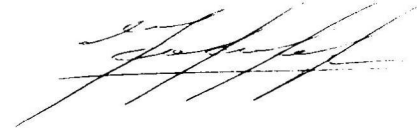


На правах рукописи



Сарсикеев Ермек Жасланович

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ВЕТРО-ДИЗЕЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Лукутин Борис Владимирович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Вайнштейн Роберт Александрович
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», профессор
кафедры «Электроэнергетические системы».

Целебровский Игорь Викторович

кандидат технических наук,
Научно-исследовательский институт автоматики и
электромеханики ТУСУР, заместитель директора по
научной работе.

Ведущая организация:

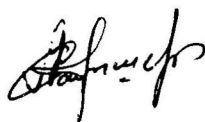
**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Сибирский
федеральный университет», г. Красноярск.**

Защита состоится «04» декабря 2013 года в 16³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «30» октября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 212.269.10
д-р техн. наук, с.н.с.



А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Подавляющее большинство (98%) существующих электрических станций малой энергетики России выполнено на базе дизельных электрических станций, средняя единичная мощность которых составляет 340 кВт.

В общей структуре затрат децентрализованных зон на производство электроэнергии основную долю (50–60%) составляют эксплуатационные издержки на покупку и доставку топлива, что определяет относительно большую топливную составляющую в тарифах на электроэнергию.

Одним из способов повышения энергетической эффективности автономных систем электроснабжения является вовлечение в энергобаланс возобновляемых источников энергии.

Для децентрализованных зон России, расположенных преимущественно на территории Сибири, Дальнего Востока, Крайнего Севера, наиболее перспективными являются ветро-дизельные электрические станции (ВДЭС), так как ветроэнергетический потенциал этих регионов достаточно высокий. Например, по данным профессора П.П. Безруких, среднее значение экономического потенциала ветровой энергии для Сибирского федерального округа составляет 7,56 млрд. кВт·ч, для Дальневосточного федерального округа – 12,35 млрд. кВт·ч.

Крайне нестабильный график электрических нагрузок автономных систем электроснабжения и стохастический характер изменения скорости ветра, соизмеримость мощностей генерирующих и потребляющих энергоустановок определяют динамический характер работы автономной системы электроснабжения на базе ВДЭС, сочетающей непрерывно протекающие и взаимосвязанные электрические, электромеханические и аэродинамические переходные процессы.

Исследование и оптимизация структуры и режимов работы автономных систем электроснабжения ветро-дизельных электрических станций является актуальной темой современных исследований. Заметный вклад в разработку этой темы внесли российские ученые Е.М. Фатеев, В.Н. Андрианов, Д.Н. Быстрицкий, Я.И. Шефтер, Г.А. Сипайлов, В.П. Харитонов, А.В. Паздерин, Д.А. Бут, Б.В. Лукутин, украинские ученые В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев, ряд зарубежных ученых D.J. De Renzo, Ray Hunter, George Elliot, Erich Nau, F. Iov, F. Blaabjerg, Bent Sorensen.

Однако, сложность ВДЭС и стремление максимально повысить энергоэффективность локальных систем электроснабжения на их основе, требуют проведения новых исследований, особенно в направлении интеллектуальных технологий в электроэнергетике.

Объектом исследования являются автономные ветро-дизельные электрические станции со звеном постоянного тока.

Предметом исследования является устойчивость генерирующих установок автономных ветро-дизельных электрических станций со звеном постоянного тока при изменении скорости ветра и/или мощности нагрузки.

Цель диссертационной работы заключается в разработке алгоритмов управления ВДЭС со звеном постоянного тока, обеспечивающих устойчивые энергоэффективные режимы ее работы.

Для достижения поставленной цели **решены следующие задачи.**

- Проведен комплексный анализ вариантов сопряжения генерирующего оборудования ветро-дизельных электрических станций, в результате которого определены наиболее перспективные схемы подключения источников питания в системах распределенной генерации с возобновляемыми источниками энергии.

- Разработаны оригинальные математические и компьютерные модели элементов ветро-дизельных электрических станций, позволяющие исследовать и формировать динамически устойчивые, энергоэффективные режимы работы ВДЭС.

- Разработаны и реализованы в виде компьютерных программ алгоритмы формирования динамически устойчивых энергоэффективных режимов ветроэлектростанции, входящей в состав ВДЭС.

