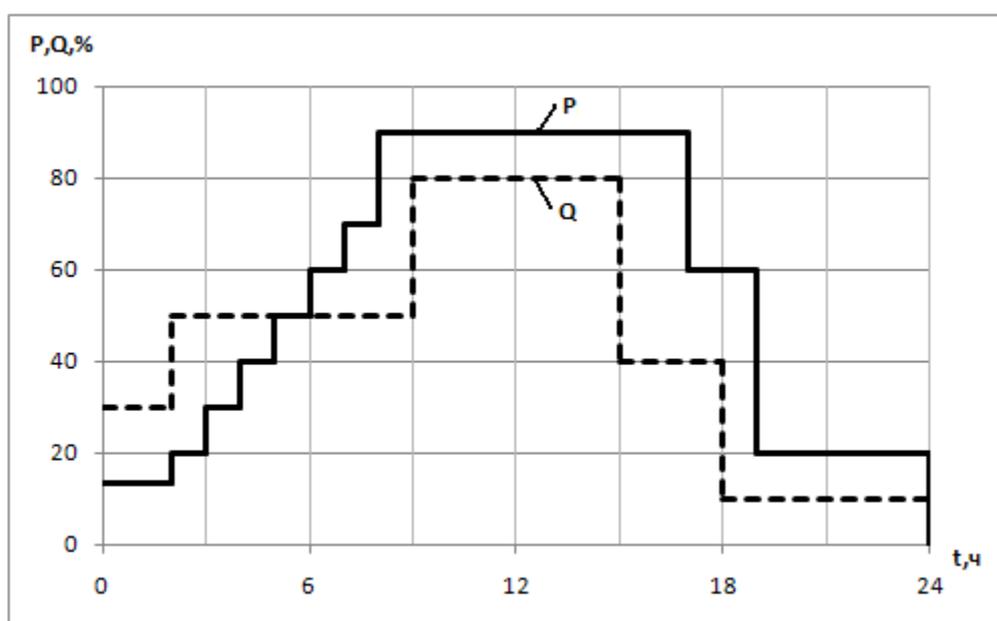


Рисунок 21- Зависимости изменения P , Q механосборочного цеха

## 2.5 Определение расчетной нагрузки цеха методом упорядоченных диаграмм (табличный метод).

Электрооборудование механосборочного цеха относится ко 2 категории надежности. «Электроприемники второй категории - электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей.

Электроприемники второй категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания.

Для электроприемников второй категории при нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады»[10].

ТП – двухтрансформаторная.

Статические электромагнитные устройства стоят однотипные, равной мощности. Расчет выполняется методом упорядоченных диаграмм. Это основной метод расчета электрических нагрузок. По нему определяются расчетные нагрузки ( $P_p$ ,  $Q_p$ ,  $S_p$ ) группы электроприемников.

«Полная расчетная мощность группы силовых электроприемников определяется по формуле» [6, с. 5]:

$$P_p = P_{cp} \cdot k_p, \quad (2.1)$$

$$Q_p = Q_{cp} \cdot k'_p, \quad (2.2)$$

$$S_p = \sqrt{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2}, \quad (2.3)$$

где  $P_p$ ,  $Q_p$ -расчетная активная и реактивная нагрузка;  $S_p$  - полная расчетная нагрузка,  $k_p$ - расчетный коэффициент активной нагрузки;  $k'_p$ - расчетный коэффициент реактивной нагрузки, причем  $k'_p=1,1$ , если  $n_3 \leq 10$  и  $k'_p=1$ , если  $n_3 > 10$ .

Из-за разной мощности электроприёмников, затрудняется учёт ихнего влияния на формирование графика нагрузки. Чтобы избежать этой затруднительной ситуации, групп электрических приёмников разной мощности, меняют на группу ЭП одной мощности  $n_3$ .

