



*На правах рукописи*

КЛИМАШ Степан Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЦЕХОВОЙ  
ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Хабаровск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» на кафедре «Электротехника, Электроника, Электромеханика»

Научный руководитель:

**Власьевский Станислав Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электротехника,  
Электроника, Электромеханика»  
ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

Официальные оппоненты:

**Черемисин Василий Титович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Подвижной  
состав электрических железных дорог»  
ФГБОУ ВО «ОМГУПС»

**Ткачева Юлия Ильинична**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Общая физика»  
ФГБОУ ВО «КНАГУ»

Ведущая организация:

Дальневосточный федеральный  
университет ФГАУО ВО ДВФУ

Защита состоится 23.04.2020 г. в \_\_ час. \_\_ мин. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27 корпус 3, ауд.201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного университета или на его вебсайте [https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/show/133](https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/133)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

А. С. Гудим

**Актуальность темы.** Применение современных технологий и новейших систем автоматизации в отечественной промышленности ставит новые требования к качеству электроэнергии и надежности электроснабжения предприятий. Электроэнергия рассматривается как товар и продукт потребления и должна соответствовать нормам качества.

Вследствие значительной протяженности линий электропередач от электростанций к потребителям и многоэтапной трансформации электроэнергии наиболее экономичным является поддержание высоких энергетических показателей непосредственно на вводах потребителей электроэнергии. Решение этой задачи предлагается осуществлять именно на уровне напряжения 6-10 кВ в цеховых понижающих подстанциях промышленного потребителя.

Основными средствами регулирования напряжения в распределительных сетях являются силовые трансформаторы с устройствами регулирования под нагрузкой (РПН) в сетях 35 кВ и выше, а подстанции класса напряжений 6-10 кВ для этой цели оборудованы только устройствами ПБВ. Эффективным способом управления режимом системы электроснабжения по реактивной мощности является применение батарей статических конденсаторов, статических тиристорных компенсаторов, но вполне совместить и автоматизировать управление устройствами РПН, ПБВ и, например, батареями конденсаторов в пределах одной подстанции (или одного электрохозяйства предприятия) довольно сложно и такое регулирование рассматривается и проводится по отдельности и не оперативно.

Таким образом, разработка и исследование системы компенсации реактивной мощности сети с одновременной стабилизацией напряжения у потребителей дает возможность квалифицировать данную диссертацию как комплексное исследование с изложением научно – обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие и совершенствование сложных электроэнергетических систем.

**Степень разработанности темы исследования.** Диссертационное исследование выполнено на основе результатов работ отечественных и зарубежных учёных: В.А. Венюкова, Р.Р. Мамошина, Б.Н. Сергеевкова, Ю.С. Железко, Ф.Ф. Карпова, И.И. Карташова, В.А. Лабунцова, М.П. Бадера, К.А. Липковского, Ю.К. Розанова, Д.И. Панфилова, а также других учёных и специалистов.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование системы компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения (КРМСН) с улучшенными энергетическими показателями, точностью и быстродействием для цеховых трансформаторных подстанций напряжением 6/0,4 и 10/0,4 кВ промышленного электроснабжения.

**Задачи диссертации:**

1. Анализ патентно-лицензионной ситуации по проблеме разгрузки электрических сетей от реактивной мощности и выравнивания напряжения у потребителей трансформаторных подстанций.
2. Теоретическое обоснование и разработка устройства непрерывного регулирования напряжения с двухсторонним обменом энергией между сетью и

нагрузкой, обладающего одновременно свойствами быть по отношению к сети универсальным плавно регулируемым активным, емкостным или индуктивным элементом.

3. Разработка принципов построения компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения (КРМСН) для трансформаторных подстанций (ТП) систем электроснабжения, обеспечивающих комплексное повышение энергоэффективности в линиях электропередачи, у силовых трансформаторов подстанций и потребителей электроэнергии:

-разработка принципа компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения с нерегулируемой генерацией конденсаторами реактивной мощности и регулируемой системой, которая обеспечивает перераспределение потоков активной и реактивной мощности между сетью и потребителями через звено постоянного напряжения транзисторного преобразователя;

-разработка принципа формирования вектора добавочного напряжения электрической сети, способа и алгоритма регулирования его модуля и аргумента для компенсации реактивной мощности на входе и стабилизацией напряжения на выходе трансформаторной подстанции.

3. Разработка способов и устройств подключения и отключения конденсаторов и регулируемой системой КРМСН к ТП без перерыва электроснабжения потребителей.

4. Создание специализированных электротехнических модулей в среде MATLAB, дополняющих пакет SimPowerSystems, и на их основе разработка комплекса математических моделей для исследования оригинальной системы компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения в составе трансформаторной подстанции;

– создание силовых модулей и их систем управления (транзисторного выпрямителя с ШИМ формированием синусоидального опережающего входного тока, транзисторного инвертора напряжения с формированием и регулированием модуля и аргумента вектора добавочного напряжения электрической сети);

– создание в среде MATLAB измерительных модулей энергетических показателей электротехнических систем и комплексов.

5. Исследование переходных и установившихся режимов работы системы компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения в составе цеховой КТП с использованием специальных модулей.

#### **Научная новизна:**

1. Предложены принципы построения КРМСН с улучшенными энергетическими показателями и быстроедействием.

2. Предложен алгоритм формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знаку сигналов с датчиков реактивной мощности сети и отклонения напряжения нагрузки.

3. Предложены способ и оригинальное устройство для подключения конденсаторов к трехфазной сети, обеспечивающий плавность их заряда с формированием в процессе заряда синусоидальной формы напряжения и тока за счет изменения угла коммутации диодов.

4. На разработанной математической модели КРМСН выявлено свойство обеспечения, как регулируемой генерации, так и регулируемого потребления реактивной мощности. При недокомпенсации устройство быстрого реагирования дополняет действие дискретной ступени, а при перекомпенсации нейтрализует его действие, обеспечивая одновременно стабилизацию напряжения.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработано новое устройство КРМСН.
2. Предложены модули (силовые, управления, измерительные), на основе которых разработан комплекс программ для исследования установившихся и переходных режимов работы КРМСН.
3. Предложено техническое решение, которое при включениях и отключениях регулируемой системы КРМСН обеспечивает защиту ВДТ и ТПФ от перенапряжений и бесперебойную работу ТП.
4. Предложен новый быстродействующий электронно-электрический пускатель конденсаторов, обеспечивающий плавное и симметричное нарастанием напряжения и тока заряда конденсаторов.

**Объектом исследования является** электротехнический комплекс, включающий в себя трансформаторную подстанцию промышленного предприятия под нагрузкой, батарею косинусных конденсаторов, вольтодобавочный трансформатор и транзисторный преобразователь фазы с двухсторонним обменом энергией через звено постоянного напряжения.

**Предметом исследования являются** разработка принципов построения КРМСН и алгоритма формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения, оценка перетоков полной, активной и реактивной мощности и энергетических показателей в системе КРМСН-ТП во всех режимах работы.

**Методы исследования** базируются на фундаментальных положениях теоретических основ электротехники, преобразования и передачи электроэнергии в электрических сетях, методах математического и численного моделирования. В качестве математического средства использовано MATLAB Simulink с комплексом программ для проведения численных экспериментов в системе КРМСН-ТП.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Принципы построения компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения КРМСН на основе ВДТ и ТПФ со специальным алгоритмом управления.
2. Новая система по схеме КРМСН-ТП.
3. Комплекс программ для исследования установившихся и переходных режимов работы КРМСН в составе ТП и результаты исследования.
4. Техническое решение для включения и отключения регулируемой системы КРМСН, обеспечивающей защиту ВДТ и ТПФ от перенапряжений и бесперебойную работу ТП.
5. Способ и устройство подключения конденсаторов к регулируемой системе КРМСН при работе ТП под нагрузкой.

**Достоверность научных положений и результатов** подтверждается обоснованностью полученных выводов, базирующихся на строго доказанных и корректно используемых положениях прикладных и фундаментальных наук, а также корректным использованием математического аппарата. Новизна технических решений, представленных в работе, подтверждается тремя патентами на изобретение.

**Апробация работы.** Материалы исследования докладывались на местных и международных конференциях и получили положительную оценку:

-Всероссийской научно-практической конференции творческой молодёжи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (г. Хабаровск, 20-22 апреля 2015 г., ДВГУПС)

– IOP Conference Series. Earth and Environmental Science (SCOPUS, WOS), 2017 №90.

– Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности» (г. Хабаровск, 20-21 сентября 2018 г., ДВГУПС).

– Заседании научно-технического совета электротехнического факультета (г. Комсомольск-на-Амуре, 25.09.2019 г., КНАГУ).

**Личный вклад соискателя.** Автору принадлежат следующие работы:

– участие в разработке принципов построения компенсатора реактивной мощности сети со стабилизацией напряжения нагрузки КРМСН.

– разработка алгоритма формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знаку сигналов с датчиков отклонения напряжения сети и реактивной мощности.

– участие в разработке способа и устройства подключения конденсаторов к трехфазной сети.

– разработка модулей (силовые, управления, измерительные), на основе которых разработан комплекс программ для исследования установившихся и переходных режимов работы КРМСН.

– проведение численных экспериментов и участие в анализе результатов.

**Публикации.** Основные научные результаты работы отражены в 15 печатных изданиях, из них 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 3 статьи в журналах, входящих в международные системы цитирования, (Scopus, Web of Science), 3 патента на изобретение, 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 51 наименований. Текст диссертации изложен на 115 страницах, содержит 68 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрено состояние проблемы повышения энергетической эффективности, обоснована актуальность и значимость выбранной темы диссертации, сформулированы цели, определены практическая ценность и научная новизна работы.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы повышения качества электроэнергии, проведен анализ способов и средств для стабилизации напряжения и компенсации реактивной мощности, обосновано их использование, сформулированы пути решения проблемы повышения качества электроэнергии.

**Вторая глава** посвящена разработке схемных решений как отдельных компонентов, так и компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения в составе трансформаторной подстанции. Предложены принципы построения КРМСН, улучшающие энергетические и массогабаритные показатели устройства. Для реализации этих принципов разработан алгоритм формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знакам сигналов с датчиков отклонения напряжения нагрузки и реактивной мощности сети. Рассмотрен способ и оригинальный электронно-электрический аппарат для подключения конденсаторов к трехфазной сети. Показано, что новые технические решения обеспечивают плавный заряд конденсаторов по экспоненциальному закону за счет естественных свойств схемы с одновременным формированием в процессе заряда синусоидальной формы напряжения и тока за счет изменения угла коммутации диодов.

Также в главе приведено техническое решение для защиты оборудования низковольтной цепи от перенапряжений со стороны обмотки высокого напряжения вольтодобавочного трансформатора при включениях и отключениях устройства без перерыва электроснабжения.

В соответствии с предложенными принципами построения и алгоритмом разработана новая система подстанции КРМСН-ТП, схема которой приведена на рисунке 1.

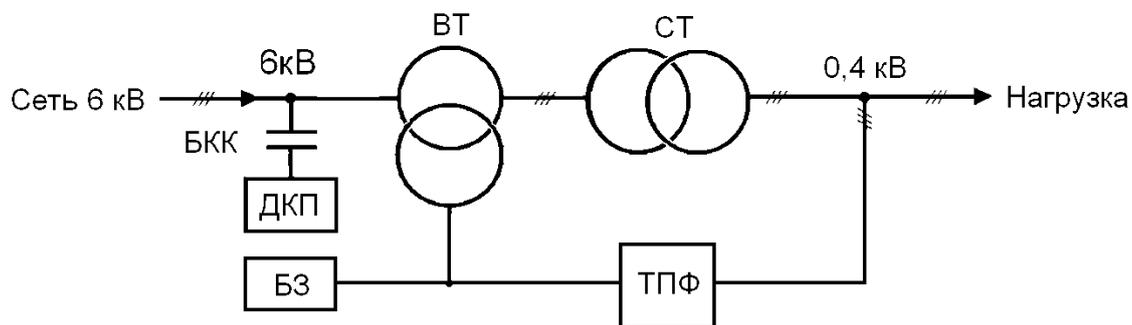


Рисунок 1. Функциональная схема силовой части трансформаторной подстанции с КРМСН

В устройстве КРМСН компенсацию реактивной мощности выполняют два блока. Это нерегулируемая батарея косинусных конденсаторов БКК, рассчитанная на компенсацию 50% среднестатистической реактивной мощности подстанции и регулируемый блок, содержащий транзисторный преобразователь

фазы со звеном постоянного напряжения ТПФ и вольтодобавочный трансформатор ВТ, рассчитанный также на компенсацию 50% реактивной мощности подстанции. Регулируемый блок включен в высоковольтную цепь СТ и кроме компенсации реактивной мощности при помощи специального алгоритма управления выполняет стабилизацию напряжения на входе СТ и у потребителей. ВТ с ТПФ могут создавать как регулируемую емкостную, так и регулируемую индуктивную составляющую реактивной мощности. Благодаря этому свойству преобразователь ТПФ-ВТ обладает возможностью дополнять действие БКК при недокомпенсации, или нейтрализовать его действие при перекомпенсации. В сравнении с косвенным принципом компенсации реактивной мощности на основе БКК и реактора с тиристорным регулированием, установленная мощность нерегулируемого и регулируемого блоков уменьшается, по крайней мере, в два раза. Кроме этого, компенсаторы, построенные по косвенному принципу, могут работать или в режиме поддержания напряжения, или в режиме поддержания реактивной мощности.

Предлагаемый преобразователь ТПФ-ВТ, кроме улучшенных массогабаритных показателей, совмещает эти две функции в одном устройстве.

