

На правах рукописи



**Табаров Бехруз Довудходжаевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО  
УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОМПЛЕКТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ  
ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность 05.09.03 –  
«Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Научный руководитель: **Климаш Владимир Степанович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «КНАГУ»

Официальные оппоненты: **Мельниченко Олег Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав» ФГБОУ ВО «ИрГУПС»;

**Игнатенко Иван Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита состоится 27 сентября 2019 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.999.086.03 на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корпус 3, аудитория 201. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КНАГУ» и на официальном сайте [https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/show/117](https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/117). Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ», учёному секретарю диссертационного совета Д.999.086.03, e-mail: [eraru@knastu.ru](mailto:eraru@knastu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
Д 999.086.03, к.т.н., доцент



А.С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Диссертационная работа направлена на решение задач, связанных с расширением функциональных возможностей реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства (Р-ТПУ) предназначенного для улучшения энергетических показателей, повышения надежности и увеличения срока службы электрооборудования трансформаторной подстанцией (ТП) за счет применения двухподдиапазонного Р-ТПУ на высокой стороне комплектной ТП и его специального способа включения, выключения и регулирования напряжения ТП.

В настоящее время трансформаторные подстанции не оснащаются устройствами силовой электроники. В их комплект входит различная коммутационная аппаратура. Это высоковольтные и низковольтные выключатели, предназначенные для подключения силовых трансформаторов подстанции к сети и нагрузке, отключения его из сети, а также механические переключающие устройства типа переключателей без возбуждения (ПБВ) и регуляторов под нагрузкой (РПН), для дискретного регулирования напряжения при отключенном силовом трансформаторе от сети и при работе под нагрузкой соответственно.

Опыт эксплуатации существующих ТП показывает, что применяемые в настоящее время на ТП коммутационные электрические аппараты (выключатели, контакторы, и др.) и регуляторы напряжения с механическими контактами не обеспечивают управляемое включение, выключение и непрерывное регулирование напряжения.

К недостаткам существующих выключателей с механическими контактами следует отнести включение при одновременном замыкании контактов во всех трех фазах, которые сопровождаются переходными процессами с большими бросками токов и просадками напряжения в сети. Кроме этого, выключение разрывом электрической цепи механическими контактами сопровождается дугой. Все это приводит к дополнительным потерям в силовых трансформаторах и в сети, увеличению материалоемкости, удорожанию и сокращению срока службы электрооборудования. Кроме этих недостатков РПН создает еще более тяжелые режимы для силовых трансформаторов, поскольку при переключении отпаек возникают межвитковые короткие замыкания с ударными токами и электродинамическими усилиями в высоковольтных обмотках. Мало того, что РПН само по себе сложное и дорогостоящее устройство, его применение в комплектных трансформаторных подстанциях (КТП) приводит еще и к усложнению и удорожанию эксплуатации. Силовые трансформаторы со встроенным РПН имеют большое количество ответвлений в первичной обмотке. Это усложняет технологию производства трансформаторов и увеличивает их стоимость.

Все это подчеркивает важность и актуальность задачи разработки различных способов и устройств, направленных на устранение недостатков, расширение функциональных возможностей управления ТП с электрическими аппаратами, а также предотвращение аварий, вызванных межвитковыми короткими

замыканиями при регулировании напряжения за счет переключения ответвлений регулятора.

**Степень разработанности темы исследований.** Значительный вклад в исследование, разработку технических решений, связанных с расширением функциональных возможностей при управлении трансформаторным подстанциями внесли: Третьяк Г.Т., Чернышев Н. А., Буткевич Г.В., Розанов Ю.К., Мелькумов А.М., Залесский А.М., Кукеков Г.А., Афонин В.В., Бронштейн А.М., Сергей В.У., Гарсон Р.Д., Батхон И.С., Попов А.А., Сельменева Д.С., Чунихин А.А., Майр О., Куйзи–Нас Э.П., Неклепаев Б.Н., Robert A., Zezhong Z., Schwarz J., Habedank U., и др. Вопросом регулирования напряжения на высокой стороне силового трансформатора подстанции занимались такие отечественные ученые, как Сергеевков Б.Н., Брускин Д.Э., Абрамович Б.Н., Бадёр М.П., Киселев В.М., Акимова Н.А., Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М., Климаш В.С., Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С., Князевский Б.А., Рожкова Л.Д., Кацман М.М., Герасимов С.Е., Маркушевич, Н.С., Будник В. В. и др.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование нового двухдиапазонного реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства и способов управления им, связанных с повышением надежности и увеличением срока службы электрооборудования ТП, а также расширения функциональных возможностей двухдиапазонного Р-ТПУ при управлении ТП во всех их режимах работы за счет непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне ТП для стабилизации напряжения у потребителей с улучшенной формой напряжения нагрузки и тока, потребляемого из сети.

В соответствии с поставленной целью в работе были рассмотрены и решены следующие **задачи**:

1. Построение модели ТП по штатной схеме в среде MatLab.
2. Исследование штатной схемы при управлении и регулировании напряжения ТП. Изучение переходных процессов и выявление недостатков.
3. Разработка новой схемы ТП с двухдиапазонным реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством (Р-ТПУ).
4. Построение модели ТП по схеме двухдиапазонный Р-ТПУ в среде MatLab.
5. Разработка новых модулей математической модели в среде MatLab, и проверка их адекватности физическим моделям.
6. Разработка системы импульсно-фазового управления двухдиапазонного Р-ТПУ в составе ТП.
7. Исследование динамических процессов и разработка способов управления ТП, а также способов перехода от регулирования напряжения к выключению на стационарный режим работы ТП.
8. Исследование физических процессов при работе трансформаторной подстанции от двухдиапазонного Р-ТПУ.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен принцип построения ТП с двухдиапазонным Р-ТПУ.

2. Разработан новый способ двухподдиапазонного непрерывного регулирования напряжения на входе ТП с улучшенными энергетическими показателями.

3. При исследовании процессов двухподдиапазонным Р-ТПУ – СТ на разработанном специализированном программном комплексе выявлены следующие свойства:

- включение СТ без электродинамических усилий и просядок напряжения.
- выключение СТ без возникновения электрической дуги, коммутационных потерь и перенапряжений на контактах выключателей.
- плавное регулирование напряжения при переходе с одного уровня напряжения на другое с сохранением фазу тока, потребляемого из сети в процессе стабилизации напряжения у потребителей.

4. Разработана методика расчёта параметров двухподдиапазонного Р-ТПУ с разных положительных и отрицательных отклонений напряжении.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Предложены новые способы и устройства для построения модели двухподдиапазонного Р-ТПУ – СТ с расширением функциональных возможностей двухподдиапазонного Р-ТПУ при управлении ТП, а также стабилизирующего напряжения у потребителей с помощью предложенного устройства на высокой стороне ТП.

2. Разработана математическая модель специализированного программного комплекса двухподдиапазонного Р-ТПУ – СТ.

3. В среде MatLab разработаны системы импульсно–фазового управления двухподдиапазонного Р-ТПУ.

4. Новизна технических решений подтверждается свидетельством на программу для ЭВМ, патентом на изобретение и полезную модель.

**Объектом исследования является** комплектная трансформаторная подстанция напряжений 35 / (10 – 6) и (10 – 6) / 0.4 кВ.

**Предметом исследования являются** регулировочные свойства двухподдиапазонного Р-ТПУ на высокой стороне ТП и энергетические показатели подстанции по схеме БК – Р-ТПУ – СТ, а также процессы включения и выключения СТ посредством Р-ТПУ.

#### **Методология и методы исследований.**

Результаты научных исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, основывались на применении методов теории электрических цепей, теории дифференциальных уравнений, теории автоматического управления и математического моделирования. Для решения поставленной задачи исследования использовался пакет Simulink среды MATLAB.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель специализированного программного комплекса двухподдиапазонного Р-ТПУ на высокой стороне ТП.

2. Разработка системы импульсно-фазового управления двухподдиапазонного Р-ТПУ – СТ.

3. Техническое решение для реализации двухдиапазонный Р-ТПУ на высокой стороне ТП.

4. Новый способ включения и выключения ТП, а также непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне ТП.

5. Результаты моделирования численными экспериментами ТП в среде MatLab при управлении ТП и непрерывном регулировании напряжения на его высокой стороне.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность результатов диссертационного исследования и его основные научные положения, и выводы, основываются на фундаментальных положениях общей теории электротехники, математики, теории автоматического управления, математического моделирования и подтверждаются соответствием результатов теоретических исследований и результатов, полученных численными экспериментами в среде Matlab. Основные материалы исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– XXXIII Международная научно–практическая конференция «International Scientific discoveries 2018». Электронный ресурс, научный центр «Олимп» (г. Москва, 27 февраля 2018 г.);

– Электрооборудование: эксплуатация и ремонт (г. Москва, 20 декабря 2018 г.);

– IX Международная научно–практическая конференция «World Science: Problems and Innovations» (г. Пенза, 30 апреля 2017 г., МЦНС «Наука и просвещение»);

– Международная научно–практическая конференция «Роль интеграции науки, инновации и технологии в экономическом развитии стран» (Республика Таджикистан, г. Душанбе–Куляб, 27–29 мая 2016 г., ИТиИМ в г. Куляб);

– Научно–техническое творчество аспирантов и студентов «Материалы 46–47–й научно–технической конференции студентов и аспирантов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 01–15 апреля 2016 г., 10–21 апреля 2017 г., КнАГТУ);

– Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно–коммунальном хозяйстве «Сборник материалов III Поволжской научно-практической конференции» (г. Казань, 7–8 декабря 2017 г., КГЭУ);

– Научно–техническое творчество аспирантов и студентов «Материалы всероссийской научно–технической конференции студентов и аспирантов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 09–20 апреля 2018 г., КнАГТУ);

– Материалы отчетной конференции аспирантов Республики Союза Мьянма, прошедших первый год обучения (г. Комсомольск-на-Амуре, 24 ноября 2016 г., КнАГТУ).

