

На правах рукописи

Хитров

Хитров Андрей Александрович

**АВТОНОМНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА
ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛА**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Псков – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Псковский государственный университет» на кафедре «Электропривод и системы автоматизации»

Научный руководитель: **Козярук Анатолий Евтихиевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Пронин Михаил Васильевич**
доктор технических наук
ПАО «Силовые машины», начальник сектора
общепромышленного регулируемого
электропривода
Томасов Валентин Сергеевич
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики», заведующий
кафедрой электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»

Защита состоится 22 мая 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая д.29, Главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Университета <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.20,

к.т.н., доцент



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Около половины территории России, на которой проживает более 10 млн. человек, не имеет систем централизованного энергоснабжения. Освоение территорий Сибири, Дальнего Востока, районов Арктики, сильно удаленных от централизованной энергосистемы требует применения автономных источников питания. Для повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов ставятся задачи создания автономных систем энергоснабжения (АСЭ), которые обеспечивают при сжигании органического топлива одновременное получение как тепловой, так и электрической энергии (когенерационные установки).

Актуальность развития автономной энергетики и повышение ее эффективности отмечена в законодательных актах Российской Федерации: 23.11.2009 № 261 — ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», №1234-р от 28.08.2003 «Энергетическая стратегия России на период до 2020 г.» и ряде других.

В настоящее время наиболее распространенными и универсальными децентрализованными АСЭ являются дизельные электростанции (ДЭС), обладающие рядом известных недостатков. Перспективным альтернативным вариантом являются когенерационные установки на базе двигателя с внешним подводом тепла (ДВПТ), конструкция которого и процессы преобразования тепловой энергии в механическую накладывают ряд особенностей на разработку энергоустановки.

Разработка особой конструкции ДВПТ – роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты (РЛДВПТ) осуществлена Журавлевым Ю.Н., Лукьяновым Ю.Н., Плоховым И.В., Донченко М.А. и др. Однако выбор решений электрической части когенерационной установки для такого типа двигателя остается открытым вопросом. Переменная частота вращения вала машины в таких

системах делает необходимым применение синхронных машин, имеющих магнитоэлектрическое возбуждение – магнитоэлектрических генераторов (МЭГ).

Вопросы создания АСЭ на базе МЭГ в установках с переменными и постоянными частотами вращения вала машины рассмотрены в работах Харитонов С.А., Грачева П.С., Захаренко А.Б. и др. Однако ряд вопросов, связанных с взаимодействием частей когенерационных локальных установок, в частности, электрического запуска систем, подобных РЛДВПТ, остается неисследованным. Большой вклад в области исследования электроприводов на базе синхронных машин с постоянными магнитами внесен такими российскими учеными как И.Е. Овчинников, А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев и др. Созданием теоретических и практических основ для исследования энергоэффективных электроприводов успешно занимались такие ученые как А.А. Горев, Р. Парк, И.П. Копылов, Р.Т. Шрейнер, И.Я. Браславский и др.

Объект исследования: автономная электроэнергетическая установка на основе двигателя с внешним подводом тепла.

Цель диссертационной работы: разработка энергоэффективной системы для запуска и генерации электрической энергии (стартер-генераторной установки) на базе роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты (РЛДВПТ) и синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ) в составе АСЭ малой мощности.

Идея работы заключается в создании структуры, разработки методов и средств для обеспечения режимов запуска АСЭ и генерации электрической энергии на основе установки с общепромышленной СМПМ, достижение эффективности управления электрической частью установки с учетом особенностей ДВПТ и использованием активных коммутаторов, включенных в её состав.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи исследований:**

1. Выявление основных особенностей РЛДВПТ с точки зрения построения электрической подсистемы когенерационной установки на его базе. Проведение

сравнительного анализа систем запуска и генерации электроэнергии в АСЭ с переменной частотой вращения вала генератора.

2. Разработка структурных схем для обеспечения генераторного и стартерных режимов работы установки на базе ДВПТ и системы управления установкой.

3. Разработка имитационных моделей электрической части установки для исследования процессов в системе.

4. Создание макета электрической подсистемы когенерационной установки на базе ДВПТ.

5. Выработка рекомендаций по проектированию автономных электроэнергетических установок на основе ДВПТ.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались методы математического моделирования электрических машин, аналитические и численные методы прикладной математики. Широко использовались методы имитационного компьютерного моделирования в среде MATLAB, а также экспериментальные исследования в лабораторных условиях.

Научная новизна исследования заключается в том, что:

1. Предложена структура автономной электроэнергетической установки на базе РЛДВПТ с СМППМ и преобразователем постоянного напряжения, а также способ управления ею.

2. Разработана имитационная модель согласно предложенной структуре, которую можно использовать для исследования режимов работы автономной электроэнергетической установки.

3. Обоснована возможность и эффективность применения общепромышленных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов в составе электроэнергетических установок малой мощности до 15 кВт.

4. Исследована работоспособность электротехнического комплекса в составе СМППМ, повышающего преобразователя постоянного напряжения и инвертора с проведением оценки качества вырабатываемой электрической энергии.

Практическая значимость работы:

1. Разработанная имитационная модель рассматриваемой стартер-генераторной установки позволяет исследовать режимы работы энергетической системы, осуществлять выбор параметров элементов системы, а также анализировать качество вырабатываемой электроэнергии.

2. Предложена структура экспериментального стенда для исследования режимов работы трехфазных электрических машин переменного тока: асинхронных двигателей и СМПМ. Разработанный универсальный лабораторный стенд (макет энергетической установки), имеющий в составе активный выпрямитель, позволяет исследовать различные режимы работы приводов с СМПМ (в двигательном и генераторном режимах). Стенд использован в учебном процессе (лабораторные работы кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФБГОУ ВО «Псковский государственный университет»), а также в совместных испытаниях СМПМ производства ОАО «ПЭМЗ» (г. Псков).

3. Решения, лежащие в основе разработанной структуры электрической части АСЭ на базе ДВПТ с СМПМ, и выработанные рекомендации по выбору значений параметров элементов, включенных в состав установки, позволяют проектировать автономные электроэнергетические установки на базе РЛДВПТ, а также могут быть применены в системах, имеющих схожие особенности (например, ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения).

Защищаемые положения:

1. Структура автономной электроэнергетической установки на базе РЛДВПТ с СМПМ и повышающим преобразователем постоянного напряжения и способ управления ею.

2. Модель электрической части АСЭ на базе РЛДВПТ и СМПМ, обеспечивающая необходимые режимы работы и учитывающая особенности работы низкоскоростного движителя с переменной скоростью вращения.

3. Результаты имитационного моделирования и экспериментальных исследований на созданном макете АСЭ.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций базируется на использовании фундаментальных законов теории электрических машин, теории автоматизированного электропривода, электрических цепей и подтверждена сходимостью результатов имитационного моделирования с результатами экспериментальных исследований на лабораторном макете.