- Разработаны системы автоматического регулирования, обеспечивающие статическую устойчивость на шине постоянного тока формируемых режимов работы ВДЭС, определены их параметры и выполнено экспериментальное подтверждение предлагаемых решений.

Идея работы заключается в формировании устойчивых и энергоэффективных режимов работы генерирующих установок ветровой и дизельной электрических станций в составе автономных систем электроснабжения.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы анализа и систематизации данных, фундаментальные законы электротехники, методы математического моделирования систем, методы физического моделирования, методы статистической обработки информации, теории вероятностей. При исследовании использовались прикладные пакеты программ Matlab, MathCAD.

Научная новизна работы.

- Созданы оригинальные математические модели элементов ветро-дизельной электростанции, основанные на рациональном сочетании динамических и статических характеристик основного силового оборудования ВДЭС.

- Разработаны алгоритмы управления силовым оборудованием ветроэлектростанции, обеспечивающие устойчивый режим ее работы при максимальном использовании энергии ветра.

- Разработаны системы регулирования для обеспечения статической устойчивости ВДЭС со звеном постоянного тока для режимов работы, формируемых алгоритмами динамической устойчивости при оптимальной загрузке каналов ветровой и дизельной генерации.

Практическая значимость работы.

- Разработана методика расчета аэродинамических характеристик ветротурбин с горизонтальной осью вращения пропеллерного типа по каталожным данным.

- Разработан пакет прикладных программ для исследования статических и динамических характеристик энергоустановок ВДЭС, позволяющих определить рациональный состав энергооборудования, исследовать его режимы, провести оптимизацию технических параметров и оценить экономическую эффективность ВДЭС как на заданных временных интервалах, так и в режиме реального времени.

- Предложена структура ВДЭС с независимыми контурами регулирования напряжения и тока для обеспечения статической устойчивости и повышения энергетической эффективности при параллельной работе ветровой и дизельной электростанций.

Достоверность результатов работы.

В результате выполнения диссертационной работы полученные научные результаты, выводы и рекомендации основываются на общепринятых фундаментальных положениях рассматриваемых областей наук, правильностью принятых допущений, адекватностью разработанных моделей, подтверждаемых результатами экспериментов.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в образовательный процесс по направлению подготовки «140400 – Электроэнергетика и электротехника» при разработке методических пособий для курсовых и лабораторных работ и практических занятий по магистерским программам «Возобновляемые источники энергии», «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения» и «Производство и транспортировка электрической энергии».

Диссертационное исследование проводилось в рамках выполнения гос. контрактов по федеральным целевым программам «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» по темам «Интеллектуальные автономные системы электроснабжения на базе гибридных ветро-дизельных установок» (П627 от 18.05.2010 г.) и «Гибридные системы буферного накопления электроэнергии для автономных энергоустановок возобновляемой энергетики» (ГК. 16.516.11.6033 от 21.04.2011 г.) соответственно. Диссертационная работа выполнена также в

рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ по приоритетным направлениям науки и техники (регистрационный номер НИР 7.5245.2011; номер государственной регистрации 01201254010 от 15.03.2012). Кроме того, результаты работы использовались при выполнении хоз. договорных работ с ФГАОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова по темам «Обзор и классификация типовых схем автономных систем электроснабжения» (х/д № 2-403/12 от 29.06.2012 г.), «Анализ эффективности объектов автономного электроснабжения северных территорий Российской Федерации» (х/д № 2-404/12 от 29.06.2012 г.), «Влияние климатических условий на режимы автономных систем электроснабжения» (х/д № 2-405/12 от 29.06.2012 г.), «Формирование критериев энергоэффективности автономных систем электроснабжения» (х/д № 2-406/12 от 29.06.2012 г.), «Методы повышения энергоэффективности автономных систем электроснабжения в условиях Севера» (х/д № 2-407/12 от 29.06.2012 г.), хоз. договорная работа с ОАО «Сахаэнерго» на тему «Разработка методов и средств повышения энергетической эффективности комплексов децентрализованного электроснабжения Республики Саха (Якутия)» (№2-402/12 от 01.07.2012 г.). Также результаты работы использовались при выполнении хоз. договорной работы с ООО «ЭЛЕМЕНТ» на тему «Разработка долгосрочной целевой программы Сахалинской области «Развитие малой энергетики Сахалинской области на период до 2020 года», а также создания условий для ее реализации» (х/д № 2-360/13 от 28.02.2013 г.).