**Научные достижения.** Новизна и значимость полученных результатов диссертационного исследования признана, автор награжден дипломом за II место (IX Международной научно–практической конференции «World Science: Problems and Innovations») в секции «Технические науки» за подготовку научной концепции на тему «Исследование входного тока трансформаторной под-

станции при работе от магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства», а также автор является дважды победителем в конкурсе молодых ученых и аспирантов на получение стипендии имени Н.Н. Муравьева-Амурского (Губернатор Хабаровского края) в 2017 и 2018 году, распоряжением Губернатора Хабаровского края от 26 мая 2017, №286–р и от 07 июня 2018, №274–р.

**Личный вклад соискателя** заключается в следующих работах:

– разработка способов для расширения функциональных возможностей двухподдиапазонного Р-ТПУ при управлении комплектных ТП и непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне ТП;

– построение математической модели специализированного программного комплекса двухподдиапазонного Р-ТПУ на высокой стороне комплектных ТП;

– разработка системы импульсно-фазового управления двухподдиапазонного Р-ТПУ – СТ;

**Реализация работы** осуществлена в лаборатории «Силовая электроника» и используется в дисциплинах «Энергетическая электроника» и «Энергосберегающие электронные устройства» при подготовке магистров на кафедре «Промышленная электроника», в энергослужбе ОАО «Барки Таджики» на подстанции «Душанбе – 500 кВ», а также в ООО «Торэкс–Хабаровск» на участке подстанций ГПП – 4 и ГПП – 5.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 19-ти публикациях, из них 4 – в изданиях из перечня ВАК РФ, в 3 патентах на изобретения, 1 патенте на полезную модель, 1 свидетельстве на программу для ЭВМ, в 1 издании, входящем в международную систему цитирования Scopus и 9 в сборниках трудов и материалах конференций регионального, всероссийского и международного уровня.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, изложенных на 127 страницах машинописного текста, списка литературы из 117 наименований и 7 приложений. В работе содержится 68 рисунков и 4 таблиц.

**Автор выражает благодарность** научному руководителю, профессору кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, доктору технических наук, профессору Климашу Владимиру Степановичу за научные консультации, поддержку и помощь при работе над диссертацией, а также начальнику участка ГПП– 4; 5 и ССКРМ, металлургического предприятия «АМУРМЕТАЛЛ» (2017 г.), Гетопанову Алексею Юрьевичу за помощь в проведении эксперимента на высоковольтных выключателях в реально действующей электроустановке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТ

**Во введении** рассмотрено состояние проблемы при управлении комплектных ТП и непрерывное регулирование напряжения (НРН) на высокой стороне ТП, обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и

основные задачи диссертационной работы, определены научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** проведен анализ существующих технических решений, анализ способов и устройств, связанных с расширениями функциональных возможностей двухподдиапазонного Р-ТПУ при управлении комплектных ТП, а также регулирование напряжения на высокой стороне ТП.

На рисунке 1 представлены штатная схема ТП. Она состоит из трёхфазную сеть ( $\sim U_c$ ), линию электропередачи (ЛЭП), сетевой ВВ (Q1), батареи конденсаторов (БК), ВВ (Q2) в цепи БК, силовой трансформатор (СТ) и активно-индуктивную нагрузку ( $Z_H$ ).

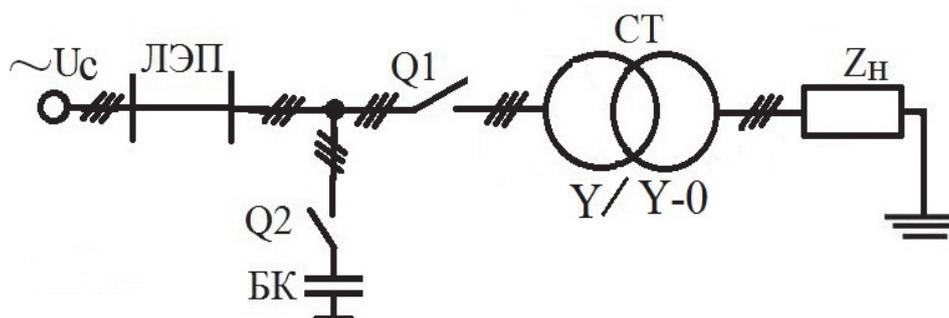


Рисунок 1 – Штатная схема трансформаторной подстанции

Существующие ТП состоят из высоковольтных коммутационных аппаратов с механическими контактами и высоковольтных регуляторов напряжения, имеющих механические переключающие устройства. Поскольку режим работы электрических сетей является нестабильным, из-за внешних и внутренних изменений электрических параметров, в ТП возникает необходимость перехода с одного режима работы (уровня напряжения) на другой режим (уровень). Эти операции выполняются с помощью высоковольтных выключателей (ВВ) и регуляторов напряжения.

В электрических установках напряжением свыше 3 кВ широко распространены ВВ для оперативного включения и отключения электрических цепей. С целью определения надежности работы механического привода ВВ при выполнении операции включения и отключения СТ, были проведены эксперименты в реальной установке, на металлургическом предприятии ОАО «АМУРМЕТАЛЛ», г. Комсомольск-на-Амуре. Эксперимент проводился на участке подстанций ГПП– 4, Т – 2, на выключателе типа ВГТЗ – 220 (протокол испытаний № 23 от 23.11.2016).

На катушки включения (отключения) трёх фаз выключателя одновременно был подан сигнал. Время замыкания (размыкания) основных контактов выключателя фиксировалось прибором контроля высоковольтных выключателей ПКВ/М7 №30, производства СКБ ЭП, 2008г.

Результаты экспериментов показали, что коммутационные электрические аппараты с механическими контактами включают или отключают участок цепи каждой фазы не одновременно, а с допустимыми производителем интервалами, в 10 – 35 мс. Такое включение или отключение электрических цепей удлиняет

переходные процессы и приводит к неравномерному распределению магнитных потоков и электродинамического усилия в обмотках СТ, броску токов и усилению электрической дуги при размыкании контактов. Все это является причиной возникновения аварий, изнашивания изоляции обмоток СТ, сокращению срока службы электрооборудования.

Вопросы регулирования напряжения на высокой стороне трансформаторных подстанций промышленных предприятий и агропромышленного комплекса для поддержания напряжения у потребителей на заданном уровне являются одними из основных задач электрических сетей. Стабильное поддержание напряжения потребителей приводит к снижению потерь электроэнергии и повышению качества электроснабжения.

Регулирование напряжения в существующих ТП выполняется дискретно с помощью ПБВ или РПН. Недостатком такого способа является низкое быстродействие, невысокая точность регулирования напряжения, возникновение переходных процессов в момент переключения, возникновение межвитковых коротких замыканий, и как следствие, быстрый износ контактов регулятора.

Опыт работы ТП показывает, что существующие коммутационные аппараты с механическими контактами и механические регуляторы напряжения отрицательно действуют на работу СТ подстанции, снижают энергетические показатели и сокращают срок службы.

Для проведения исследования включения, выключения и дискретного регулирования напряжения ТП по штатной схеме, в среде MatLab были разработаны модели этого физического процесса.

Аналитическое исследование литературы по данной проблеме, изучение патентов и опыта испытаний в условиях промышленной эксплуатации, а также полученные результаты проведенных численных экспериментов подтверждают вышеуказанные недостатки ТП по штатной схеме, и позволяет создать новое техническое решение применительно к ТП. Оно заключается в разработке специального двухподдиапазонного Р-ТПУ и способа управления им.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы разработки двухподдиапазонного Р-ТПУ – СТ и его системы импульсно-фазового управления, представлены теоретические обоснования расширения функциональных возможностей двухподдиапазонного Р-ТПУ при управлении комплектных ТП и НРН на высокой стороне СТ, обоснование, расчет и выбор элементов силовой части двухподдиапазонного Р-ТПУ, а также приведено математическое описание физических процессов названного устройства.

Предлагаются две схемы подключения устройства двухподдиапазонного Р-ТПУ в первичную цепь СТ подстанции. Они приведены на рисунке 2. В первой схеме (рисунок 2, а) устройство включается между сетью и первичной обмоткой СТ, соединённой в звезду, и его блоки СИФУ–1 и СИФУ–2 синхронизированы с сетью. Во-второй схеме (рисунок 2, б) устройство включается в расщепку звезды первичной обмотки СТ, и его блоки СИФУ–1 и СИФУ–2 синхронизирована с сетью. Обе схемы выполняют регулирование с идентичными физическими процессами и имеют свои достоинства и недостатки при рекон-

струкции существующих и вновь проектируемых ТП с учетом применения в них сухих или масляных СТ. Вместе с тем, преимуществом второй схемы является то, что при возникновении трехфазного короткого замыкания в первичной обмотке СТ тиристоры не подвергаются воздействию аварийным током.