Апробация работы. Основные результаты и научные положения диссертационной работы докладывались на таких научно-технических конференциях как: VI Международная (XVII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП) (г. Тула, 2010 г.), Всероссийский конкурс «Эврика» (г. Новочеркасск, 2011 г.), VII Международная (VIII Всероссийская) конференция АЭП-2012 (г. Иваново, 2012 г.), Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук (СПбГПУ, 2012 г.), 9-я и 10-я Международная научно-практическая конференция «Environment. Technology. Resources» (г. Резекне, 2013, 2015 г.), Молодежный научно-инновационный конкурс «У.М.Н.И.К.» (г. Псков, 2014-2016 г.).

Реализация результатов работы:

Полученные теоретические и практические результаты диссертационной работы были использованы:

- в учебном процессе, в том числе в исследовательских и дипломных проектах, студентов кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет», лабораторных работ магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»;

- при создании экспериментального макета электрической части когенерационной установки на базе РЛДВПТ в ООО «Научное инновационное предприятие «Дельта-Т»»;

- при совместных испытаниях режимов работы СМПИМ производства ОАО «ПЭМЗ» (г. Псков).

Личный вклад автора. Автор непосредственно участвовал в постановках задач, синтезе структуры автономной электроэнергетической установки на базе

РЛДВПТ, патентном поиске, разработке имитационной компьютерной модели системы, создании и синтезе схем экспериментального стенда – макета системы, проведении имитационных и натуральных исследований, обработке полученных результатов, а также формировании выводов по проведённой работе и дальнейших перспектив научных исследований.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 17 научных работ, в их число входят 5 статей, опубликованных в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ (включая 3 статьи, индексируемые в Scopus), получено 2 патента на полезную модель и 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 95 наименований, 3 приложений. Полный объем диссертации – 141 страница, в том числе рисунков – 56, таблиц – 7.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, представлена её общая характеристика, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость результата исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, и отражена структура диссертации.

В **первой** главе обозначены недостатки используемых для автономных энергоустановок двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и преимущества применения ДВПТ в автономных системах электроснабжения и когенерационных установках. Приведены структуры когенерационной установки, работающей на основе ДВПТ. Электрическая часть многоуровневой системы представляет собой стартер-генераторную установку (рисунок 1).

РЛДВПТ, как альтернативный вариант исполнения двигателя Стирлинга, относится к тепловым энергетическим преобразователям и в качестве источника

тепловой энергии может использовать в отличие от ДЭС более дешевый источник – природный газ и другие виды энергоносителей из органического топлива, а также низкопотенциальное тепло.

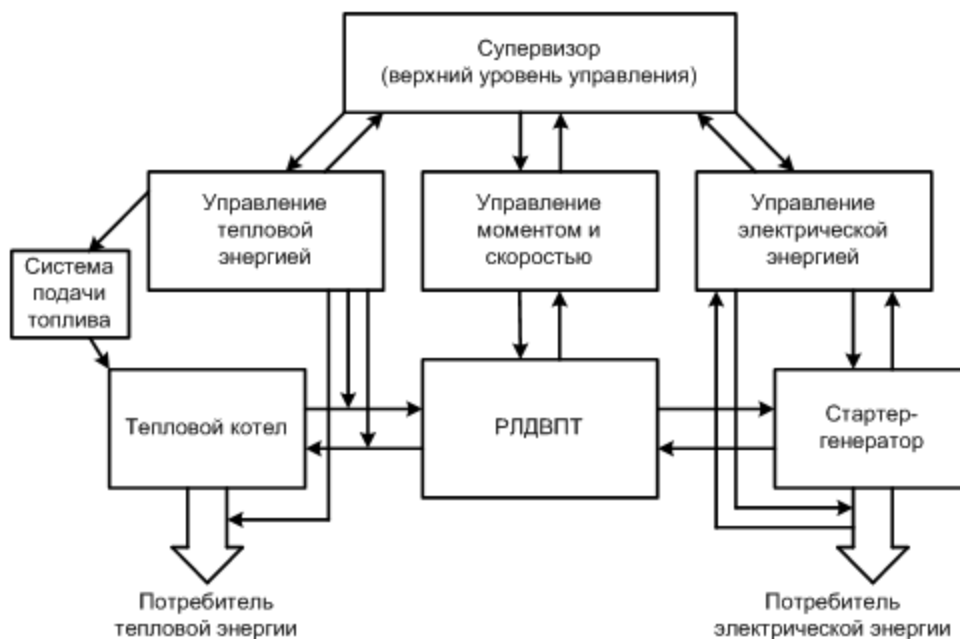


Рисунок 1 – Система управления когенерационной установкой

Преобразование тепловой энергии во вращение вала РЛДВПТ осуществляется по специализированному тепловому циклу без связи рабочего тела с внешней средой (рисунок 2). Двухмодульная конструкция двигателя имеет общий выходной вал, регулирование момента на выходном валу с помощью температуры достигается путем изменения подачи топлива в нагреватель.

Разработанные в ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» и запатентованные конструкционные решения для РЛДВПТ различной мощности позволили в настоящее время изготовить его опытный образец на мощность 1,5 кВт.

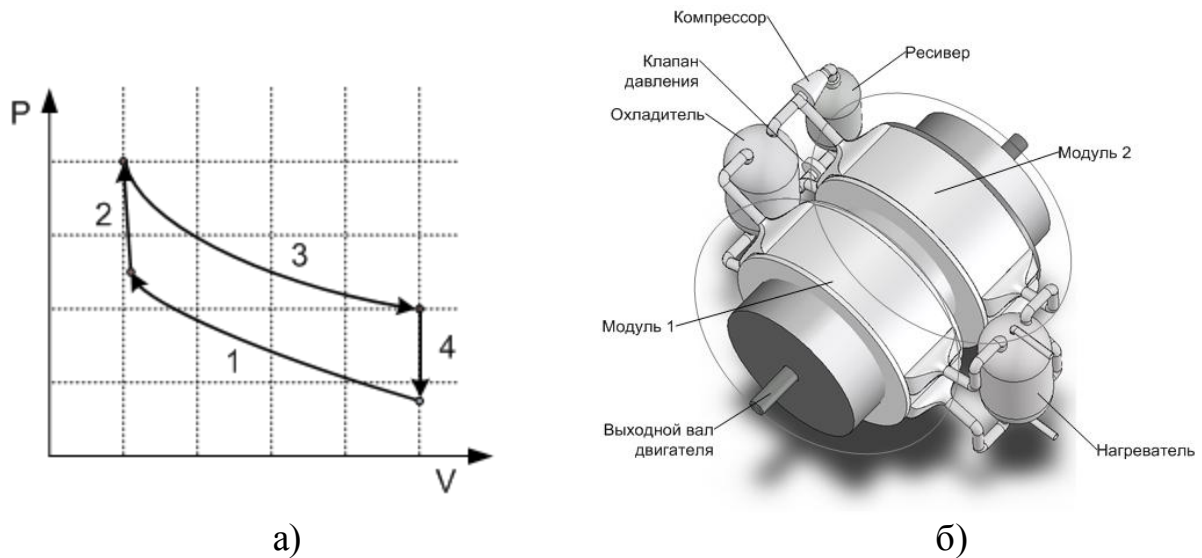


Рисунок 2 – Роторно-лопастной двигатель: а) тепловой цикл б) конструкция

Во **второй** главе рассмотрены вопросы выбора структуры разрабатываемой электроэнергетической установки – электрической подсистемы когенерационной установки на базе ДВПТ.

