

На правах рукописи



Лавренов Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО КАСКАДА С
МНОГОУРОВНЕВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ
НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ
ПОДСТАНЦИИ**

Специальность 05.09.03 -
«Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2018

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»;
- Константинов Андрей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВО «ДВГУПС».
- Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

Защита состоится 02 июля 2018 г. в 12 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 http://sovnet.knastu.ru/diss_defense/.

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: kerapu@knastu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

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



А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертационная работа направлена на решение задачи повышения качества напряжения и снижения потерь электроэнергии на трансформаторных подстанциях промышленных предприятий и у подключенных к ним потребителей.

Отклонение напряжения от номинальной величины оказывает значительное влияние на стабильность работы электрооборудования, качество выпускаемой продукции. Эта проблема особенно актуальна на современных предприятиях с непрерывными технологическими процессами, станками с числовым программным управлением, автоматизированными и роботизированными линиями с чувствительными к напряжению элементами системы управления. Отсутствие стабильности напряжения в цеховой сети приводит к браку продукции, а в некоторых случаях требуется перезапуск станков или целой линии. Систематическое отклонение питающего напряжения может привести к механическим неисправностям электрооборудования, дорогостоящему ремонту и обслуживанию.

Одним из известных способов регулирования напряжения на трансформаторных подстанциях является применение вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ), в которых функция вольтодобавки или вольтовычета осуществляется переключением отпаек механических контактов, т. е. дискретным способом. Такое регулирование напряжения создает переходные процессы, вследствие чего возникают потери и снижение срока службы исполнительных механизмов. Подобный способ регулирования и стабилизации не согласуется с требованиями по качеству напряжения для современного, высокоточного промышленного оборудования. Данная проблема не может быть решена только при помощи коммутационных электрических аппаратов. Исходя из этого, разработка устройств непрерывного действия с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями, высоким быстродействием является весьма актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Свой вклад в решение вопросов повышения качества напряжения внесли Б.Н. Абрамович, В.А. Веников, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, В.И. Идельчик, М.С. Лисеев, В.С. Клиماش, Р.Р. Мамошин, А.К. Шидловский и др.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование вольтодобавочного каскада (ВДК) с выходным многоуровневым напряжением, предназначенного для регулирования питающего напряжения трансформаторных подстанций промышленных предприятий и

стабилизации напряжения у потребителей.

Для достижения поставленной цели ставились и решались следующие задачи:

1. Анализ патентно–лицензионной ситуации по проблеме регулирования питающего напряжения трансформаторных подстанций и стабилизации напряжения у потребителей.

2. Разработка принципов формирования многоуровневого добавочного напряжения ВДК с IGBT инверторами и специальной системой управления.

3. Разработка имитационной модели ВДК в составе трансформаторной подстанции в среде Matlab.

4. Исследование процессов на имитационной модели и разработка способов регулирования напряжения.

5. Создание действующего макета ВДК для регулирования напряжения на входе трансформаторной подстанции и его исследование.

Научная новизна диссертационной работы:

1. На разработанной имитационной модели определены алгоритмы управления ИН для улучшения формы добавочного напряжения в системе ВДК–ТП.

2. Предложены способы регулирования переменного напряжения в системе ВДК–ТП с улучшенными энергетическими показателями.

3. Создана программно – аппаратная часть системы управления на основе предложенных алгоритмов и способов для ВДК–ТП.

Практическая значимость работы:

1. Предложено техническое решение для построения ВДК–ТП стабилизирующего напряжение у потребителей через регулирование напряжения на высокой стороне подстанции.

2. Разработана имитационная модель ВДК–ТП.

3. В среде Matlab разработано программное обеспечение системы управления для микроконтроллера STM32F4.

4. Построен действующий макет ВДК–ТП.

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

Объектом исследования является трансформаторная подстанция промышленного предприятия.

Предметом исследования являются технические средства и способы регулирования напряжения трансформаторной подстанции.

Методы исследования. Результаты работы основаны на применении теории электрических цепей, микроэлектроники, имитационного моделирования, программирования и данных экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель системы ВДК-ТП.
2. Техническое решение для реализации системы ВДК-ТП.
3. Способы регулирования трёхфазного напряжения.
4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований регулирования напряжения.

Достоверность научных положений и результатов обоснована теоретически и подтверждена результатами имитационного и физического моделирования вольтодобавочного каскада.

Апробация работы. Материалы исследования докладывались на местных и международных конференциях, где получили положительные оценки:

- Международная научно – практическая конференция «Теоретические и практические вопросы науки XXI века», Уфа, 2015;
- Международная научно – практическая конференция «Роль интеграции науки, инновации и технологии в экономическом развитии стран», Таджикистан, 2016;
- Научно-технические конференции аспирантов и студентов, Комсомольск-на-Амуре, 2014 – 2017.

Представленная тема выполнялась в рамках гранта молодежного научно – инновационного конкурса «У.М.Н.И.К.» по договору № 5683ГУ1/2014. Получено свидетельство на программу для ЭВМ, патент на изобретение и полезную модель.

Личный вклад соискателя. Автору принадлежат следующие работы:

- разработка способов регулирования многоуровневого добавочного напряжения;
- построение имитационной модели системы ВДК-ТП;
- проектирование и изготовление макета системы ВДК-ТП.