Трансформаторные подстанции с двухподдиапазонным Р-ТПУ предназначены взамен ТП с механическим регулированием напряжения типа регуляторов напряжения без возбуждения (ПВБ) или под нагрузкой (РПН).

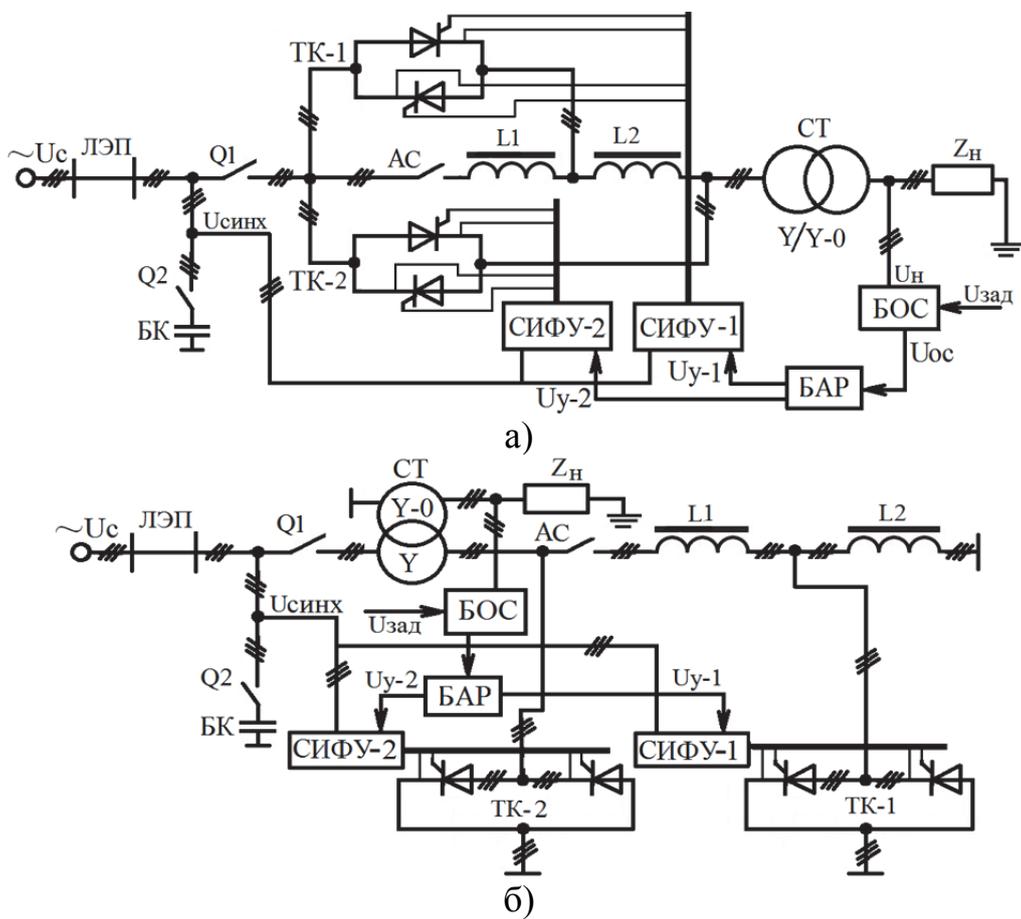


Рисунок 2 – Функциональные схемы трансформаторной подстанции с двухподдиапазонным реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством

Схемы на рисунке 2 содержат трёхфазную сеть ( $U_c$ ), линию электропередачи (ЛЭП), сетевой ВВ ( $Q1$ ), батареи конденсаторов (БК), ВВ ( $Q2$ ) в цепи БК, модули основных ( $TK-1$ ) и дополнительных ( $TK-2$ ) тиристорных ключей (ТК) с сетями, синхронизированными с системами импульсно-фазового управления (СИФУ-1) и (СИФУ-2), контактор (АС), основной ( $L1$ ) и дополнительный ( $L2$ ) реакторы, силовой трансформатор (СТ), блок обратной связи (БОС), блок авторегулирования (БАР) и активно-индуктивную нагрузку ( $Z$ ). Сигнал обратной связи с аналоговыми элементами через блок авторегулирования подается на блоки СИФУ-1 и СИФУ-2 для поддержания стабильности напряжения у потребителей на заданном уровне при изменении напряжения в сети и тока нагрузкой. Синхронизация осуществлена от трехфазного специализированного

понижающего трансформатора, входящего в блок СИФУ–1 и СИФУ–2, первичные обмотки которого подключены перед Q1.

Устройство двухподдиапазонное Р-ТПУ, как и механические переключатели устройства типа ПБВ и РПН включается между сетевым высоковольтным выключателем и первичной обмоткой СТ и может быть конструктивно согласовано, как с сухими, так и масляными трансформаторами и при непрерывном регулировании обеспечивает стабильное напряжение у потребителей при отклонениях напряжения в сети от номинального на  $\pm 10\%$ . При этом оно обеспечивает синусоидальное напряжение на входе и выходе СТ при трех уровнях напряжения в сети (при номинальном уровне, а также при повышенном и пониженном на  $\pm 10\%$ ). Следует отметить, что предложенное устройство само не создает искажение на форму тока и напряжения на входе и выходе устройства.

Предложенное устройство работает следующим образом.

Включение ТП и отключение его от сети производится основными ТК при полностью выключенных дополнительных ТК. При включении СТ сначала включают основные ТК двух фаз в момент перехода фазного напряжения третьей фазы через ноль, а затем включают основной ТК третью фазу, в момент перехода линейного напряжения от двух предыдущих фаз через ноль. После этого включают трехфазный контактор и переходят к регулированию напряжения.

Устройство обеспечивает регулирование напряжения на входе СТ относительно напряжения сети и напряжения на нагрузке потребителей в заданном диапазоне регулирования: максимальный, номинальный и минимальный.

Максимальный уровень регулирования напряжения на нагрузке СТ задают коэффициентом трансформации СТ при полностью выключенных основных ключах и полностью включенных дополнительных ТК при пониженном напряжении в сети и номинальной нагрузке. Дополнительные ТК в этот момент шунтируют основной и дополнительный реактора в цепи первичной обмотки СТ.

Номинальный уровень напряжения на нагрузке обеспечивается при полностью включенных основных ключах, которые шунтируют основной реактора при полностью выключенных дополнительных ТК, при номинальном напряжении сети и номинальной нагрузке.

Минимальный уровень регулирования напряжения на нагрузке задают суммарным сопротивлением основного и дополнительного реакторов при полностью закрытых основных и дополнительных ТК, при повышенном напряжении в сети и номинальной нагрузке.

Разработанное устройство также предусматривает деление диапазона регулирования напряжения на два поддиапазона с гармоническим составом напряжения, удовлетворяющему ГОСТу и без искажения формы и сдвига фазы тока в сети: верхний и нижний.

Верхний поддиапазон регулирования находится между максимальным и номинальным уровнем, а нижний между номинальным и минимальным уровнем регулирования напряжения.

При работе между верхним и нижним поддиапазонами регулирования напряжения введена зона нечувствительности на изменение проводящего состояния, как основных ТК–1, так и дополнительных ТК–2, при которой отклонения напряжения на нагрузке не превышают допустимых значений, как вверх, так и вниз от номинального уровня.

Изменением проводящего состояния ТК–2 производится регулирование напряжения в нижнем поддиапазоне от промежуточного (номинального) до минимального уровня регулирования, а изменением проводящего состояния основных ТК производится регулирование напряжения в верхнем поддиапазоне от промежуточного (номинального) до максимального уровня регулирования напряжения.

Посредством двухподдиапазонного Р-ТПУ на входе ТП регулируется индуктивное сопротивление и падение напряжения на нем. В зависимости от величины положительных и отрицательных отклонений напряжения на входе подстанции необходимо индивидуально выбирать сопротивление основного и дополнительного реактора. Это способствует достижению высокого качества напряжения на нагрузке. С этой точки зрения каждые ТП имеют свои Р-ТПУ.

При выключении ТП основные ТК переводят в полностью проводящее состояние. Затем, выключают трехфазный контактор и снимают управляющие импульсы с основных ТК с естественной коммутацией, без возникновения электрической дуги и коммутационных перенапряжений.

Рассмотрим математическое описание физических процессов предложенного устройства, в процессе стабилизации напряжения у потребителей при вышеуказанных уровнях и поддиапазонах регулирования.

Падение напряжения в Р-ТПУ при:

– минимальном напряжении в сети

$$\Delta U_{\text{мин.}} = \Delta U_{\text{ТК-2}}, \% \quad (1)$$

– номинальном напряжении в сети

$$\Delta U_{\text{ном.}} = \Delta U_{\text{Р2}} + \Delta U_{\text{ТК-1}}, \% \quad (2)$$

– максимальном напряжении в сети

$$\Delta U_{\text{макс.}} = \sum \Delta U_{\text{Р}}, \% \quad (3)$$

где,  $\Delta U_{\text{ТК-1}}$  и  $\Delta U_{\text{ТК-2}}$  – падение напряжений на основных и дополнительных ТК;

$\sum \Delta U_{\text{Р}}$  – сумма падения напряжения в реакторах на основных  $\Delta U_{\text{Р1}}$  и дополнительных  $\Delta U_{\text{Р2}}$  реакторах, соответственно.