Указаны особенности РЛДВПТ, которые вносят вклад в характер процессов в подобных установках. Движущий момент на валу в зависимости от угла поворота α может быть представлен как:

$$M_{ДВ}(\alpha) = 2\psi_1 \frac{2}{\pi} a + \psi_1 b \sin(4\alpha) + \frac{8\psi_1}{\pi} a \left(-\frac{1}{3} \cos(4\alpha) - \frac{1}{15} \cos(8\alpha) - \frac{1}{35} \cos(12\alpha) - \frac{1}{63} \cos(16\alpha) \right),$$

где a , b – расчетные коэффициенты,

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} - \psi_{\min}, \quad \psi_{\min} \text{ – минимальный угол раствора между лопатками.}$$

То есть движущий момент на выходном валу можно представить в виде суммы гармонических составляющих.

$$M_{ДВ}(\alpha) = M_0 + B_1 \sin(4\alpha) + A_1 \cos(4\alpha) + A_2 \cos(8\alpha) + A_3 \cos(12\alpha) + A_4 \cos(16\alpha)$$

Количественные оценки показали, что значения амплитуд четвертых гармоник B_1 и A_1 вносят существенный вклад в значение движущего момента и составляют более половины постоянной составляющей момента (до 0,67 от M_0). Таким образом, наличие возмущающих периодических составляющих момента не позволяет получить равномерное вращение с постоянной скоростью. Причем,

значение механической скорости вращения вала двигателя, соединенного с валом электрогенератора, невысоко (не более 1000 об/мин).

Проведен обзор решений по созданию стартер-генераторных устройств и генераторных установок в системах энергоснабжения малой мощности, в том числе для установок с переменной частотой вращения. Наиболее близкими системами являются системы генерирования энергии ветроустановок с использованием асинхронных генераторов или синхронных генераторов. В системах с переменной частотой вращения перспективно применение синхронных машин с постоянными магнитами – магнитоэлектрических генераторов.

Проведен обзор и анализ электрических машин для стартер-генераторных устройств. Обоснована возможность и эффективность применения общепромышленных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов в составе энергетических установок малой мощности до 15 кВт. Проведенные эксперименты по использованию СМПМ в стартерном и генераторном режимах (при работе на активную и активно-индуктивную нагрузку) подтвердили возможность использования общепромышленных СМПМ в качестве стартер-генератора для автономной электроэнергетической установки. В качестве общепромышленного двигателя экспериментальной установки используется вентильный двигатель с постоянными магнитами (ВДПМ) серии ДВУ2М с использованием ферритов стронция.

На первом этапе исследований и проведения экспериментов в качестве мультипликатора напряжения с выхода ДВУ2М, недостаточного для эффективной работы вентильных преобразователей, использован трехфазный трансформатор. Однако трансформатор, как и механический редуктор, не эффективен как мультипликатор для системы генерирования электрической энергии на базе ДВПТ прежде всего с учётом массо-габаритных показателей установки. В процессе поиска эффективных решений была разработана и запатентована структура, изображенная на рисунке 3. В основе предложенного решения лежит полупроводниковая преобразовательная система, которая обеспечивает необходимые режимы запуска и генерирования электрической энергии.

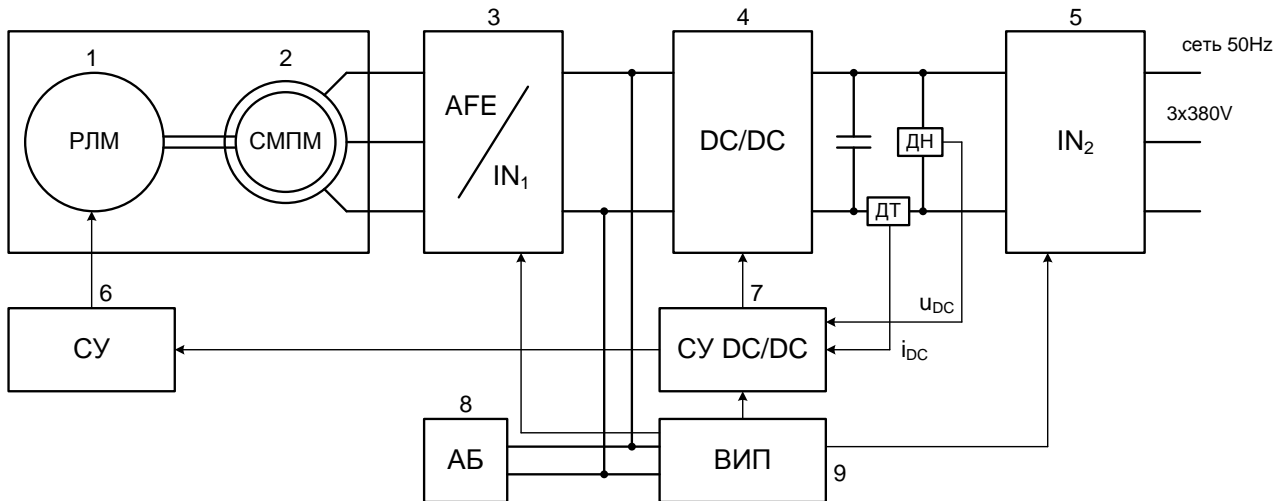


Рисунок 3 – Структура электрической части установки

Наиболее близкие системы, системы электроснабжения ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения (гл. 2), либо предназначены только для генерации энергии потребителю, либо предполагают использование высокоскоростных машин и высокой частоты вращения вала при генерации электроэнергии и не подходят для решаемой задачи.

Обеспечение необходимых режимов с помощью общепромышленной СМППМ и вентильных преобразователей осуществляется следующим образом:

1. Режим выработки электроэнергии.

СМППМ (2) работает в генераторном режиме, приводится во вращение РЛДВПТ (1), работающим с переменной частотой вращения вала. Трехфазный вентильный преобразователь (3) работает в режиме неуправляемого или активного выпрямителя и выдает на выходе постоянное напряжение низкого уровня, подаваемое на вход повышающего преобразователя постоянного напряжения (4). Необходимое для работы постоянное напряжение высокого уровня подается на инвертор (5) (в случае применения трехфазного инвертора свыше 450 В).

Управление системой выработки электроэнергии и связь с главной системой управления (6) производится через систему управления вентильным мультипликатором постоянного напряжения (7). Управление через мультипликатор совмещает управление в зависимости от подключения нагрузки

(не требуется система управления инвертором) и в зависимости от переменной скорости вращения роторно-лопастного двигателя. Причем, при подключении на звенья постоянного тока датчиков напряжения и тока (ДН и ДТ на рисунке 3), в главную систему управления поступает информация о потребляемой электрической мощности автономной энергоустановки. Таким образом, система управления инвертором не требуется, а в качестве инвертора может быть использован любой типовой однофазный или трехфазный инвертор. Частота сети 50 Гц остается постоянной, а регулирование напряжения сети регулируется значением напряжения высокого уровня на выходе преобразователя постоянного напряжения (входе инвертора) (4).

