

На правах рукописи



**Йе Мин Тху**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННЫХ  
ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО И  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ  
АЭРОДРОМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность – 05.09.03 – Электротехнические комплексы  
и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольском-на-Амуре государственном университете» на кафедре «Промышленная электроника»

**Научный руководитель - Климаш Владимир Степанович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная электроника».

**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 «Дальневосточный федеральный университет»**. (г. Владивосток)

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 999.086.03 в государственном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. Факс: 8(4217) 54-08-87; E-mail:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте [https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/show/162](https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/162).

Отзывы на автореферат присылать в двух экземплярах, заверенных печатью организации по адресу: Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: epapu@knastu.ru

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 999.086.03, к.т.н., доцент



А.С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** При математическом описании и моделировании устройств силовой электроники AC/AC, AC/DC и DC/AC целесообразно учитывать параметры в цепях постоянного и переменного тока. Введение параметров источников питания и электропередачи позволяет создать возможность варьирования параметрами в цепях AC и DC и обеспечить универсальность математического описания для применения в исследованиях широкого класса преобразователей. Тиристорные выпрямители, инверторы, ведомые сетью, и регуляторы переменного напряжения находят широкое применение в промышленности и на электрифицированном транспорте, имеют много общего, как в силовой схеме, так и в системе управления. У них единое математическое описание и процессы коммутации. Вместе с тем выпрямительно-инверторные агрегаты и тиристорные регуляторы переменного напряжения, как в теоретическом, так и в практическом плане рассматриваются отдельно. О них пишут в разных книгах как о совершенно разных устройствах. В диссертации установлено, что их можно объединить в один класс по признаку единства уравнений, описывающих электромагнитные процессы. Это теоретическое положение подтверждено на экспериментальной установке, на обобщенной модели в среде MatLab и актуально как для научных исследований, так и для учебного процесса. В последнее время наблюдается переход от тиристорных к транзисторным схемам в модульном исполнении. Показав на примере тиристорных выпрямителей и регуляторов переменного напряжения, можно сделать вывод о единстве математического описания и для перспективных транзисторных преобразователей, ведомых сетью.

В библиотеке Simpowersystem Simulink в среде MatLab для силовой электроники имеется силовой модуль трёхфазного мостового тиристорного выпрямителя и блок системы управления этими выпрямителями. Модулей для других преобразователей ведомых сетью в среде MatLab не предусмотрено. Поэтому создание обобщенной модели, на основе которой можно исследовать все однофазные и трёхфазные преобразователи постоянного и переменного тока ведомые сетью (с синхронизированной и фазированной сетью системы управления), а также электротехнических комплексов и систем на их основе является важной научно-исследовательской задачей, которая в частности решается в данной диссертации. Не менее важную практическую значимость имеет обобщенная модель для создания унифицированных блоков, использование которых упрощает производство преобразователей для электротехнических систем, их эксплуатацию и ремонт и этого класса устройств является весьма актуальной.

В качестве объекта применения унифицированных преобразователей в данной работе рассмотрена электротехническая система

энергообеспечения аэродромного оборудования. В диссертации разработана система освещения взлетно-посадочной полосы аэродрома, которая устраняет существующие недостатки. Она обеспечивает равномерность освещения по всей длине полосы, предотвращает перегорание ламп при перенапряжениях в сети и создает удобство при эксплуатации и ремонте.

**Степень проработанности темы.** Большой вклад в разработку теоретических основ электронных электротехнических устройств и систем внесли: Ф.И. Ковалев, В. А. Лабунцова, И. М. Чиженко, Н.К. Полуянович, А.Г. Иванов, Г.А. Белов, А.Г. Сергеев, В. И. Сенько, А.Б. Красовский, Ю.С. Забродин, К.А. Преображенский, в математическое моделирование - И.В. Черных, С.Г. Герман - Галкин, в производство - П.Д. Андриенко, Т.А.Глазенко, и др. Среди зарубежных авторов следует отметить работы Juan Dixon, XU Wuxiong, Suhel Mustajab, Mohd. Kashif Adhami, S.C.Gupta, K.Venkatesan, RK Kanodia, Ashish Murolia.

**Целью** работы является обобщенное математическое описание и разработка обобщенной модели в среде MatLab для исследования физических процессов тиристорных преобразователей ведомых сетью переменного и (или) постоянного тока и на этой основе создание унифицированных преобразователей для электротехнических систем, в частности для энергообеспечения аэродромного оборудования. Сопоставление результатов, моделирование с результатами, полученными на экспериментальной установке.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) Исследование в среде MatLab системы управления трехфазным выпрямителем и разработка на её основе системы управления трехфазным регулятором переменного напряжения;
- 2) Разработка способа построения системы управления преобразователями постоянного и переменного тока;
- 3) Разработка обобщенной модели в среде MatLab для исследования трёхфазных и однофазных преобразователей, ведомых сетью и на ее основе построение частных моделей преобразователей, ведомых сетью;
- 4) На основе обобщенной и частных моделей предусмотреть построение унифицированных силовых блоков и блоков управления для ведомых сетью преобразователей;
- 5) Сравнение результатов, полученных на блочно - модульной модели и экспериментальной установке;
- 6) На основе унифицированных блоков преобразователей разработка систем энергообеспечения аэродромного оборудования:
  - а) осветительной системы взлетно - посадочной полосы аэродрома;
  - б) системы заряда и разряда аккумуляторов для источников бесперебойного питания аэродромного локатора.

### **Научная новизна**

1. Установлено единство математического описания класса преобразователей, ведомых сетью, работающих на нагрузку постоянного и (или) переменного тока для построения обобщенной модели.

2. Разработана обобщенная блочно-модульная модель для исследования физических процессов тиристорных преобразователей переменного и постоянного тока и на её основе составлены частные модели однофазных и трехфазных преобразователей ведомых сетью (выпрямителей и инверторов ведомых сетью, конверторов и циклоконверторов) для выявления способа построения унифицированных блоков управления.

3. На основании полученных из обобщенной модели частных моделей предложено построение унифицированных блоков управления для ведомых сетью преобразователей, обладающих единством аппаратного и программного обеспечения.

4. Предложена система освещения взлетно-посадочной полосы аэродрома, которая обеспечивает равномерность освещения по всей длине полосы, предотвращает перегорание ламп при повышенном напряжении в сети, создает удобство при настройке и упрощает эксплуатацию и ремонт.

### **Практическая ценность работы.**

1. Предложены на уровне изобретения способ и устройство для систем управления трехфазным мостовым выпрямителем и трехфазным регулятором переменного напряжения.

2. Разработаны блочно-модульные модели однофазных и трехфазных преобразователей постоянного и переменного тока ведомых сетью (с синхронизированной и фазированной сетью системы управления).

3. В среде MatLab разработана система управления трёхфазным регулятором переменного напряжения на основе шести-пульсного выпрямителя из библиотеки Simpower system Simulink.

Новизна технических решений подтверждается патентом на изобретение и свидетельством на программу для ЭВМ.

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

1. Единство математического описания класса преобразователей, ведомых сетью, работающих на нагрузку постоянного и (или) переменного тока для построения обобщенной модели;

2. Разработанная обобщенная блочно-модульная модель, позволяющая исследовать физические процессы в трехфазных и однофазных преобразователях, работающих на нагрузки переменного и (или) постоянного тока для выявления способа построения унифицированных блоков управления;

3. Построение систем управления трёхфазными и однофазными преобразователями переменного и (или) постоянного тока на унифицированных электронных компонентах;

4. Разработанная система освещения взлетно-посадочной полосы аэродрома, которая обеспечивает равномерность освещения по всей длине полосы и предотвращает перегорание ламп при повышенном напряжении в сети.

#### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность результатов диссертационного исследования и его основных научных положений и выводов основана на фундаментальных принципах общей теории электротехники, теории автоматического управления, математического моделирования и подтверждается соответствием результатов теоретических исследований в среде Matlab и результатов, полученных на экспериментальной установке.

Основные результаты исследования докладывались, обсуждались, и получили положительную оценку на следующих конференциях:

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

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

– Международная конференция по электрическим машинам и системам силовой электроники (г. Токио ноября 2017 г);

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

–Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям (FarEastCon 2018) г. Владивосток.