Отсюда:

$$\sum \Delta U_{\text{Р}} = \Delta U_{\text{Р1}} + \Delta U_{\text{Р2}}, \% \quad (4)$$

где,  $\Delta U_{\text{Р1}}$  – падения напряжения на основных реакторах;

$\Delta U_{P2}$  – падения напряжения на дополнительных реакторах.

Приведём описание падения напряжения для предложенного устройства при верхнем (5) и нижнем (6), поддиапазонах регулирования напряжений.

$$\Delta U_{\text{верх.под.}} = \Delta U_{P2} + \Delta U_{\text{TK-2}}, \% \quad (5)$$

$$\Delta U_{\text{ниж.под.}} = \Delta U_{P1} + \Delta U_{P2} + \Delta U_{\text{TK-1}}, \% \quad (6)$$

На основании выражений (1) – (6) определяем комплексное падение напряжения в подстанции.

Ниже рассмотрим комплексное падение напряжения в подстанции при трех уровнях и разделенном поддиапазоне между этими уровнями напряжения в сети.

падение напряжения в подстанции при минимальном уровне напряжения

$$\Delta U_{\text{мин.}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{СТ}} + (\Delta U_{\text{TK-2}}), \% \quad (7)$$

Отсюда 
$$\Delta U_{\text{ЛЭП}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos\varphi \cdot L + X \cdot \sin\varphi \cdot L)}{U_{\text{л}}}, \%$$

$$\Delta U_{\text{СТ}} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U \cdot U_{\text{н}}} \cdot 100 = \frac{S}{U} \cdot \frac{R \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi}{U_{\text{н}}} \cdot 100, \%$$

где R и X

$$R = \left( \frac{U_{\text{н.СТ}}}{S_{\text{н}}} \right)^2 \cdot \Delta P_{\text{К.З.}}, \text{ Ом};$$

$$X = \frac{U_{\text{н.СТ}}^2}{S_{\text{н}}} \cdot \frac{U_{\text{х}}}{100}, \text{ Ом};$$

падение напряжения в подстанции при номинальном уровне напряжения

$$\Delta U_{\text{ном.}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{СТ}} + (\Delta U_{P2} + \Delta U_{\text{TK-1}}), \% \quad (8)$$

падение напряжения в подстанции при максимальном уровне напряжения

$$\Delta U_{\text{мин.}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{СТ}} + (\Delta U_{P1} + \Delta U_{P2}), \% \quad (9)$$

Определяем математическое описание падения напряжения в подстанции при верхнем (10) и нижнем (11) поддиапазонах регулирования напряжений.

$$\Delta U_{\text{верх.под.}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + (\Delta U_{P2} + \Delta U_{\text{TK-2}}), \% \quad (10)$$

$$\Delta U_{\text{ниж.под.}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + (\Delta U_{P1} + \Delta U_{P2} + \Delta U_{\text{TK-1}}), \% \quad (11)$$

Регулирование напряжения с помощью предложенного устройства выполняется непрерывно во всех уровнях и поддиапазонах регулирования с хорошими энергетическими показателями.

**Третья глава** посвящена разработке и исследованию математической модели ТП с двухподдиапазонным Р-ТПУ, а также моделирование силового тиристорного модуля ТК-1 и ТК-2 в среде MatLab/Simulink. Математическая модель подстанции построена для схемы рисунок 2, а, и представлены на рисунке 3.

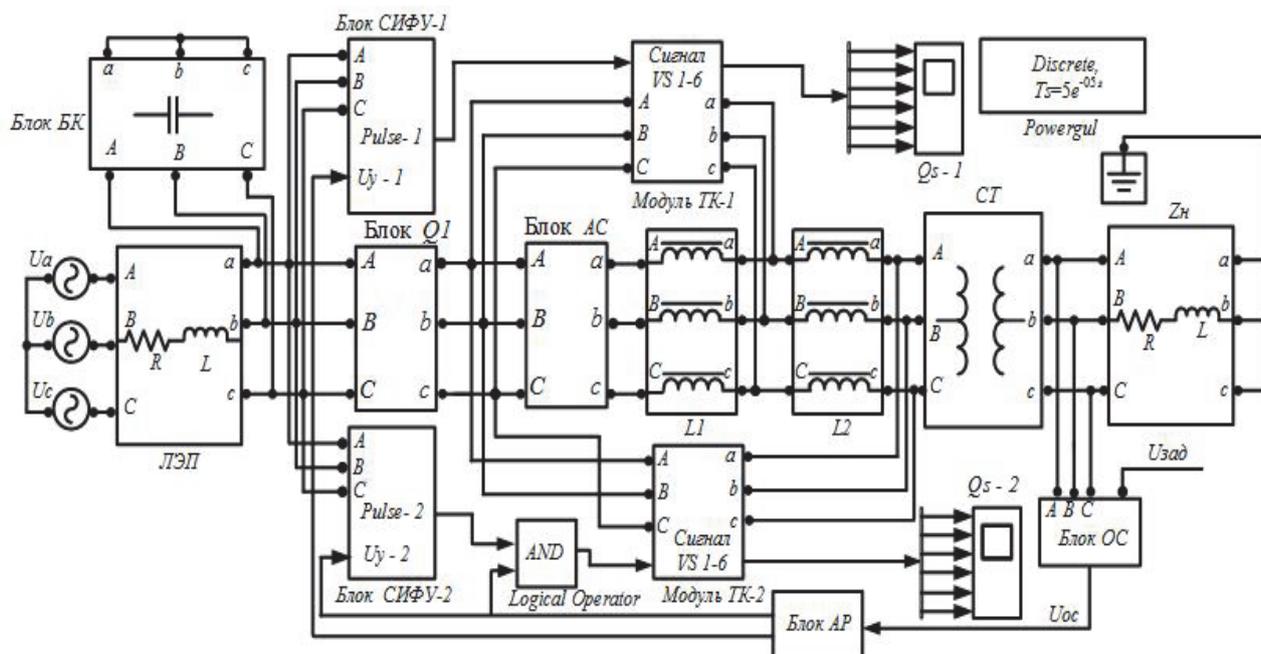


Рисунок 3 – Математическая модель трансформаторной подстанции с двухподдиапазонным Р-ТПУ

В состав модели входят три однофазных источника, образующих трехфазную сеть ( $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ ), линия электропередачи (ЛЭП), блок сетевой высоковольтный выключатель (Q1), блок конденсаторная батарея (БК), блок контактор (АС), модель силовых модулей основных (ТК–1) и дополнительных (ТК–2) ТК с блоками системой импульсно-фазового управления СИФУ–1 и СИФУ–2, основной (L1) и дополнительный (L2) реакторы, силовой трансформатор (СТ), блок обратной связи (БОС), блок авторегулирования (БАР), активно-индуктивная нагрузка (Z) и другие вспомогательные элементы. Следует отметить, что блоки сетевого высоковольтного выключателя (Q1), конденсаторная батарея (БК) и контактор (АС) показаны в развёрнутом виде в третьей главе диссертации.

На рисунке 4 показана развёрнутая модель одного из силовых модулей ТК–1 и ТК–2, каждый из которых состоит из шести тиристоров, соединённых встречно-параллельно пофазно (1 – 6) и имеют частные дифференциальные уравнения и при их стыковке с элементами схемы (рисунок 3) по электротехническим принципам образуют общую систему дифференциальных уравнений исследуемого объекта.

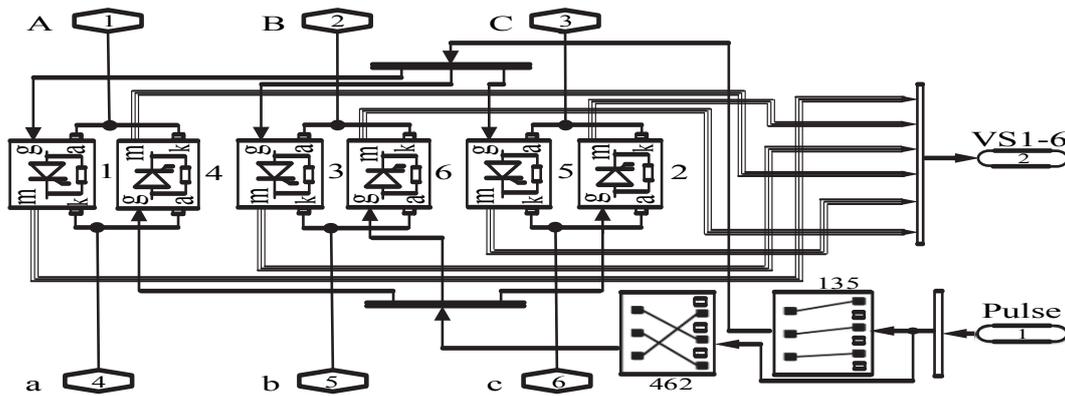
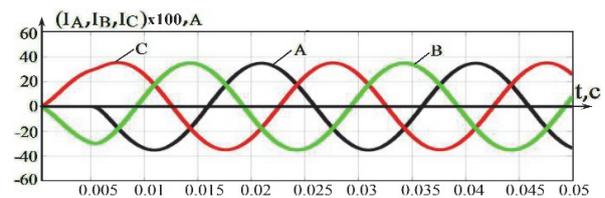
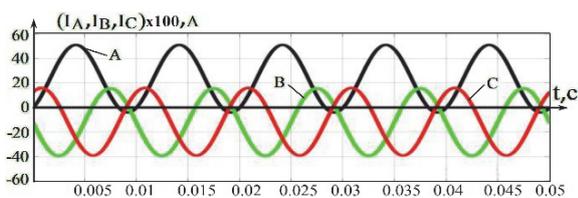
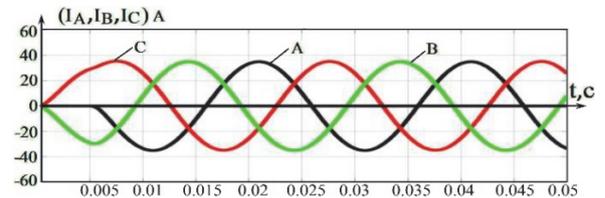
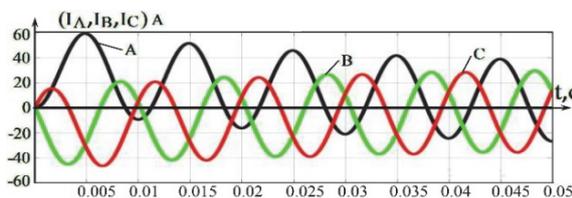