С учетом этих функциональных возможностей предлагается алгоритм формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по величине и знаку сигналов с датчиков отклонения напряжения нагрузки и реактивной мощности сети.

При изменении напряжения в сети и соответственно у потребителей, контроль отклонения напряжения производится при помощи ДОН в цепи нагрузки. При повышенном напряжении в сети сигнал с ДОН  $\Delta U_n$  имеет положительный знак относительно  $U_{31}$ , и отрицательный знак при пониженном. При недокомпенсации реактивной мощности подстанции (индуктивный характер тока сети) сигнал  $Q_c$  с ДРМ имеет положительный знак, и отрицательный знак – при перекомпенсации (емкостной характер тока сети).

В соответствии с предлагаемым алгоритмом управление инвертором производится по двум каналам регулирования. Первый канал осуществляет регулирования модуля вектора добавочного напряжения изменением степени регулирования  $\delta_u$  напряжения инвертора при помощи ШИМ, а второй канал осуществляет регулирование аргумента вектора добавочного напряжения путем регулирования фазы выходного напряжения инвертора  $\beta_u$ .

Направление вектора добавочного напряжения на комплексной плоскости и регулирование его величины производится по знакам и величине  $\Delta U_n$ ,  $Q_c$  и производится изменением  $\delta_u$ ,  $\beta_u$  в соответствии с таблицей 1.

В соответствии с таблицей 1 алгоритм управления обеспечивает работу устройству в четырех режимах и переход из одного режима работы в другие:

- вольтодобавка с генерацией реактивной мощности;
- вольтодобавка с потреблением реактивной мощности;
- вольтовычет с генерацией реактивной мощности;
- вольтовычет с потреблением реактивной мощности.

Таблица 1

| Знак $\Delta U_n$ | Знак $Q_c$ | Функция и знак $\beta_u$ | Увеличение $\Delta U_n$                                  | Уменьшение $\Delta U_n$                                  | Увеличение $Q_c$  | Уменьшение $Q_c$  |
|-------------------|------------|--------------------------|--|--|---|---|
| +                 | +          | $-\beta_u$               | $\beta_u \downarrow, \delta_u \uparrow$<br>$Q_c = const$ | $\beta_u \uparrow, \delta_u \downarrow$<br>$Q_c = const$ | $\beta_u \downarrow, \delta_u \downarrow$<br>$\Delta U_n = const$ | $\beta_u \uparrow, \delta_u \uparrow$<br>$\Delta U_n = const$ |
| +                 | -          | $+\beta_u$               |  |  |   |   |
| -                 | +          | $-(\pi - \beta_u)$       |  |  |   |   |
| -                 | -          | $+(\pi - \beta_u)$       |  |  |   |   |

Структурная схема оригинального компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения трансформаторной подстанции 6/0,4 кВ с предлагаемым алгоритмом двухконтурного подчиненного регулирования [10] приведена на рисунке 2.

В состав трансформаторной подстанции по схеме КРМСН-СТ входят следующие элементы: СТ и ВТ – силовой и вольтодобавочный трансформаторы; ИН – транзисторный инвертор напряжения с ШИМ системой управления СУИ; УВ – управляемый транзисторный выпрямитель с ШИМ системой управления СУВ; БС – блок синхронизации с сетью и выбора режима работы; ДРМ – датчик реактивной мощности сети; ДОН – датчик отклонения напряжения нагрузки; БКК – батарея косинусных конденсаторов; ДКП – диодно-контакторный пускатель конденсаторов; БЗ – блок защиты элементов ТПФ от возможного обратного высокого напряжения;  $U_{31}$  и  $U_{32}$  – напряжения задания необходимой величины.

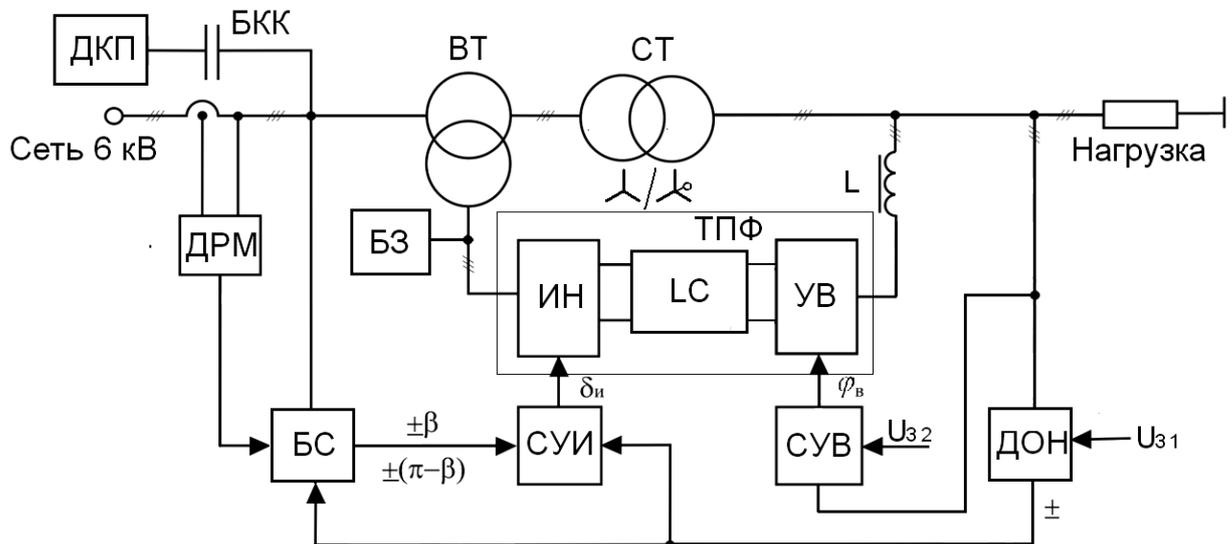


Рисунок 2. Структурная схема трансформаторной подстанции с КРМСН

К энергосберегающим системам относят также современные частотно-регулируемые электроприводы, в которых транзисторные преобразователи выполнены с двухсторонним обменом энергией между двигателями через звено постоянного тока и возможностью возврата избыточной энергии генераторного торможения в сеть.

На рисунке 3 представлен электротехнический комплекс КРМСН-СТ цеховой подстанции с разделением потребителей постоянного и переменного тока [4]. Здесь система электроснабжения и система электропривода объединены звеном постоянного тока.

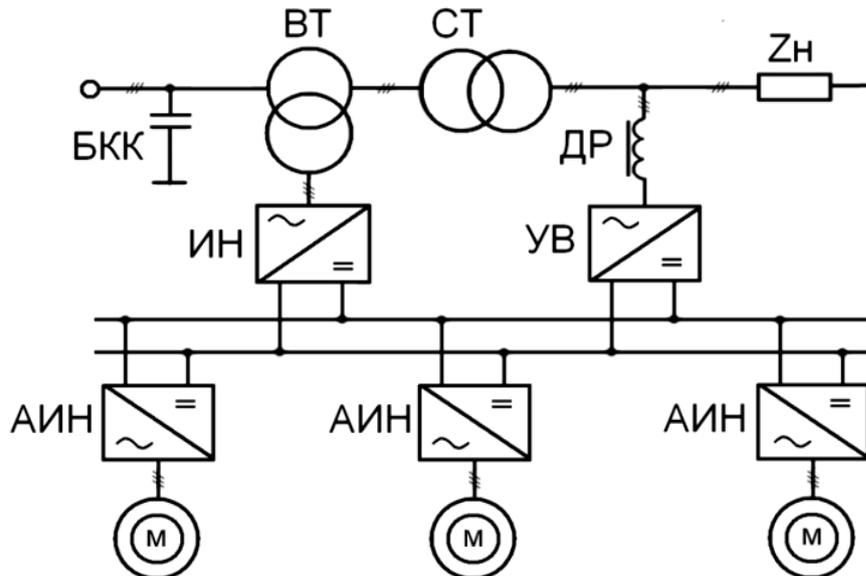


Рисунок 3. Структурная комплекса цеховой подстанции с объединенной по звену постоянного напряжения системой частотно-регулируемого электропривода

В систему входят силовой СТ и вольтодобавочный ВТ трансформаторы, дроссель ДР, блок косинусных конденсаторов БКК, инвертор напряжения ИН с синхронизированной с сетью системой ШИМ регулирования амплитудой и фазой напряжения, управляемый выпрямитель УВ с синхронизированной с сетью системой ШИМ регулирования амплитудой и фазой тока.

Система электропривода содержит асинхронные двигатели М с индивидуальными автономными инверторами напряжения АИН и общим управляемым выпрямителем УВ. Обе системы могут работать как самостоятельно, так и в объединенном комплексе.

Объединение систем имеет высокую готовность к применению. Но, кроме этого устраняется нестабильность напряжения на входах инверторов и срабатывание их индивидуальных защит от отклонений напряжения.

На рисунке 4 приведена векторная диаграмма напряжений и токов силового трансформатора подстанции с КРМСН.

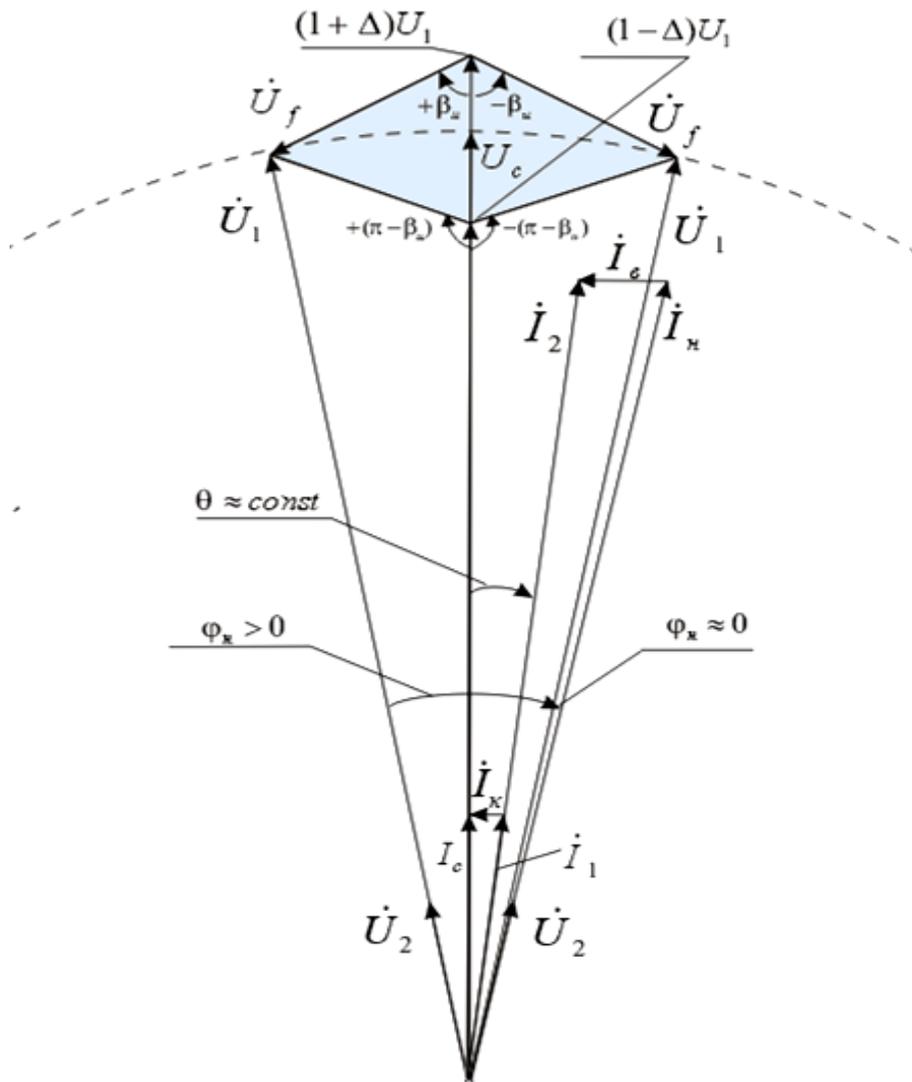


Рисунок 4. Векторная диаграмма напряжений и токов силового трансформатора подстанции с КРМСН

На векторной диаграмме используются общепринятые обозначения:

$U_c$ ,  $U_f$  - напряжение сети и напряжение вольтодобавки;

$U_1$ ,  $U_2$  - напряжения на первичной и вторичной обмотках силового трансформатора подстанции;

$\Delta$  - степень отклонения напряжения сети от номинального уровня;

$I_1$ ,  $I_2$  - токи первичной и вторичной обмоток силового трансформатора;

$I_c$ ,  $I_n$  - ток сети и ток нагрузки;

$I_e$ ,  $I_k$  - ток управляемого выпрямителя и ток батареи косинусных конденсаторов;

$\varphi_c$ ,  $\varphi_n$  - фаза тока сети и фаза тока нагрузки;

$\theta$  - фазовый угол между напряжением сети и током нагрузки;

$\beta_u$  - фазовый угол напряжения вольтодобавки относительно напряжения сети.