Основные научные положения работы, выносимые на защиту:

- Математические и компьютерные модели элементов автономной системы электроснабжения на базе ветро-дизельной электростанции для исследования ее статических и динамических режимов работы в условиях стохастического изменения ветрового потока и мощности изолированного потребителя.

- Автоматизированный алгоритм управления ВДЭС, обеспечивающий устойчивость и энергоэффективность в динамических режимах работы при изменении мощности нагрузки и скорости ветра.

- Система регулирования каналов ветровой и дизельной генерации на шине постоянного тока и параметры регулирующих устройств.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях и семинарах в России, Казахстане и Кыргызстане: X Межрегиональная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Нерюнгри, 2009 г.; Международная научная конференция молодых ученых, студентов и школьников «IX Сатпаевские чтения», г. Павлодар, 2009 г.; IX Российская научная конференция преподавателей, аспирантов, студентов вузов и учащихся старших классов альтернативных учебных заведений «Мировая культура и язык: взгляд молодых исследователей», г. Томск, 2009 г.; V Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения», г. Казань, 2010 г.; Международная научно-техническая конференция «IV чтения Ш. Шокина», г. Павлодар, 2010 г.; XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2010 г.; Международная научно-техническая конференция «Энергобезопасность и энергоэффективность: состояние и проблемы», г. Бишкек, 2011 г.; XVIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2012 г.; XII Международная научная конференция «Интеллект и наука», г. Железногорск, 2012 г.; Международная научная конференция молодых ученых, студентов и школьников «XII Сатпаевские чтения», г. Павлодар, 2012 г.; Международная научно-техническая конференция «V Шокинские чтения», г. Павлодар, 2012 г.; V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г. Томск, 2012 г.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 19 работ, из них 5 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений, содержащих 152 страницы основного текста, 5 таблиц, 99 рисунков и списка литературы из 111 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована и доказана актуальность темы исследований, определены объект и предмет исследования, поставлена цель и задачи диссертационной работы, описаны методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту и структура диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ текущего состояния автономных систем электроснабжения, в том числе на базе возобновляемых источников энергии, определены современные тенденции развития малой энергетики, описаны сценарии развития мировой энергетики, в которых немаловажную роль занимают возобновляемые источники энергии, показана необходимость научно-технического подхода к изучению проблем малой энергетики на базе возобновляемых источников энергии.

В результате проведения аналитического обзора патентов, являющихся достоверным и актуальным источником информации в области техники и технологии, выявлены особенности существующих схем сопряжения источников питания малой и возобновляемой энергетики. Показана целесообразность сопряжения ветровой и дизельной электростанций электрическим способом.

Для ВДЭС установленной мощностью не более 100 кВт оптимальной схемой сопряжения является схема с шиной постоянного тока и двойным преобразованием электроэнергии, которая представлена на рисунке 1. Для устойчивой работы источников питания различной физической природы необходимы специальные методы и средства управления, разработка которых является основной целью диссертационной работы.

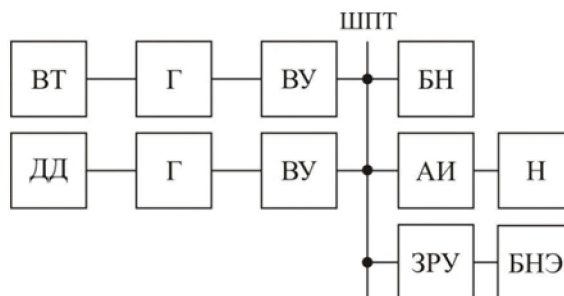


Рисунок 1 – Структурная схема ВДЭС

Во второй главе подробно представлены математическое и компьютерное моделирование основных элементов ветро-дизельной электрической станции, имеющей в своем составе накопитель электрической энергии и балластную нагрузку.

Общий вид модели дизельной электростанции, включающей в себя модель дизельного двигателя, синхронного генератора и системы возбуждения, представлен на рисунке 2.