Эффективное число электроприемников  $n_3$  определяется как:

$$n_3 = \frac{\sum_1^n P_{ном}^2}{\sum_1^n P_{ном}} \quad (2.4)$$

Найдем эффективное число электроприемников  $n_3$ :

$$n_3 = \frac{\left( 3 \cdot 2,2 + 3 \cdot 10 + 2 \cdot 14 + 3 \cdot 20,5 + 3 \cdot 25 + 2 \cdot 17,5 + \right. \\ \left. + 2 \cdot 7,5 + 2 \cdot 17 + 2 \cdot 13 + 2 \cdot 4 + 2 \cdot 4,5 + 2 \cdot 5 + 1 \cdot 16 + 2 \cdot 5 \right)^2}{23 \cdot 2,2^2 + 3 \cdot 10^2 + 2 \cdot 14^2 + 3 \cdot 25^2 + 2 \cdot 17,5^2 + 2 \cdot 7,5^2 + \\ + 2 \cdot 17^2 + 2 \cdot 13^2 + 2 \cdot 4^2 + 2 \cdot 4,5^2 + 2 \cdot 5^2 + 1 \cdot 16^2 + 2 \cdot 5^2} = 22,43 \quad (2.5)$$

Принимаем  $n_3=23$  штуки.

В приложение А представлены все электрические нагрузки механосборочного цеха.

Пример расчета первой строки.

Найдем суммарную активную мощность:

$$\sum P = P_{ном} \cdot n = 2,2 \cdot 3 \text{ кВт} \quad (2.6)$$

где  $n$ -количество станков.

Средняя активная мощность:

$$P_{cp} = k_u \cdot P_{ном} = 0,7 \cdot 6,6 = 4,62 \text{ кВт} \quad (2.7)$$

где  $k_u$ – коэффициент использования электроприемника.

Средняя реактивная мощность:

$$Q_{cp} = P_{cp} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 72 \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi) = 4,62 \cdot 1,732 = 8 \text{ кВАр} \quad (2.8)$$

Для осветительной нагрузки:

$$\sum P = F_{Ц} \cdot P_{уд.осв.} = 1,2 \text{ кВт} \quad (2.9)$$

На стороне обмотки низкого напряжения трансформатора найдем средний коэффициент использования:

$$k_{u,cp} = \frac{\sum P_{cp}}{\sum P_{ном}} = \frac{234,33}{365,30} = 0,64 \quad (2.10)$$

Средний коэффициент мощности на стороне низкого напряжения:

$$\cos \varphi_{средн} = 0,58 \quad (2.11)$$

Расчетный коэффициент на стороне низкого напряжения:

$$k_p = 1 + 2,6 \sqrt{k_u} \left( \frac{1}{k_u} - 1 \right) n_э^{-0,75} \quad (2.12)$$

$$k_p = 1 + 2,6 \sqrt{0,7} \left( \frac{1}{0,2} - 1 \right) \cdot 23^{-0,75} = 1,41 \quad (2.13)$$

Расчетная активная мощность на стороне низкого напряжения:

$$P_p = P_{cp} \cdot k_p = 4,62 \cdot 1,41 = 6,51 \text{ кВт} \quad (2.14)$$

Расчетная реактивная мощность на стороне низкого напряжения:

$$Q_p = Q_{cp} = 8 \text{ кВАр} \quad (2.15)$$

Т.к.  $n_3=23>10$ .

Расчетная полная мощность на стороне низкого напряжения:

$$S_p = \sqrt{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2} = 10,32 \text{ кВА} \quad (2.16)$$

Учитываем потери мощности в трансформаторе. На данном этапе определения мощности на стороне высокого напряжения мы еще не выбрали трансформатор, поэтому потери в трансформаторе берутся приближенно:

$$\Delta P = 0,02 \cdot S_p = 0,02 \cdot 452,48 = 9,05 \text{ кВт} \quad (2.17)$$

$$\Delta Q = 0,1 \cdot S_p = 0,1 \cdot 452,48 = 45,25 \text{ кВАр} \quad (2.18)$$

Полная мощность на стороне высокого напряжения:

$$P_{p.в} = P_p + \Delta P = 260,30 + 9,05 = 269,35 \text{ кВт} \quad (2.19)$$

$$Q_{p.в} = Q_p + \Delta Q = 370,12 + 45,25 = 415,37 \text{ кВАр} \quad (2.20)$$

$$S_{p.в} = \sqrt{P_{p.в}^2 + Q_{p.в}^2} = 495,05 \text{ кВА} \quad (2.21)$$

Коэффициент мощности на стороне высокого напряжения:

$$\cos \varphi = \frac{P_{p.в}}{S_{p.в}} = \frac{269,35}{495,05} = 0,54 \quad (2.22)$$