– Научно–техническое творчество аспирантов и студентов «Материалы всероссийской научно–технической конференции студентов и аспирантов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2019 г., КнАГУ).

– Научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов (г.Челябинск: 20 Февраля 2020г., «Южно-Уральский технологический университет».

– Научно–техническое творчество аспирантов и студентов «Материалы всероссийской научно–технической конференции студентов и аспирантов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2020 г., КнАГУ).

#### **Реализация результатов исследования**

Результаты исследования используются в учебном процессе в дисциплинах "Энергетическая электроника" и "Силовая электроника".

#### **Публикации**

По результатам выполненных исследовательских работ было опубликовано 13 работ, в том числе, 2 статьи из перечня изданий, определенных ВАК РФ, 1 статья включения в базу цитирования Scopus, 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

#### **Личный вклад автора в работу**

- участие в разработке программы для ЭВМ;
- участие в разработке способа построения системы управления;
- выполнение исследований на блочно-модульной модели и экспериментальной установке.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение написана на 120 страницах, содержит 49 рисунков, 1 таблицу, список литературы состоит из 124 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, определена цель, определены задачи и сформулирована научная новизна исследования, отмечена практическая ценность, основные направления реализации диссертационной работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, дан обзор содержания диссертации.

**В первой главе** проанализированы современные схемы трехфазных тиристорных преобразователей. Рассмотрены схемы трехфазного мостового тиристорного выпрямителя и регулятора переменного напряжения, принципы работы и регулировочные свойства этих преобразователей.

**Во второй главе** приведено обобщенное математическое описание тиристорных преобразователей, ведомых сетью, исследования на модели в среде MatLab трёхфазных устройств и экспериментальное исследование преобразователей.

В отдельный класс выделены преобразователи с синхронизированными с сетью системами управления. К ним относятся выпрямители и ведомые сетью инверторы, регуляторы переменного напряжения и циклоконвертеры, реверсивные и рекуперативные преобразователи для электроприводов постоянного и переменного тока. Обобщенная принципиальная схема и соответствующая ей эквивалентная схема замещения вышеперечисленных мостовых тиристорных преобразователей приведены на рисунке 1.

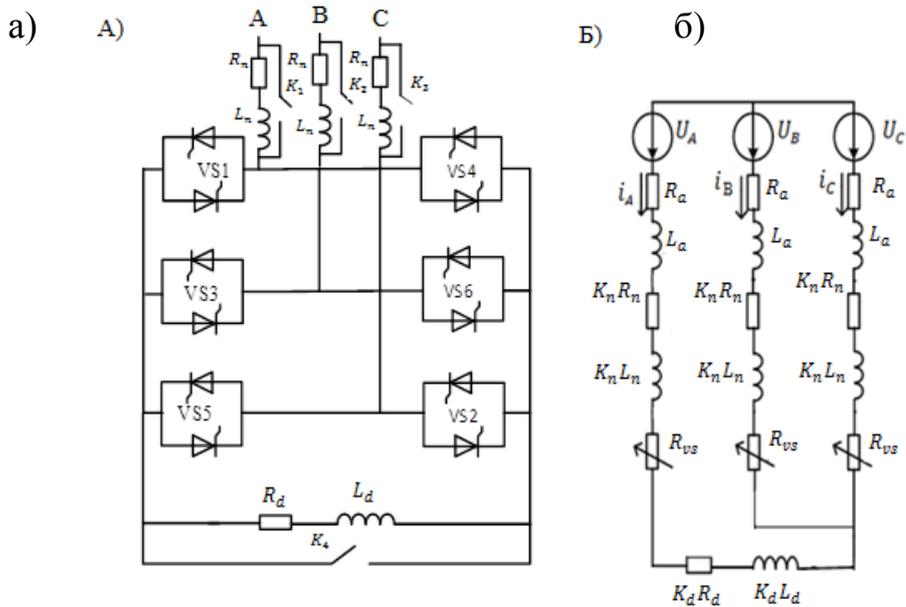


Рисунок 1 – Принципиальная схема (а) и эквивалентная схема замещения (б) мостовых тиристорных преобразователей

Из принципиальной схемы (рисунок 1, а) и схемы замещения (рисунок 1, б) видно, что трехфазный мостовой тиристорный выпрямитель (МТВ) и трехфазный тиристорный регулятор переменного напряжения (ТРН) имеют много общего. Регулятор можно получить из выпрямителя путем шунтирования нагрузки выпрямителя ( $K_d = 0$ ) и добавления сопротивления во входную цепь ( $K_n = 1$ ). Эта особенность позволяет составить одну обобщенную схему замещения и в дальнейшем записать уравнения, описывающие электромагнитные процессы в преобразователях рассматриваемого класса.

Различают два режима (интервала) работы тиристорov в мостовой схеме.

- 1) В работе находятся два тиристора:
  - а) у ТРН называют интервалы двухфазной проводимости;
  - б) у МТВ называют межкоммутационных интервал.
- 2) В работе находятся три тиристора:
  - а) у ТРН называют интервалы трехфазной проводимости;
  - б) у МТВ называют интервал коммутации.

Найдено единое построение системы управлений для обоих преобразователей.

Уравнения преобразователей при работе на межкоммутационных интервалах (двухфазная проводимость):

$$\begin{aligned}
 U_{AB} = & 2(R_a + R_{vs} + K_n R_n + K_d R_d) \cdot i_A \\
 & + 2(L_a + K_n L_n + K_d L_d) \cdot \frac{di_A}{dt} ; \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$i_A = -i_B ,$$

где  $U_{AB}$  – линейное напряжение между фазами А и В ;  $i_A$  – ток фазы А через нагрузку;  $R_a, L_a$  – сопротивление и индуктивность рассеяния обмоток сетевого трансформатора;  $R_d, L_d$  – сопротивление и индуктивность нагрузки выпрямителя;  $R_n, L_n$  – сопротивление индуктивность нагрузки регулятора;  $R_{vs}$  – сопротивление открытого тиристора,  $K_d, K_n$ - коммутационные функции выпрямителя и регулятора.

Уравнения преобразователей на интервалах коммутации тиристоров (трехфазная проводимость):

$$\begin{cases} U_{AB} = 2(R_a + R_{vs} + K_n R_n + K_d R_d) \cdot i_A + 2(L_a + K_n L_n + K_d R_d) \cdot \frac{di_A}{dt}; \\ U_{BC} = 2(R_a + R_{vs} + K_n R_n) \cdot i_C + 2(L_a + K_n L_n) \cdot \frac{di_C}{dt}. \\ i_A + i_B + i_C = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{BC}$  – линейное напряжение между фазами В и С,  $i_C$  – ток фазы С.

Обобщенная блочно-модульная модель в среде MatLab представлена на рисунке 2. Развернутые схемы силового модуля и система управления приведены на рисунках 3 и 4.

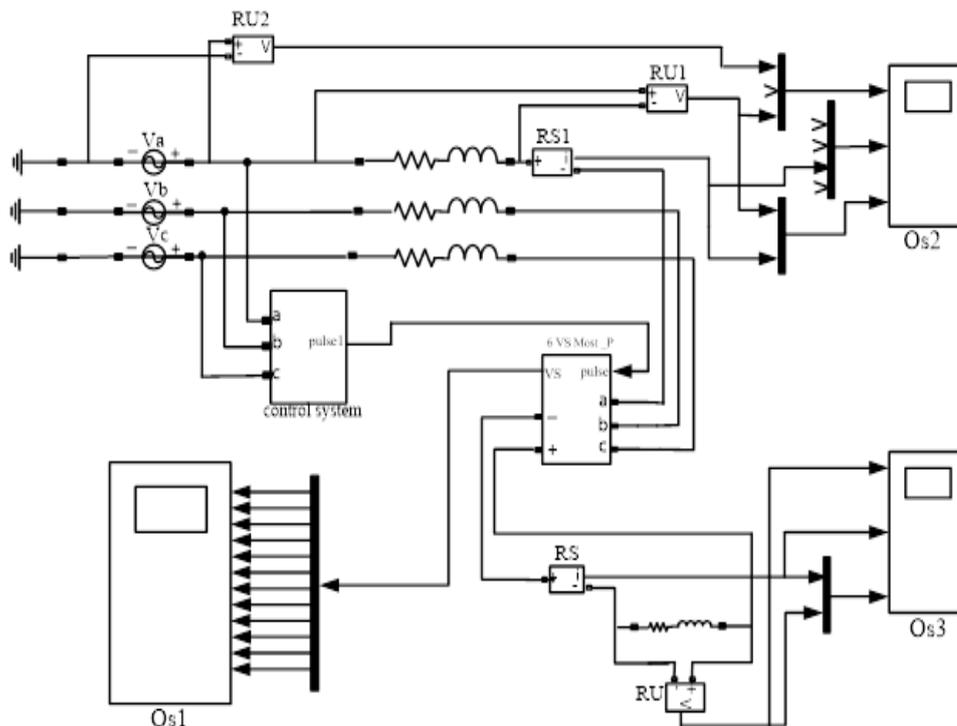


Рисунок 2 – Обобщённая блочно – модульная модель мостового преобразователя в среде MatLab.