Рисунок 4 – Развернутая схема модели силового тиристорного модуля

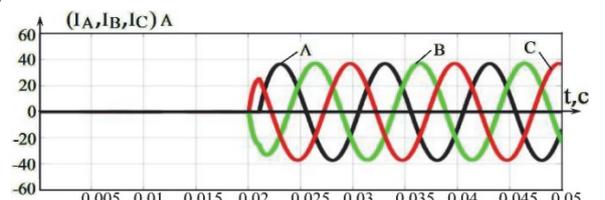
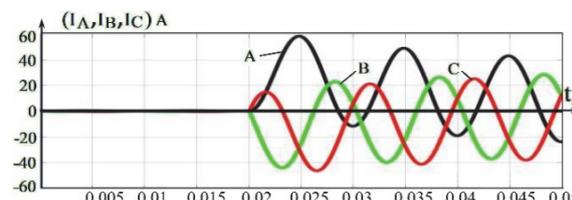
Проанализируем результаты численных экспериментов ТП в среде MatLab по штатной и предложенной схемам. На рисунке 5 представлены результаты исследования численного эксперимента при включении и выключении ТП на холостом ходу (ХХ), под нагрузкой и смешанном. С правой стороны приведены результаты исследования ТП с двухподдиапазонным Р-ТПУ. Предложенное устройство кроме непрерывного регулирования напряжения ещё выполняет операций управления электромагнитными процессами в СТ при его включении и выключении с хорошими энергетическими показателями. Выполнение этих операций не позволяет вызывать электрические дуги при коммутации механических контактов индуктивных цепей, устраняется снижение энергетических показателей и электродинамических ударов на обмотках ТП, что в результате повышает коэффициенты мощности и полезного действия у СТ и у потребителей электроэнергии, уменьшает ток потребления трансформатора, в пусковых и стационарных режимах работы, уменьшает потери и просадки напряжения, выключение СТ происходит без возникновения электрической дуги, а также не происходит коммутационных потерь и перенапряжения на обмотках СТ и на контактах ВВ при управляемом отключении подстанции.



a)



б)



в)

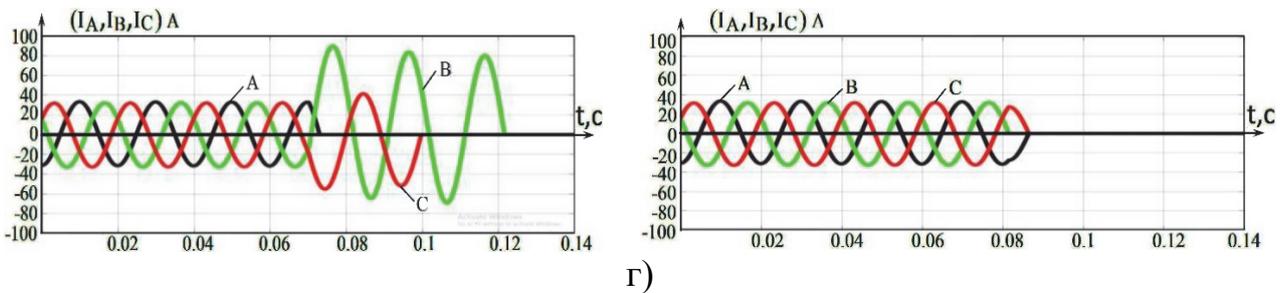
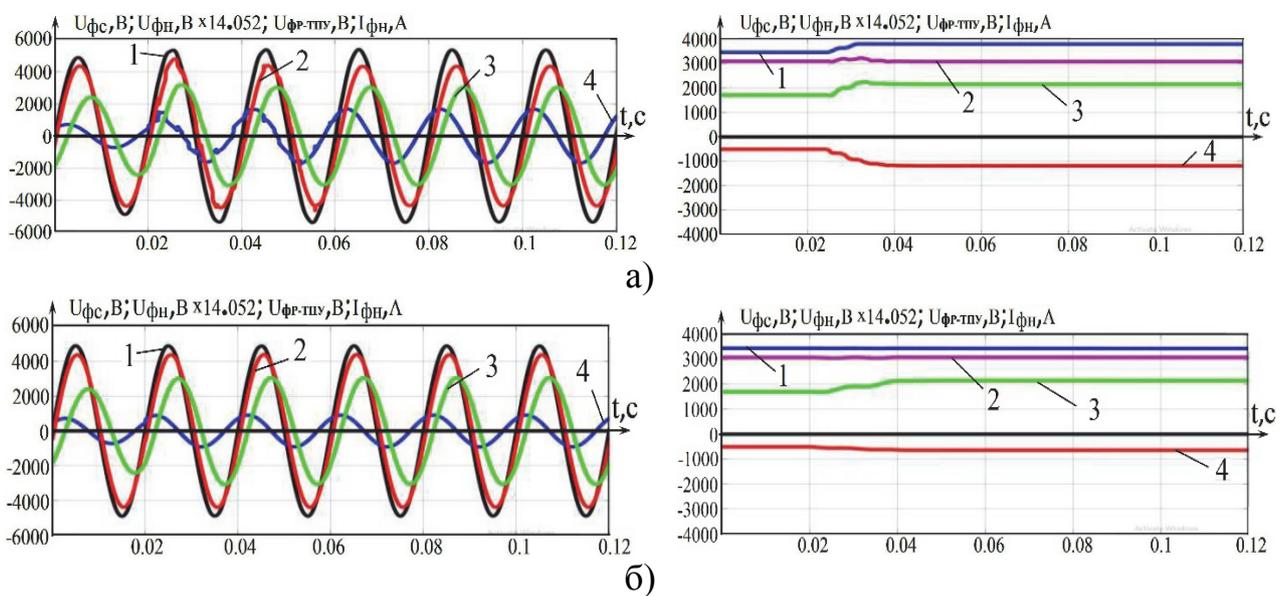


Рисунок 5– Осциллограммы способа включения и выключения трансформаторной подстанции по штатной и новой схеме: а– на холостом ходу; б– под нагрузкой; в– смешенном включении; г – выключения под нагрузкой

Из результатов исследования способа включения ТП с электрическими аппаратами механическими контактами в среде Matlab выяснилось, что включение СТ на ХХ, под нагрузкой и в смешанном создаётся переходной процесс с большими динамическими ударами и неравномерным распределением магнитных потоков в обмотках трансформатора, который в результате ухудшает качество электрической энергии, снижает производительность, изнашивает изоляции обмотки, сокращает срок службы СТ, увеличивает количество проведенных капитальных ремонтов и, наконец, приводит к выходу его из строя.

Осциллограммы рисунка 6 иллюстрируют динамические процессы работы ТП с двухподдиапазонным Р-ТПУ при трех уровнях напряжения в сети. Здесь до момента времени  $t = 0.02\text{c}$  ТП работает в номинальном режиме и при начале момента времени  $t = 0.03\text{c}$  напряжение сети внезапно повышается или понижается на  $\pm 10\%$  (см. рисунок 6, а или 6 в). В номинальном режиме основной реактор шунтируется основными ключами ТК–1. При повышении напряжения ТК–1 плавно запирается, а при понижении ТК–2 плавно открывается. Надписи осциллограммы рисунков 7 и 8 означают фазные напряжения сети 1 и нагрузки, фазный ток нагрузкой 3, а также фазное напряжение 4 в двухподдиапазонном Р-ТПУ. С правой стороны показаны осциллограммы действующего значения этого физического процесса.



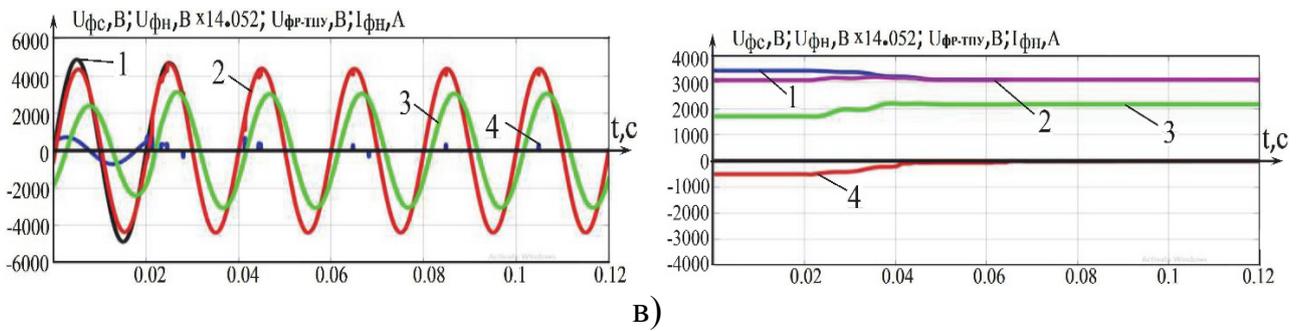


Рисунок 6 – Осциллограммы токов и напряжения при максимальном (а), номинальном (в) и минимальном (б) напряжения в сети

На рисунке 7 приведены результаты исследования динамические процессы работы ТП при верхнем и нижнем поддиапазоне регулирования. Они получены при номинальной нагрузке и отклонениях напряжения в сети на  $\pm 5\%$  от номинального уровня и показаны для одной фазы.