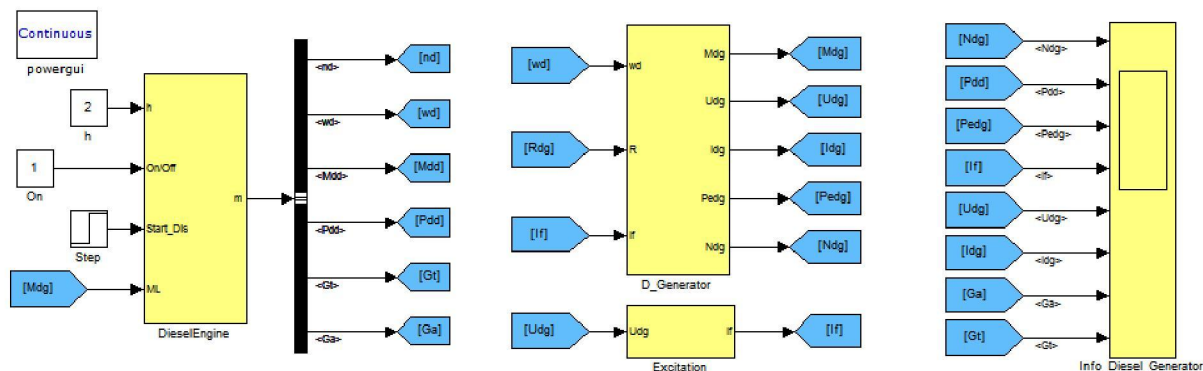


Рисунок 2 – Компьютерная имитационная модель ДЭС

Моделирование дизельного двигателя марки Kirg KM2V80 и явнополюсного синхронного генератора типа KTS12 в составе дизельной электростанции марки KDE12EA3 основывается на паспортных и экспериментальных данных лабораторного оборудования.

Динамические режимы работы дизельной генераторной установки описываются дифференциальным уравнением движения ротора

$$(J_{\text{ДД}} + J_{\text{СГ}}) \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ДД}} - M_{\text{Н}},$$

где $J_{\text{ДД}}$ и $J_{\text{СГ}}$ – моменты инерции дизельного двигателя и синхронного генератора соответственно, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ω – угловая скорость, $\text{рад}/\text{с}$; $M_{\text{ДД}}$ и $M_{\text{Н}}$ – моменты дизельного двигателя и электрической нагрузки генератора, $\text{Н}\cdot\text{м}$.

Для установившегося температурного режима работы дизельного двигателя с большой степенью точности можно считать, что момент дизельного двигателя является функцией двух параметров: угловой скорости и положения рабочего органа топливного насоса высокого давления, если двигатель работает на одной из ветвей регуляторной характеристики. Момент инерции дизельного двигателя определяется по методам двойного и свободного выбегов.

С целью проверки адекватности модели дизельной электростанции проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными, что отображено на рисунке 3. Погрешность моделирования не превышает 10%.