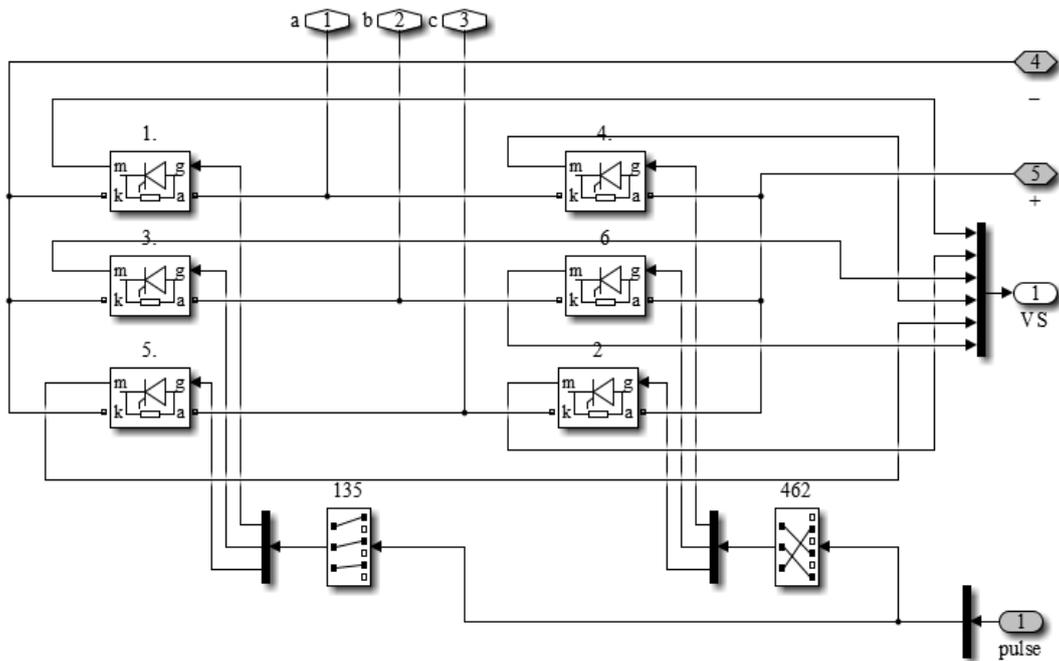


Рисунок 3 – Схема силового модуля тиристорного моста

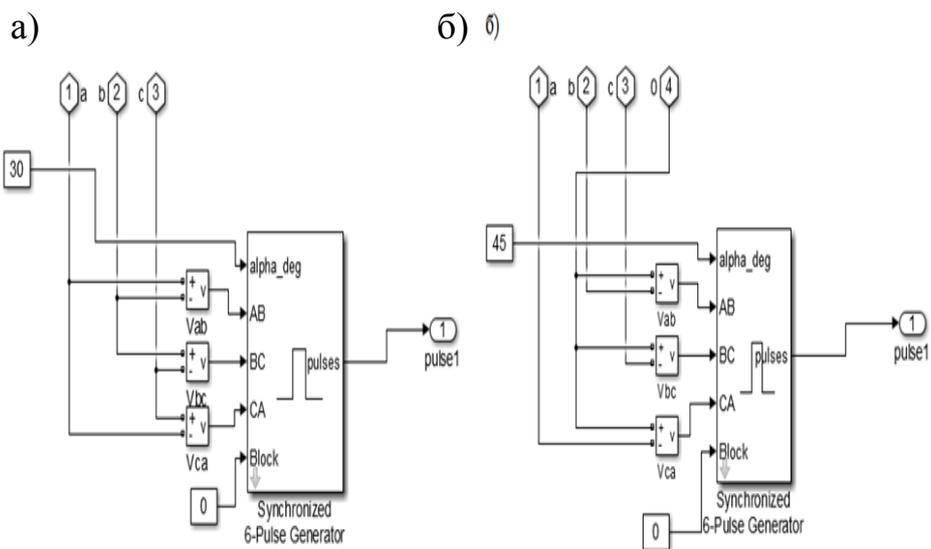


Рисунок 4 – Схема синхронизации с сетью модуля системы управления выпрямителем (а) и регулятором (б)

Результаты исследования выпрямителя и регулятора переменного напряжения в установившихся режимах на обобщенной модели приведены на рисунках 5 и 6.

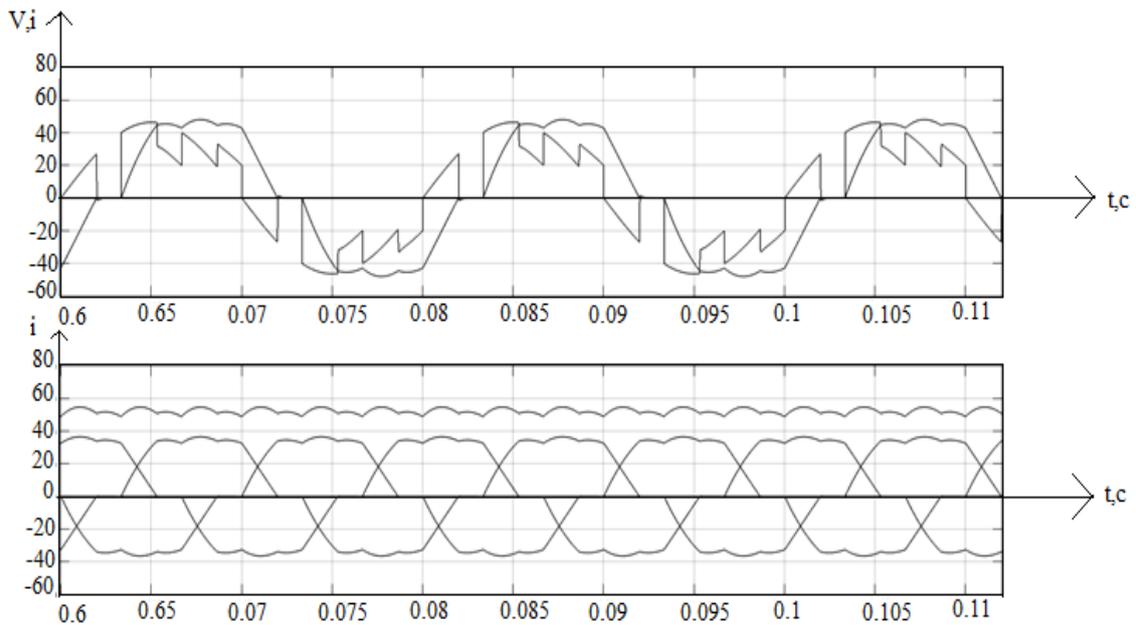


Рисунок 5 – Осциллограммы тиристорного регулятора переменного напряжения: напряжение  $U_n$  и ток  $i_n$  нагрузки (сверху); трёхфазный ток сети  $i_a, i_b, i_c$ , выпрямленный ток  $i_d$  в закороченной диагонали моста (снизу)