Устройство работает следующим образом. Транзисторный преобразователь величины и фазы напряжения ТПФ, в состав которого входит управляемый выпрямитель с входным дросселем и инвертор напряжения с входным LC-

фильтром и силовая часть выполнена на интеллектуальных модулях, из напряжения нагрузки  $U_2$  формирует регулируемое напряжение  $\dot{U}_f = U_2 \cdot \mathcal{E}(\delta_u) \cdot \mathcal{E}(\delta_e) \cdot \exp(j \cdot \beta_u)$ , которое вольтодобавочным трансформатором увеличивается в  $k_{BT}$  раз и прибавляется к напряжению сети  $U_c$ , образуя напряжение питания  $\dot{U}_1 = U_c + k_{BT} \cdot \dot{U}_f$  силового трансформатора и уменьшенное в  $k_{ГТ}$  раз напряжение нагрузки

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{k_{ГТ}} = \frac{U_c + k_{BT} \cdot \mathcal{E}(\delta_u) \cdot \mathcal{E}(\delta_e) \cdot \exp(i \cdot \beta_u) \cdot \dot{U}_2}{k_{ГТ}}. \quad (1)$$

Здесь  $k_{ГТ}$  и  $k_{BT}$  - коэффициенты трансформации силового и вольтодобавочного трансформаторов;  $\mathcal{E}(\delta_u)$  и  $\mathcal{E}(\delta_e)$  - степени регулирования добавочного напряжения соответственно инвертором напряжения и активным выпрямителем;  $\delta_u$ ,  $\delta_e$  - скважности при широтно-импульсной модуляции напряжения соответственно инвертора напряжения и активного выпрямителя.

С учетом отклонений напряжения в сети  $\Delta U_c = \Delta \cdot U_c$  и падение напряжения на трансформаторах  $\Delta \dot{U}_K = (\dot{\Delta}_{KB} \cdot k_{BT} / k_{ГТ} + \dot{\Delta}_{КТ}) \cdot U_c = \dot{\Delta}_K \cdot U_c$  выражение (1) запишется в виде

$$\dot{U}_2 = \frac{U_c \cdot (1 \pm \Delta - \dot{\Delta}_K)}{k_{ГТ} - k_{BT} \cdot \mathcal{E}(\delta_u) \cdot \mathcal{E}(\delta_e) \cdot \exp(i \cdot \beta_u)}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  - степень отклонения напряжения сети от номинального уровня;  $\dot{\Delta}_K$  - вектор относительного падения напряжения на трансформаторах.

Из выражения (2) и векторной диаграммы (рисунок 4) видно, что вектор напряжения нагрузки  $\dot{U}_2$  регулируется по величине и фазе. Регулированием действующего значения напряжения на входе СТ  $\dot{U}_1$  создается стабильное напряжение  $\dot{U}_2$  у потребителей, а регулированием фазы вектора  $\dot{U}_1$  и вместе с ним  $\dot{U}_2$  достигается компенсация реактивной мощности в сети.

Посредством управляемого выпрямителя совместно с конденсатором LC-фильтра и дросселем отображается реактивная составляющая тока нагрузки, который в узле подключения управляемого выпрямителя с входным дросселем к нагрузке суммируются по первому закону Кирхгофа с током нагрузки, обеспечивая во вторичной обмотке силового трансформатора ток, максимально приближающийся по фазе к выходному напряжению подстанции. При выполнении этой функции происходит изменение  $\delta_e$ , влияющее на величину входного напряжения инвертора, регулируемого напряжения  $U_f$  и величину выходного напряжения  $U_2$ . Стабилизация напряжения  $U_2$  обеспечивается воздействием на канал широтно-импульсной модуляции системы управления инвертора напряжения сигналом обратной связи.

Регулирование фазы вектора  $\dot{U}_1$  в сторону опережения при недокомпенсации и в сторону отставания при перекомпенсации (рисунок 4) позволяет совместно с батареями косинусных конденсаторов обеспечить прямую полную компенсацию реактивной мощности на входных зажимах подстанции.

Эту функцию выполняет система двухконтурного управления, построенной по принципу подчиненного регулирования. Системой управления инвертором напряжения регулирование  $\delta_u$  производится по отклонению напряжения нагрузки, а регулирование величины и смена знака  $\beta_u$  по отклонению и направлению реактивной мощности сети.

При таком способе регулирования и соответствующем коэффициенте трансформации  $k_{BT}$  вольтодобавочного трансформатора векторы токов и напряжений соответствующих фаз питающей сети совпадают по фазе и это условие полной компенсации реактивной мощности трансформаторной подстанции практически сохраняется, вследствие того, что  $\theta \approx \text{const}$  (рисунок 4) при четырехквadrантном формировании вектора добавочного напряжения, в соответствии со способом изменения  $\beta_u$  по знакам и величине сигналов, снимаемых с датчиков отклонения напряжения нагрузки и реактивной мощности сети.

Далее на рисунок 5 представлена разработанная схема для пуска и защиты элементов ТПФ от возможного обратного высокого напряжения на низковольтной обмотке ВДТ.

Здесь ВДТ - вольтодобавочный трансформатор с обмотками низкого ОНН и высокого ОВН напряжения; РК - реверсивный контактор с шунтирующим ШК и подключающим ПК контакторами; ИН, Ф, РВ - инвертор, фильтр и реверсивный выпрямитель тиристорного преобразователя; VS - симмисторы;  $R_{OH}$  - резисторы для ограничения напряжения на ОНН; БУС - блок управления симмисторами; VD - стабилитроны;  $R_{OT}$  - токоограничивающие сопротивления; ПН – понижающие трансформаторы (один трехфазный или три однофазных).

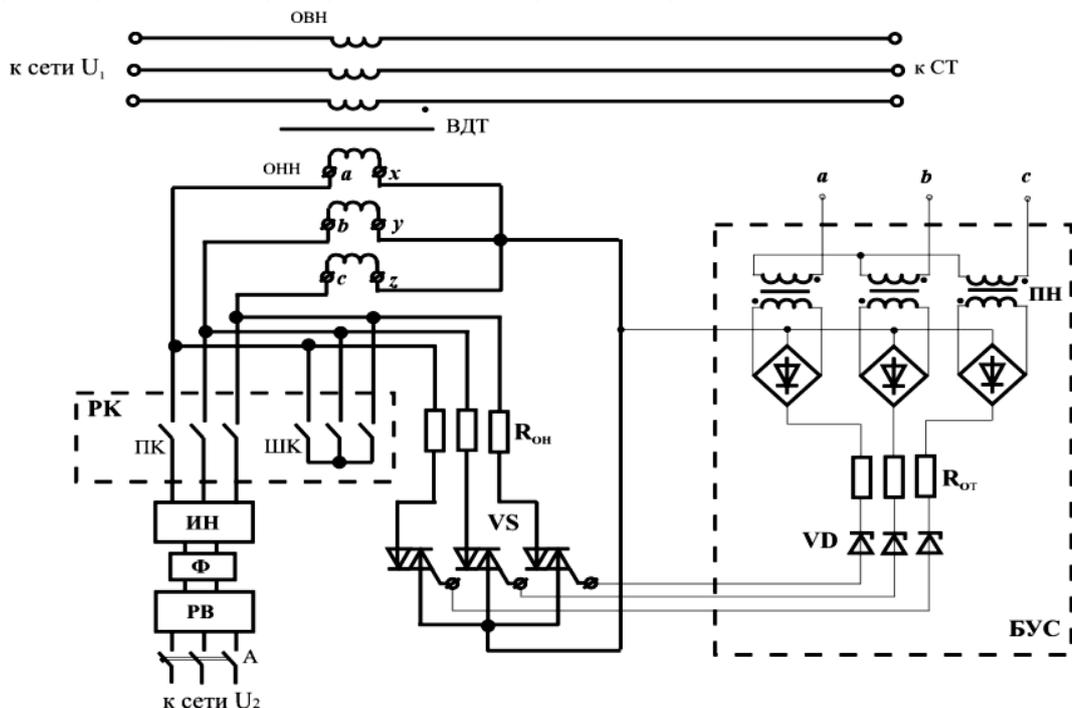


Рисунок 5. Схема блока защиты ТПФ и ВДТ от перенапряжений при подключении и отключении КРМСН и работе ТП под нагрузкой

В отключенном состоянии КРМСН обмотка низкого напряжения ВТ шунтируется контактором ШК, и напряжение на ней отсутствует. В момент переключения контакторов с ШК на ПК включение обмотки производится сначала симмисторами на Рон, величина которых подобрана таким образом, чтобы фазное напряжение на ОНН было не менее 230В. При включении ПК стабилитроны и симмисторы восстанавливают свои запирающие свойства.

Зажимы а, b, с блока БУС предназначены для подключения к ОНН ВТ а, b, с. Трансформаторы ПН должен понижать напряжение до 14В, если на ОНН ВТ и выходе инвертора 230В, а стабилитроны VD выбираются на напряжение пробоя 15 В.

Для мягкого пуска батареи косинусных конденсаторов предлагается применить сравнительно простой и надежный гибридный электронно-электрический аппарат [10]. В отличие от широко применяемого реостатного пуска конденсаторов, предлагаемый способ и аппарат для его реализации не создают бросков тока и перенапряжений.

Функциональная схема аппарата для подключения батареи косинусных конденсаторов к трехфазной сети приведена на рисунок 6.

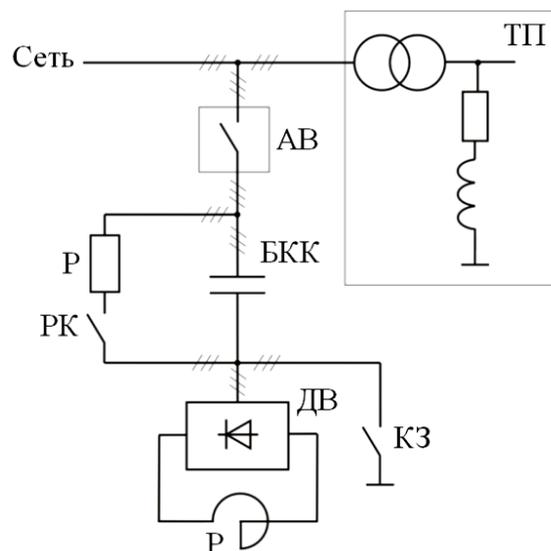


Рисунок 6. Функциональная схема аппарата для подключения конденсаторов

При включении автоматического выключателя АВ конденсаторы БКК подключаются к трехфазной сети через трехфазный мостовой диодный выпрямитель ДВ с реактором Р в цепи постоянного тока. За счет естественных свойств устройства производится плавное увеличение тока реактора по экспоненциальному закону с плавным и симметричным нарастанием тока и напряжения заряда конденсаторов во всех фазах.

Одновременно с увеличением токов в контурах с диодами выпрямителя плавно увеличиваются углы коммутации диодов, преобразуя за время переходного процесса трапецеидальную форму напряжения на конденсаторах в синусоидальную.

После заряда конденсаторов до установившегося значения напряжения включают контактор КЗ, который, шунтируя трехфазный мостовой диодный

выпрямитель, выполняет две функции. Во-первых, он завершает процесс подключения конденсаторов, обеспечивая синусоидальный ток в конденсаторах и в сети. Во-вторых, после шунтирования выпрямителя устройство выполняет функцию автомата гашения поля. Через диоды мостового выпрямителя, с замкнутыми контактами входными зажимами, создается замкнутый контур для гашения электромагнитной энергии, накопленной в реакторе на сопротивление этого контура. Отключение конденсаторов производится по штатной схеме при помощи автоматического выключателя АВ с одновременным подключением к конденсаторам разрядных резисторов Р.

**Третья глава** посвящена разработке математической модели системы КРМСН-ТП в среде MATLAB. Моделирование в диссертации выбрано как основной метод исследования, так как в работе идет речь о разработке и исследовании устройств значительной мощности (1000кВА) и высокого напряжения (6,10 кВ), работающих в составе системы энергоснабжения. Монтаж, испытание и исследование разработанной системы в условиях промышленной эксплуатации крайне затруднительны ввиду недопустимости нарушения технологического электроснабжения промышленных предприятий, как правило, являющихся потребителями 1 и 2 категорий. С другой стороны исследование процессов устройства при изменении одного из параметров в условиях эксплуатации, когда происходит изменение сразу нескольких параметров, становится невозможным.

В данном случае именно моделирование позволит в режиме реального времени создать имитацию возможных режимов работы как КРМСН, его компонентов, системы управления, так и участка энергосистемы, в котором рассчитывается установка.

Важным этапом, предшествующим моделированию, является расчет и разработка модулей, оценка их работоспособности и точности.

Глава посвящена разработке элементов модели в среде MATLAB, позволяющих реализовать исследования оригинальной системы компенсации реактивной мощности со стабилизацией напряжения в составе трансформаторной подстанции с предложенным алгоритмом управления, точно оценить энергетические показатели. Описаны разработанные специализированные электротехнические модули, дополняющие пакет SimPoweSystems, рассчитана, рассмотрена и описана разработанная модель электротехнического комплекса с раскрытием и исследованием работы каждого силового модуля.

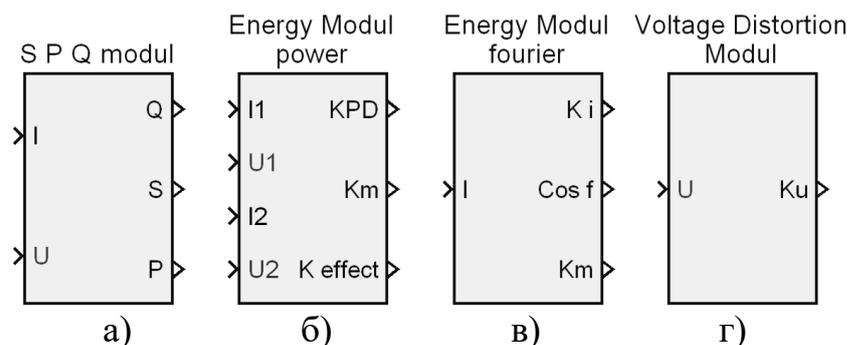


Рисунок 7. Измерительные блоки энергетических показателей в среде MatLab

На рисунке 7, а приведен специализированный измерительный блок полной мощности и ее активной и реактивной составляющих (SPQ), разработанный для определения численных значений полной  $S$  (ВА), активной  $P$  (Вт) и реактивной  $Q$  (вар) мощностей, используя для этого сигналы мгновенных значений с датчиков напряжения и тока.