2. Режим запуска РЛДВПТ.

Аккумуляторная батарея (8) питает блок вторичных источников питания (9), который, в свою очередь, питает системы управления всей когенерационной установки и управляющие цепи вентиляльных преобразователей (3, 4, 5). В пусковом режиме питаемый от низкого постоянного напряжения вентиляльный преобразователь (3) работает в режиме инвертора, и запускает СМППМ, и, соответственно, РЛДВПТ, на малую частоту вращения.

3. Дополнительный режим запуска от сети при её наличии.

Данный режим требует переключения в силовой части энергетической установки и осуществляется путем отключения преобразователя постоянного напряжения (4) и соединения по звену постоянного тока вентиляльных преобразователей (3) и (5). Вентиляльный преобразователь (3) подключается к трехфазной сети повышенного напряжения и работает в режиме активного выпрямителя, выдавая на выходе достаточное для инвертора (5) напряжение звена постоянного тока. Инвертор (5) питает СМППМ, осуществляя ее запуск (и, соответственно, облегченный режим запуска РЛДВПТ). Системы управления и управляющие цепи преобразователей запитываются от внешней сети.

В качестве звена повышения постоянного напряжения был выбран наиболее распространенный повышающий импульсный преобразователь напряжения, представленный на рисунке 4, известный как корректор коэффициента мощности

(ККМ). СУ ККМ на рисунке – система управления корректором коэффициента мощности.

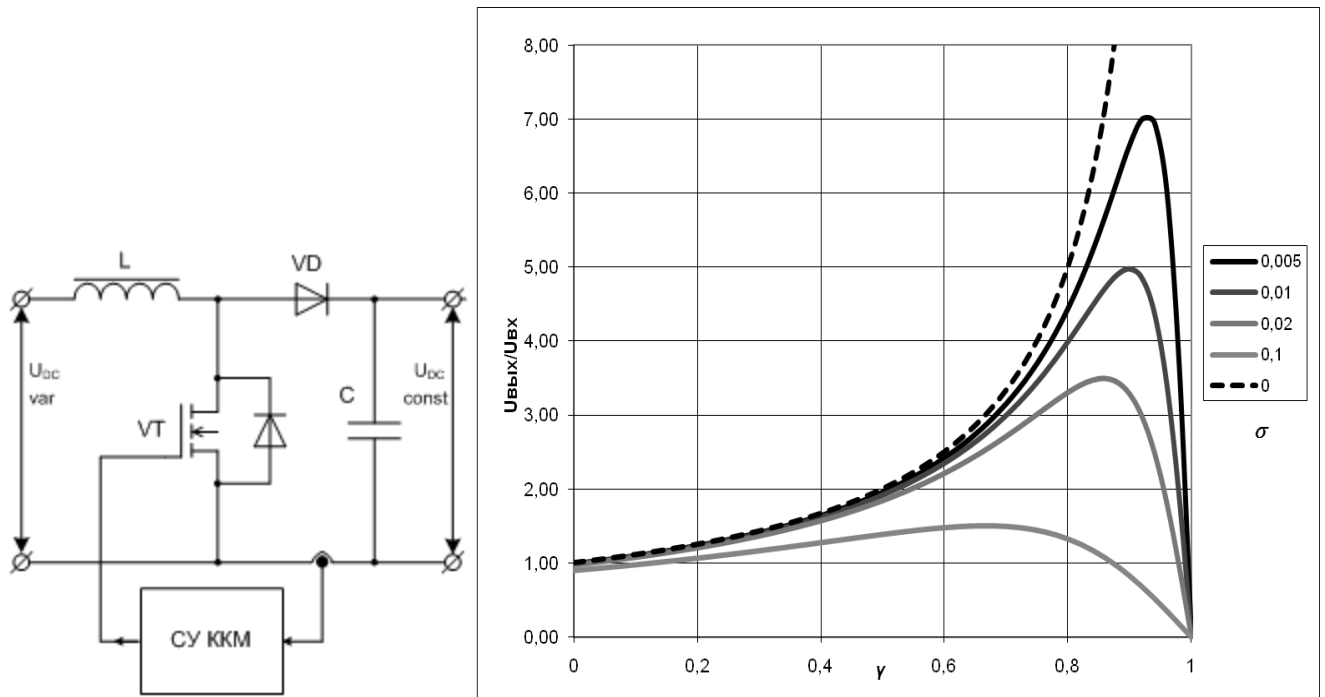


Рисунок 4 – ККМ(DC/DC)–модуль и его регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика такого повышающего преобразователя определяется уравнением:

$$U_{dc}^{const} = \frac{(1-\sigma)(1-\gamma)}{\sigma + (1-\sigma)(1-\gamma)^2} \times U_{dc}^{var},$$

где:

U_{dc}^{var} – напряжение на входе ККМ-модуля,

U_{dc}^{const} – удерживаемое постоянное напряжение на выходе ККМ-модуля,

$\gamma = \frac{t_1}{T}$ – длительность импульсов включенного состояния силового транзистора VT (t_1) к периоду T, включающему и время открытого состояния силового диода,

$\sigma = \frac{r_L}{R_H}$ – отношение сопротивления дросселя к сопротивлению нагрузки.

Напряжение на входе повышающего преобразователя напряжения равно напряжению на выходе силового выпрямительного полупроводникового преобразователя:

$$U_{dc}^{var} = \omega_{\text{двпт}}^{var} \times k_e \times k_{cx},$$

где:

$\omega_{\text{двпт}}^{var}$ – скорость вращения вала ДВПТ,

k_e – коэффициент передачи синхронной машины по э.д.с.,

k_{cx} – коэффициент схемы электрического мультиплексирования.

Общая структура всей когенерационной установки имеет вид, показанный на рисунке 5.