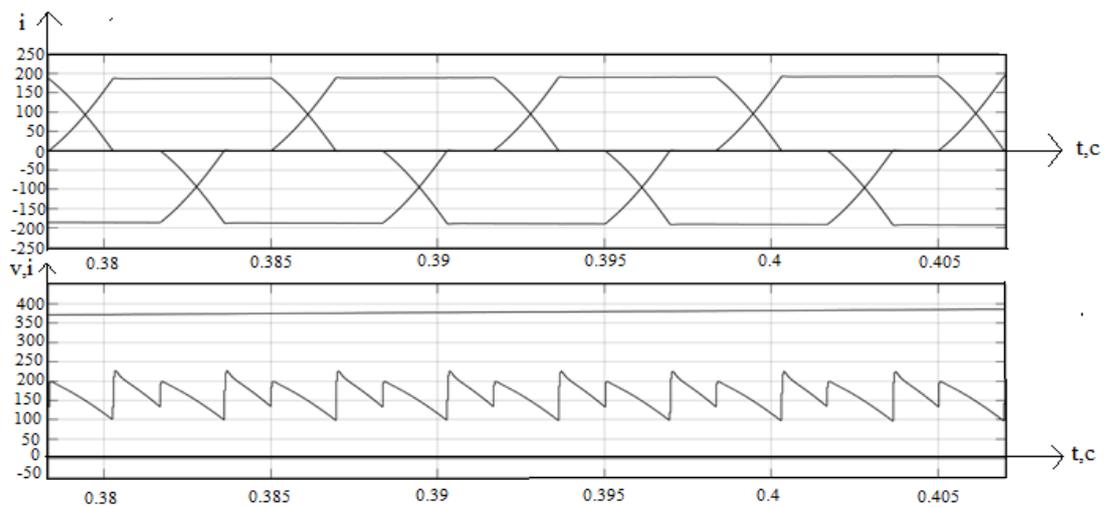


Рисунок 6 – Осциллограммы выпрямителя при работе на RL- нагрузку

Рассмотрим подробнее исследования пусковых режимов промышленных RL- нагрузок. На рисунке 7 приведены пусковые токи трёхфазной нагрузки электрическим аппаратом (рисунок 7, сверху) и гибридным электронно-электрическим аппаратом на основе выпрямителя и шунтирующего контактора (рисунок 7, снизу). Из этого численного эксперимента видно, что трёхфазная нагрузка при включении электрических аппаратов создает большое увеличение токов и динамические удары по электрической части оборудования, а при помощи

гибридного аппарата производится безударное включение с плавным нарастанием токов.

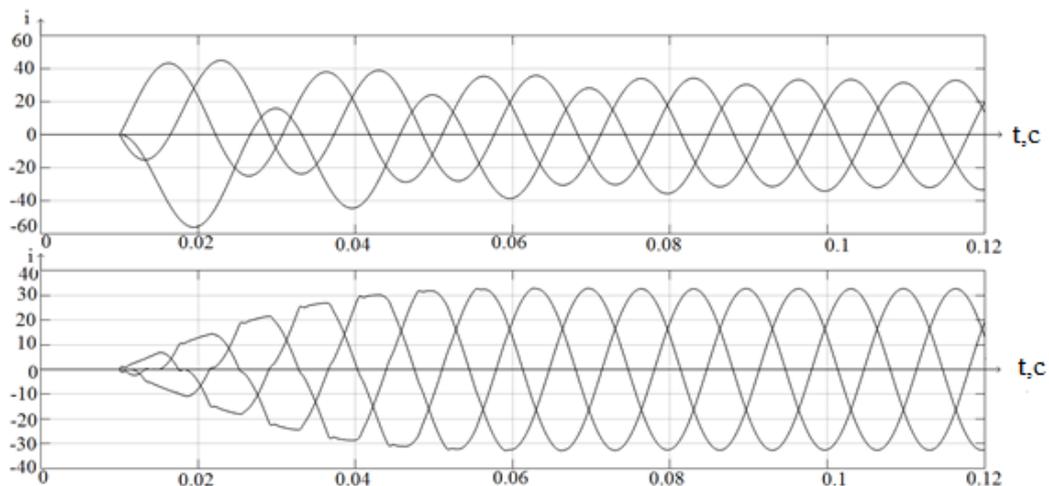


Рисунок 7 – Осциллограммы пусковых токов RL – нагрузка при включении электрическим аппаратом (сверху) и гибридным электронно-электрическим аппаратом (снизу)

Развернутые физические процессы электронно-электрического пускателя представлены на рисунке 8.

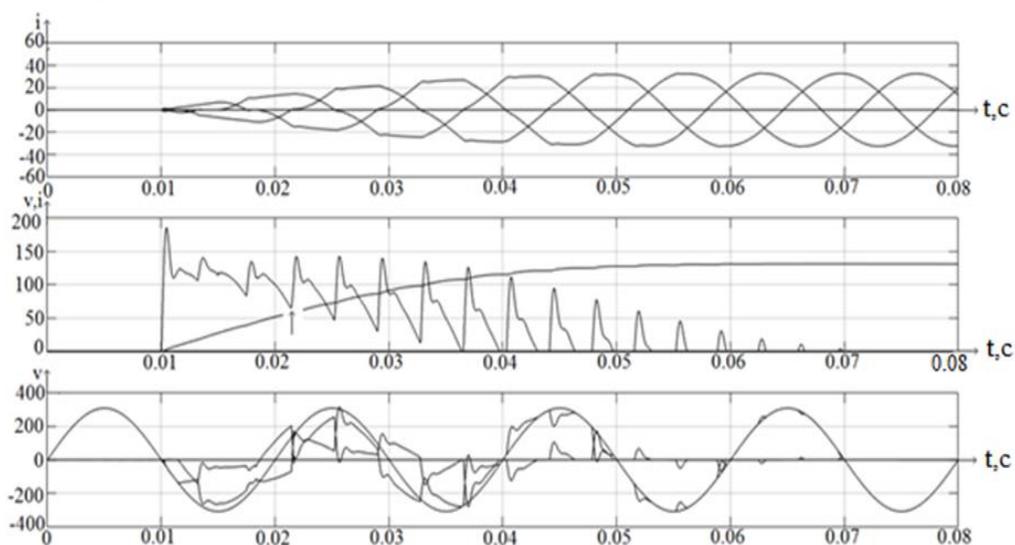


Рисунок 8 – Осциллограммы безударного включения трёхфазной RL-нагрузки через выпрямитель с последующим его шунтированием в 0,07с контактором

Включение электронным пускателем производится с высоким быстродействием без превышения токами их установившихся значений. После завершения пуска электронная часть пускателя шунтируется контактором и исключается из схемы электропитания промышленного оборудования.

На рисунке 9 приведен процесс изменения напряжения и тока при переходе МТВ из выпрямителя в инверторный режим.

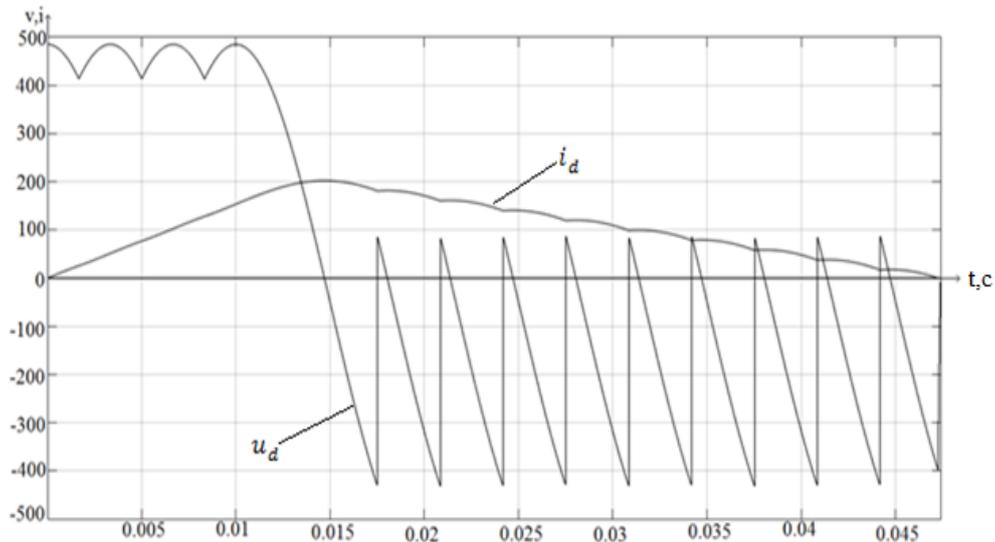


Рисунок 9 – Осциллограммы напряжения  $u_d$  и тока  $i_d$  при переходе выпрямителя в инверторный режим

Численный эксперимент с циклическим переходом из выпрямителя в инвертор на режим представляет на рисунке 10.