На рисунке 7, б приведен блок для вычисления основных энергетических показателей (Energy modul Power). Этот модуль создан для вычисления основных энергетических показателей, характеризующих эффективность потребления и использования электроэнергии. Это коэффициенты мощности  $K_m$ , полезного действия  $\eta$  и их произведение, получившее название коэффициента энергоэффективности  $K_{\text{Э}}$  системы. Коэффициент энергетической эффективности характеризует и эффективность потребления, и эффективность использования электроэнергии. Для вычисления энергетических показателей используются сигналы мгновенных значений с датчиков тока и напряжения на входе ( $I_1$  и  $U_1$ ) и на выходе ( $I_2$  и  $U_2$ ) всей системы.

На рисунке 7, в приведен блок для вычисления коэффициента мощности через коэффициенты искажения и сдвига фазы мгновенного значения тока. Следует отметить, что входной коэффициент мощности системы может быть определен другим методом через форму и фазу тока сети. Данный метод реализован в блоке Energy modul Fourier, приведенном на рисунке 7, в. На вход блока подается мгновенное значение тока, через которое вычисляются и снимаются с выхода три величины: коэффициент искажения тока, коэффициент фазы тока и коэффициент мощности.

На рисунке 7, г приведен блок для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения (коэффициента гармоник). В основу этого вычислителя-оценщика положен метод, который без спектрального анализа исследуемого напряжения позволяет определить сумму всех высших гармоник и ее процент по отношению к первой. Сумма высших гармоник в процентном отношении к первой является показателем качества напряжения, характеризующим его несинусоидальность, и нормируется российским ГОСТ 13109-97 и международным IEEE 519-1992 стандартами.

Обязательным условием при моделировании силовых модулей ставилось соответствие разработанных модулей реальным устройствам в структуре силовой схемы и в принципах работы ее системы управления.

Разработанный силовой транзисторный модуль с ШИМ управлением может работать как в автономном, так и ведомом сетью режиме. Его также можно применять в качестве синхронизированных с сетью выпрямительно-инверторных преобразователей и активных фильтров тока сети, автономных инверторов напряжения с регулируемой частотой. Модули всех этих преобразователей использовались при моделировании и исследовании электротехнического комплекса.

Прототипом разрабатываемого выпрямительно-инверторного модуля был взят реальный модуль инвертора на 6-ти IGBT транзисторах PM300CVA060 фирмы Mitsubishi мощностью 55 кВт, напряжением 600 В, частотой 20 кГц.

В четвертой главе описано исследование особенностей работы вольтодобавочного трансформатора от инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в цепи высокого напряжения, исследование работы управляемого выпрямителя с целью выявления особенностей энергообмена для дальнейшего им управления. Также проведено исследование пускателя конденсаторов.

На рисунке 8 представлена схема подстанции с ВТ и ИН, подключенному к отдельному источнику постоянного напряжения. При данном подключении устройства мощность, взятая из отдельного источника постоянного напряжения, создает мощность, передаваемую через ИН и ВТ в цепь высокого напряжения для компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения. В качестве источника постоянного напряжения могут быть использована сеть постоянного напряжения, выпрямитель, подключенный к вторичной цепи СТ той же или другой подстанции предприятия, дизель-генераторная установка с выпрямителем.

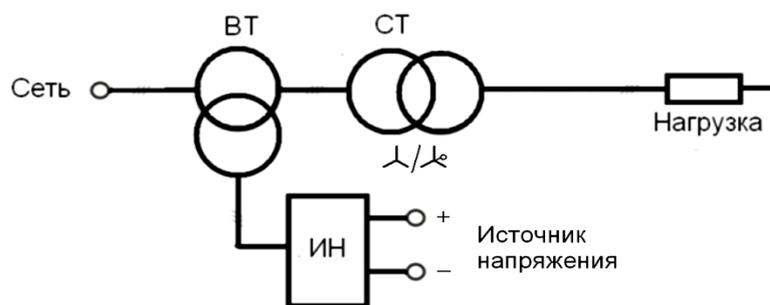


Рисунок 8. Схема для исследования инвертора при работе на ВТ

На схеме (рисунок 8) первичные обмотки ВТ и СТ соединены последовательно и подключены к сети. Вторичная обмотка ВТ соединена в звезду и подключена к выходу инвертора напряжения ИН.

Напряжение на входе силового трансформатора ТП

$$U_{СТ} = U_C + U_{ВТ}, \quad (3)$$

где  $U_C$  – напряжение сети;  $U_{ВТ}$  – добавочное напряжение к  $U_C$  (напряжение на первичной обмотке ВТ);  $U_{СТ}$  – напряжение на первичной обмотке СТ.

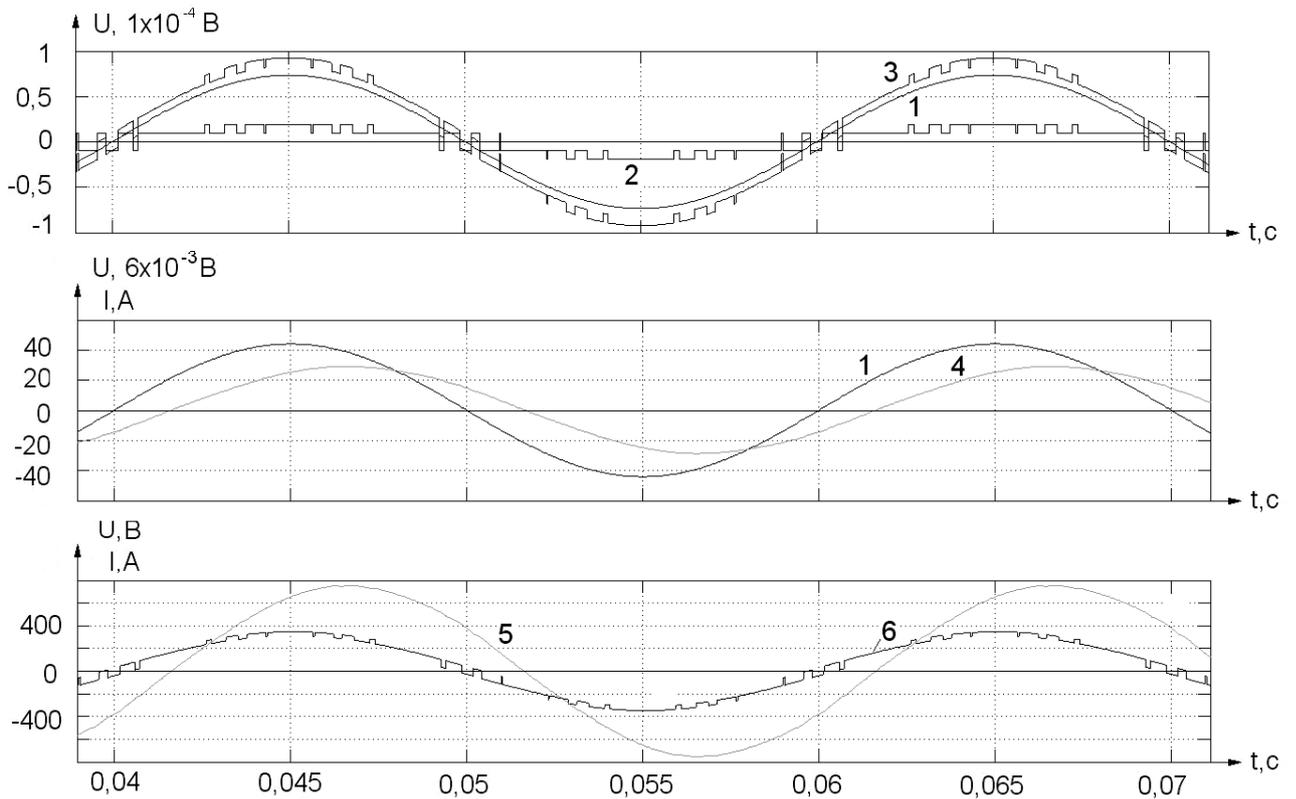
Добавочное напряжение можно записать в виде

$$U_{ВТ} = K_{ВТ} \cdot U_{ИН}. \quad (4)$$

Здесь где  $K_{ВТ}$  – коэффициент трансформации ВТ;  $U_{ИН}$  – регулируемое напряжение инвертора.

При ШИМ выходного напряжения инвертора и синфазном его формировании с сетью в среде MatLab получены осциллограммы фазных напряжений и токов в режиме вольтодобавки, которые приведены на рисунке 9.

Осциллограммы (рисунок 9) иллюстрируют принцип регулирования напряжения на входе СТ и на нагрузке при построении стабилизаторов трехфазного напряжения.



1 – напряжение сети, 2 – добавочное напряжение, 3, 4 – напряжение и ток на входе СТ, 5, 6 – ток и напряжение нагрузки.

Рисунок 9. Осциллограммы напряжений и токов при ШИМ вольтодобавки

К энергосберегающим системам относят современные частотно-регулируемые электроприводы, в которых транзисторные преобразователи выполнены с двухсторонним обменом энергией между двигателями через звено постоянного напряжения и возможностью возврата избыточной энергии генераторного торможения в сеть.

На рисунках 11 и 12 показаны осциллограммы напряжений и токов, полученные при моделировании системы КРМСН-ТП с объединенной системой частотно-регулируемых электроприводов в среде MatLab при вольтодобавке, на рисунках 13 и 14 показаны осциллограммы напряжений и токов при вольтовычете.

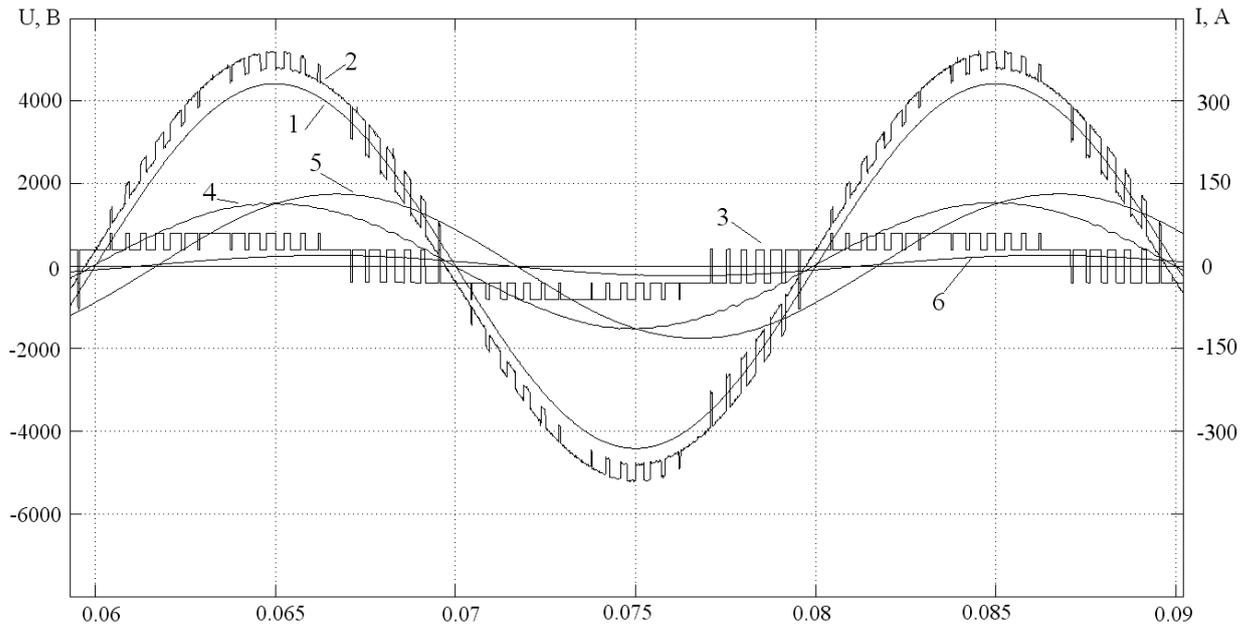


Рисунок 11. Осциллограммы фазных напряжений и токов системы КРМСН – ТП при пониженном напряжении сети: 1 и 2- напряжения сети и на входе СТ; 3 – напряжение на вторичной обмотке ВТ и на выходе ИН; 4 - ток, потребляемый из сети; 5 – ток первичных обмоток СТ и ВТ; 6 - ток вторичной обмотки ВТ и на выходе ИН, уменьшен в 15 раз