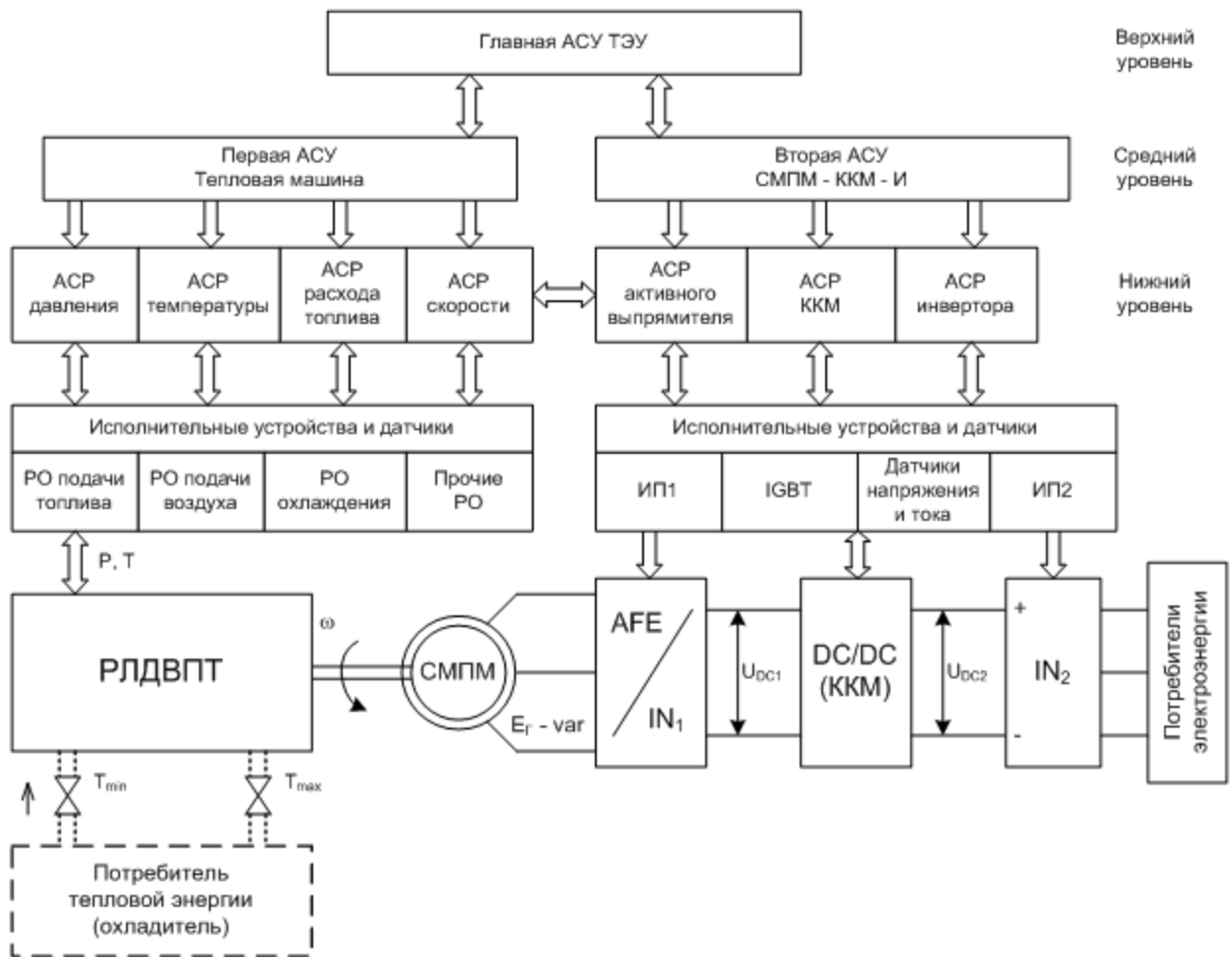


Рисунок 5 – Схема теплоэнергетической установки

Третья глава посвящена имитационному моделированию электрической подсистемы когенерационной установки на базе ДВПТ.

На рисунке 6 изображена модель генераторного режима по предложенной выше структуре в среде Matlab Simulink. При разработке имитационной модели использованы уравнения, описывающие работу синхронного генератора с постоянными магнитами, трехфазных силовых полупроводниковых

преобразователей, принятые в среде MatLab. Уравнения механической части РЛДВПТ заключены в блоке Source, выходные функции момента и скорости являются периодическими функциями с изменяющимся периодом. В таком случае временная диаграмма выходного напряжения генератора U_T имеет вид, показанный на рисунке 7.