Для повышения коэффициента активной мощности до нормативного ( $\cos\varphi=0,93$ ) необходимо использовать устройство компенсации реактивной мощности.

$$Q_{P_6} = P_{p.6} \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi) = 269,35 \cdot 0,395 = 106,453 \text{ кВАр} \quad (2.23)$$

Мощность компенсирующих устройств:

$$Q = Q_{p.6} - Q_{P_6} = 415,37 - 106,453 = 308,92 \text{ кВАр} \quad (2.24)$$

## 2.6 Выбор компенсирующего устройства

По электронному каталогу производителя, выбираем компенсирующее устройство: 4х АУКРМ -0,4-75. АУКРМ -0,4-75 -это комплектная конденсаторная установка, оснащена 3-мя ступенями регулирования в автоматическом режиме, на  $U=0,4$  кВ. Мощность КУ- 75кВАр ( по 25кВАр на секцию).

Также, при недостатке денежных средств на установку с автоматическим регулированием, можно использовать нерегулируемую, групповую КРМ с 12-ю конденсаторами марки КМ-0,4-25 общей мощностью 300 кВАр.

Т.к общая мощность компенсирующих устройств  $Q=308,92\text{кВАр} > 75\text{кВАр}$ , то рекомендуется регулируемая (автоматическая) КРМ.

Таким образом, кВА- полная мощность системы, снизившаяся за счет компенсирующих устройств.

## 2.7 Ток включения

«Выше было показано, что амплитуда тока включения конденсаторной батареи может быть очень большой, особенно в случае многосекционной

автоматически регулируемой батарее. 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» [17].

## **2.8 Выбор типа и уставки защиты для конденсаторных батарей**

«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  $1,36 \cdot I_{ном}$ , а номинальный ток теплового расцепителя может быть принят  $1,36 \cdot I_{ном}$ .

Защита должна быть чувствительна к действующему значению тока, включая высшие гармоники. Уставка мгновенного срабатывания должна быть на уровне  $10 \cdot I_{ном}$ .

- Тип расцепителя

Может быть использован комбинированный (магнитотермический) расцепитель.

В случае использования электронного расцепителя уставка мгновенного срабатывания должна быть  $10 \cdot I_r$ , 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.

#### - 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

#### - 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:

- $1,36 I_{\text{ном}}$  для оборудования типа CLASSIC;
- $1,5 I_{\text{ном}}$  для оборудования типа COMFORT;
- $1,12 I_{\text{ном}}$  для оборудования типа HARMONY (с реактором), частота настройки 2,7 (135 Гц);
- $1,19 I_{\text{ном}}$  для оборудования типа HARMONY (с реактором), частота настройки 3,8 (190 Гц);
- $1,31 I_{\text{ном}}$  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:  $10 I_{\text{ном}}$  для оборудования CLASSIC, COMFORT или HARMONY (с реактором).

Номинальный ток можно рассчитать по формуле:

$$I_{\text{ном.}} = \frac{Q_C}{1,732 \cdot U_{\text{ном.}}} \quad (2.25)$$

- Защита устройства компенсации предохранителем

Необходимо использовать предохранители с высокой отключающей способностью типа Gg:

- тип CLASSIC:  $1,4 I_{\text{НОМ.}}$ ;
- тип COMFORT:  $1,6 I_{\text{НОМ.}}$ ;
- тип HARMONY:  $1,4 I_{\text{НОМ.}}$ .

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:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \dots + I_i^2 + \dots}, \quad (2.24)$$

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:  $1,6 I_{\text{НОМ.}}$ ;
- Тип Harmony (с реакторами):  $1,5 I_{\text{НОМ.}}$ .

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

- для ступени типа Classic или Harmony:  $1,4 I_{\text{НОМ.}}$ ;
- для ступени типа Comfort:  $1,6 I_{\text{НОМ.}}$ .

- 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» [17].

## **2.9 Учет влияния реактивной мощности на напряжение при расчете мощности КУ**

«Такой учет включает в себя четыре аспекта, поэтому если утверждается, что расчет проведен с учетом влияния КУ на напряжение, следует уточнить, учет каких аспектов имеется в виду.