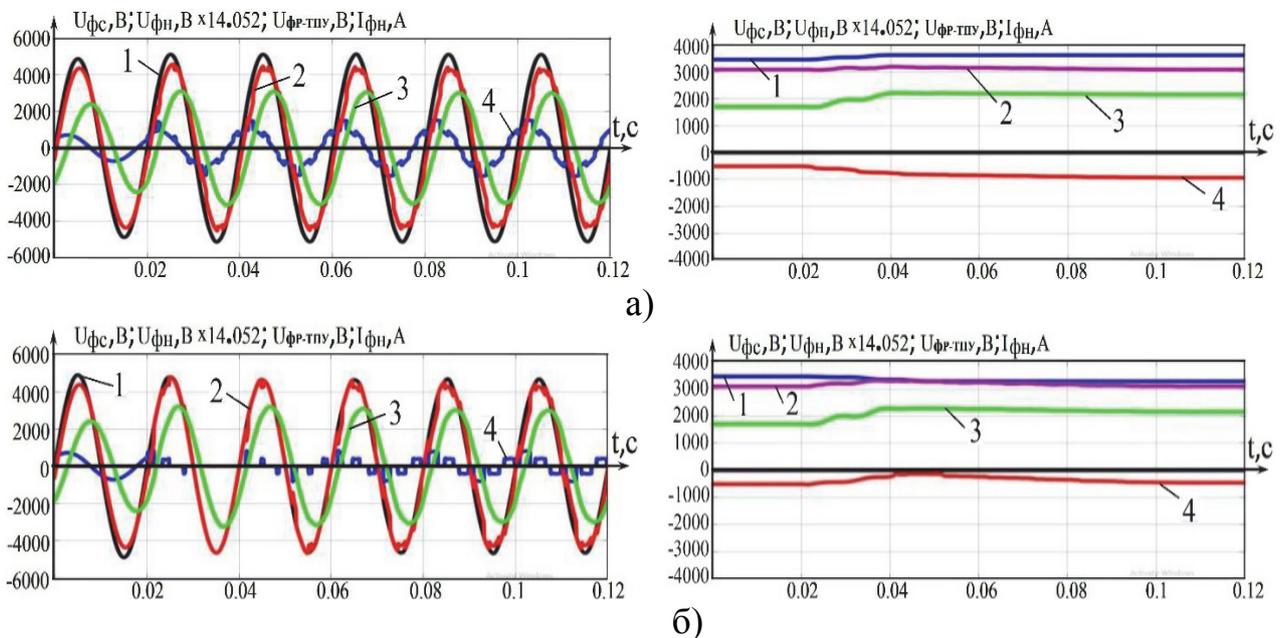


Рисунок 7 – Осциллограммы токов и напряжения в верхнем (а) и нижнем (б) поддиапазонах регулирования напряжения

Анализ этих осциллограмм показал, что форма тока сети искажается незначительно, а его фаза совпадает с напряжением сети, что обуславливает высокую эффективность потребления электроэнергии трансформаторной подстанцией. Отметим, что при смещении регулирования от середины в ту или другую сторону форма напряжения улучшается и стремится к синусоидальной, как показано на рисунке 7.

Исследованиями двухподдиапазонным Р-ТПУ установлено, что регулирование напряжения на высокой стороне ТП не оказывает отрицательного влияния на форму тока сети. Результаты этого исследования иллюстрирует рисунок 8, на котором введены следующие обозначения: 1 и 2 – фазные токи сети и дополнительный реактор; 3 – фазный ток основного тиристорного ключа.

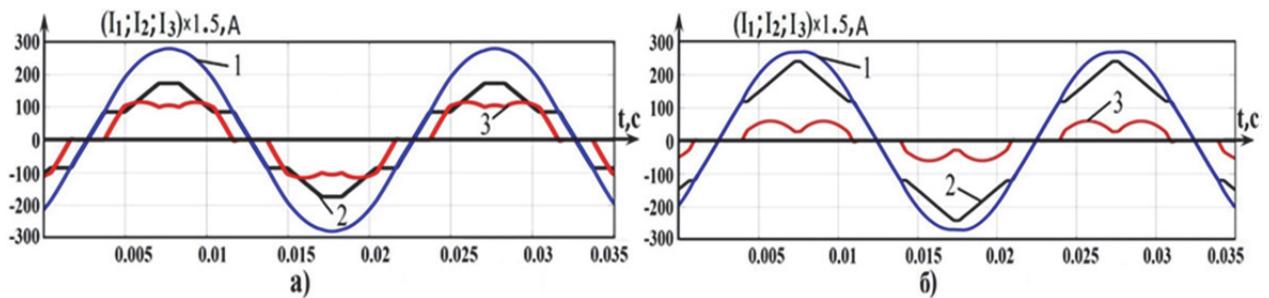


Рисунок 8 – Осциллограммы токов при разных углах управления тиристорами

Из этих осциллограмм видно, что токи тиристорov и реакторов искажаются, а их сумма, являясь током сети и током силового трансформатора, сохраняет синусоидальную форму при любых углах управления. Это одно из замечательных свойств устройства, которое в процессе регулирования не создаёт дополнительных потерь в силовом трансформаторе и в сети.

На рисунке 9 представлены результаты численных экспериментов сдвига фазы тока сети по штатной и предложенной схеме при стабилизации напряжения у потребителей с одновременной компенсацией реактивной мощности. Здесь введены следующие обозначения: 1 – фазное напряжение сети; 2, 3 и 4 – фазные токи конденсатора, сети и входного тока СТ; 5, 6 и 7 – реактивные мощности ТП в комплекте с Р-ТПУ, сети и конденсаторной батареей.

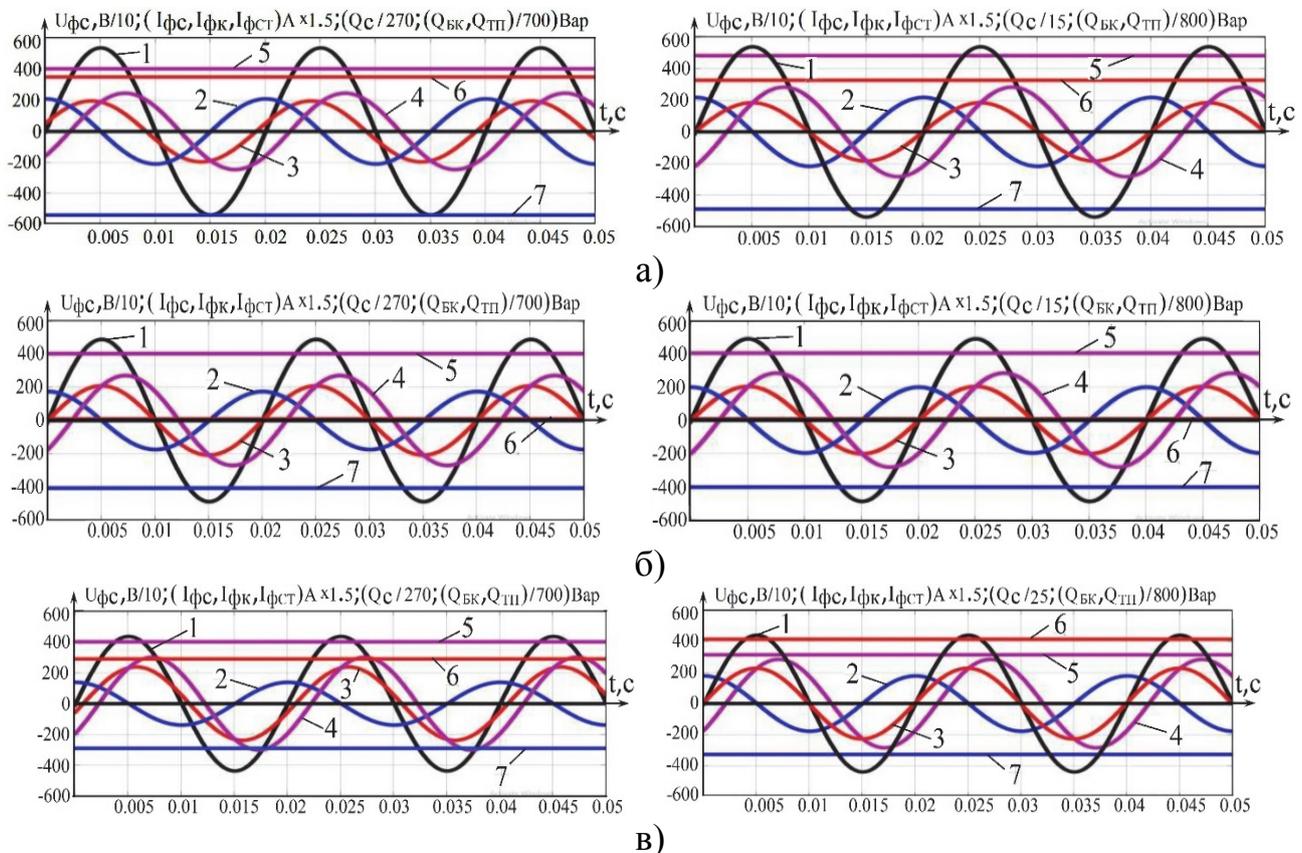


Рисунок 9– Осциллограммы напряжения, тока и реактивных мощностей подстанции при максимальном (а), номинальном (б) и минимальном (в) напряжении в сети

Повышение (понижение) напряжения в сети приводит к повышению (понижению) напряжения у потребителей и увеличению (уменьшению) генерируемой конденсаторами реактивной мощности в единицу времени, так как энергия конденсаторов  $W_c = \frac{1}{2} CU^2$ .