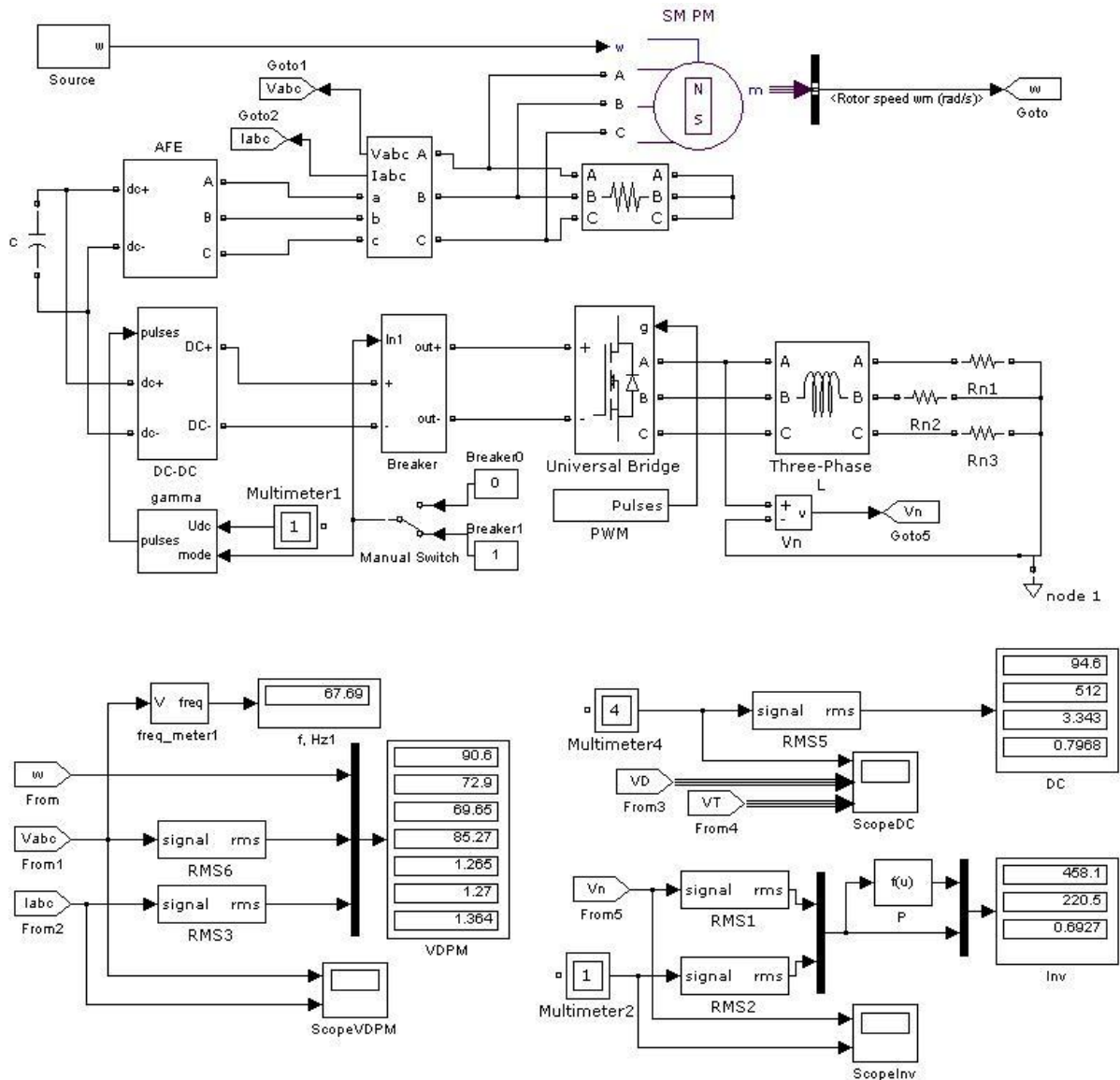


Рисунок 6 – Matlab-модель системы

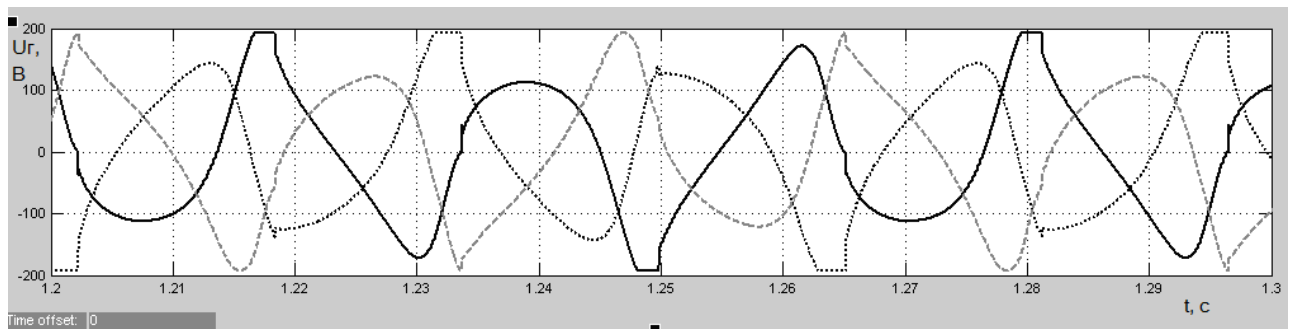


Рисунок 7 – Выходные напряжения трехфазного СМПП

На рисунке 8 приведены результаты моделирования исследуемой системы при включении нагрузки установки (а – временные диаграммы напряжения на выходе инвертора и тока нагрузки; б – напряжения на входе и выходе ККМ; в – укрупненная временная диаграмма напряжения на звене постоянного тока – на выходе ККМ).

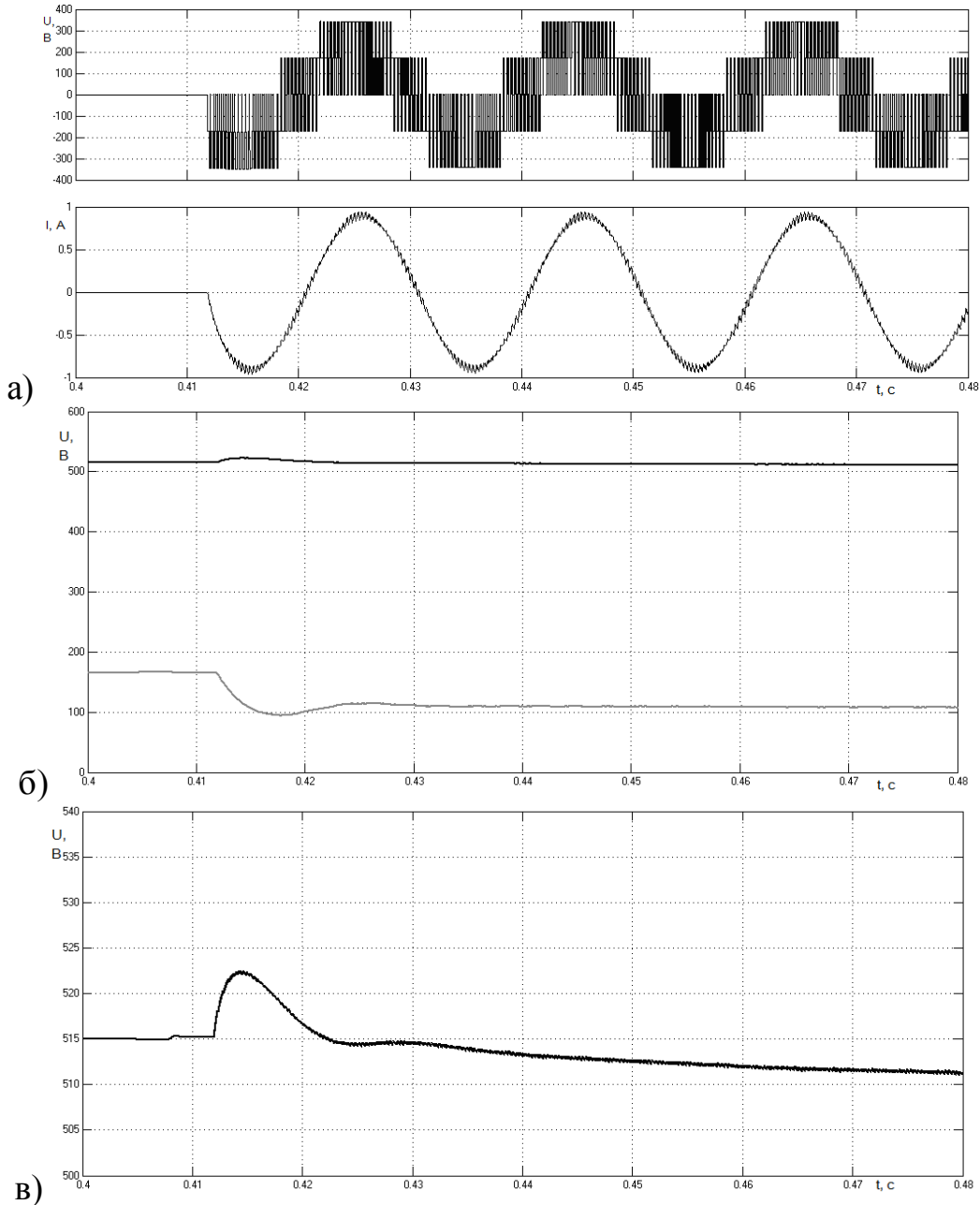


Рисунок 8 – Результаты моделирования

Разработанная модель позволяет проводить исследования электроэнергетической установки на базе ДВПТ при различных типах общепромышленных СМПИМ, изучать влияние параметров DC/DC преобразователя и подбирать параметры элементов, а также проводить

исследования при разном типе системы управления повышающим преобразователем напряжения: блок управления ККМ – Gamma был реализован несколькими способами: непрерывное, ШИМ-управление и релейное управление.

Четвертая глава посвящена разработке экспериментального макета, соответствующего предложенной структуре и разработанной имитационной модели системы. Стенд был создан на кафедре «Электропривод и системы автоматизации» ФБГОУ ВО «Псковский государственный университет».