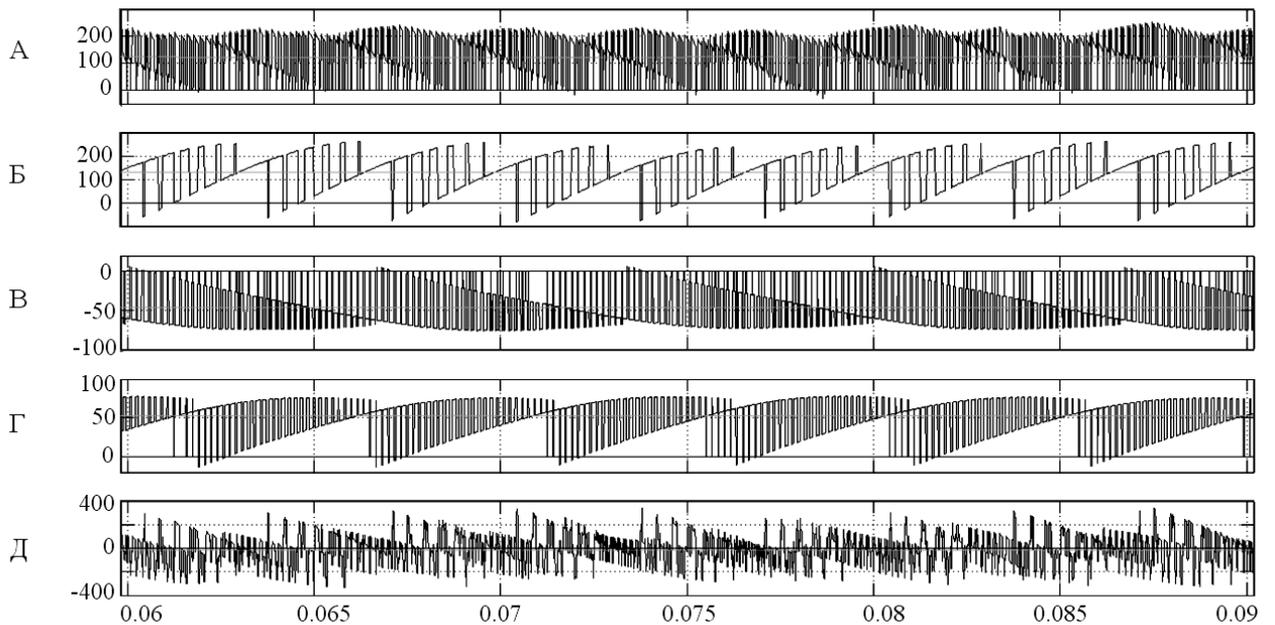


Рисунок 12. Токи в звене постоянного напряжения системы КРМСН-ТП при вольтодобавке: А - суммарный ток, Б – ток на входе ИН-ВТ (частота 50 Гц), В – ток на входе АИН –АД 1 (частота 25 Гц) в генераторном режиме, Г – ток на входе АИН-АД 2 (частота 35Гц) в двигательном режиме, Д – ток конденсатора в звене постоянного напряжения

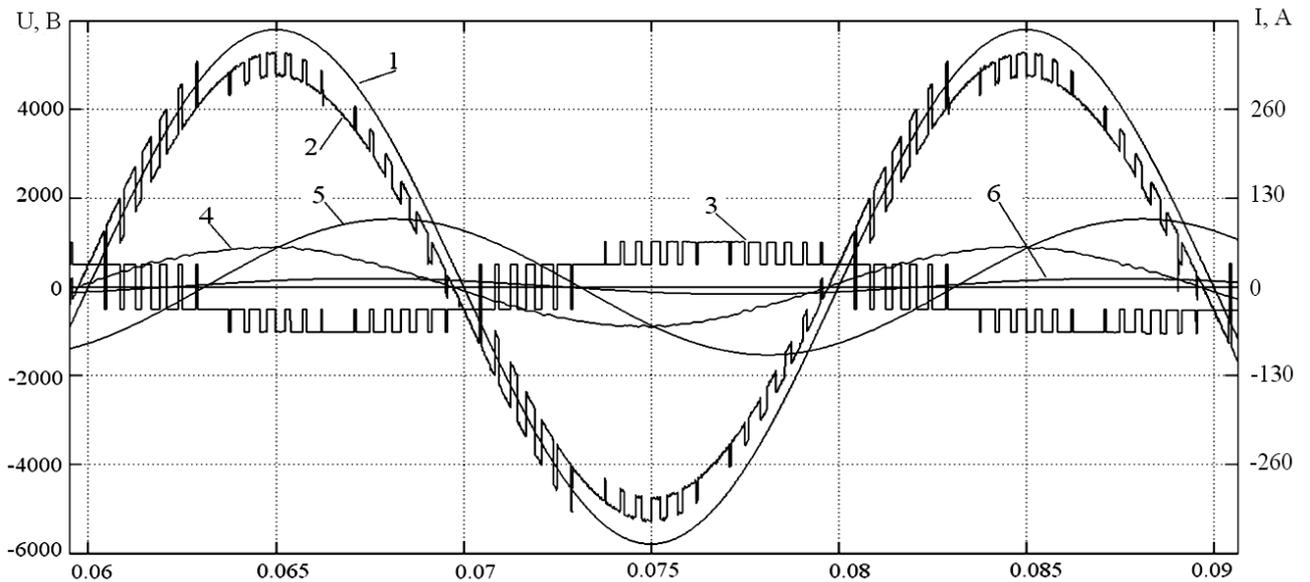


Рисунок 13. Осциллограммы фазных напряжений и токов системы КРМСН – ТП при пониженном напряжении сети: 1 и 2- напряжения сети и на входе СТ; 3 – напряжение на вторичной обмотке ВТ и на выходе ИН; 4 - ток, потребляемый из сети; 5 – ток первичных обмоток СТ и ВТ; 6 - ток вторичной обмотки ВТ и на выходе ИН, уменьшен в 15 раз

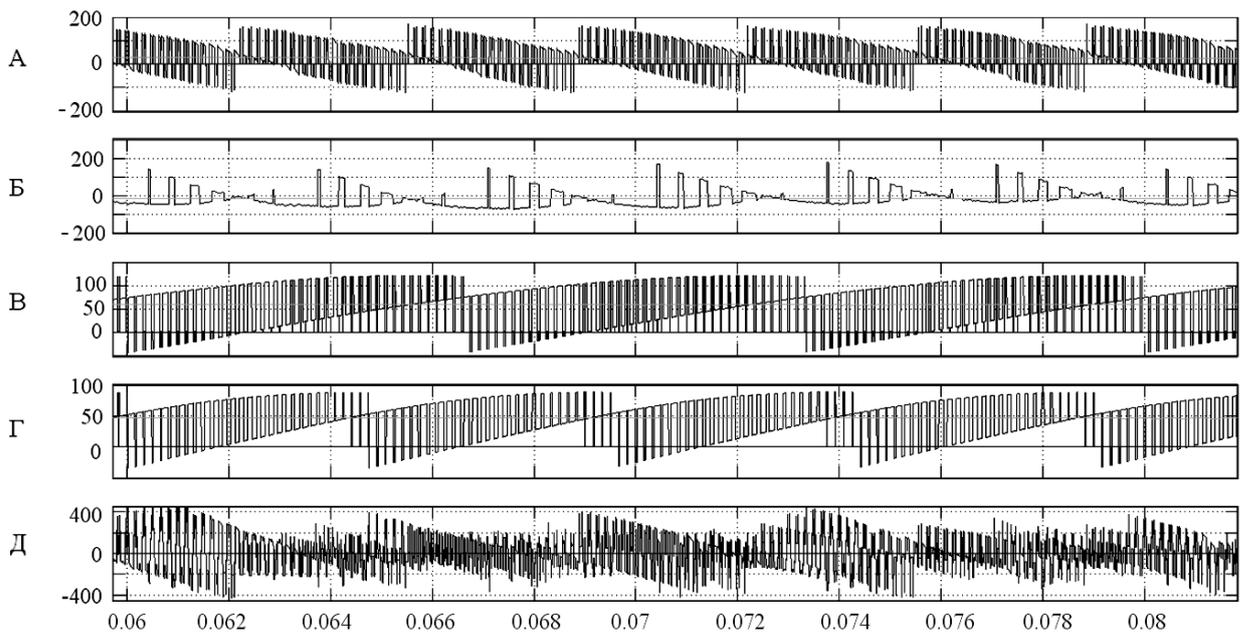


Рисунок 14. Токи в звене постоянного напряжения системы КРМСН-ТП при вольтовычете: А - суммарный ток, Б – ток на входе ИИ-ВТ (частота 50 Гц), В – ток на входе АИИ –АД 1 (частота 25 Гц) в генераторном режиме, Г – ток на входе АИИ-АД 2 (частота 35Гц) в двигательном режиме, Д – ток конденсатора в звене постоянного напряжения

Исследование диодно-контакторного пускателя конденсаторов на высокой стороне трансформаторной подстанции произведено на блочно-модульной модели, приведенной на рисунке 15.

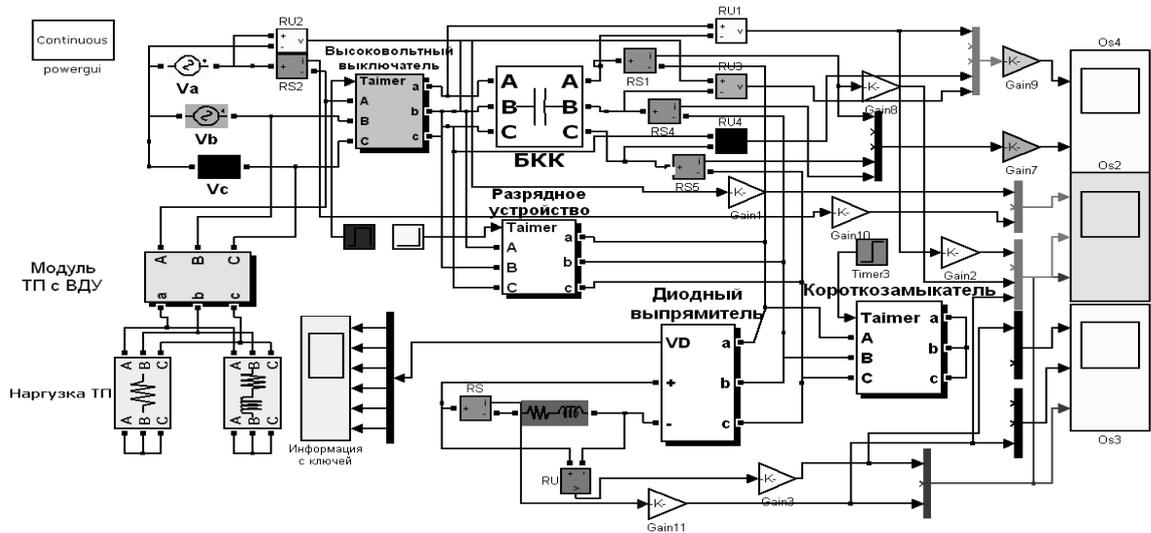


Рисунок 15. Модель для исследования процессов подключения конденсаторов к модулю цеховой трансформаторной подстанции

Переходные процессы в электронно-электрическом аппарате на конденсаторах и в сети иллюстрируют рисунок 16 и рисунок 17.

Из осциллограмм на рисунке 16 видно, что после момента включения конденсаторов выключателем в 0.02 секунды напряжения и токи всех трех фаз плавно и быстро возрастают до номинальных значений по экспоненциальному закону. Для удобства сопоставления результатов численного эксперимента осциллограммы представлены в относительных единицах.

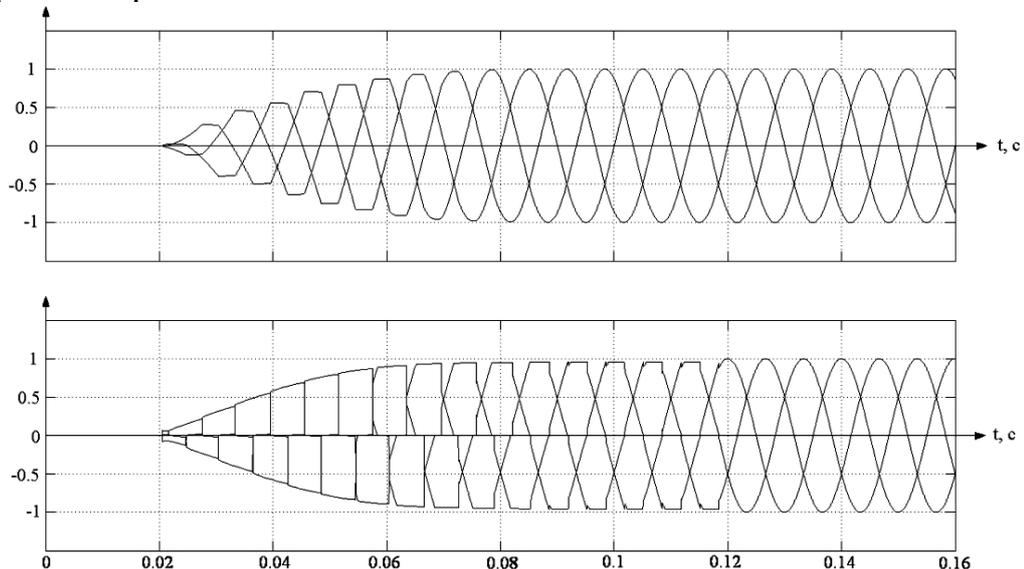


Рисунок 16. Осциллограммы трехфазных напряжений (сверху) и токов (снизу) конденсаторов при пуске

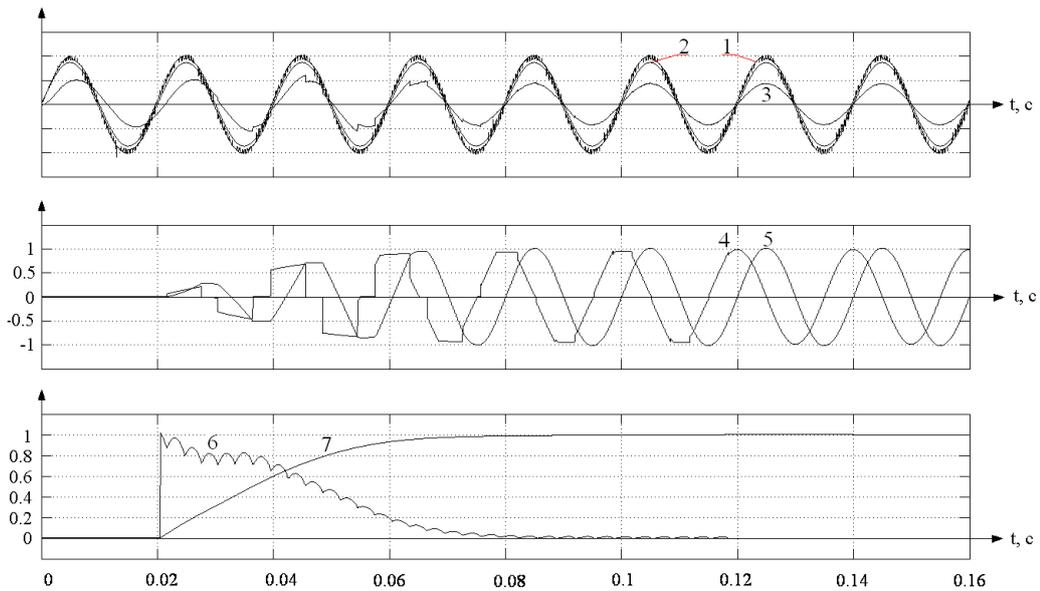


Рисунок 17. Осциллограммы напряжений и токов одной фазы сети (сверху), конденсатора той же фазы (в середине) и реактора (снизу)

На осциллограммах (рисунок 17) введены следующие обозначения: 1 – напряжение на входе силового трансформатора подстанции, 2 и 3 – напряжение и ток сети, 4 и 5 – ток и напряжение конденсатора, 6 и 7 – напряжение и ток реактора.