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Промышленная электроника» КнАГУ для подготовки магистров, обучающихся по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», а также используются энергослужбой ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю. А. Гагарина» при разработке конструктивных решений в рамках выполнения работ по повышению качества напряжения и снижению потерь электроэнергии на трансформаторных подстанциях завода.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 8 печатных работах, в 1 патенте на изобретение и полезную модель, 1 свидетельстве на программу для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений,

списка литературы из 95 наименований. Текст диссертации изложен на 133 страницах, содержит 100 рисунков и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе сделан обзор технических решений, анализ способов и устройств регулирования напряжения на трансформаторных подстанциях.

Одной из применяемых схем для регулирования напряжения на трансформаторных подстанциях промышленных предприятий, является соединение силового (СТ) и вольтодобавочного трансформатора (линейного регулятора). Такое включение силовых элементов имеет несколько способов регулирования напряжения. Наибольшее распространение получило механическое (дискретное) переключение отпаек вторичной обмотки ВДТ. Недостатком такого способа является низкое быстродействие, невысокая точность регулирования добавочного напряжения, возникновение переходных процессов в момент переключения, как следствие быстрый износ контактов регулятора.

Развитие полупроводниковой техники позволило перейти на другой принцип регулирования, при котором стало возможным заменить механическую часть на тиристорные переключающие устройства. Этот прием исключает некоторые недостатки первого способа, а именно: увеличивается быстродействие, повышается надежность. Однако необходимость применения ключей с двухсторонней проводимостью и наращивание количества ступеней добавочного напряжения ведет к усложнению системы управления, что можно отнести к её недостаткам.

Предприятия, переходящие на современное промышленное оборудование, в схему которых входят цифровые системы управления, более требовательны к стабильности питающего напряжения. Неспособность быстрой и плавной стабилизации напряжения приводит к частому срабатыванию защитной автоматики промышленного оборудования. Одним из вариантов решения этой проблемы является применение систем плавного бесконтактного регулирования напряжения. Примером такой системы является автотрансформатор с подмагничиваемыми элементами постоянным током. В основе этого принципа регулирования лежит изменение магнитного потока сцепленного с вторичной обмоткой трансформатора. Эта конструкция содержит обмотки, степень подмагничивания которых зависит от тока нагрузки. К недостаткам такого способа относится снижение общего КПД, повышенное потребление реактивной мощности.

Наиболее подходящим способом регулирования и стабилизации напряжения для современных электроустановок отвечающее быстрому и плавному действию, соответствует предлагаемое техническое решение. Оно реализуется устройством с каскадным построением в котором первичные обмотки ВДТ подключены последовательно в разрыв между питающей линией и высокой стороной СТ, а регулирование напряжения в обмотках возбуждения ВДТ осуществляется однофазными мостовыми IGBT инверторами по специальному алгоритму управления. Предлагаемое техническое решение, использующее достоинства ВДТ, современную электронную часть управления, структуру построения ВДК, способно решить проблему стабильности напряжения с большей точностью и быстродействием в сравнении с приведенными выше способами, не потребляя реактивной энергии из сети.

Во второй главе представлены теоретические обоснования принципов регулирования добавочного напряжения, рассмотрены вопросы разработки системы ВДК-ТП. Приведено математическое описание принципов формирования многоуровневого напряжения.

Схема трансформаторной подстанции промышленного предприятия с предлагаемым устройством регулирования и стабилизации напряжения представлена на рисунке 1.

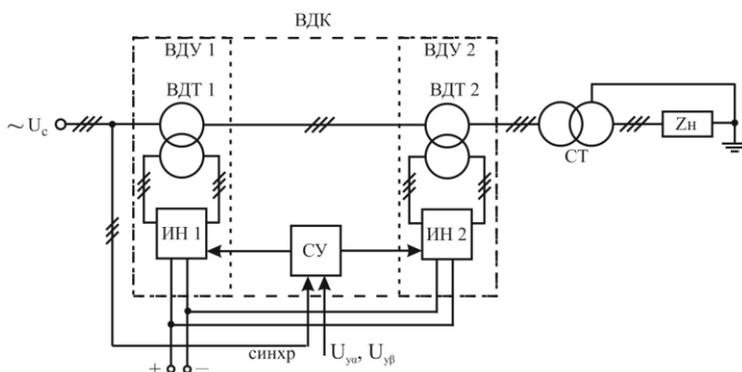


Рисунок 1 – Функциональная схема вольтодобавочного каскада в составе трансформаторной подстанции

Схема на рисунке 1 состоит из двух вольтодобавочных устройств (ВДУ 1, ВДУ 2) каждое из которых содержит трехфазный вольтодобавочный трансформатор (ВДТ 1, ВДТ 2) и три однофазных мостовых IGBT инвертора напряжения в каждом блоке (ИН 1, ИН 2). Синхронизированная с сетью СУ обеспечивает совместное согласованное

управление ИН и ВДУ по управляющим сигналам $U_{y\alpha}$ и $U_{y\beta}$. Синхронизация осуществлена от трехфазного понижающего трансформатора, входящего в блок СУ, первичные обмотки которого подключены на высокую сторону СТ перед ВДК. Обмотки возбуждения ВДТ подключены к выводам ИН, а первичные обмотки соединены последовательно между питающей сетью и высоковольтной обмоткой СТ. Питание ИН обеспечивается от шины постоянного напряжения не имеющей прямой связи с сетью. Формирование многоуровневого добавочного напряжения происходит не только за счет алгоритма системы управления, но и с учетом каскадного и межфазного взаимодействия, которое возникает при соединении первичной обмотки СТ в звезду без нулевого провода. Так как воздействие на напряжение сети происходит через последовательно включенную в каждую фазу обмотку ВДТ, то в случае выхода из строя любого ИН или отключение всего ВДУ не приведет к перерыву энергоснабжения потребителей (Z_n), при этом оставшееся ВДУ продолжает работать в штатном режиме, что сохраняет эксплуатационную надежность ТП.