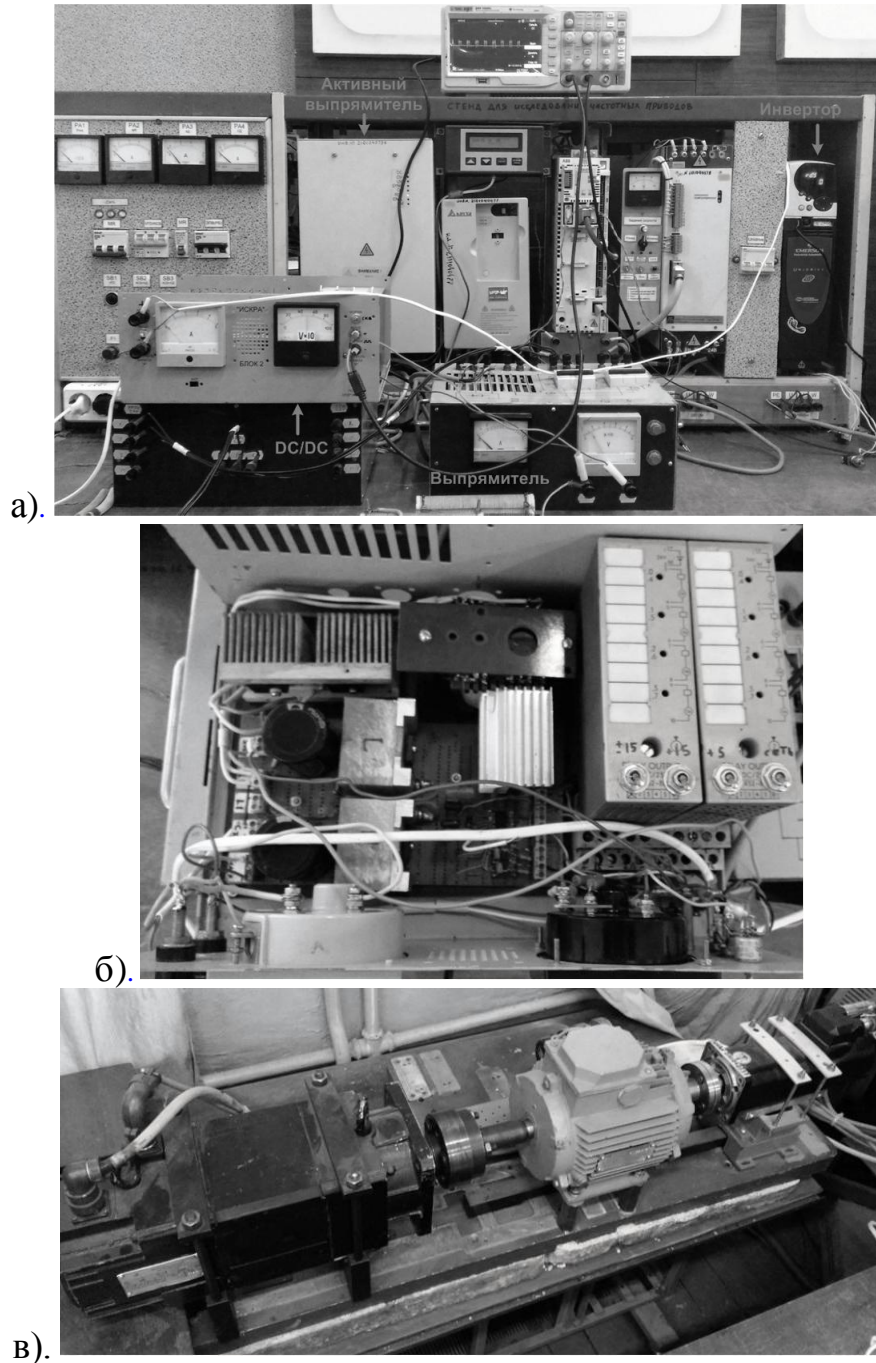


Рисунок 9 – а). Общий вид экспериментального стенда б). Повышающий преобразователь напряжения в). Электромашинный агрегат

Приведены функциональные схемы экспериментального макета электроэнергетической установки для ДВПТ и DC/DC преобразователя, а также системы управления установкой; указаны параметры узлов и элементов, составляющих систему. Разработан алгоритм управления с применением датчиков обратной связи по току и напряжению (LV и LT фирмы ТВЕЛЕМ).

Приведены результаты эксперимента, подтверждающие работоспособность спроектированной установки и адекватность полученных с помощью имитационной модели результатов исследований, включая как генераторный, так и стартерный режимы работы. Произведены оценка соответствия качества вырабатываемой электрической энергии ГОСТ с помощью прибора «Ресурс-U2F» при различных структурах установки. На рисунке 10 в качестве примера приведена часть временной диаграммы трехфазной системы напряжений при включении нагрузки системы. Подробные результаты измерений, включающие графики напряжений, частоты, коэффициентов гармонических составляющих, вынесены в приложение диссертационной работы.

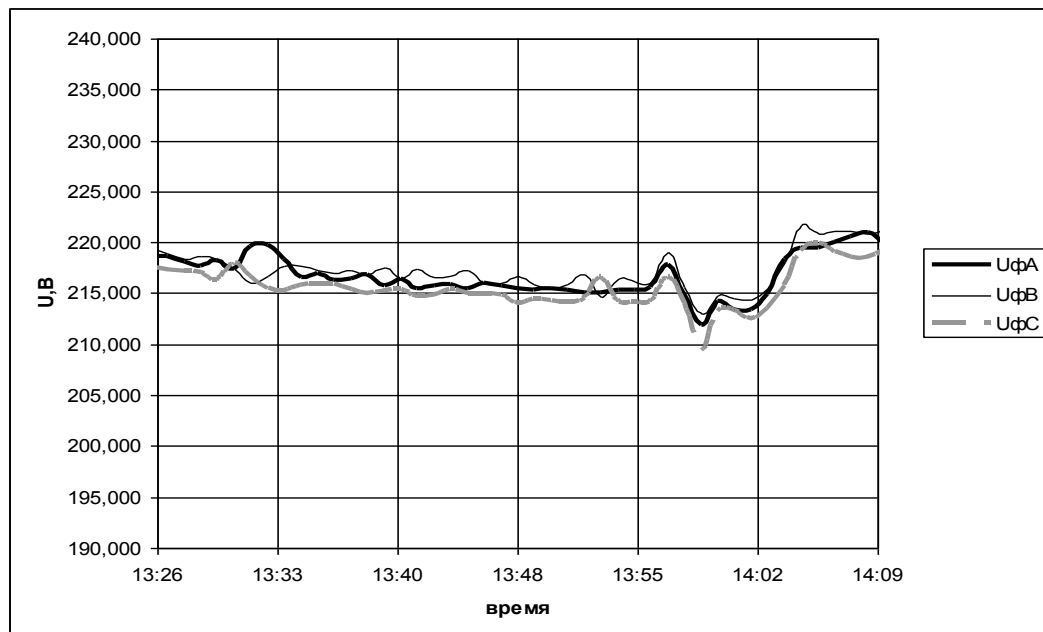


Рисунок 10 – Временная диаграмма фазных напряжений

Для экспериментов использован универсальный лабораторный стенд, защищенный патентом РФ, в электромашинный агрегат которого включены СМПМ и асинхронный двигатель с двумя валами. В генераторном режиме макета работа асинхронного двигателя имитирует работу системы с переменной частотой

вращения вала, и на выходе СМПП фиксируется напряжение переменной частоты и амплитуды, в то время как для режима стартера асинхронный двигатель используется в качестве нагрузочного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Произведен анализ влияния работы РЛДВПТ на электрическую часть когенерационной установки на его базе. В качестве базовых аналогичных систем выбраны установки с переменными частотами вращения вала машины ветроэнергетических установок и дизельных установок. Такая система должна строиться с использованием вентильных преобразователей и синхронной машины с постоянными магнитами.