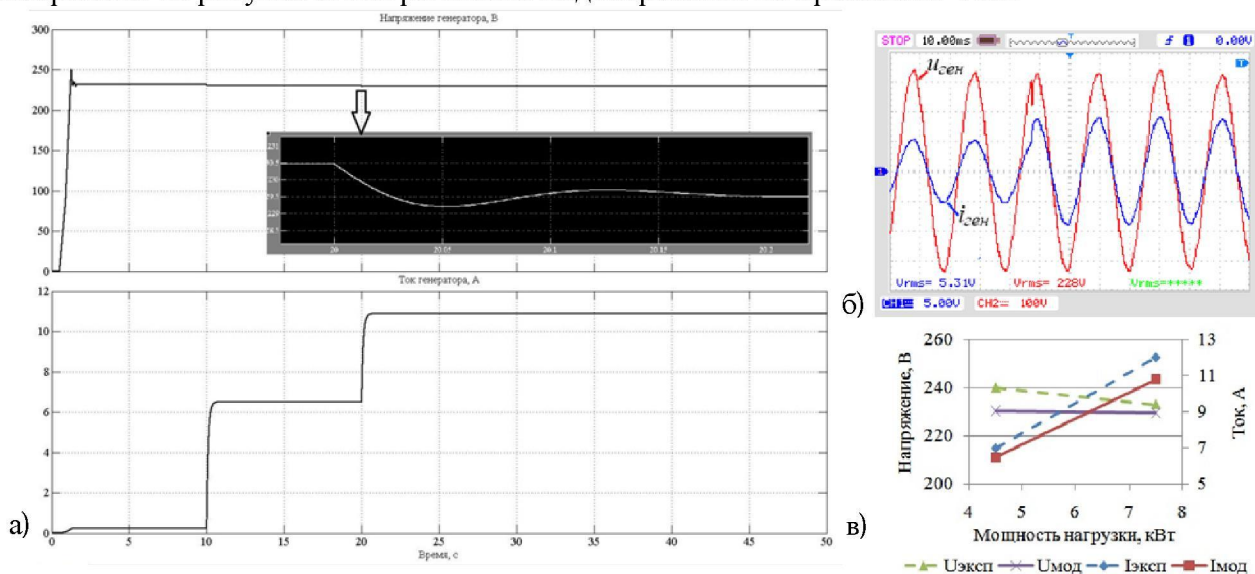


Рисунок 3 – Сравнение результатов моделирования и экспериментов ДЭС: а) – осциллограмма моделирования; б) – осциллограмма эксперимента; в) – графическое сравнение моделируемых и экспериментальных значений напряжения и тока.

Модель дизельной электростанции позволяет проводить исследования различных режимов работы, в том числе при переменной частоте вращения вала.

Для оценки поведения ветрогенератора в составе ВДЭС в работе предложена оригинальная методика расчета аэродинамических характеристик ветротурбин с горизонтальной осью вращения пропеллерного типа по паспортным данным.

На основании данных мощностной характеристики ветротурбины определяется зависимость коэффициента использования энергии ветра C_p от скорости ветра V . Причем для меньшей погрешности и простоты аппроксимации рассматривается две зоны: первая – скорость ветра меньше номинальной скорости ВЭУ, вторая – скорость ветра больше номинальной, но меньше буревой.

На основании полученной зависимости $C_p=f(V)$ определяется максимальное значение коэффициента использования энергии ветра $C_{p,max}$. Для определения коэффициента торможения воздушного потока и нормального числа модулей решается оптимизационная задача двух параметров при условии максимального значения коэффициента использования энергии ветра.

С помощью теории профессора Г.Х. Сабина по идеальной аэродинамической характеристике получены реальные аэродинамические характеристики рассматриваемого типа ветротурбины.

Мощностные $P_{ВТ}=f(V,n)$ и моментные $M_{ВТ}=f(V,n)$ характеристики ветротурбины получают из ее аэродинамической характеристики $C_p = f(Z)$, задаваясь значениями быстроходности Z от нуля до синхронной Z_0 .

В качестве примера на рисунке 4 приведены расчетные мощностные и моментные характеристики ветротурбины мощностью 1500 Вт.