Численными экспериментами в среде MatLab показано, что за счет естественных свойств устройства производится плавное симметричное включение с завершением процесса нарастания тока и напряжения заряда конденсаторов (рисунок 16, рисунок 17) до их установившихся значений за несколько периодов сетевого напряжения. Время заряда конденсаторов задается индуктивностью реактора.

**В пятой главе** приведены диаграммы распределения активной, реактивной и полной мощностей с их численными значениями при различных режимах работы ТП, показан энергообмен в системе КРМСН-ТП между электронными и электромагнитными преобразователями при трансформации электрической энергии. Дана оценка энергетическим показателям, показано снижение потерь в ЛЭП в результате применения системы КРМСН-ТП.

Одним из основных технико-экономических показателей при рассмотрении целесообразности применения устройств КРМСН на трансформаторных подстанциях является энергоэффективность. Если точнее, то полная характеристика как, положительного, так и отрицательного влияния КРМСН на энергоэффективность устройств электроснабжения. Исследование проводилось на математической модели трансформаторной подстанции по схеме КРМСН-ТП, приведенной на рисунке 18.

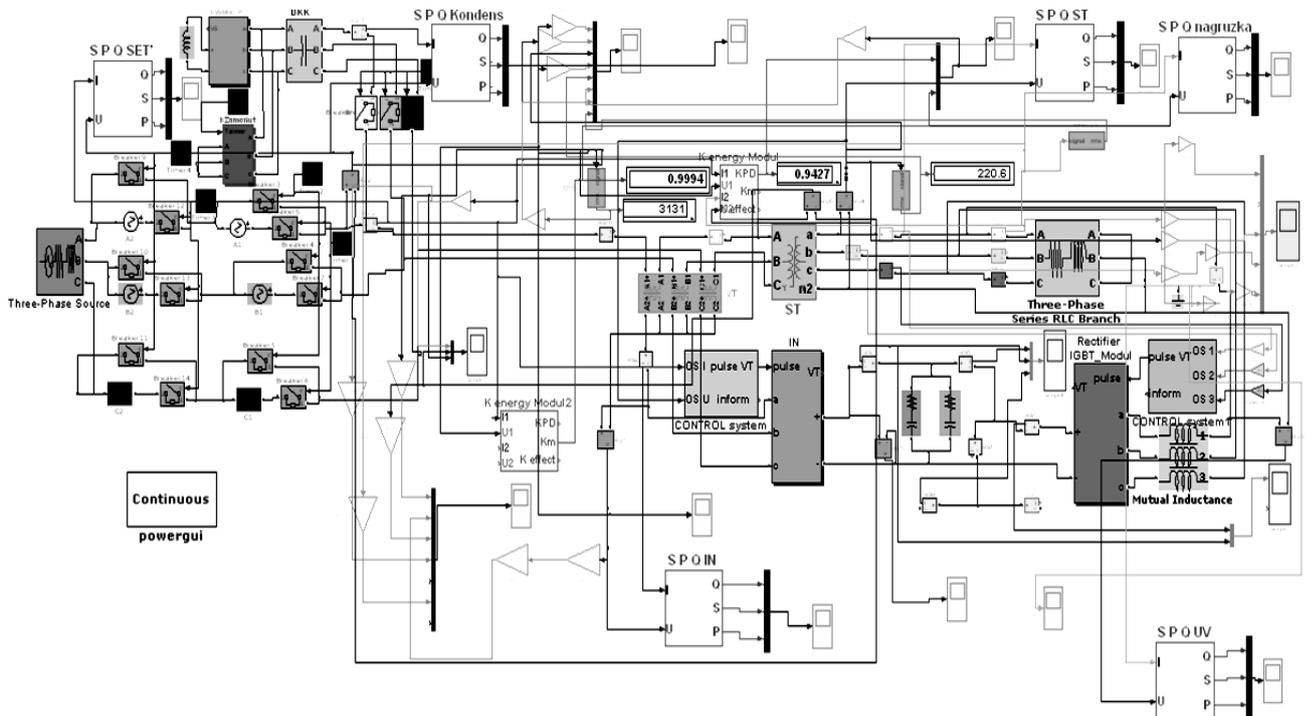


Рисунок 18. Модель электротехнической системы КРМСН-ТП

В состав блочно-модульной математической модели системы КРМСН-ТП (рисунок 18) входят блоки силового и вольтодобавочного трансформаторов, трехфазный источник с ЛЭП и батарея косинусных конденсаторов. Электронная часть модели содержит два одиноковых силовых IGBT -модуля с двухсторонним пропуском энергии. Один является ИН, а другой УВ. Для каждого из них индивидуально разработаны системы управления. Блоки систем управления ИН и УВ имеют предвключенные, синхронизированные и сфазированные с первичным и вторичным напряжением СТ. Они отличаются также заданием частоты ШИМ синусоидальное формирование токов и требуют настройки при апробации модели. Нагрузками системы являются основные RL-потребители промышленного предприятия, подключенные непосредственно к выходным шинам подстанции.

Процесс преобразования напряжения и тока посредством ТПФ в системе КРМСН-ТП иллюстрирует рисунок 19. Здесь осциллограммами показано как при повышенном напряжении в сети на 10 % и загрузкой ТП RL-нагрузкой на 80% с коэффициентом мощности 0,88, производится полная компенсация реактивной мощности на входе системы с одновременным выравниванием напряжения у потребителей до номинального уровня. При этом эффективность ТП (произведение коэффициентов мощности и полезного действия) повысилась на 8,7 % без учета потерь в ЛЭП.

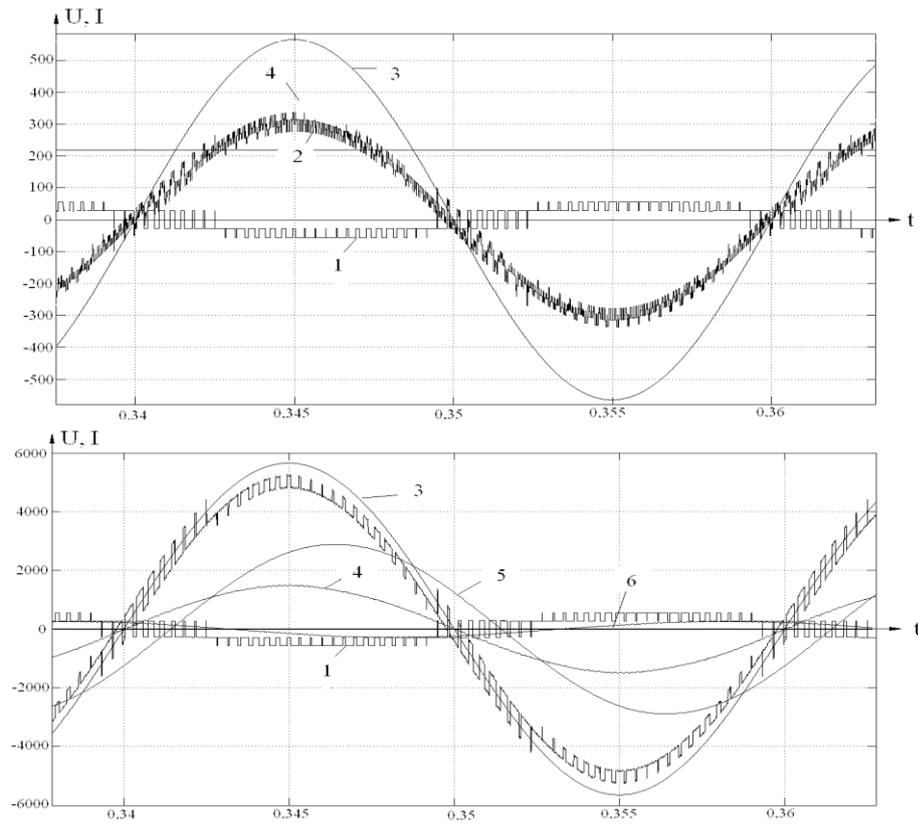
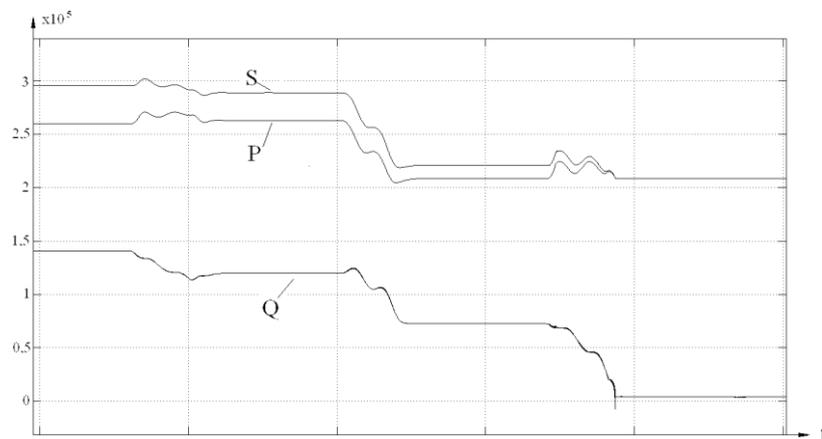


Рисунок 19. Осциллограммы системы КРМЧН-ТП при повышенном напряжении в сети и RL-нагрузке подстанции (масштаб относительный): 1 – напряжение вольтодобавки; 2 – напряжение нагрузки; 3 – напряжение сети; 4 – ток сети; 5 – ток нагрузки; 6 – ток на входе управляемого выпрямителя.

При исследовании производилась качественная и количественная оценка результатов. По осциллограммам (рисунки 19, 20) в удобном для наглядности масштабе производилась качественная оценка физических процессов. Количественная оценка произведена при помощи специализированных модулей (см. рисунок 7).



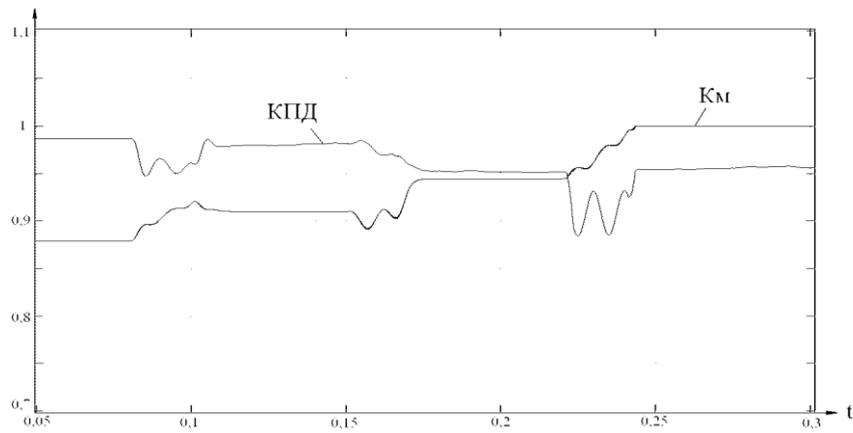


Рисунок 20. Графики мощностей (сверху) и энергетических показателей (снизу):  
 0,08с - включен управляемый выпрямитель;  
 0,15с - включен инвертор напряжения;  
 0,22с - включена батарея косинусных конденсаторов.

На модели был проведен численный эксперимент, результаты которого в удобных для наблюдателя масштабах выведены на осциллограмму рисунка 21. На интервале времени от 0 до 0,4с при заданной нагрузке происходило понижение, а затем повышение напряжения в питающей сети.