2. Разработаны структура электрической части когенерационной установки на основе низкоскоростного двигателя с промежуточным звеном постоянного тока и способ управления ею. Электроэнергетическая установка малой мощности на базе низкоскоростного ДВПТ управляется через повышающий преобразователь напряжения, который может быть выполнен на базе простого корректора коэффициента мощности. Такая система осуществляет двухканальное регулирование напряжения на звене постоянного тока (являющегося входом трехфазного инвертора потребителя), при этом являясь подчиненной структурой общей системы управления, выдающей информацию о потребляемой электрической мощности когенерационной системы.

3. Доказано, что в составе такой установки возможно применение общепромышленных СМПП, работающих в стартерном и генераторном режимах, что позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели электроэнергетических установок мощностью 10-15 кВт.

4. Разработаны имитационная модель и экспериментальный макет системы, которые позволяют проектировать автономные системы электроснабжения на базе низкоскоростных ДВПТ мощностью до 15 кВт, осуществляя подбор СМПП, элементов DC/DC преобразователей, вида управления системой.

5. Предложена структура экспериментального универсального стенда для трехфазных электрических машин переменного тока: асинхронных двигателей и СМПМ. Предложенный вид универсального стенда, защищенный патентом на полезную модель РФ, может быть использован при исследованиях режимов работы электрических машин синхронного и асинхронного типа.

6. Произведена оценка качества вырабатываемой электроэнергии, подтверждающая работоспособность электрической части когенерационной установки на основе низкоскоростного движителя по структуре с DC/DC. При питании нагрузки по структуре с DC/DC и инвертором наблюдаются искажения напряжения, аналогичные искажениям при питании от сети без промежуточного мультипликатора.

7. Доказана возможность создания систем генерирования электроэнергии на основе низкоскоростного движителя без механических и электрических мультипликаторов на мощность 10-15 кВт. Разработана методика испытаний и алгоритмы управления электрической частью когенерационной установки с трехкратным преобразованием электрической энергии.

8. Значение полученных результатов исследования на практике подтверждено тем, что:

- разработаны и внедрены в учебный процесс кафедры электропривода и автоматизации Псковского государственного университета как комплексный лабораторный стенд;

- разработан и внедрен комплекс испытаний синхронной машины завода ПЭМЗ на мощность 3 кВт;

- разработана электрическая часть когенерационной установки на мощность 10-15 кВт.

Список публикаций

В научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Хитров, А.А. Экспериментальный стенд для исследования режимов работы асинхронных и вентильных двигателей современных электроприводов / И.М.Федотов, А.А. Хитров, А.И. Хитров // Известия ТулГУ, Технические науки, Выпуск 3. Тула: Издательство ТулГУ, 2010, часть 4, с. 247-253.

2. Козярук, А.Е. Автономная система энергоснабжения на базе роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты и вентильного двигателя с постоянными магнитами / А.Е. Козярук, А.А. Хитров // Электротехника, Фирма Знак. №4, 2011. с. 17-22.

3. Khitrov, A.A. Electrical subsystem of the low power cogeneration plant with low-speed vehicle / A.A. Khitrov, A.I. Khitrov // Environment. Technology. Resources. Proceeding of the 9th International Scientific and Practical Conference. June 20-22, 2013. Volume II. Rezekne. p. 119-123.

4. Khitrov, A.A. Investigation of permanent magnet synchronous machine with recuperation block / A.A. Khitrov, A.I. Khitrov // Proceedings of the 10-th International Scientific and Practical Conference «Environment. Technology. Resources». Volume I. Rezekne, Latvia, 2015. p. 53-56.

5. Козярук, А.Е. Энергоэффективная автономная электроэнергетическая установка на основе двигателя с внешним подводом тепла / А.Е. Козярук, А.А. Хитров, А.И. Хитров // Электротехника, Фирма Знак, №3, 2016. с. 2-7.

Патенты:

6. Патент на полезную модель РФ №144521. Стартер-генераторная установка для автономной системы электроснабжения на базе роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты. / И.В. Плохов, А.И. Хитров, А.А. Хитров // Опубликовано 27.08.2014. Бюл.№24.

7. Патент на полезную модель РФ №156902. Стенд для исследования режимов работы трехфазных электрических машин переменного тока. / И.М. Федотов, А.И. Хитров, А.А. Хитров // Опубликовано 20.11.2015. Бюл.№32.

8. Патент на изобретение РФ №2574217. Стартер-генераторная установка для автономной системы электроснабжения на базе роторно-лопастного двигателя

с внешним подводом теплоты и способ управления ею. / И.В. Плохов, А.И. Хитров, А.А. Хитров // Опубликовано 10.02.2016. Бюл.№4.

Монографии:

9. Математические модели физических процессов в роторно-лопастном двигателе с внешним подводом теплоты: Коллективная монография / Ю. Н. Журавлев, И. В. Плохов, Ю. Н. Лукьянов и др. // Псков: Издательство ПсковГУ, 2012. – 99 с., ил.

10. Моделирование физических процессов роторно-лопастной машины с внешним подводом теплоты: Коллективная монография / Ю. Н. Журавлев, И. В. Плохов, Ю. Н. Лукьянов и др. // Псков: Издательство ПсковГУ, 2012. – 76 с., ил.

Публикации в прочих научных изданиях:

11. Хитров, А.А. Автономная система энергоснабжения на основе двигателей с внешним подводом теплоты и возбуждением от постоянных магнитов / А.А. Хитров, А.И. Хитров // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург. Т. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – с. 73-74.

12. Хитров, А.А. Исследование синхронной машины с постоянными магнитами в режиме генератора для автономной системы энергоснабжения / А.А.Хитров // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям, г. Новочеркасск, октябрь-ноябрь 2011 г./Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: Лик, 2011. –с. 245-248

13. Перминов, А.Л. Мехатронная система «магнитоэлектрический синхронный двигатель – активный выпрямитель» для автономной системы электроснабжения на базе роторно-лопастной машины с внешним подводом тепла / А.Л. Перминов, А.А. Хитров, А.И. Хитров // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-

2012: ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. Ленина". - Иваново, 2012. – с. 330-335

14. Хитров, А.А. Стартер-генератор на основе вентильного двигателя для роторно-лопастной машины с внешним подводом теплоты / А.А.Хитров // Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – с. 103-104.

15. Хитров, А.А. Энергетическая установка малой мощности с низкоскоростным движителем / А.А. Хитров, А.И. Хитров // Материалы международной научно-практической конференции 21 век: фундаментальная наука и технологии. 24-25 декабря 2012 г. Москва – с. 127-133.

16. Хитров, А.А. Электромашинно-вентильная система в составе когенерационной установки. «Электроприводы переменного тока» / А.А. Хитров, А.И. Хитров // Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина», 2015. 05-09 октября 2015. – с. 213-216.

17. Хитров, А.А. Трехфазный инвертор для автономных систем электроснабжения малой мощности / А.А. Хитров, А.И. Хитров, Е.Л. Веселков // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Технические науки». Выпуск 2. – Псков: Псковский государственный университет, 2015. – с.70-80.