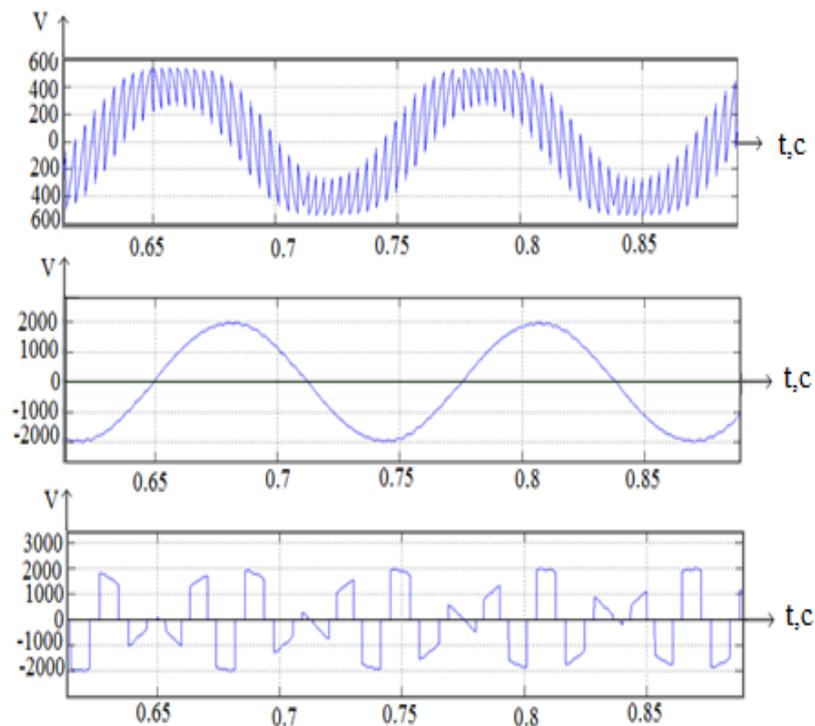


Рисунок 10 – Осциллограммы циклоконвертора: напряжение нагрузки (сверху); ток нагрузки (по середине); фазный ток сети (снизу)

В циклоконверторах управляющий сигнал имеет синусоидальную форму. Каждая тиристорная группа выполнена с двухсторонней проводимостью тока и работает в режимах выпрямителя и инвертора с переключением угла управления с  $\alpha$  на  $\pi - \alpha$  при переходе тока через ноль.

В третьей главе представлены принципы построения унифицированной системы управления трехфазным мостовым выпрямителем и трехфазным регулятором переменного напряжения.

Аналитическое исследование технической литературы и патентно-лицензионной информации позволило найти и предложить техническое решение для управления трехфазными тиристорными преобразователями (мостовым выпрямителем и регулятором переменного напряжения). Оно относится к электротехнике, в частности, к силовой электронике и может найти применение в электроэнергетических и электромеханических системах и комплексах.

Сущность предлагаемого технического решения поясняется нижеприведенным описанием и прилагаемыми к нему чертежами, где на рисунке 11 представлена функциональная схема унифицированной системы управления.

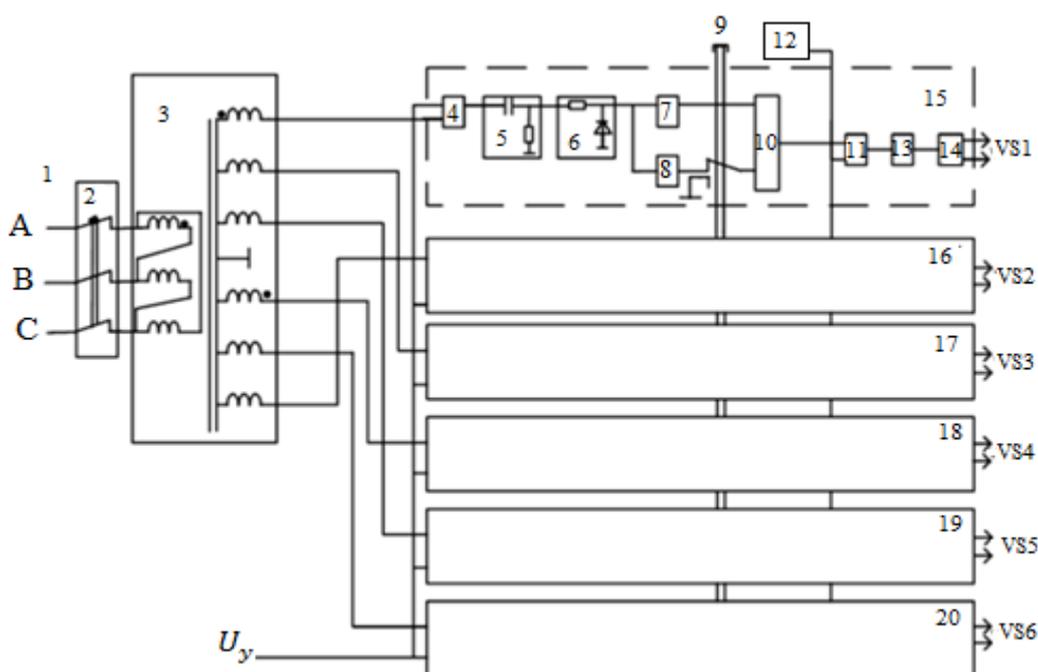


Рисунок 11 – Схема унифицированной системы управления трёхфазным мостовым выпрямителем и трёхфазным регулятором переменного напряжения

Система управления (рисунок 11) подключается к трехфазной сети 1 и содержит автомат 2, синхронизирующий трансформатор 3 с первичной обмоткой, соединенной в треугольник и двумя вторичными обмотками, соединенными в шестифазную звезду, шесть каналов управления, каждый из которых включает в себя компаратор 4, дифференцирующую цепь 5, выпрямитель 6, основной одновибратор 7, дополнительный одновибратор 8, условный переключатель соединений между микросхемами 9, логический элемент «ЗАПРЕТ» 10, логический элемент «И» 11, модулятор

12, усилитель мощности 13, импульсный трансформатор 14. Нумерация каналов выполнена от 15 до 20.

На рисунке 12 диаграммы управляющих импульсов для трехфазного регулятора переменного напряжения (рис .12, а) и для трехфазного мостового выпрямителя (рис.12, б).

У регулятора переменного напряжения при работе на чисто индуктивную нагрузку импульсы должны быть широкими, длительностью не меньше угла  $\varphi = 90^\circ$ , в то время как у выпрямителя с любым соотношением между  $R_d$  и  $L_d$  нагрузки они могут быть как короткими и сдвоенными, следуя через  $60^\circ$ , так и широкими, длительностью не меньше  $60^\circ$ .

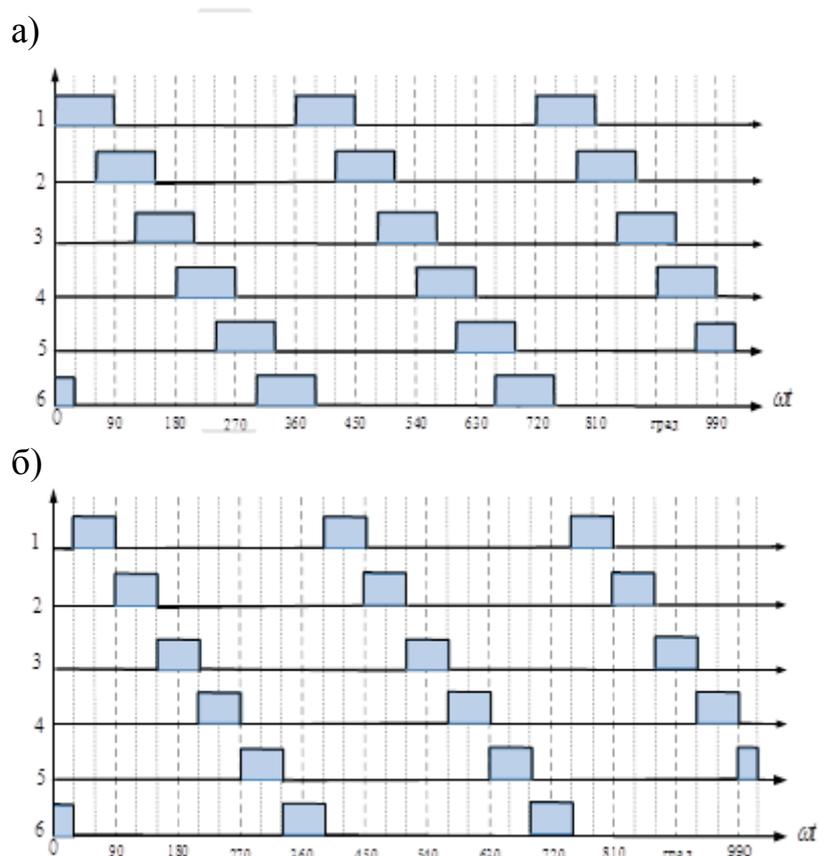


Рисунок 12 – Диаграммы управляющих импульсов для регулятора переменного напряжения (а) и выпрямителя (б)