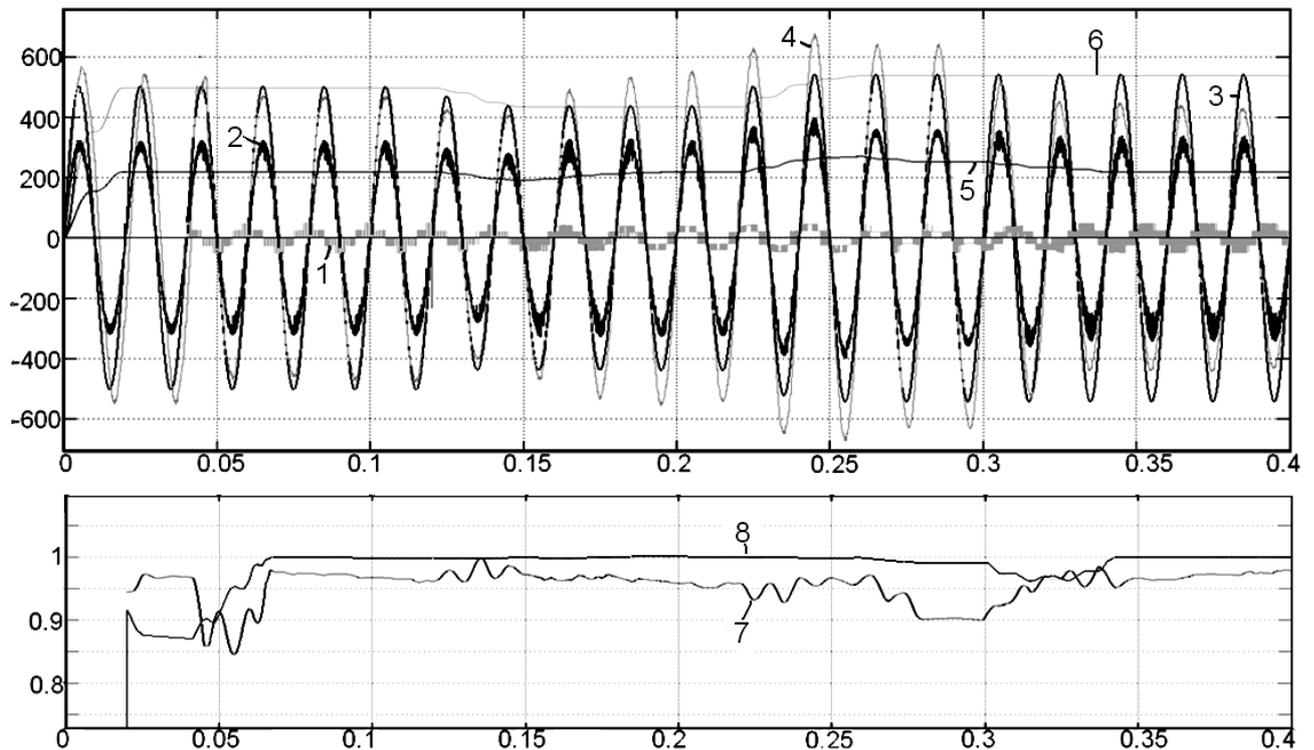


Рисунок 21. Осциллограммы системы КРМСН-СТ при изменении напряжения в сети: 1 – напряжение вольтодобавки; 2 и 5 – мгновенное и действующее значения напряжения нагрузки; 3 и 6 – мгновенное и действующее значения напряжения сети; 4 – ток сети; 7 и 8 – КПД и КМ системы

В ходе исследований подтверждено, что система выполняет свои функции при отклонениях напряжения в сети и изменениях величины и характера нагрузки. Точность стабилизации действующего значения выходного напряжения

составила  $\pm 0,4$  % от заданного уровня при отклонениях сетевого напряжения на  $\pm 10\%$ .

В ТПФ транзисторные преобразователи ИН и УВ объединены шинами постоянного тока, через которые происходит обмен энергией. Направление потоков активной и реактивной энергии изменяется при регулировании амплитуды и фазы входного тока УВ и действующего значения и фазы выходного напряжения ИН в процессе компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения нагрузки.

При математическом моделировании с применением разработанных специализированных измерительных модулей [4] проведено ряд численных экспериментов, по результатам которых были построены диаграммы распределения полной, активной и реактивной мощности в системе КРМСН-ТП при работе во всех четырех квадрантах импульсно-фазового регулирования (во всех режимах работы). Диаграммы распределения мощностей между электронными и электромагнитными преобразователями энергии исследуемой системы, изображенные на рисунке 22.

На рисунке приведены диаграммы для возможных режимов, во всех из которых полная мощность, потребляемая из сети, меньше полной мощности нагрузки:

-вольтодобавка, недокомпенсация – режим работы КРМСН при пониженном напряжении в питающей сети и с генерацией инвертором недостающей реактивной мощности БКК. На рисунке видно, что возник контур циркуляции полной и активной мощностей (УВ-ИН-ВТ-СТ-УВ) с некоторым избытком мощности, проходящей через СТ. Что касается реактивной мощности, то видно, что и УВ и ИН работают как РС элемент, генерируя реактивную мощность.

- вольтовычет, недокомпенсация - режим работы КРМСН при повышенном напряжении в питающей сети и с генерацией инвертором недостающей реактивной мощности БКК. Из рисунка видно, что возник дополнительный путь следования полной и активной мощностей (Сеть-ВТ-ИН-УВ-Зн). Что касается реактивной мощности, то видно, что и УВ и ИН работают как РС элемент, генерируя реактивную мощность. Режим является энергетически более эффективным, чем вольтодобавка, так как для обеспечения нагрузки той же мощностью требуется меньшая потребляемая мощность из сети, меньшая мощность преобразователя, а также потери активной мощности значительно меньше и отсутствует перегрузка СТ.

- вольтовычет, перекомпенсация - режим работы КРМСН при повышенном напряжении питающей сети и с потреблением инвертором избыточной реактивной мощности БКК. Для имитации режима перекомпенсации была увеличена мощность БКК. Путем изменения фазы ШИМ напряжения инвертор стал потребителем избыточной реактивной мощности.

- вольтодобавка, перекомпенсация - режим работы КРМСН при пониженном напряжении питающей сети и с потреблением инвертором избыточной реактивной мощности БКК.

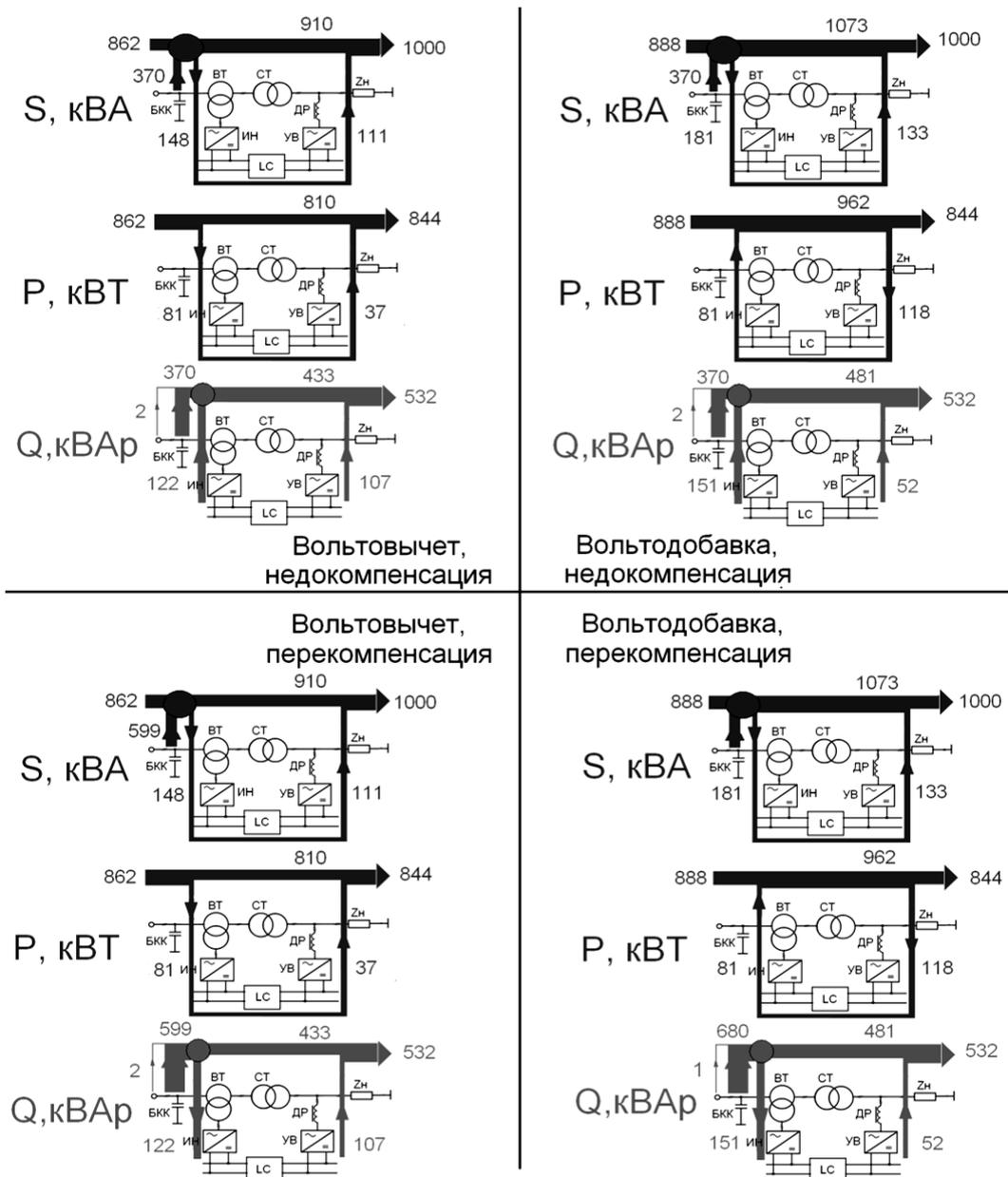


Рисунок 22. Диаграммы перетоков полной, активной и реактивной мощности в системе КРМСН-ТП при различных режимах работы

Решая задачи компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения нагрузки, КРМСН, воздействуя на напряжение и ток, оказывает влияние на их форму.

При проведении количественной оценки энергетических показателей в каждом из режимов работы системы КРМСН-ТП ставилась задача определения коэффициентов качества электроэнергии и показателей энергоэффективности:

1) коэффициенты искажения  $K_i$  токов через элементы схемы (тока, потребляемого подстанцией из сети; тока, потребляемого нагрузкой; тока, потребляемого управляемым выпрямителем). Под исследуемыми искажениями подразумеваются те, которые вызваны именно работой КРМСН, а не нелинейностью, несогласованностью и прочими отклонениями нагрузки.

2) коэффициенты несинусоидальности  $K_u$  напряжений на элементах схемы (напряжение питания потребителя; напряжения на входе силового трансформатора; добавочного напряжения, сформированного ИН и ВТ).

3) сравнительный анализ величин полной  $S$ , активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей, потребляемых нагрузкой и из сети для количественной оценки экономии электроэнергии.

4) КПД и коэффициент мощности подстанции при установке на ней КРМСН.

Исследование проведено в среде MATLAB при помощи специально разработанного комплекса математических моделей, описанного в главе 3. Полученные результаты приведены далее в таблице 1 и рисунке 23.

Таблица 1. Показатели КРМСН

| №    | Показатели   | Полученное значение                         |
|------|--|---|
| 1    | <b>Технические показатели</b>  |   |
| 1.1  | Мощность нагрузки, кВ•А  | 1000  |
| 1.2  | Напряжение питающей сети, кВ   | $6 \pm 11 \%$ ;                             |
| 1.3  | Число фаз питающего напряжения                                       | 3   |
| 1.4  | Номинальная частота питающего напряжения, Гц                         | 50  |
| 1.5  | Напряжение нагрузки, кВ  | $0,4 \pm 0,4 \%$ ;                          |
| 1.6  | Номинальная частота выходного напряжения, Гц                         | 50  |
| 1.7  | Фаза тока нагрузки, град   | 30  |
| 1.9  | Быстродействие, сек  | 0,01-0.02                                   |
| 1.10 | Характер нагрузки  | Активно-индуктивный                         |
| 2    | <b>Энергетические показатели</b>                                     |   |
| 2.1  | Точность стабилизации выходного напряжения на заданном уровне, %     | $\pm 0,4$                                   |
| 2.2  | Коэффициент мощности системы КРМСН-ТП                                | 0,98-0,999                                  |
| 2.3  | Коэффициент несинусоидальности напряжения питания потребителя        | 0,05-0,11<br>в зависимости от режима работы |
| 2.4  | Коэффициент несинусоидальности напряжения на входе СТ                | 0,06-0,1<br>в зависимости от режима работы  |
| 2.5  | Коэффициент несинусоидальности напряжения питающей сети              | 0   |
| 2.6  | Коэффициент несинусоидальности ШИМ напряжения инвертора              | 0,25-0,4                                    |
| 2.7  | Коэффициент искажения тока вторичной обмотки силового трансформатора | 0,99-1                                      |
| 2.8  | Коэффициент искажения тока нагрузки                                  | 1   |
| 2.9  | Коэффициент искажения тока, потребляемого выпрямителем               | 0,965-0,99                                  |
| 2.10 | КПД системы КРМСН-ТП   | 0,95-0,97                                   |