Применительно к высоковольтным ТП большой мощности, схема ВДК будет включать в себя несколько последовательно соединенных маломощных ВДУ (силовых ячеек), что тоже можно отнести к положительным качествам. Кроме этого регуляторы напряжения, построенные на полностью управляемых полупроводниковых элементах, обладают высокими энергетическими показателями, линейностью регулировочной и жесткостью внешней характеристики.

Аналитическими соотношениями выявлено два способа регулирования многоуровневого напряжения каскада, где в процессе учувствуют ИН с углом регулирования α и ВДУ с углом регулирования β .

Рассмотрим формируемое напряжение на выходе вольтодобавочного каскада. Комплексно сопряженные векторы ВДУ 1 и ВДУ 2 имеют вид:

$$\bar{U}_{ВД1} = 2 \cdot U_d \cdot K_u \cdot \cos \alpha \cdot e^{j\beta}, \quad \bar{U}_{ВД2} = 2 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot \cos \alpha \cdot e^{-j\beta} \quad (1)$$

и их геометрическая сумма

$$\bar{U}_{ВДК} = 4 \cdot U_d \cdot K_u \cdot K_{КТ} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta. \quad (2)$$

Здесь α и β – углы управления инверторами напряжения и вольтодобавочными устройствами, соответственно; $\bar{U}_{ВД1}$, $\bar{U}_{ВД2}$ – векторы напряжений первого и второго устройств вольтодобавки; U_d – напряжение постоянного тока; $K_{и}$ – коэффициент передачи напряжения мостовым

однофазным инвертором, $K_{КТ}$ – коэффициент трансформации ВДК. Выходное напряжение трансформаторной подстанции с ВДК

$$U_2 = \frac{U_1}{K_{СТ}} = \frac{U_c + 4 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot K_{ВТ} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{K_{СТ}}, \quad (3)$$

где U_1, U_2 – напряжения на входе и выходе СТ; U_c, U_d – напряжения сети переменного тока и сети постоянного тока; $K_{СТ}, K_{ВТ}$ – коэффициенты трансформации силового и вольтодобавочных трансформаторов.

Из выражения (1) следует, что напряжение на высокой стороне СТ и соответственно на нагрузке можно регулировать двумя способами:

- изменение α при фиксированном значении β (способ « α »);
- изменение β при фиксированном значении α (способ « β »).

Для пропорционального регулирования напряжения с арккосинусным принципом построения систем управления, углы управления α и β имеют следующий вид:

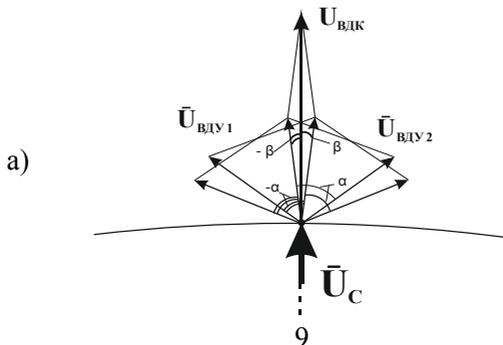
$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos(U_{\gamma\alpha} \cdot K_\alpha); \\ \beta &= \arccos(U_{\gamma\beta} \cdot K_\beta), \end{aligned} \quad (4)$$

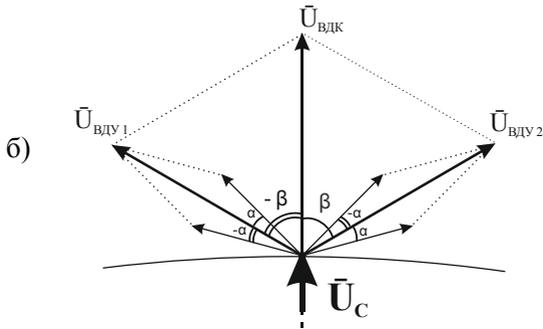
где K_α, K_β – коэффициенты пропорциональности; $U_{\gamma\alpha}, U_{\gamma\beta}$ – напряжения управления.

На основании выражений (1) и (2) получим:

$$U_2 = \frac{U_c + 4 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot K_{ВТ} \cdot K_\alpha U_{\gamma\alpha} \cdot K_\beta U_{\gamma\beta}}{K_{СТ}}. \quad (5)$$

Векторные диаграммы, отображающие процесс регулирования напряжения представлены на рисунке 2 (а, б).





$\vec{U}_{ВДК}$ - вектор напряжения каскада; α , $(-\alpha)$ - угол управления ИН; β , $(-\beta)$ - угол регулирования напряжения между двумя ВДУ каскада

Рисунок 2 – Векторные диаграммы напряжений ВДК:

а) способ « α »; б) способ « β »

Принцип совместного согласованного управления для плеч однофазных мостов ИН при первом способе и для блоков ВДУ при втором способе позволяет сформировать многоуровневое напряжение и регулировать его в 12-ти поддиапазонах.