Областью применения устройства являются трехфазные мостовые выпрямители и трехфазные тиристорные регуляторы переменного напряжения. Начало координат на рисунке 12 совпадает с переходом через ноль напряжения фазы А. Таким образом, при выполнении необходимых соединений в силовой схеме и системе управления регулятор переменного напряжения становится выпрямителем. Те же переключения в обобщенной блочно-модульной модели позволяют исследовать физические процессы в

выпрямителе и регуляторе переменного напряжения при различных видах нагрузки.

**Четвёртая глава** посвящена разработке системы энергообеспечения аэродромного оборудования.

Предлагаемая для аэродрома осветительная система с автотрансформаторами и тиристорным регулятором напряжения приведена на рисунке 13.

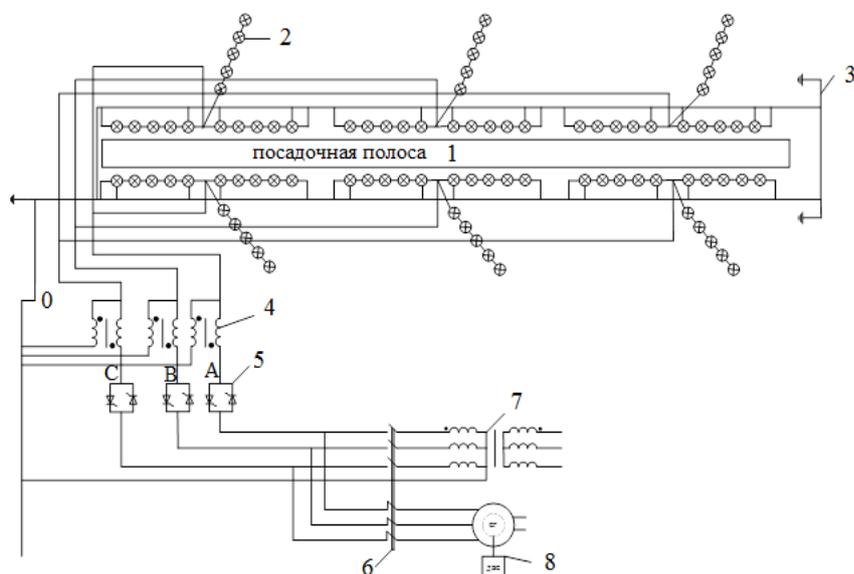


Рисунок 13 – Схема электрических соединений осветительной системы взлётно-посадочной полосы

На рисунке 13 введены следующие обозначения:

1 – взлётно-посадочная полоса; 2 – галогеновые лампы; 3 – трехфазные источники с нулевым проводом; 4 – однофазные вольтодобавочные трансформаторы; 5 – трехфазный регулятор переменного напряжения с нулевым проводом; 6 – реверсивный контактор; 7 – силовой трансформатор подстанции; 8 – дизель-генераторная установка.

Условия для равномерного освещения взлётно-посадочной полосы:

$$U_{CA} = U_{CB} = U_{CC};$$

$$U_{PA} < U_{PB} < U_{PC};$$

$$U_{LA} = U_{LB} = U_{LC}.$$

Здесь  $U_{CA}$  – напряжение трехфазной сети,  $U_{PA}$  – напряжение источника питания,  $U_{LA}$  – напряжение на лампах.

Модель одного сектора осветительной системы взлётно-посадочной полосы аэродрома в среде Matlab приведена на рисунке 14. Она содержит тиристорный модуль с блоком системы управления, блок вольтодобавочного трансформатора, включенный по схеме автотрансформатора и сопротивления проводов и ламп.

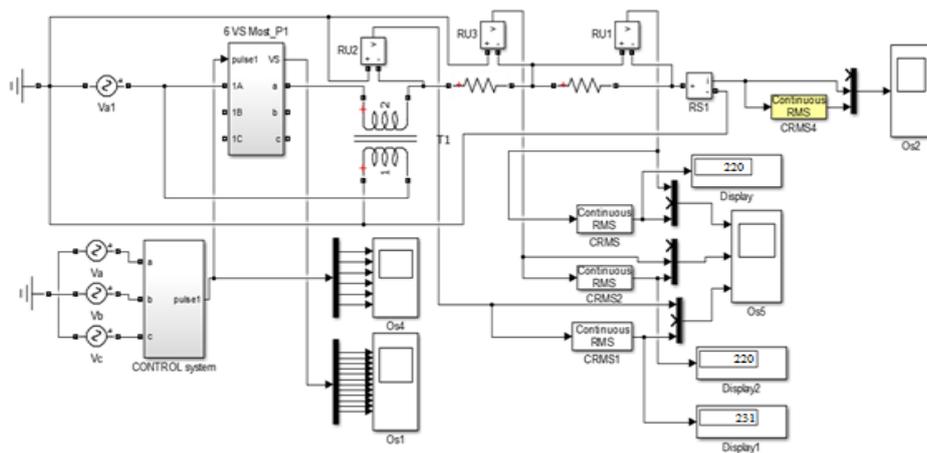


Рисунок 14 – Модель для одного сектора системы освещения взлётно-посадочной полосы аэродрома в среде MatLab

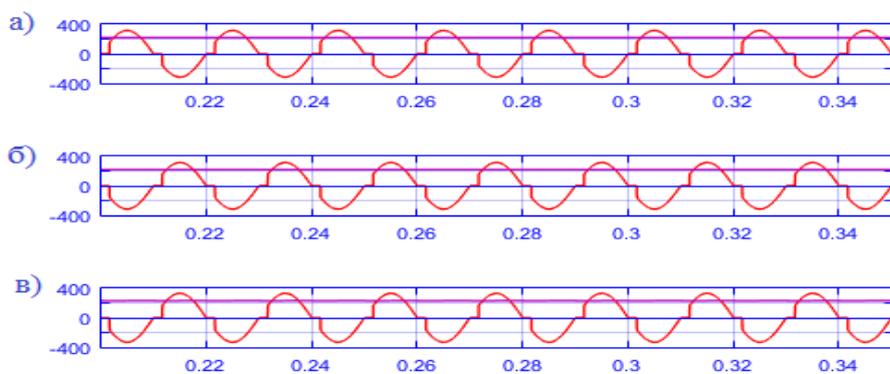


Рисунок 15 – Осциллограммы напряжений элементов схемы:  
 а) напряжение на нагрузке; б) результирующие напряжения источника (220 В), вольтодобавки (+11 В) падение напряжения на проводах (-11 В);  
 в) суммарное напряжение (231 В) источника (220 В) и вольтодобавки (+11В)

Предложенная структура схемы заряда/разряда аккумуляторных батарей представлена на рисунке 16.