Первый аспект. Так как потери мощности и энергии в сети зависят от напряжений в узлах, то при их расчете до и после установки КУ при учете происходящего при этом повышении напряжения эффект от их установки будет выше, чем при расчете по номинальному напряжению, как это сделано в предыдущих разделах.

Второй аспект. При выбранной мощности КУ напряжения в узлах должны находиться в технически допустимых пределах. Теоретически можно представить, что в некоторых узлах КУ экономически не окупаются, но их приходится ставить, чтобы поднять напряжение выше нижнего допустимого предела. Вместе с тем соотношение стоимостей КУ и электроэнергии таково, что даже при учете в расчете эффекта только от снижения потерь электроэнергии (без учета эффекта от увеличения пропускной способности сети) экономически целесообразная мощность КУ оказывается больше необходимой по техническим условиям. Поэтому обычно нет необходимости проверять соблюдение технических условий на каждом шаге итерационного процесса, достаточно проверить это в конце расчета.

Третий аспект. Так как установка КУ приводит к увеличению напряжений в узлах и, следовательно, к дополнительному снижению потерь мощности и энергии, то при расчете производных потерь следовало бы учесть влияние  $Q$  на  $U$  (производные станут больше, а следовательно, и оптимальная мощность КУ

получится несколько больше, чем определенная без учета этого влияния)»[3, с. 243].

«Четвертый аспект. Он касается учета статических характеристик нагрузки (СХН). Под СХН понимается зависимость мощности, потребляемой нагрузкой неизменного состава, от напряжения в узле. При увеличении напряжения на вводах ЭП возрастает потребление ими и активной, и реактивной мощности. Что касается активной мощности, то увеличение ее потребления нельзя рассматривать как увеличение потерь. Электроприемник выполняет при этом большую работу, чем до повышения напряжения. Если это ЭП периодического действия (например, насос), то он будет включаться на меньшее время для выполнения той же работы, потребляя ту же электроэнергию. Некоторые ЭП имеют трудно контролируемую полезность (например, вентиляторы), и часто специалисты считают нерациональным увеличение потребления ими электроэнергии (чуть меньше дуют, ну и что, зато меньше платим за электроэнергию!). При таком подходе можно рекомендовать выключить вентиляторы совсем (хоть и душно, ну и что!) — будет существенная экономия электроэнергии. Возможно, некоторые ЭП работают зря (например, двигатели на холостом ходу, которые надо бы на эти периоды отключать).

Учет СХН активной мощности при выборе КУ еще мог применяться во времена, когда частота в сетях постоянно была ниже 50 Гц из-за превышения суммарной мощностью потребителей располагаемой мощности электростанций. Он был продиктован желанием с помощью централизованного воздействия снизить бесхозяйственное (а заодно и полезное) потребление электроэнергии. При целевой установке потреблять как можно меньше, конечно, надо работать при минимально допустимом напряжении. Однако при этом надо оценить технологический ущерб (снижение производства продукции)»[3, с. 245].

### 3. Технико-экономическое обоснование

#### 3.1 Определение годового экономического эффекта от внедрения автоматического компенсирующего устройства

Полученный экономический эффект, от установки конденсаторной батареи с автоматическим регулированием, можно представить в виде суммы нескольких составляющих:

1. Экономия на оплате за реактивную энергию. Плата за реактивную мощность составляет от 15% до 47% от оплаты активной энергии, в зависимости регионов России. Как показывает практика, стоимость конденсаторной установки компенсации реактивной мощности окупается через полгода-год после внедрения
2. Для действующих объектов уменьшение потерь электроэнергии в кабельных линиях за счет уменьшения значений фазных токов;
3. Для проектируемых объектов внедрение конденсаторной установки на этапе проектирования позволяют сэкономить на стоимости кабельных линий за счет уменьшения их поперечного сечения.

Рассмотрим экономическую составляющую работы компенсирующей установки на примере действующего объекта.

До внедрения автоматической конденсаторной установки:  $\cos \varphi = 0,58$ .

После внедрения автоматической конденсаторной установки:  $\cos \varphi = 0,93$ .

Относительную активную составляющую тока (совпадающую по фазе с напряжением) примем равной единице.