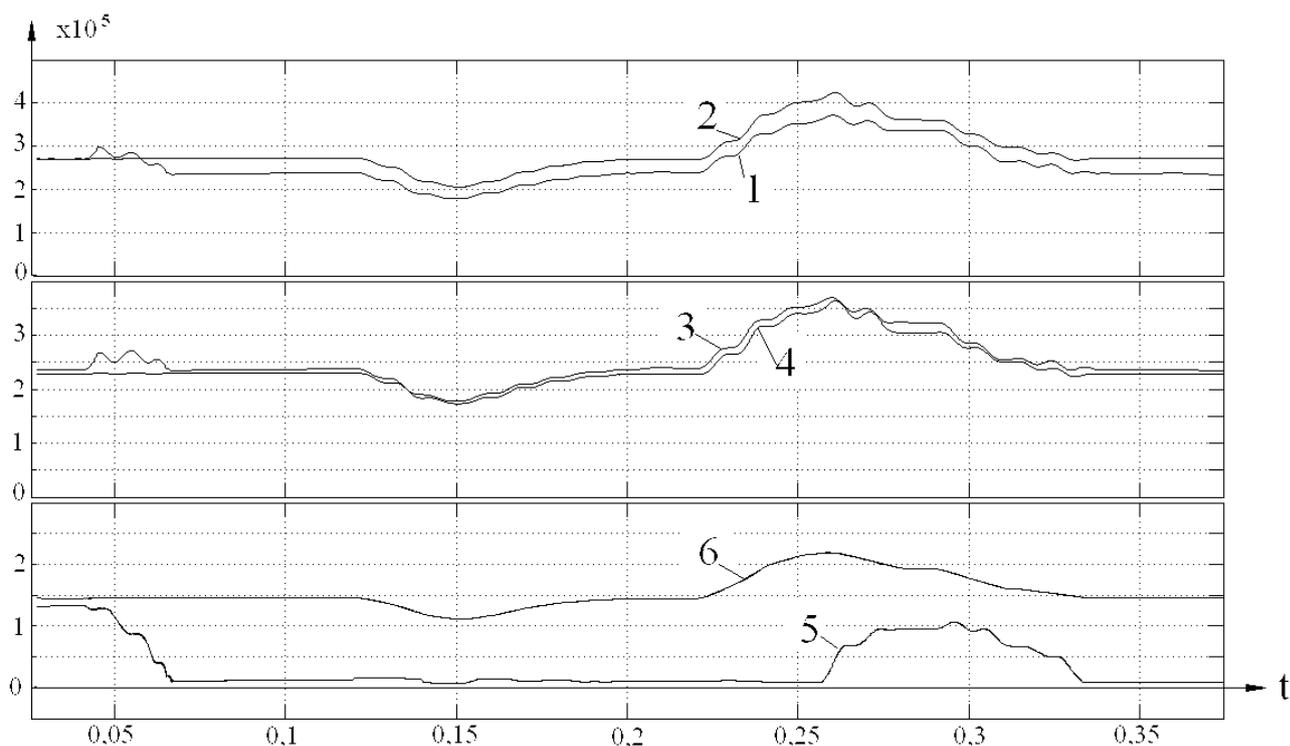


Рисунок 23. Диаграммы полной мощности (сверху), активной мощности (в центре) и реактивной мощности (снизу):

- 1 – полная мощность, потребляемая из сети.
- 2 – полная мощность, реально потребляемая нагрузкой.
- 3 – активная мощность, потребляемая из сети.
- 4 – активная мощность, реально потребляемая нагрузкой.
- 5 – реактивная мощность, потребляемая из сети.
- 6 – реактивная мощность, реально потребляемая нагрузкой.

### Оценка снижения потерь в ЛЭП от применения системы КРМСН-ТП

Приведенные ранее исследования показали, что общий КПД подстанции при установке на ней дополнительного оборудования КРМСН составит 0,95 – 0,97 относительно штатной подстанции.

Однако, такое рассмотрение КПД не совсем верное, так как при этом не учитывается эффект снижения потерь в питающей высоковольтной линии электропередачи из-за уменьшения потребляемого тока при компенсации реактивной мощности и устранении повышенного напряжения на входе СТ и у потребителей.

В приведенной на рисунке 24 модели (сверху) RL- нагрузкой для ЛЭП представлено эквивалентное сопротивление схемы замещения СТ подстанции под нагрузкой без КРМСН, а – R-нагрузкой (снизу) подстанции с КРМСН.

Сравнительный анализ проводится при одинаковых в обоих случаях напряжениях 6000В и потребляемой активной мощности 846,7 кВт. Это можно видеть на индикаторах (рисунок 22). Расчет произведен для одного километра одноцепной трехпроводной линии электропередачи ВЛ-6кВ с изолированной нейтралью с проводами АС-50.

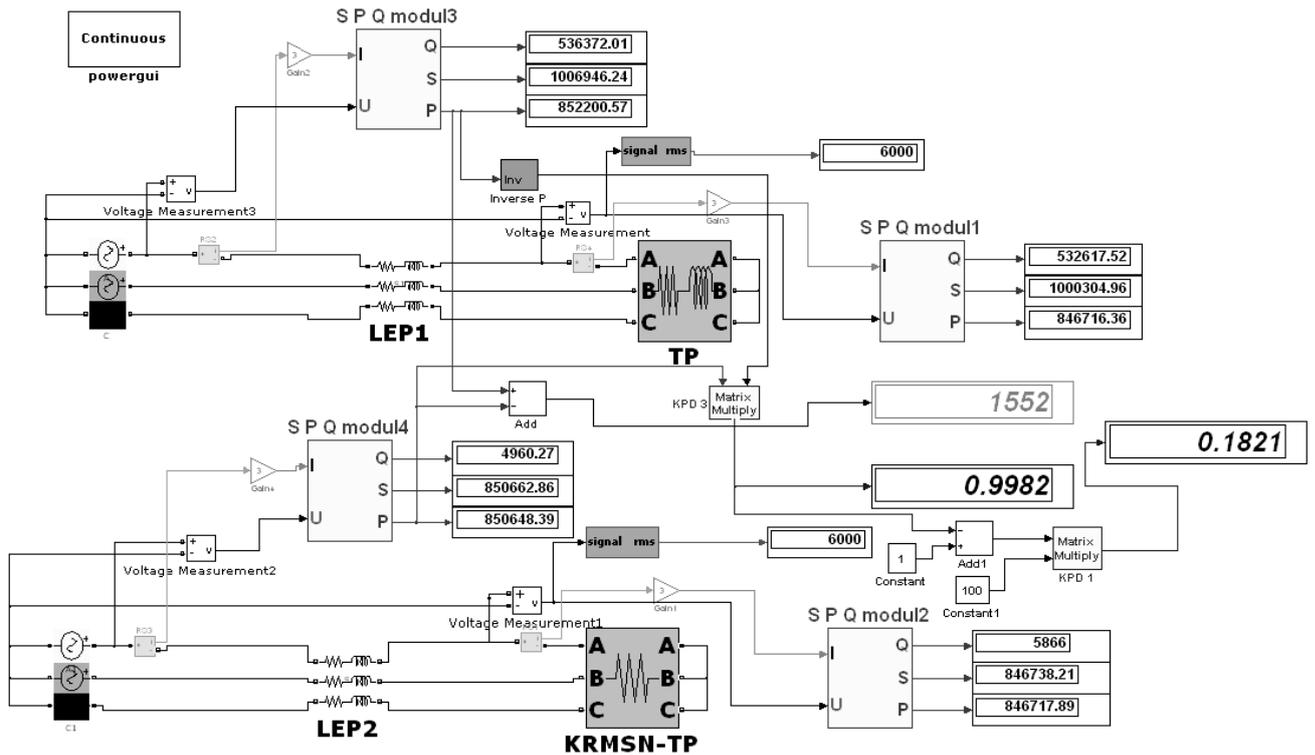


Рисунок 24. Модель для оценки снижения потерь мощности в 1 километре ЛЭП

Расчет показал, что при данной величине мощности подстанции с КРМСН в 1 км в питающей ЛЭП потери составили на 1552 Вт меньше, чем при питании штатной схемы подстанции. В относительных единицах данная величина потерь составляет 0,1821% от активной мощности подстанции. Это значит, что каждый учтенный километр ЛЭП повышает оцениваемый КПД системы КРМСН-ТП в данном случае на 0,1821%. Например, при учете длины питающей ЛЭП, равной 10 км, КПД системы КРМСН-ТП повысится на 1,821%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены принципы построения КРМСН на основе вольтодобавочного трансформатора и транзисторного преобразователя со звеном постоянного напряжения, обеспечивающие регулируемую генерацию или потребление реактивной энергии с одновременной стабилизацией напряжения у потребителей без искажения инвертором и выпрямителем тока в трансформаторах и сети. Регулируемая часть мощности подстанции, пропорциональной требуемому диапазону регулирования модуля вектора добавочного напряжения.

2. Разработан алгоритм формирования и регулирования модуля и аргумента вектора добавочного напряжения по информации о величине и знаке сигналов, снимаемых с двух датчиков – датчика реактивной мощности сети и датчика отклонения напряжения на нагрузке. Система КРМСН с предложенным алгоритмом формирования и регулирования напряжения позволяет обеспечить прямую полную компенсацию реактивной энергии сети с одновременной

стабилизацией напряжения у потребителей электроэнергии независимо от жесткости внешней характеристики сети, а также величины и характера нагрузки.

3. Предложен способ регулируемого подключения конденсаторов к трехфазной сети при помощи диодного выпрямителя и реактора, обеспечивающий плавность заряда конденсаторов с формированием в процессе заряда синусоидальной формы напряжения и тока за счет изменения угла коммутации диодов.

4. Предложен способ надежной защиты КРМСН при его включениях и отключениях при работе ТП под нагрузкой.

5. Создан комплекс программ в среде MatLab и математическая модель КРМСН на основе разработанных силовых транзисторных модулей и микроэлектронных модулей их систем управления с применением разработанных специализированных измерительных модулей. На основе этого комплекса программ проведены исследования КРМСН в установившихся и переходных режимах работы, по результатам которых методом энергетических диаграмм получено полное представление об энергообмене между сетью и нагрузкой, а также между электронными и электромагнитными устройствами системы в целом и дана оценка энергетическим показателям.

6. При отклонениях питающего напряжения в пределах  $\pm 10\%$  от номинального КРМСН обеспечивает стабильный уровень напряжения потребителей на уровне  $220 \pm 0,4\%$ .

7. Величина коэффициента искажения синусоидальности напряжения у потребителя в зависимости от режима работы подстанции с КРМСН составляет от 5 до 11%.

8. При активно-индуктивном характере нагрузки с  $K_m=0,84$  КРМСН совместно с дискретной ступенью компенсации реактивной мощности (БКК) обеспечивают коэффициент мощности на входе подстанции в пределах от 0,99 до 0,999.

9. При снижении общего КПД подстанции за счет введения в ее состав КРМСН в среднем на 4% получаем повышение коэффициента мощности на входе подстанции на 16% по сравнению с той же подстанцией без КРМСН. Так среднее повышение энергоэффективности подстанции при применении КРМСН по данным эксперимента составило 12%.

### **Список научных работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:**

1. **Климаш С.В.** Исследование компенсаторов реактивной мощности в тяговой сети переменного тока с двухступенчатой коммутацией конденсаторов гибридными аппаратами / С.В. Власьевский, С.В. Климаш // М: Электроника и электрооборудование транспорта, №3, 2018, с. 13-16.

2. **Климаш С.В.** Способ и устройство подключения конденсаторов к трансформаторным подстанциям / С. В. Власьевский, С. В. Климаш // Омск, ОмГТУ: Омский научный вестник, №1, 2018, с. 23-27.

3. **Климаш С.В.** Электронно-электрические аппараты для компенсаторов реактивной мощности в промышленных и тяговых сетях переменного тока / Ю.М. Иньков, В.С. Климаш, С.В. Климаш // М.: Практическая силовая электроника, №2, 2018, с. 31-35.

4. **Климаш С.В.** Исследование электротехнического комплекса в среде MatLab с применением специализированных модулей / Ю.М. Иньков, В.С. Климаш, С.В. Климаш, Е.А. Жемчужина // М.: Электротехника, № 9, 2017, с. 13-18.

5. **Климаш С.В.** Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде MATLAB / С.В. Климаш, В.С. Климаш, С.В. Власьевский // Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова: Электротехнические системы и комплексы, №4, 2017, с. 11-16.

#### **Статьи, входящие в международную систему цитирования Scopus и Web of Science:**

6. **Klimash, S.V.** Investigation of an electrical complex using specialized modules in the MatLab environment / Y.M. In'kov, V.S. Klimash, S.V. Klimash, E.A. Zhemchuzhina // Russian Electrical Engineering, №88(9), 2017, pp. 568-572.

7. **Klimash, S.V.** Principles for construction the compensators of reactive power with voltage stabilization for transformer substations / S.V. Vlasayevsky, S. V. Klimash//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, №90, 2017, 9 p.

8. **Klimash, S.V.** Measuring modules for reactive power with voltage stabilization in MATLAB / S.V. Vlasayevsky, S. V. Klimash//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, №90, 2017, 5 p.

#### **Патенты на изобретения и свидетельства на программы для ЭВМ:**

9. **Патент РФ** на изобретение №2648690 Компенсатор реактивной мощности со стабилизацией напряжения трансформаторной подстанции. / С.В. Власьевский, С.В. Климаш (Россия) // Оpubл. Б.И. №10, 28.03.2018.

10. **Патент РФ** на изобретение №2665476 Устройство для подключения конденсаторов к трехфазной сети / С.В. Климаш, С.В. Власьевский, Ю.М. Иньков, В.С. Климаш (Россия) // Оpubл. Б.И. №25, 30.08.2018.

11. **Патент РФ** на изобретение №2579437 Система автостабилизации трехфазного синусоидального напряжения трансформаторных подстанций / С.В. Власьевский, С.В. Климаш (Россия) // Оpubл. Б.И. №10, 10.04.2016.

12. **Свидетельство РФ** на программу №2016 616629 Программный комплекс в среде MatLab для исследования систем тягового и промышленного электроснабжения с применением устройств силовой электроники на трансформаторных подстанциях / С.В. Климаш, С.В. Власьевский (Россия) //Оpubл. Б.И. №7, 16.06.2016.

#### **Публикации в других изданиях**

13. **Климаш С.В.** Исследование вольтодобавочного устройства с транзисторным преобразователем фазы в составе трансформаторной подстанции / С.В. Климаш, С.В. Власьевский // Труды II Всероссийской научно-практической

конференции, Электропривод на транспорте и в промышленности, ДВГУПС, 2018, с.11-16.

14. **Власьевский С.В.** Принципы построения электронных устройств для повышения качества и экономии электроэнергии в системах электроснабжения / С.В. Власьевский, С. В. Климаш // Материалы Всероссийской конференции, Вестник ИТПС, ДВГУПС, №12, 2016, с.9-12.

15. **Климаш С.В.** Динамические процессы компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения в составе трансформаторной подстанции / С.В. Климаш, С.В. Власьевский // Научно–техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: Труды международной научной конференции творческой молодёжи, 2015 г.