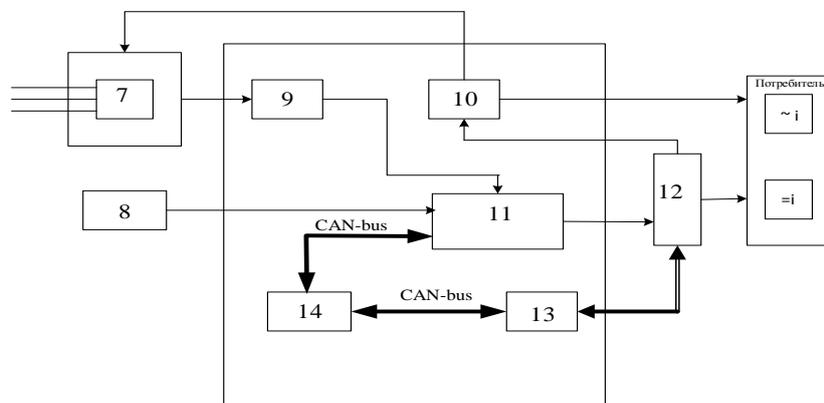


Рисунок 16 – Структура схемы заряда/разряда аккумуляторных батарей

Схема на рисунке 16 является продолжением схемы, приведенной на рисунке 14, и включает в себя: 7 – силовой трансформатор подстанции; 8 – дизель-генераторную установку; 9 – блок заряда (управляемый выпрямитель с понижающим трансформатором СУ); 10 – блок разряда (транзисторный коммутатор с СУ); 11 – блок питания; 12 – аккумуляторную батарею; 13 – систему контроля аккумуляторных батарей; 14 – ЭВМ.

В диссертации выполнено имитационное моделирование зарядно - разрядного устройства аккумуляторов для источников бесперебойного питания в среде Matlab. Проанализированы процессы изменения напряжения (рисунки 18 и 19) при заряде и разряде аккумуляторных батарей.

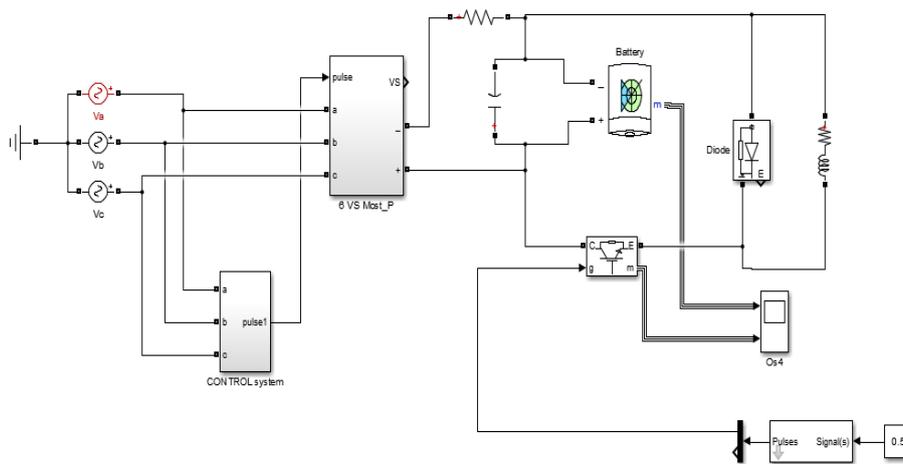


Рисунок 17 – Модель зарядно - разрядного устройства аккумуляторов источников бесперебойного питания аэродромного оборудования

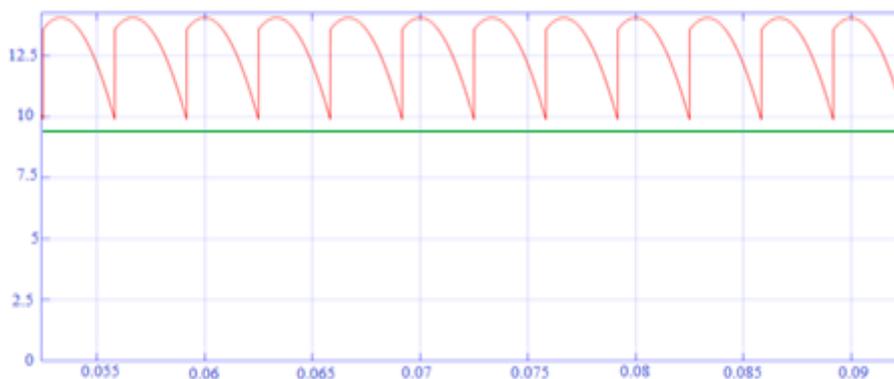


Рисунок 18 – Осциллограммы напряжения и тока при заряде аккумулятора от выпрямителя

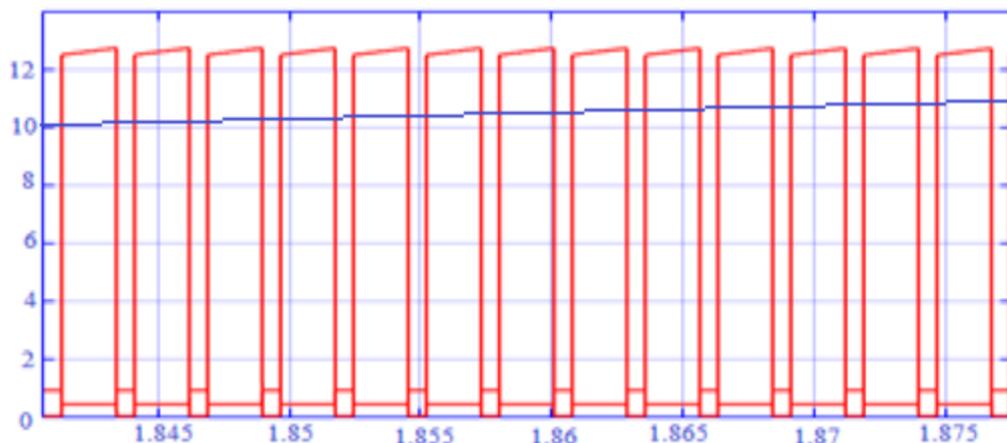


Рисунок 19 – Осциллограмма импульсного напряжения и тока при разряде аккумулятора

На рисунке 20 представлена фотография экспериментальной установки.

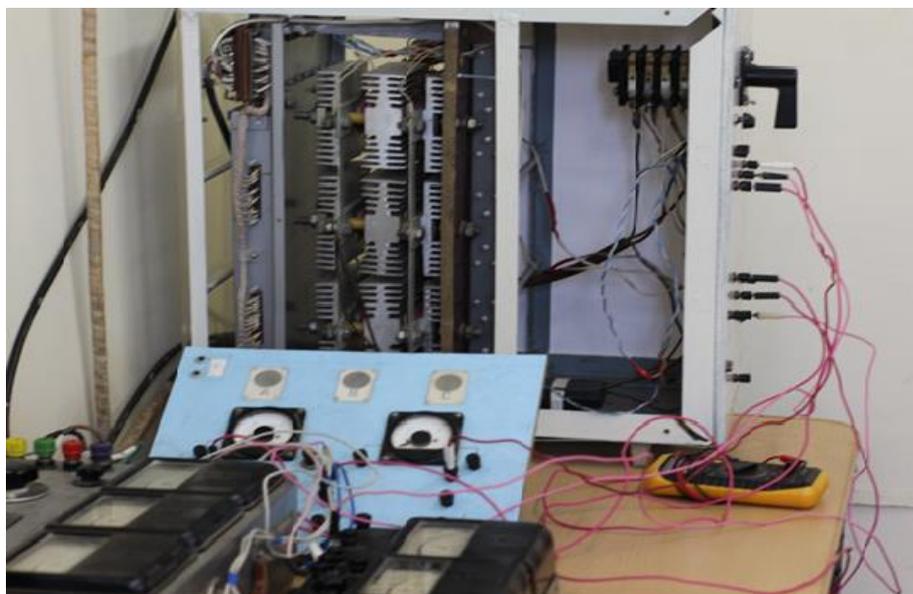


Рисунок 20 – Внешний вид экспериментальной установки

На рисунке 21 представлены осциллограммы МТВ и ТРН, снятые на общей для этих преобразователей экспериментальной установке, выполненной с возможностью перераспределения сопротивлений в цепях постоянного и переменного тока. На нем же представлены осциллограммы МТВ и ТРН, снятые на обобщённой математической модели в среде MatLab. В результате математического моделирования и экспериментальных исследований было установлено, что одно и то же устройство может работать как регулятор переменного напряжения, так и как выпрямитель при любом характере нагрузок в цепях переменного и (или) постоянного тока.