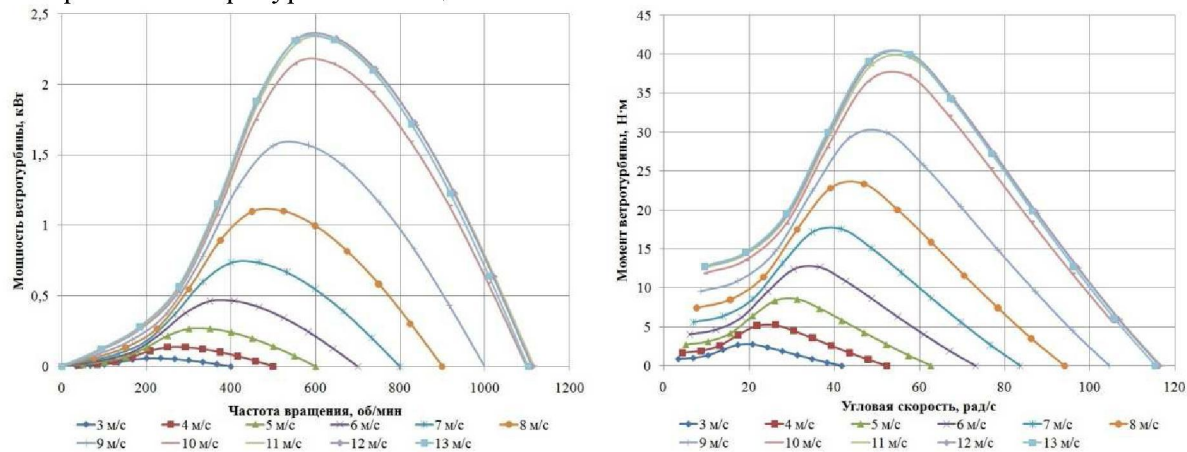


Рисунок 4 – Мощностные и моментные характеристики ветротурбины

Определенные дискретным образом с шагом изменения скорости ветра 1 м/с механические характеристики ветротурбины не дают возможности проводить исследования в динамических режимах. Поэтому для полученных численных массивов предлагается использовать набор инструментальных средств аппроксимации Model-Based Calibration Toolbox программного продукта Matlab, предназначенный для создания подобных моделей и обработки ошибок при моделировании. Результат моделирования приведен на рисунке 5, где изображена трехмерная модель семейства характеристик ветротурбины.

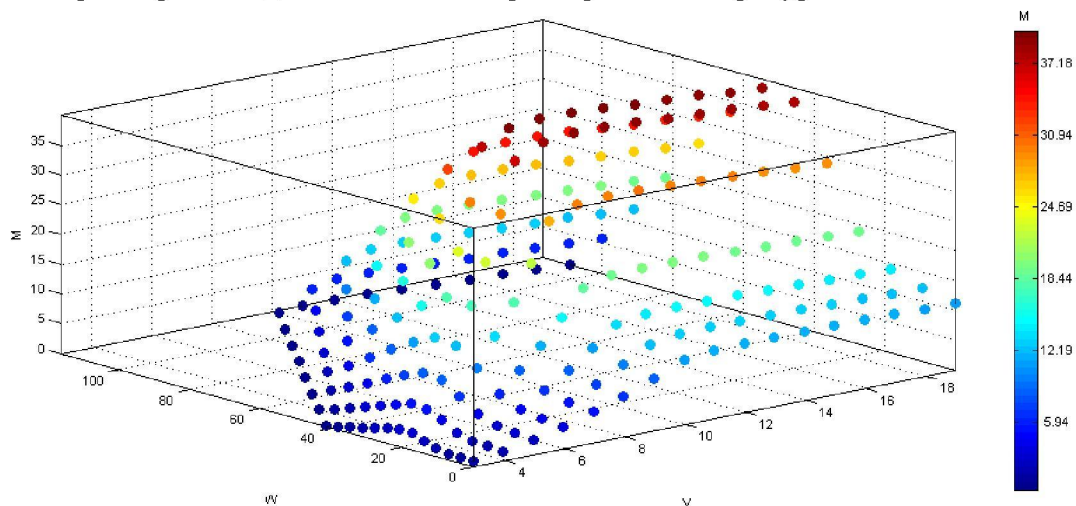


Рисунок 5 – Трехмерная модель семейства моментных характеристик

В результате оценки погрешности моделирования средствами Prediction Error Variance Viewer определено, что ее величина не превышает 0,5%. Погрешность резко возрастает за пределами рабочей зоны входных параметров.

Полученные трехмерные характеристики экспортируются в файлы Matlab, в модели Simulink, что позволяет рассчитанные характеристики использовать в исследовании ветротурбин при минимальных погрешностях.

Момент инерции вращающихся масс ветротурбин существенным образом влияет на параметры переходного процесса движения ротора, поэтому особое внимание уделено расчету момента инерции лопастей ветротурбины, так как они являются сложными составными изделиями из композитных материалов.

Для определения момента инерции полых лопастей ВЭУ предложено использовать упрощенную формулу

$$J_{\text{лоп}} = k_J \cdot m \cdot L^2,$$

где k_J – коэффициент, принимаемый в пределах 0,18–0,22; m – масса лопасти; L – длина лопасти, м;.

При этом массу лопасти приближенно определяют через ее длину, используя степенную аппроксимацию вида $m = \alpha \cdot L^\beta$, значения коэффициентов которой определены путем статистической обработки известных каталожных данных по 26 ВЭУ, мощностью от 0,3 до 20 кВт, что позволило получить значения коэффициентов $\alpha = 0,63$ и $\beta = 2,62$.