«Относительный полный ток до установки КУ составляет»[3, с. 227]:

$$I_1 = \frac{1}{0,58} = 1,667. \quad (3.1)$$

«Относительный полный ток после внедрения КУ составляет»[6]:

$$I_2 = \frac{1}{0,93} = 1,03. \quad (3.2)$$

Тогда количество потребляемой активной энергии составит:

$$\Delta W_C = \left[ \frac{I_1^2 - I_2^2}{I_1^2} \right] \cdot K_{\Pi} \cdot 100\% = 7,24\%. \quad (3.3)$$

Т.е. затраты на активную мощность снизились на 7,42%.

«В общем случае для действующего объекта снижение потребления активной энергии за счет увеличения  $\cos \varphi$ »[6]:

$$\Delta W_C = \left( \frac{[1 / \cos^2 \varphi_1 - 1 / \cos^2 \varphi_2]}{1 / \cos^2 \varphi_1} \right) \cdot K_{\Pi} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

$$\Delta W_C = \left( \frac{[1 / 0,58^2 - 1 / 0,93^2]}{1 / 0,58^2} \right) \cdot 0,12 \cdot 100 = 7,40\%,$$

«где:  $\cos \varphi_1$  – косинус  $\varphi$  до компенсации;  $\cos \varphi_2$  – косинус  $\varphi$  после компенсации;  $K_{\Pi}$  - коэффициент потерь,  $K_{\Pi}=0,12$ »[6].

Годовая экономия  $C$  в оплате электроэнергии:

$$C = \frac{\Delta W_C}{100\%} \cdot T = 0,074 \cdot T, \quad (3.5)$$

$$C = 0,074 \cdot 303656 = 22470 \text{ руб},$$

где:  $T$  – стоимость электроэнергии потребленной за год.

Срок окупаемости затрат, лет:

$$T_P = \frac{C_{TY}}{C}, \quad (3.6)$$

$$T_P = \frac{38200 \cdot 4}{22470} = 6,8 \text{ лет,}$$

где:  $C_{TY}$  – стоимость конденсаторной установки (АУКРМ-0,4-75);  $C$  – годовая экономия за оплату электроэнергии.

Как можно заметить, применяемое в работе устройство по компенсации реактивной энергии, может снижать экономические потери на оплату электрической энергии. Правда и окупаются они не очень быстро, но поскольку терристорные установки и конденсаторы не имеют подвижных частей, то и служить они будут долго. К тому же, тратить деньги на их обслуживание, нет необходимости.

АКУРМ также обеспечивает стабилизацию напряжения, фильтрацию высших гармоник, симметрирование  $U$  и  $I$  в сети.

## Заключение

Одним из главных вопросов, решаемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения, является вопрос о компенсации реактивной энергии, который включает расчет и выбор компенсирующих устройств, их регулирование и размещение на территории предприятия.

При работе многих промышленных устройств появляется реактивная составляющая, которую невозможно исключить совсем, но можно применять средства, уменьшающие её потребление из питающей сети. Чтобы этого добиться, необходимо приблизить источник реактивной мощности к месту её потребления, и уменьши её получения из энергосистемы. Это разгрузит питающие линии и трансформаторы от реактивной составляющей.

В выпускной квалификационной работе рассмотрены вопросы компенсации реактивной мощности подстанции 6/0,4 на ООО «Гольяттинский Трансформатор».

Уменьшение потребления реактивной энергии на ООО «Гольяттинский Трансформатор» достигается путем компенсации реактивной энергии, как естественными мерами (суть которых заключается в ограничении влияния приемника на питающую сеть за счёт воздействия на сам приемник), так и за счет специальных компенсирующих устройств в соответствующих точках системы, в данном случае на цеховых трансформаторных подстанциях.

В данной работе проведен синтез устройства компенсации реактивной мощности. За прототип была взята система автоматической компенсации отклонений напряжения трансформаторной подстанции, которое предназначено для электротехнических систем и комплексов. Оно обеспечивает быстродействующую компенсацию реактивной мощности и стабилизацию трехфазного синусоидального напряжения в системах энергоснабжения промышленных предприятий, объектов агропромышленного и оборонного

комплексов, городского жилищно-коммунального хозяйства и электрифицированного транспорта.

Основное достоинство данной системы является то, что реактивная энергия, генерируемая в систему, поступает плавно, без скачков. Получается это с помощью установки, в качестве коммутирующих элементов, терристорных преобразователей.