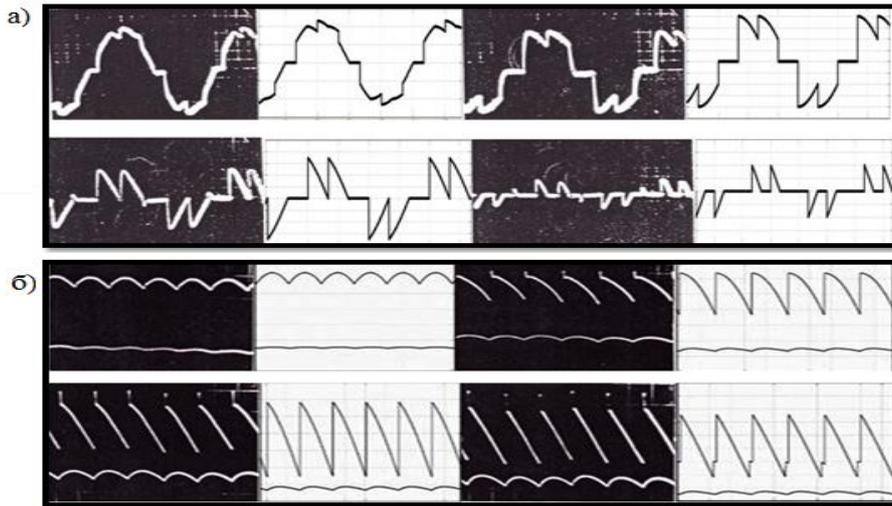


Рисунок 21 – Осциллограммы экспериментальной установки и обобщенной модели для ТРНЕ (а) и МТВ (б)

На рисунке 22 представлен сравнительный анализ напряжения и тока одной фазы регулятора.

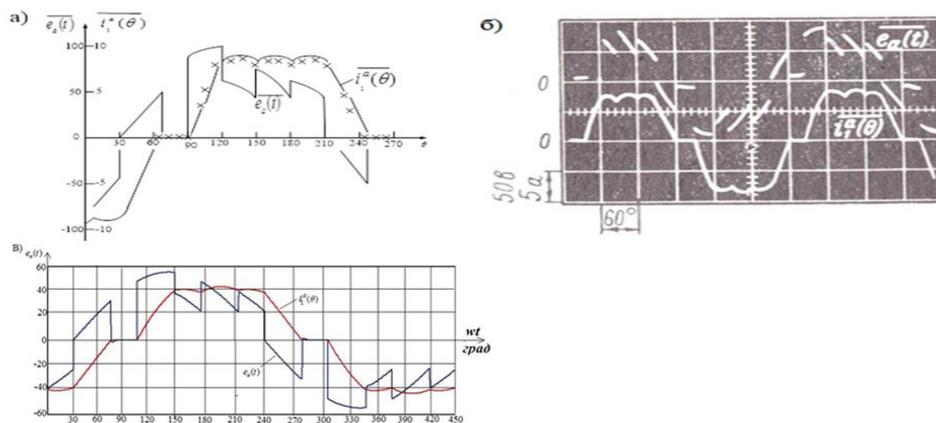


Рисунок 22 – Напряжение и ток:(а) – по аналитическим выражениям; (б) – экспериментальным путем;(в) с использованием обобщенной модели в среде MatLab

При сравнении видно их хорошее совпадение. Таким образом, обобщенная модель позволяет достоверно производить расчёт электромагнитных процессов для рассматриваемых преобразователей в переходных и стационарных режимах при любом характере нагрузки с выявлением любой электрической величины и характеристик устройства.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Установлено единство математического описания для построения обобщенной модели и исследования преобразователей, ведомых сетью.

2) Предложен новый способ построения системы управления трехфазным мостовым выпрямителем и трехфазным регулятором переменного напряжения, который может быть применен ко всему классу преобразователей, ведомых сетью.

3) Разработанная обобщенная блочно-модульная модель для исследования трехфазных схем, как частный случай, применима для однофазных устройств, относящиеся к классу преобразователей, ведомых сетью (выпрямители и инверторы, конверторы и циклоконвертеры) и электротехнические системы с их применением.

4) Анализ обобщенной и частных моделей с учетом предложенного способа построения систем управления позволил выявить унифицированные блоки и дать рекомендации при проектировании, производстве, эксплуатации и ремонте преобразователей, ведомых.

5) Обобщенная модель в среде MatLab адекватно отображает физические процессы, полученные на экспериментальной установке.

6) На основе унифицированных блоков преобразователей разработаны системы энергообеспечения аэродромного оборудования:

а) система освещения взлетно-посадочной полосы аэродрома, которая обеспечивает равномерность освещения по всей длине полосы, предотвращает перегорание ламп при перенапряжениях в сети и создает удобство при эксплуатации и ремонте;

б) зарядно-разрядного устройства аккумуляторов в среде Matlab для системы бесперебойного питания аэродромного локатора.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.*

1. Климаш, В.С. Обобщенное математическое описание и моделирование тиристорных преобразователей, ведомых сетью / В.С. Климаш, Ye Min Tху // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – №4(33). – С. 78 – 86.

2. Климаш, В.С. Математическое моделирование устройств силовой электроники в системах электроснабжения и электропривода / В.С. Климаш, Ye Min Tху// Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – №6. – С. 378 – 384.

*В зарубежных научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus (в 2018) и Web of Science (в 2019).*

3. Klimash, V.S. Research of the physical processes of the power electronics device / V.S. Klimash, Ye Min Thu // 10.1109 / FarEastCon.2019.8602876.

4. Klimash, V.S. Generalized Mathematical Description and Simulation of Grid-Tied Thyristor Converters / V.S. Klimash, Ye Min Thu // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol: 11 No: 11, Tokyo 2017. p. 1135 – 1142.

***Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и Патенты.***

5. Свидетельство РФ № 2016617861 о регистрации программы для ЭВМ "Программа обобщенной математической модели в среде MatLab. тиристорных преобразователей ведомых сетью для исследования физических процессов". / Климаш В.С. (RU), Йе Мин Тху (RU) // Бюл. № 8, 20.08.2016.

6. Способ построения системы управления трехфазным мостовым выпрямителем и трехфазным регулятором переменного напряжения и устройство для его реализации: пат.2658321 Рос. Федерация: МПК: H02J 13/00 / Климаш В.С., Йе Мин Тху; заявитель и патентообладатели Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2017121772/07; заявл. 01.06.2017; опубл. 20.06.2018, Бюл. № 6. – 1 с: ил.

***Публикации в других изданиях***

7. Йе Мин Тху. Математическое моделирование тиристорных преобразователей, Йе Мин Тху, В.С. Климаш // Материалы отчетной конференции аспирантов Республики Союза Мьянма, прошедших первый год обучения: – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2016. С. 17 –19.

8. Климаш В.С. Теоретические и экспериментальные исследования тиристорных преобразователей, ведомых сетью (статья), В.С. Климаш, Йе Мин Тху // журнал Электрооборудование: эксплуатация и ремонт: - М. 2017. С. 18 –23.

9. Йе Мин Тху. Исследование физических процессов трехфазного тиристорного регулятора переменного напряжения, Йе Мин Тху, В.С. Климаш // Материалы 47-й научно–технической конференции студентов и аспирантов: сб. науч. работ. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2017. С. 443 – 446.

10. Йе Мин Тху, Исследование динамических процессов вентильных преобразователей промышленных нагрузок, Йе Мин Тху, В.С. Климаш // Материалы I-й Всероссийской научно–технической конференции студентов и аспирантов: – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. С. 303 – 306.

11. Йе Мин Тху, От математики к производственному электротехническому комплексу, Йе Мин Тху, В.С. Климаш // Материалы II-й Всероссийской научно–технической конференции студентов и аспирантов: – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. С. 463 – 465.

12. Климаш В.С. Теоретические и экспериментальные исследования вентильных преобразователей промышленных нагрузок, В.С. Климаш, Йе Мин Тху // научно–практическая конференция научных, научно-

педагогических работников, аспирантов и студентов: Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет», 2020. С. 184–189.

13. Йе Мин Тху, Схема осветительной системы взлетно-посадочной полосы аэродрома, Йе Мин Тху, В.С. Климаш // Материалы III-й Всероссийской НТК студентов и аспирантов: – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. С. 246 – 248.

Подписано в печать.

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.

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