Наиболее распространенным типом генераторов ВЭС малых мощностей является синхронная машина с магнитоэлектрическим возбуждением. Модель синхронного генератора на постоянных магнитах реализована в Matlab Simulink, с помощью экспериментальных данных, по векторной диаграмме, внешней и магнитной характеристикам. На рисунке 6 представлена итоговая модель ВЭС.

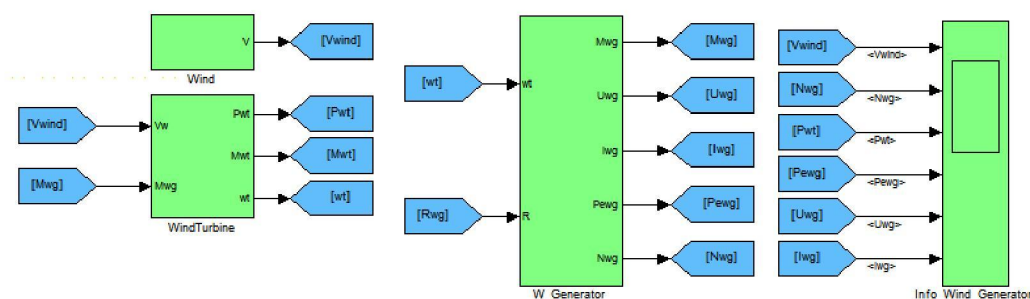


Рисунок 6 – Компоненты модели ветровой электрической станции

При использовании силовых каналов библиотеки SimPowerSystem для модели трехфазной нагрузки переменного тока применяются управляемые источники тока и блок задания амплитуды. Моделирование балластной нагрузки осуществляется по такому же принципу, как и полезной нагрузки потребителя АСЭС.

Для исследования процессов заряда и разряда накопителя электрической энергии на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей создана модель, удовлетворяющая требованиям моделирования в заданных условиях.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований (рисунок 7) доказывают адекватность разработанных моделей и допустимую погрешность в рамках принятых допущений.

Третья глава посвящена разработке автоматизированных алгоритмов для обеспечения динамической устойчивости и повышения энергетической эффективности.

Основная проблема использования ВЭУ в качестве источника энергии заключается в непостоянстве скорости ветра, которая характеризуется не только многолетней и сезонной изменчивостью, но и изменяется по направлению и величине от максимальных до минимальных значений в течение весьма короткого промежутка времени: сутки, часы, минуты.

Стохастический характер процессов производства и потребления электроэнергии в автономной ветро-дизельной системе электроснабжения практически исключает статические режимы, определяя ее рабочий режим как непрерывную последовательность переходных режимов, вызванных изменением мощности нагрузок и ветрового потока.

Сложность системы электроснабжения и нелинейность ее энергетических характеристик определяют необходимость исследования динамической устойчивости ВЭС и

гибридной системы электроснабжения в целом, разработке оптимального алгоритма управления режимами энергопреобразования.