Устройство автоматической компенсации реактивной позволяет регулировать генерируемую в сеть энергоснабжения ООО «Тольяттинский Трансформатор» реактивную энергию, контролировать текущие значения тока, напряжения и коэффициента мощности в сети, измерять значение отдающую в систему реактивной энергии и поддерживать заданную потребителем величину коэффициента мощности в сети.

Экономия электроэнергии, при использовании устройства автоматической компенсации реактивной мощности только на одной цеховой подстанции, составляет 22 тыс. руб. в год. Если его установить на большинство цеховых подстанций, то это даст ощутимую годовую экономию заводу.

## Список используемых источников

1. Алиев Ф.Г. Проблемы защиты от перенапряжений в системах электроснабжения. Екатеринбург: Издательство ООО ИЦ “Терминал Плюс”, 2016. 350 с.
2. МатикЭлектро [Электронный ресурс]: Микропроцессорный регулятор DCRK. URL: [www.matic.ru/lovato-electric/reactive-power-controllers/](http://www.matic.ru/lovato-electric/reactive-power-controllers/) (дата обращения: 05.05.2018).
3. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
4. Boggs, S. Partial discharge: Overview and signal generation. IEEE Electr. Insul. Mag. 1990, 6, 33–39. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/63057/>
5. Дьяков, А.Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем. Учебник для вузов. М.: МЭИ, 2015. 226 с.
6. Свиридов Ю.П., Пестов С.М. Электроснабжение промышленных предприятий: Методические указания к курсовому проектированию для студентов специальности 14 02 11. М.: УлГТУ, 2005. 42 с.
7. Bruno Castro, Guilherme Clerice, Caio Ramos, André Andreoli, Fabricio Baptista, Fernando Campos and José Ulson Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors. Sensors 2016, 16, 1266; doi:10.3390/s16081266. URL: <https://doaj.org/article/264ffa3d0c924a5f9859690ab5f67e79>
8. Дмитриев, М.В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ. СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2013. 93 с.
9. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий М.: Энергоатомиздат, 1983. 136с.

10. Правило устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. с изм. и доп. [Текст] – М.: Госэнергонадзор, 2015.
11. Грейсх М. В., Лазарев С. С. Расчеты по электроснабжению промышленных предприятий. М.: Энергия, 1977. 312 с.
12. РД 153-34.3-47.501-2013 Рекомендации по эксплуатации и выбору выключателей, работающих в цепи шунтирующих реакторов.
13. Добрусин Л.А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей // Электричество. 2014. №4. С. 27-30.
14. Бортник И.М., Буряк С.Ф., Ольшванг М.В., Таратута И.П. Статические тиристорные компенсаторы для энергосистем и сетей электроснабжения // Электричество. 2013. №2. С. 13-19.
15. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах. / Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета №38 СИГРЭ ; под ред. И.И. Карташева. М.: Энергоатомиздат, 2017. 174с.
16. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. Челябинск: ЧГТУ, 2013. 355с.
17. Техническая коллекция Schneider Electric Руководство по компенсации реактивной мощности с учетом влияния гармоник мощности [Электронный ресурс]: Выпуск № 21, август 2008. URL: [www.pro-schneider.ru/technical\\_support/technical\\_collection/21/](http://www.pro-schneider.ru/technical_support/technical_collection/21/) (дата обращения: 06.06.2018).
18. Кононов Ю.Г. Интеграция баз данных энергосбытовых и распределительных сетевых компаний для мониторинга потерь электроэнергии // Информатика и системы управления. 2007. № 2(14). С. 195-202.
19. Волчков Ю. Д. Методика расчета потерь электроэнергии в сети 0,4кВ // Актуальные проблемы 77 науки в АПК : материалы 51-й науч.-практ. конф. / КГСХА. 2010. Т. 2. С. 165–166.