Опыт работы, существующих ТП показывает, что известные устройства для компенсации реактивной мощности (КРМ) не позволяют выполнить КРМ одновременно со стабилизацией напряжения. Повышение или понижение напряжения в сети приводит к сдвигу фазы тока, потребляемого из сети (к опережению или отставанию) относительно его фазного напряжения, который создаёт дополнительные потери в системе электроснабжения от флуктуаций фазы тока сети и в целом снижает энергетические показатели установки. Результаты исследования этого физического процесса представлены на левой стороне рисунка 9, который подтверждает вышеуказанные недостатки ТП при возникновении необходимости КРМ. Способы решения этих недостатков рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов со ступенчатыми компенсациями, которые, во-первых, усложняют работу установки за счет большого количества ступеней регулирования реактивной мощности (коммутационных переключений) и снижают надежность работы электрооборудования, во-вторых увеличивают технико-экономические показатели установки.

Для решений этих проблем предложенное устройство совместно с батареей конденсаторов повышает пропускную способность электрических сетей и выравнивает напряжение у потребителей.

Результаты исследования ТП по новой схеме показывают, что при повышении напряжения в сети от номинального уровня на «+»  $\Delta U$ , СИФУ увеличивает угол  $\alpha$  для создания на индуктивном сопротивлении (в реакторы) устройства Р-ТПУ, напряжение с противоположным знаком «-»  $\Delta U$  и нейтрализует дополнительную реактивную мощность, генерируемую конденсаторами и отклонение фазы тока сети от напряжения и сохраняет максимальное значения  $\cos\phi$ . Это ещё одно из замечательных свойств предложенного устройства. Результаты исследования ТП по новой схеме показаны с правой стороны рисунка 9.

На рисунке 10 приведены характеристики ТП по существующей и новой схемам. Внешние характеристики (рисунок 10, а) естественная 1 и искусственные 2 – 4 получены при фиксированных углах управления. Регулировочная характеристика (рисунок 10, б), рассчитанная при изменении углов управления тиристорами таким образом, чтобы при изменении напряжения в сети с фиксированными токами нагрузки напряжения у потребителей оставалось постоянным. Характеристика стабилизации напряжения на нагрузку, которая реализуется в соответствии с регулировочной характеристикой показана на рисунке 10, в.

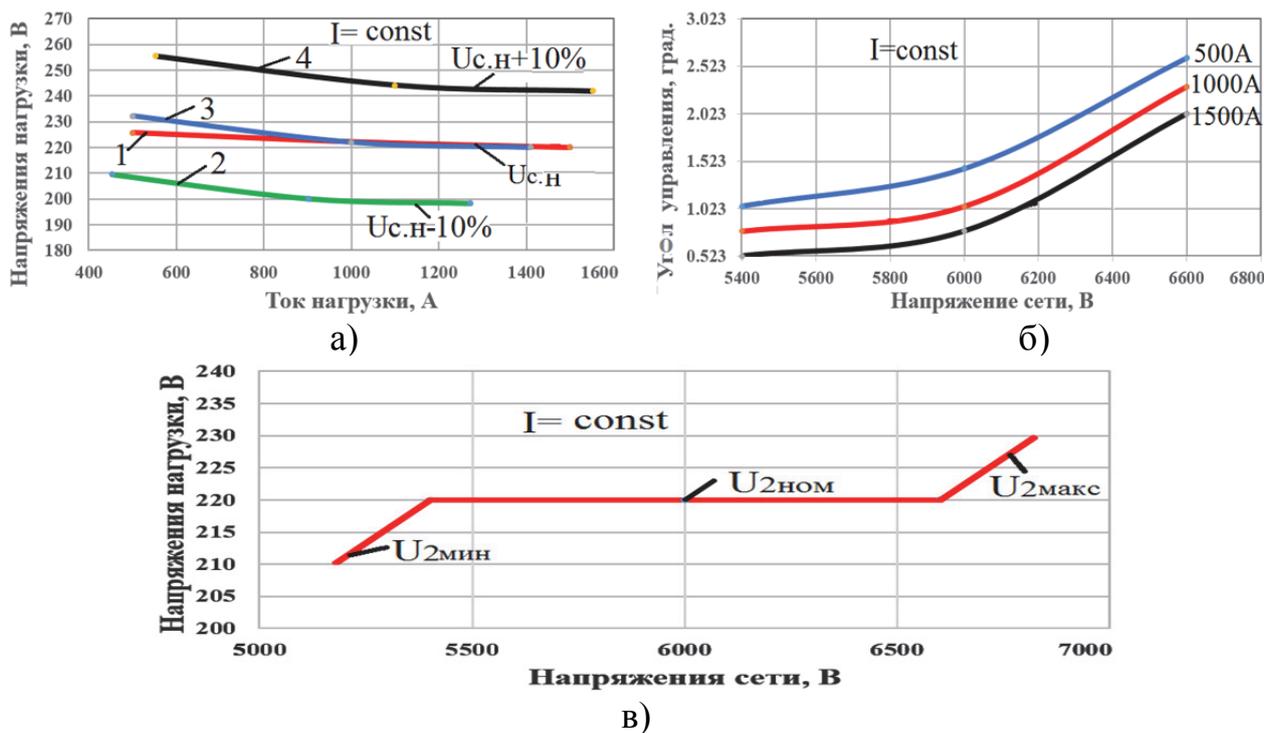


Рисунок 10 – Характеристики трансформаторной подстанции: внешняя (а), регулировочная (б) и стабилизации (в)

Следующие осциллограммы, связанные с энергетическими показателями характеризуют работу ТП по штатной (рисунок 11, а) и новой (рисунок 11, б) схемами при максимальном уровне напряжения сети. Надписи рисунка означают коэффициенты мощности ( $K_m$ ), полезного действия ( $K_{пд}$ ) и энергетического показателя ( $K_{эп}$ ). Из результата исследования энергетических показателей ТП по новой схеме видно, что предложенное устройство сохраняет  $K_{пд}$  как предложено в паспортных данных СТ,  $K_m$  повышается до единицы и в результате их произведение, которым является  $K_{эп}$  имеет высокие энергетические показатели при всех уровнях напряжений сети и нагрузки у потребителей.

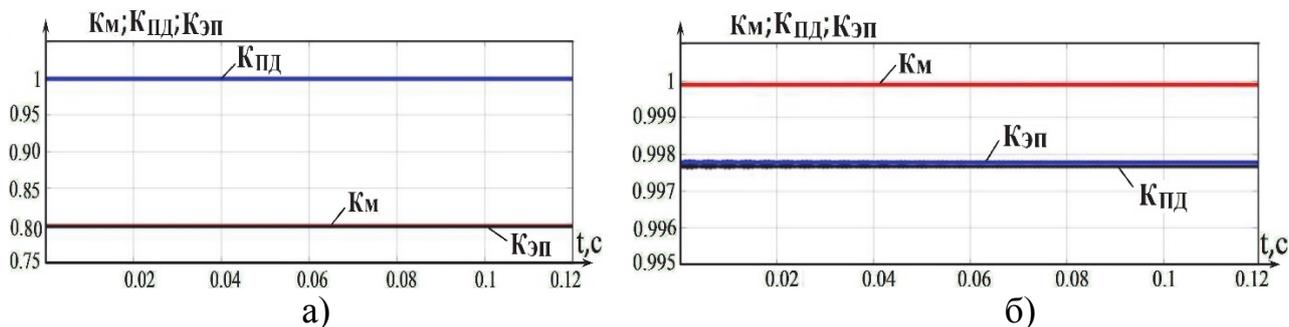


Рисунок 11 – Осциллограммы энергетических показателей трансформаторной подстанции по штатной и новой схемам

Результаты исследования энергетических показатели ТП по штатной схеме показали, что повышение напряжения в сети приводит к снижению коэффициента мощности и полезного действия. При этом магнитные потери в стали магнитопровода и электрические потери в обмотках СТ возрастает из-за возрастания

квадрата тока. Следует отметить, что результаты численных экспериментов ТП по штатной схеме подтверждают, что ТП при всех уровнях напряжений сети и нагрузки у потребителей обладает низкими энергетическими показателями.

Ниже приведены результаты исследования коэффициента искажения тока и несинусоидальности напряжения по новой схеме при верхнем и нижнем поддиапазонах регулирования напряжения. Осциллограммы рисунка 12а иллюстрируют коэффициенты искажения тока ( $K_{i.max.prom}$ ,  $K_{i.min.prom}$ ) и напряжения (1, 2) при верхнем и нижнем поддиапазонах регулирований. Надписи рисунка 12б, обозначают коэффициенты несинусоидальности напряжения при верхнем (2) и нижнем (1) поддиапазонах регулирований.