Третья глава посвящена разработке и исследованию имитационной модели ВДК и системы управления в среде Matlab/Simulink для выявления способов формирования многоуровневого напряжения, принципов совместного согласованного управления ИН и ВДУ. Имитационная модель системы ВДК – ТП в среде Matlab представлена на рисунке 3.

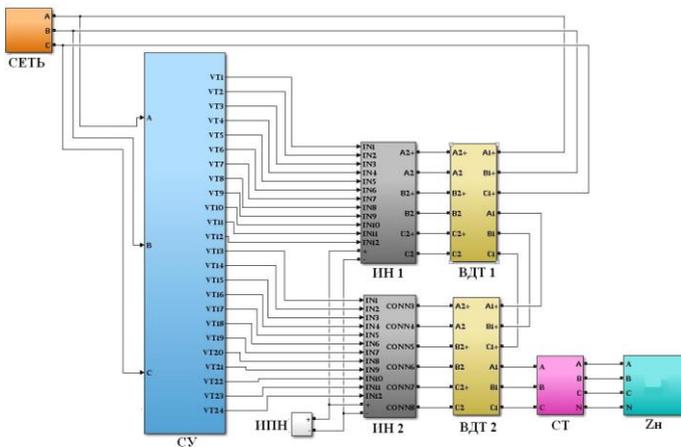


Рисунок 3 – Имитационная модель системы ВДК-ТП

В основу алгоритма СУ заложен 150-градусный способ управления применительно к однофазным мостовым IGBT инверторами напряжения. Форма напряжения, полученная при помощи этого алгоритма, содержит меньше всего высших гармоник, чем при других способах управления ключами инверторов. Имитационная модель СУ в среде Matlab представлена на рисунке 4.

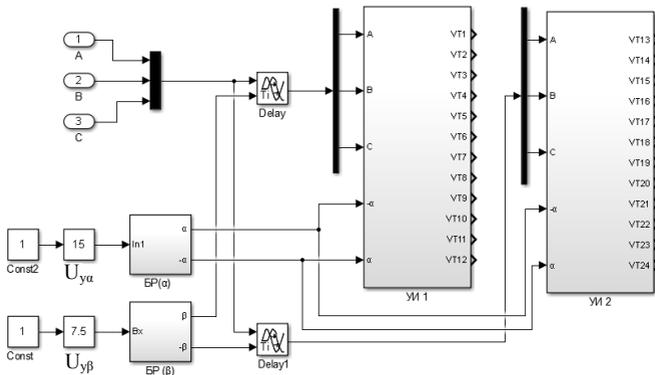
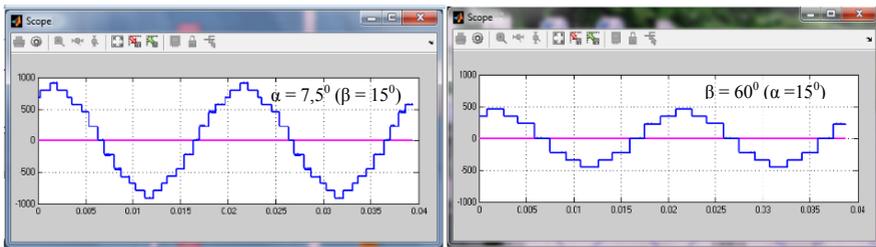


Рисунок 4 – Имитационная модель системы управления

Схема имитационной модели СУ включает в себя три синхронизирующих входа (А, В, С), блоки BP_α и BP_β совместно с Delay предназначенные для регулирования одноименных углов, задание которых обеспечивается потенциометрами $U_{\gamma\alpha}$ и $U_{\gamma\beta}$, а также блоки формирования управляющих импульсов (УИ 1, 2) для шести однофазных мостовых IGBT модулей.

Осциллограммы фазных добавочных напряжений на RL нагрузке соединённой в звезду без нулевого провода при закороченных первичных обмотках ВДТ 1 представлены на рисунке 5.



а) способ «α»

б) способ «β»

Рисунок 5 – Фазные добавочные напряжения

Следует отметить, что фазное добавочное напряжение не зависимо от применяемого способа имеет одинаково изменяемую форму во всём диапазоне регулирования. При арккосинусном построении системы управления в соответствии с выражением (4) регулировочная характеристика приобретает линейность. Изменение напряжения на нагрузке U_n от величины управляющих сигналов $U_{\gamma\alpha}$ или $U_{\gamma\beta}$ представлено на рисунке 6.

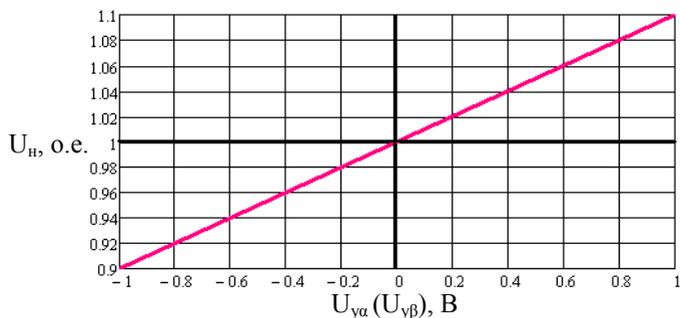


Рисунок 6 – Регулировочная характеристика

Изменение коэффициента несинусоидальности (K_n) напряжения питания СТ в процессе стабилизации напряжения на нагрузке показано на рисунке 7.