20. Васин В.П. Управление режимами электрооборудования электрических станций: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 207с.
21. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2013. 280с
22. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336с.
23. Александров Г.Н. Управляемые реакторы: учеб. пособие. СПб.: Центр подготовки кадров, 2014. 200с.
24. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. М.: Энергоатомиздат, 2014. 136 с.
25. Чернова В.Э., Шмулевич Т.В. Актуальность энергосбережения. Государственная политика в области повышения эффективности использования энергии: учебное пособие. СПб.: 2014. -68 с.
26. Design Guide for Sectionalizing Distribution Lines [electronic resource] / URL: [https://www.rd.usda.gov/files/UEP\\_Bulletin\\_1724E-102.pdf](https://www.rd.usda.gov/files/UEP_Bulletin_1724E-102.pdf)
27. Design of Mv/Lv Substation Transformer [electronic resource] / URL: [http://file.scirp.org/pdf/ENG\\_2013011515012421.pdf](http://file.scirp.org/pdf/ENG_2013011515012421.pdf)
28. The Research of Intelligent Substation Time Synchronization System and the Influence of Its Fault to Relay Protection [electronic resource] / URL: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=38370>
29. A Scheme of Dynamic Voltage Restorer to Improve Power Quality in Large Scale Industrial Enterprises [electronic resource] / URL: [http://file.scirp.org/pdf/JPEE\\_2016021815561578.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JPEE_2016021815561578.pdf)
30. Optimization of Power Transformer Design: Losses, Voltage Regulation and Tests [electronic resource] / URL: [http://file.scirp.org/pdf/JPEE\\_2017022318060024.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JPEE_2017022318060024.pdf)

31. Early Failure Detection in Power Transformers [electronic resource] / URL: [http://file.scirp.org/pdf/JPEE\\_2013112613452853.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JPEE_2013112613452853.pdf)
32. Design of Intelligent Control System of Transformer Oil Temperature [electronic resource] / URL: <https://doaj.org/article/37282f0ccccf4e76b70de4de60ed544f>
33. Control of Unit Power Factor PWM Rectifier [electronic resource] / URL: [http://file.scirp.org/pdf/EPE\\_2013101414262203.pdf](http://file.scirp.org/pdf/EPE_2013101414262203.pdf)
34. Overvoltage Condition Assessment of a Microgrid Due to Faults Occurring in the Islanded Mode of Operation [electronic resource] / URL: [http://file.scirp.org/pdf/EPE\\_2015102715565271.pdf](http://file.scirp.org/pdf/EPE_2015102715565271.pdf)
35. Automatic System for Failure Detection in Hydro-Power Generators [electronic resource] / URL: [http://file.scirp.org/pdf/JPEE\\_2014041513442016.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JPEE_2014041513442016.pdf)
36. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интернет Инжиниринг, 2006. 672 с.
37. Долин П. А. Справочник по технике безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 824с.
38. Быстрицкий, Г.Ф. Основы энергетики. М.: Б 95 ИНФРА-М, 2011. 278 с.
39. Плоткин Я. Д., Янушкевич О. К. Организация и планирование приборостроительного производства. Львов.: Свит, 1992. 324с.
40. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для втузов. 2-е изд., стер - М.: Высш. шк., 2000. 383 с.