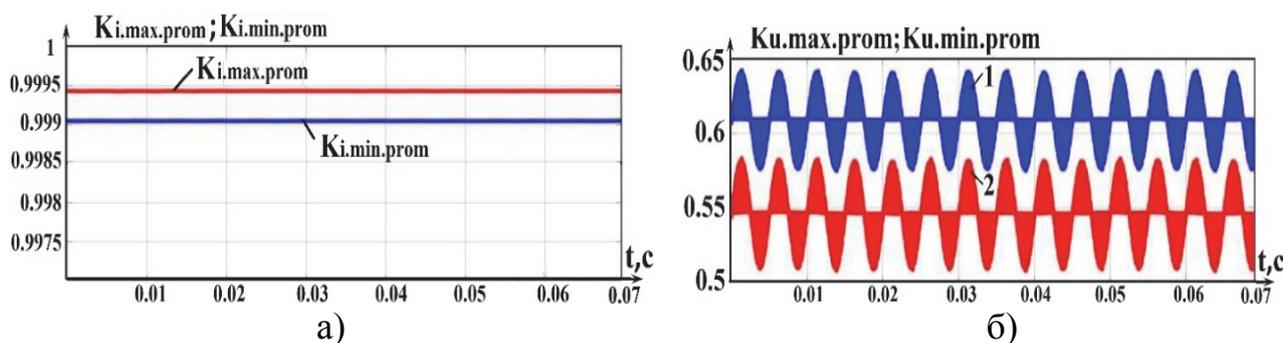


Рисунок 12– Осциллограммы коэффициента искажения тока и несинусоидальности напряжения по новой схеме

Предложенное устройство имеет максимальное искажение тока и несинусоидальность напряжения в этом поддиапазоне регулирования напряжения. Как отмечено выше искажение формы тока и несинусоидальность напряжения в этом поддиапазоне соответствует Международным стандартам и при смещении напряжения на сторону максимального или минимального уровня напряжения форма тока и напряжения улучшается и переходит в чистую синусоидальную форму.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны принципы построения нового двухподдиапазонного реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства на высокой стороне трансформаторной подстанции для расширения функциональных возможностей управления и непрерывного регулирования напряжения силового трансформатора.

2. Численными экспериментами на математической модели двухподдиапазонного реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства установлено, что при включении подстанции токи нагрузки и сети практически сразу входят в установившийся режим. Магнитные потоки и токи намагничивания силового трансформатора в процессе пуска не имеют постоянных подмагничивающих составляющих и ударных динамических воздействий на обмотки силового трансформатора.

3. Применение двухподдиапазонного реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства на высокой стороне силового трансформатора подстанции обеспечивает выключение силового трансформатора без возникновения электрической дуги, перенапряжения и коммутационных потерь на контактах высоковольтных оборудованных.

4. При отклонениях напряжения в сети в пределах  $\pm 10\%$  от номинального значения, устройство поддерживает напряжение у потребителей на заданном уровне не вызывая возмущений переходных процессов в квазистационарных режимах с высокими энергетическими показателями.

5. Предложенное двухподдиапазонное реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство непрерывного действия позволяет высвободить механические регуляторы напряжения с переключающими устройствами типа РНТ – 13 и РНТА, упростить конструкцию силового трансформатора и технологию производства комплектных трансформаторных подстанций.

6. Устройство непрерывного регулирования совместно с батареей конденсаторов одновременно со стабилизацией напряжения на выходе трансформаторной подстанции обеспечивает стабилизацию генерируемой реактивной мощности на входе подстанции с высоким энергетическим показателем.

7. Экспериментами в среде MatLab установлено, что в процессе непрерывного регулирования напряжения на входе подстанции двухподдиапазонное реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство не создает искажений тока и напряжения в силовом трансформаторе и в сети при трех уровнях напряжения сети.

#### **Работы, опубликованные по теме диссертации:**

#### **Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:**

1. Климаш, В.С. Принципы построения пускорегулирующего устройства для трансформаторных подстанций / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров // Омский научный вестник. – 2017. – № 5 (155). – С. 55 – 60.

2. Гетопанов, А.Ю. Исследование регулировочных свойств и влияние на сеть реакторно-тиристорного устройства на высокой стороне печного трансформатора / А.Ю. Гетопанов, Б.Д. Табаров, В.С. Климаш // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – №2(39). – С. 49 – 56.

3. Климаш, В.С. Исследование трансформаторной подстанции с двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулирующим устройством / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2018. – №28. – С. 92 – 107.

4. Климаш, В.С. Реакторно-тиристорное регулирующее и компенсирующее устройство для трансформаторных подстанций систем электроснабжения / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров // Известия ТулГУ. – 2019. – № 2. – С. 342 – 353.

**Статья в издании, входящем в международную систему цитирования**

**Scopus:**

5. Klimash, V.S. The Method and Structure of Switching on and off, and Regulating the Voltage of a Transformer Substation / V.S. Klimash, B.D. Tabarov //10.1109/FarEastCon.2019.8602876.

**Авторские свидетельства и патенты:**

6. Пускорегулирующее устройство на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции: пат. 166559 Рос. Федерация: МПК H02M5/00, H02P13/00 / Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю.; заявитель и патентообладатели Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2016121772/07; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 1 с: ил.

7. Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции: пат. 2622890 Рос. Федерация: МПК H02M 5/257 / Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю.; заявитель и патентообладатели Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т., Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю. – № 2016131037/07; заявл. 27.07.2016; опубл. 21.06.2017, Бюл. № 18. – 8 с: ил.

8. Устройство для включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции: пат. 2667481 Рос. Федерация: МПК H02P 13/00 / Климаш В.С., Табаров Б.Д.; заявитель и патентообладатели Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т. – №2017143967; заявл. 14.12.2017; опубл. 20.09.2018. Бюл. № 26. – 8 с: ил.

9. Способ управления пускорегулирующим устройством силового трансформатора: пат. 2667095 Рос. Федерация: МПК H02M 5/25, G05F1/30 / Климаш В.С., Табаров Б.Д.; заявитель и патентообладатели Климаш В.С., Табаров Б.Д. – № 2017147194; заявл. 29.12.2017; опубл. 14.09.2018. Бюл. № 26. – 11 с: ил.

10. Программный комплекс математических моделей магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства для силового трансформатора в среде MatLab: свид. № 2017613852 Рос. Федерация / Климаш В.С., Табаров Б.Д.; заявитель и патентообладатели Климаш В.С. – № 2016663857; заявл. 16.12.2016; опубл. 03.04.2017. Бюл. № 26. – 1 с: ил.

**Публикации в других изданиях:**

11. Гетопанов, А.Ю. Регулировочные свойства и влияние на сеть реакторно-тиристорного устройства 35 кВ, 2 кА для печного трансформатора 120 МВ·А / А.Ю. Гетопанов, Б.Д. Табаров, В.С. Климаш // Журнал электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – №12(174). – С. 41 – 50.

12. Табаров, Б.Д. Моделирования пускорегулирующего устройства трансформаторной подстанции в среде MATLAB / Б.Д. Табаров, В.С. Климаш // Материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – С. 579 – 581.

13. Климаш, В.С. Исследования пускорегулирующего устройства трансформаторной подстанции в среде MATLAB / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров //

Материалы международной научно-практической конференции «Роль интеграции науки, инновации и технологии в экономическом развитии стран»: сб. науч. работ. – Таджикистан, 2016. – С. 431–434.

14. Табаров, Б.Д. Повышение коэффициента мощности и улучшение режимов работы потребителей промышленных предприятия в частности дуговых электросталеплавильных печей / Б.Д. Табаров, В.С. Климаш // Материалы отчетной конференции аспирантов Республики Союза Мьянма, прошедших первый год обучения: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – С. 5 – 7.

15. Климаш, В.С. Исследование входного тока трансформаторной подстанции при работе от магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров // IX Международной научно-практической конференции «World Science: Problems and Innovations: сб. науч. работ. – Пенза, 2017. – С. 167 – 170.

16. Климаш, В.С. Исследования трансформаторной подстанции с пускорегулирующим устройством в аварийных режимах работы / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров // III Поволжской научно-практической конференции. Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. науч. работ. – Казань, 2017. – С. 118 – 123.

17. Табаров, Б.Д. Исследование пускорегулирующего устройства при стабилизации напряжения на высокой стороне трансформаторной подстанции / Б.Д. Табаров, В.С. Климаш // Материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. – С. 1045 – 1048.

18. Климаш, В.С. Исследование динамических процессов трансформаторных подстанции 20/0.4 кВ / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров // Сборник материалов XXXIII международной научно-практической конференции «International Scientific discoveries 2018»: сб. науч. работ. – Москва, 2018. – С. 35 – 40.

19. Табаров, Б.Д. Разработка способа и устройства отдельного регулирования напряжения трансформаторной подстанций в двух поддиапазонах / Б.Д. Табаров, В.С. Климаш // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – С. 455 – 458.

Подписано в печать 15.07.2019.

Формат 60×84 1/16. Бумага 65 г/м<sup>2</sup>. Ризограф RISO EZ 570E.  
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 29735.

Полиграфическая лаборатория  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.