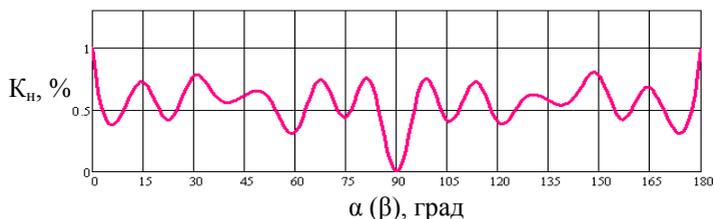
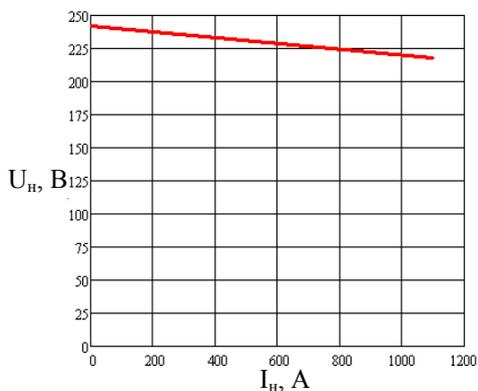


Рисунок 7 – Коэффициент несинусоидальности напряжения

Зависимость на рисунке 7 построена в среде Mathcad с применением интерполяции. Данные для построения получены на имитационной модели системы ВДК-ТП блоком THD из стандартной библиотеки Simulink. Независимо от выбранного способа регулирования напряжения, при условии, что один из углов зафиксирован на величину 15° , коэффициент K_n будет одинаков. Это характеризует реализацию 150 - градусного алгоритма управления ключами ИН применительно к ВДК с двумя ВДУ.

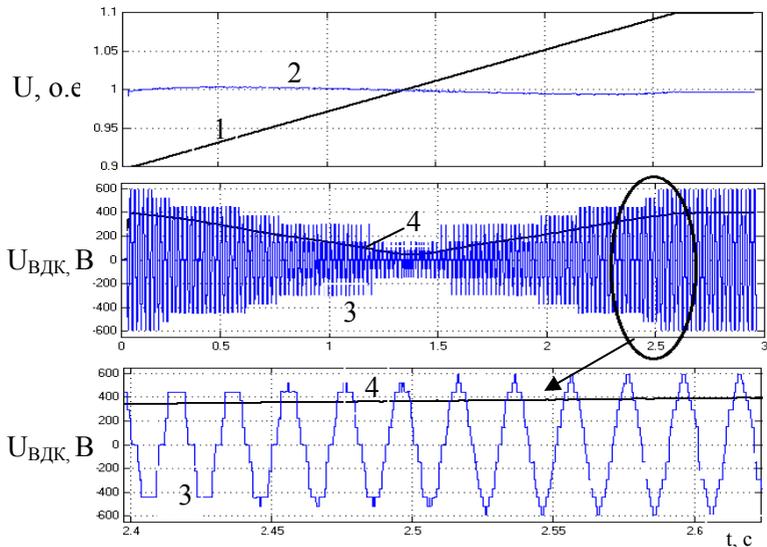
Внешняя характеристика системы ВДК-ТП с допустимой перегрузкой показана на рисунке 8.



U_n – напряжение на нагрузке; I_n – ток нагрузки

Рисунок 8 – Внешняя характеристика

Осциллограммы динамических испытаний системы ВДК-ТП представлены на рисунке 9.



а) способ «а»

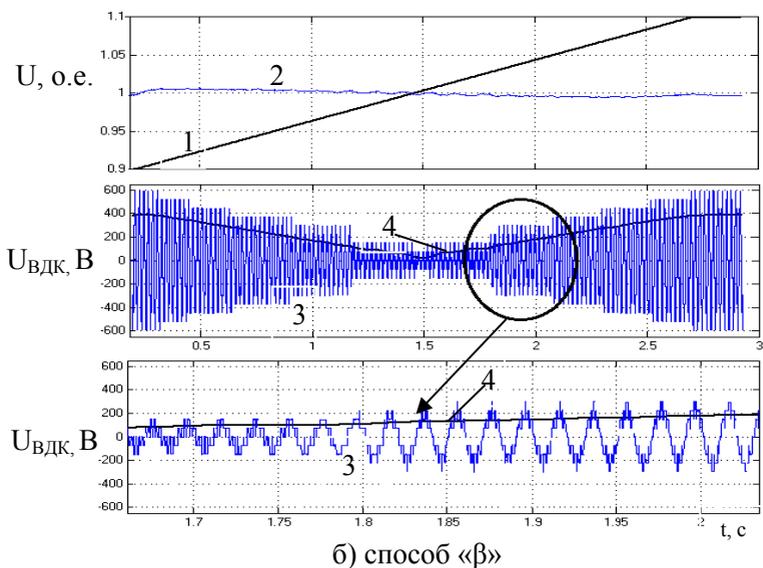


Рисунок 9 – Реакция системы на изменение напряжения в сети

На рисунке 9 цифрами 1, 2 обозначены действующие значения фазных напряжений сети U_c и нагрузки U_n соответственно и 3, 4 – мгновенное и действующее значение добавочного напряжения $U_{ВДК}$.