## Приложение А

Таблица А.1- Электрические нагрузки механосборочного цеха

| № п/п                                       | Наименование оборудования                  | Кол-во | Исходные данные  |  | Ср. факт. мощность,<br>$P_{ср} = k_{ф} * P_{ном}, \text{ кВт}$ | Ср. реакт. мощность,<br>$Q_{ср} = P_{ср} * \text{tg}\phi, \text{ кВАр}$ | Ср. полн. мощность,<br>$S_{ср}, \text{ кВА}$ | Эфф. число<br>электромоторов, $n_{э}$ | Расч. коэф. нагрузки, $k_p$ | Расчетная мощность |               |  |   |                               |
|---|--|--------|------------------|--|--|---|--|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------|--|---|-------------------------------|
|   |  |        | Р <sub>ном</sub> | Ном. мощность, кВт<br>$\sum P = P_{ном} * n$ |  |   |  |                                       |                             | k <sub>н</sub>     | cosφ          | Активная,<br>$P_p = k_p * P_{ср}, \text{ кВт}$ | Реактивная,<br>$Q_p = k_p * Q_{ср}, \text{ кВАр}$ | Полная,<br>$S_p, \text{ кВА}$ |
|   |  |        |                  |  |  |   |  |                                       |                             |                    |               |  |   |                               |
| 1   | Наждачные станки                           | 3      | 2,2              | 6,6  | 0,7  | 0,5   | 4,62   | 8,00                                  | 9,24                        | 1,41               | 6,51          | 8,00   | 10,32   |                               |
| 2   | Карусельно-фрезерные станки                | 3      | 10               | 30   | 0,7  | 0,35  | 21,00  | 56,20                                 | 60,00                       | 1,09               | 22,86         | 56,20  | 60,68   |                               |
| 3   | Вертикально-протяжные станки               | 2      | 14               | 28   | 0,55   | 0,65  | 15,40  | 18,00                                 | 23,69                       | 1,15               | 17,71         | 18,00  | 25,26   |                               |
| 4   | Токарные полуавтоматы                      | 3      | 20,5             | 61,5   | 0,7  | 0,6   | 43,05  | 57,40                                 | 71,75                       | 1,09               | 43,05         | 57,40  | 71,75   |                               |
| 5   | Продольно-фрезерные станки                 | 3      | 25               | 75   | 0,6  | 0,65  | 45,00  | 52,61                                 | 69,23                       | 1,13               | 45,00         | 52,61  | 69,23   |                               |
| 6   | Горизонтально-расточные станки             | 2      | 17,5             | 35   | 0,6  | 0,65  | 21,00  | 24,55                                 | 32,31                       | 1,13               | 21,00         | 24,55  | 32,31   |                               |
| 7   | Вертикально-сверильные станки              | 2      | 7,5              | 15   | 0,68   | 0,5   | 10,20  | 17,67                                 | 20,40                       | 1,40               | 10,20         | 17,67  | 20,40   |                               |
| 8   | Агрегатные горизонтально-сверильные станки | 2      | 17               | 34   | 0,65   | 0,6   | 22,10  | 29,47                                 | 36,83                       | 1,45               | 22,10         | 29,47  | 36,83   |                               |
| 9   | Агрегатные вертикально-сверильные станки   | 2      | 13               | 26   | 0,65   | 0,55  | 16,90  | 25,66                                 | 30,73                       | 1,45               | 24,56         | 25,66  | 35,52   |                               |
| 10  | Шлифовально-обдирочные станки              | 2      | 4                | 8  | 0,55   | 0,65  | 4,40   | 5,14                                  | 6,77                        | 1,67               | 7,34          | 5,14   | 8,97  |                               |
| 11  | Вентиляторы                                | 2      | 4,5              | 9  | 0,5  | 0,6   | 4,50   | 6,00                                  | 7,50                        | 1,80               | 8,12          | 6,00   | 10,09   |                               |
| 12  | Круглошлифовальные станки                  | 2      | 5                | 10   | 0,8  | 0,65  | 8,00   | 9,35                                  | 12,31                       | 1,22               | 9,74          | 9,35   | 13,50   |                               |
| 13  | Закалочная установка                       | 1      | 16               | 16   | 0,7  | 0,58  | 11,20  | 15,73                                 | 19,31                       | 1,43               | 11,20         | 15,73  | 19,31   |                               |
| 14  | Клепальная машина                          | 2      | 5                | 10   | 0,6  | 0,63  | 6,00   | 7,40                                  | 9,52                        | 1,55               | 6,00          | 7,40   | 9,52  |                               |
| 15  | Освещение                                  |        |                  | 1,20   | 0,8  | 1   | 0,96   | 0,00                                  | 0,96                        |                    |               |  |   |                               |
| <b>Итого на стороне НН</b>                  |  |        |                  |  | <b>365,30</b>  | <b>0,64</b>   | <b>234,33</b>                                | <b>333,19</b>                         | <b>407,34</b>               | <b>1,11</b>        | <b>260,30</b> | <b>370,12</b>                                  | <b>452,48</b>                                     |                               |
|   | Потери в трансформаторе                    |        |                  |  |  |   |  |                                       |                             |                    | <b>9,05</b>   | <b>45,25</b>                                   |   |                               |
| Итого на стороне ВН без компенсации Q       |  |        |                  |  |  |   |  |                                       |                             |                    | 269,35        | 415,37   | 495,05  |                               |
| <b>Итого на стороне ВН с компенсацией Q</b> |  |        |                  |  |  |   |  |                                       |                             |                    | <b>269,35</b> | <b>106,453</b>                                 | <b>289,62</b>                                     |                               |