Исследования динамических процессов системы ВДК-ТП показали, что при изменении напряжения сети в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения в течение 2 с, отклонение напряжения в нагрузке не превышает $\pm 0,7\%$ для обоих способов регулирования.

Четвёртая глава посвящена разработке макетного образца системы ВДК-ТП, апробации функционирования, как отдельных элементов, так и всего устройства в целом, проведению экспериментальных исследований, осциллографированию напряжений на всех элементах устройства при обоих способах регулирования напряжения.

Напряжение питания ИН осуществлено от однофазного выпрямителя, собранного из 4 диодов марки Д112-10, который в свою очередь подключен к выходу однофазного ЛАТРа TSGC2-3. Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения произведено фильтром собранного из электролитических конденсаторов марки К50-12. В качестве ВДТ использованы трансформаторы ТС3-2,5/0,38 а силовой трансформатор ТС-6,3/0,66. Установка величины питающего напряжения СТ осуществлено

при помощи трехфазного ЛАТРа TSGC2-9. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 10.

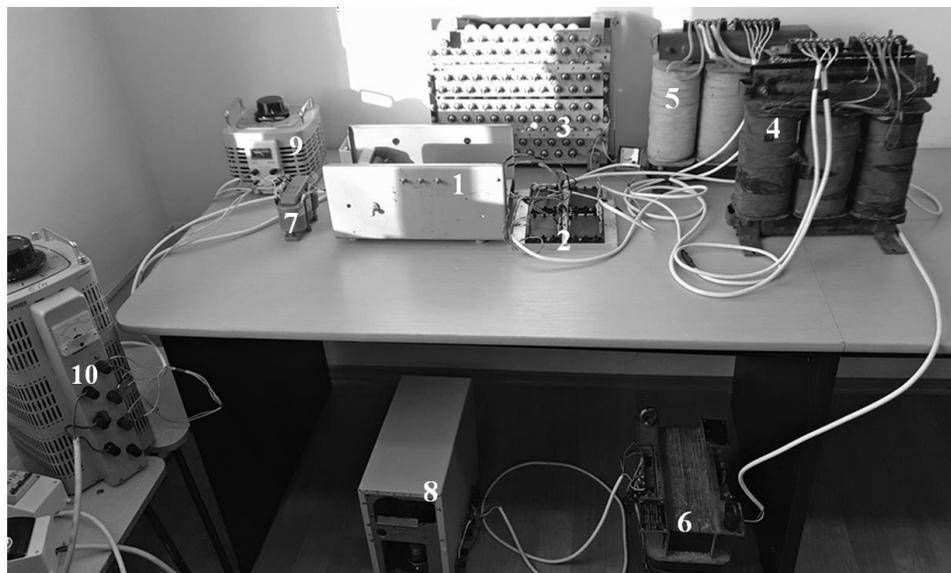


Рисунок 10 – Макет исследуемого устройства

На фотографии (рисунок 10) цифрами показаны основные элементы устройства: 1 – система управления; 2 – шесть однофазных мостовых ИН выполненные на четырех трехфазных мостовых IGBT модулях; 3 – выпрямитель; 4 и 5 – вольтодобавочные трансформаторы; 6 – силовой трансформатор; 7 – синхронизирующий трансформатор; 8 – нагрузка; 9 – однофазный ЛАТР выпрямителя; 10 – трехфазный ЛАТР питающей сети.

Имитационная модель СУ (рисунок 4) транспонирована на действующий макет с учетом особенности функционирования выбранного микроконтроллера. Программная часть СУ выполнена в блочно-модульном виде с использованием стандартных библиотек Simulink и специализированной библиотекой Waijung Blockset предназначенной для отладочной платы на базе микроконтроллера (МК) серии STM32F4. В её состав входит встроенный отладчик ST-LINK/V2, USB порт для связи с персональным компьютером. Блочно-модульная схема системы управления для программирования STM32F4 Discovery представлена на рисунке 11.

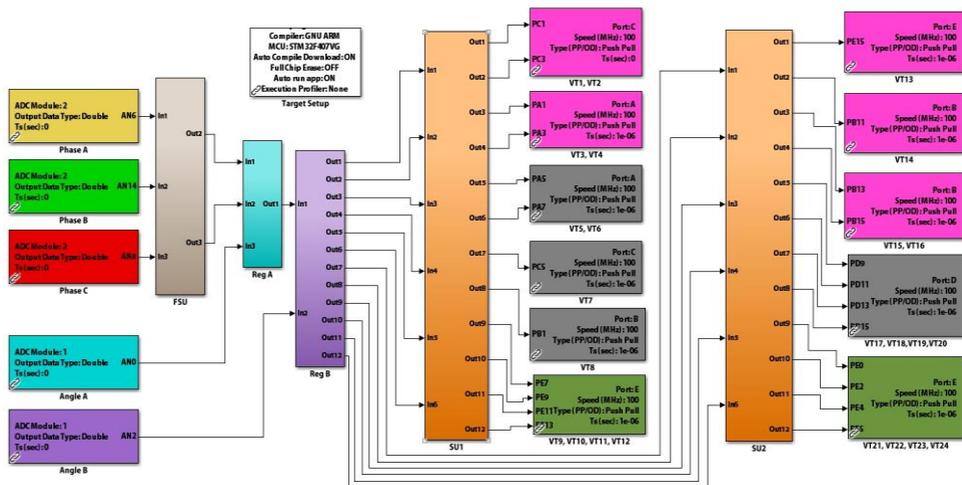
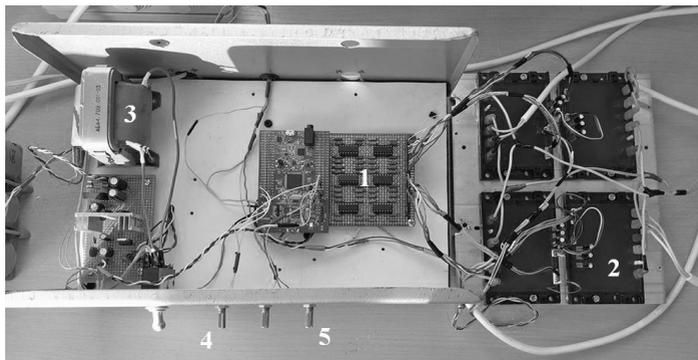


Рисунок 11 – Система управления ВДК на STM32F4

Блочнo-модульная схема СУ (рисунок 11) состоит из следующих элементов: Phase A, B, C – аналого-цифровые входы МК соответствующих фаз сети; Angle A, B – управляющие входы углов α и β ; FSU – формирователь сигналов управления; RegA, RegB – блоки регулирования угла α и β соответственно; SU1, SU2 – блоки распределения сигналов управления; VT1 ÷ VT24 – порты вывода сигналов управления для ключей ИИ.

Преобразование блочно-модульной системы управления в код программы необходимый для работы микроконтроллера выполнен по стандарту языка программирования «Си», компилятором GNU ARM.

В качестве управляемых элементов использованы интеллектуальные трехфазные IGBT инверторы напряжения IPM Mitsubishi PS12018-A. Модуль имеет встроенный драйвер с оптической развязкой по цепи управления транзисторами. Выходной уровень напряжения с выводов микроконтроллера составляет 3 В, а минимальный входной уровень напряжения IGBT модуля равен 5 В. Для согласования этих уровней выбрана схема повторителей напряжения на операционных усилителях LM324N. Внешний вид системы управления и подключенных к ней силовых модулей показан на рисунке 12.

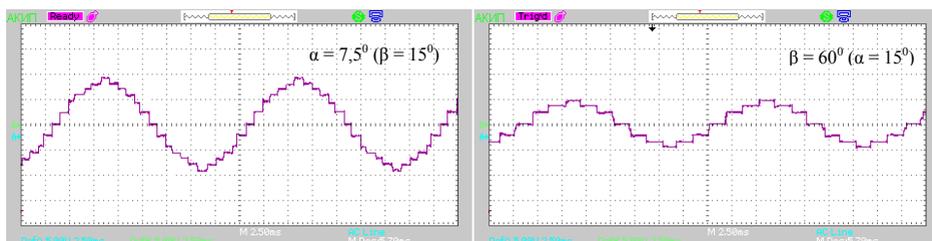


1 - система управления на плате STM32F4 Discovery и повторители напряжения; 2 - инверторы напряжения; 3 - блок питания; 4, 5 - регуляторы углов α и β

Рисунок 12 – Общий вид макета системы управления и силовой части

Применяемый IGBT модуль имеет трехфазное исполнение, а его схемное решение в большей степени подходит для системы электропривода. В его архитектуру входит 7 транзисторов, один из которых применяется для рассеивания энергии торможения асинхронного двигателя на резистор. Согласно техническому решению и алгоритму, заложенному в МК, требуется использование мостовых однофазных инверторов. Исходя из этого произведено преобразование схемы включения транзисторов, при котором из четырёх трехфазных модулей было получено 6 однофазных мостовых инверторов напряжения для системы ВДК-ТП.

Экспериментальные осциллограммы фазных добавочных напряжений при фиксированных углах управления показаны на рисунке 13.



а) способ « α »

б) способ « β »

Рисунок 13 – Экспериментальные осциллограммы фазных напряжений вольтодобавки на RL нагрузке

Осциллограммы напряжений, полученные как на имитационной модели, так и на макете при тех же углах управления показывают идентичность происходящих процессов. Результат суммирования напряжения ВДК с пониженным на 10 % напряжением сети показан на рисунке 14.

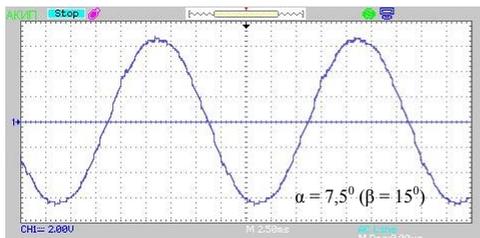


Рисунок 14 – Экспериментальная осциллограмма фазного напряжения на высокой стороне силового трансформатора

Было установлено на имитационной модели и подтверждено на экспериментальном макете, что:

- формирование добавочного напряжения амплитудно-импульсной модуляцией позволяет в разы уменьшить количество переключений транзисторов, а значит сократить тепловые потери при коммутации по сравнению с ШИМ;

- при изменении действующего напряжения ВДК до нулевого значения вольтодобавки углом α ($\beta = \text{const}, \alpha = \text{var}$), напряжение на выходе каждого инвертора и на обмотках возбуждения ВДТ равно нулю. При регулировании напряжения углом β ($\alpha = \text{const}, \beta = \text{var}$) изменяется только действующее напряжение ВДК, а напряжение на выходе инверторов и обмотках возбуждения ВДТ остается неизменным;

- регулирование углов в диапазонах $0^\circ \leq \alpha (\beta) \leq 7,5^\circ$ и $172,5^\circ \leq \alpha (\beta) \leq 180^\circ$ не приводит к существенному изменению добавочного напряжения, более того происходит ухудшение гармонического состава добавочного напряжения. В связи с этим введено ограничение диапазона изменения углов управления в пределах $7,5^\circ \leq \alpha (\beta) \leq 172,5^\circ$;

- симметричное управление углами α и β , позволяет формировать результирующий вектор добавочного напряжения первой гармоники ВДК совпадающий с направлением вектора питающего напряжения силового трансформатора во всем диапазоне регулирования.

Поддиапазон регулирования напряжения характеризуется диапазоном регулирования углов α , β . При работе двух ВДУ и изменении добавочного напряжения в сторону вольтодобавки происходит плавный переход от 1 до 6 поддиапазона и аналогично в сторону вольтовывчета. Номер поддиапазона меняется каждые 30^0 относительно регулируемого угла. Изменение количества ВДУ приводит к изменению количества поддиапазонов в большую или меньшую сторону. Коэффициент несинусоидальности результирующего напряжения на входе подстанции для обоих способов регулирования не превышает 0,8 % против 8 % установленных ГОСТ 523144 – 2013.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Схемотехнические решения предлагаемой системы и способы регулирования трёхфазного напряжения позволяют стабилизировать напряжение у потребителей без дополнительного потребления реактивной энергии из сети.

2. При каскадном регулировании многоуровневого напряжения, частота модуляции выше частоты коммутации транзисторов в 6 раз ($m \cdot k$), где m – число фаз, k – число ВДУ в каскаде.

3. Каскадный принцип построения системы ВДК-ТП обеспечивает повышение точности и быстродействия регулирования напряжения питания СТ при K_n не более 0,8 %, против 2,4 % при работе с одним ВДУ.

4. На действующем макете экспериментально показано функционирование как всех элементов в отдельности, так и ВДК в целом.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Климаш, В. С. Многоуровневое регулирование напряжения трансформаторной подстанции / В.С. Климаш, А.С. Лавренов // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1 (34). – С. 10 –16.

2. Климаш, В. С. Теоретические и экспериментальные исследования вольтодобавочного каскада для системы электроснабжения / В.С. Климаш, А.С.Лавренов // Известия ТулГУ. – 2017.– № 5. – С. 346 – 353.

3. Климаш, В.С. Экспериментальные исследования многоуровневого формирования и регулирования напряжения инверторами / В.С. Климаш, А.С. Лавренов // Материалы 47-й научно-технической конференции аспирантов и студентов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – С. 626 – 629.

4. Климаш, В.С. Многоуровневое регулирование напряжения на IGBT модулях в высоковольтных электротехнических системах / В.С. Климаш, А.С. Лавренов // Материалы международной научно-практической

конференции «Роль интеграции науки, инновации и технологии в экономическом развитии стран»: сб. науч. работ. – Таджикистан, 2016. – С. 448 – 452.

5. Климаш, В.С. Многоуровневое регулирование напряжения в высоковольтных ЛЭП / В.С. Климаш, А.С. Лавренов // Материалы 46-й научно-технической конференции аспирантов и студентов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 333 – 335.

6. Климаш, В.С. Исследование и разработка способа и системы управления вольтодобавочным устройством / В.С. Климаш, А.С. Лавренов // Теоретические и практические вопросы науки XXI века: сб. статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. – С. 39 – 43.

7. Климаш, В.С. Формирователь управляющих импульсов специальной формы / В.С. Климаш, А.С. Лавренов // Материалы 44-й научно-технической конференции аспирантов и студентов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2014. – С. 376 – 377.

8. Климаш, В.С. Система управления инвертором напряжения для компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения трансформаторной подстанции / В.С. Климаш, А.С. Лавренов // Материалы 43-й научно-технической конференции аспирантов и студентов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2013. – С. 77 – 78.

9. Система 150-градусного управления ведомым инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией: пат. 135862 Рос. Федерация: МПК H02M7/539./ Климаш В.С., Лавренов А.С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – №2013121213/07; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. №35.– 8 с: ил.

10. Устройство для формирования сигнала специальной формы: пат. 2570032 Рос. Федерация: МПК H03K4/92. / Климаш В.С., Лавренов А.С., Коротков И.И.; заявители и патентообладатели Климаш В.С., Лавренов А.С. – № 2014126993/07; заявл. 01.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.– 7 с: ил.

11. Модель вольтодобавочного каскада с многоуровневым напряжением в среде Matlab: свид. 2016611781 Рос. Федерация / Климаш В.С., Лавренов А.С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2015619802; заявл. 16.10.2015; опубл. 20.03.2016, Бюл. №3. – 10 с.