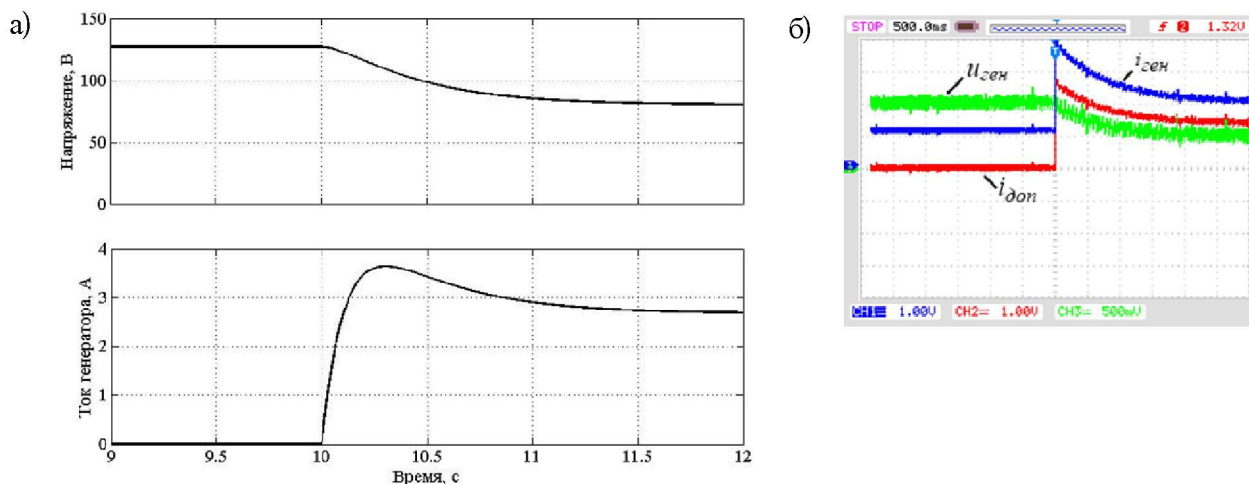


Рисунок 7 – Сравнение результатов моделирования а) и экспериментов б) ВЭС

Динамические режимы работы ветровой электростанции определяются изменением кинетической энергии вращающихся частей ветротурбины и изменением электромагнитной энергии в системе электроснабжения, поэтому для исследования динамической устойчивости целесообразно разделение электромагнитных и механических процессов по скорости их протекания.

Очевидно, что механические переходные процессы, обусловленные преимущественно инерционностью вращающихся масс, являются более длительными во времени и в значительной степени определяют динамику ВЭС.

Изменения скорости ветра происходят постепенно и относительно длительным образом по сравнению со ступенчатым изменением мощности нагрузки, поэтому при увеличении или уменьшении скорости ветра существенны электромеханические переходные процессы, а при набросах или сбросах мощности нагрузки – электромагнитные переходные процессы.

Кроме проблем устойчивости, автоматизированная система управления режимами гибридного энергетического комплекса должна обеспечивать максимальную энергоэффективность его работы, определяемую в первую очередь экономией дизельного топлива.

Для управления режимами ВЭС существуют два основных способа регулирования: регулирование аэродинамических характеристик ветротурбины, регулирование электрической нагрузки генератора ВЭС.

Регулирование аэродинамических характеристик ветротурбины заключается в изменении угла атаки всей лопасти и/или ее отдельными частями, в некоторых случаях изменением длины лопасти. Однако аэродинамическое регулирование обладает недостатками: усложнение и увеличение массы всей системы, снижение надежности работы ВЭУ, большие погрешности регулирования, сложность механических регуляторов.

Наиболее перспективным на сегодняшний день способом формирования энергоэффективных режимов ВЭС является регулирование нагрузки генератора, чему способствует ряд причин:

- благоприятные тепловентиляционные условия работы генератора ВЭС;
- значительная перегрузочная способность синхронных генераторов на постоянных магнитах;
- неполное использование по мощности ресурса генератора, так как номинальная скорость ветра ВЭС практически всегда больше фактических скоростей ветра в рабочем диапазоне;
- возможность использования простых, надежных и относительно дешевых ветротурбин;

- быстрое протекание электромагнитных процессов и высокое быстродействие электрических и электронных устройств управления и коммутации.
- хорошие экономические и эксплуатационные характеристики полупроводниковых регуляторов мощности АЭС.

Таким образом, для обеспечения устойчивых и энергоэффективных режимов работы ВЭС целесообразно использовать методы регулирования ее нагрузки с учетом особенностей характеристик ВЭС и ветровых условий и особенностей электропотребления, а именно: управление режимами заряда/разряда накопителей электрической энергии, управление процессами полезной утилизации электроэнергии в балластных нагрузках, управление режимами работы дизельной электрической станции.

С целью определения оптимальных значений мощности для рабочих скоростей ветра аналитическим путем определяются значения угловой скорости (частоты вращения), мощности и момента ветротурбины при максимальном значении коэффициента использования ветра, в результате чего получается аналитическое выражение зависимости $P_{\text{опт}} = f(\Omega_{\text{опт}})$.

Значения мощности оптимальной точки определяются по выражению

$$P_{\text{опт}} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot C_{p\text{max}} \cdot R^5}{2 \cdot Z_{\text{опт}}^3} \cdot \Omega_{\text{опт}}^3 = k_{\text{опт}} \cdot \Omega_{\text{опт}}^3$$

где $Z_{\text{опт}}$ – оптимальное значение быстроходности, соответствующее максимальному значению коэффициента использования энергии ветра; $k_{\text{опт}}$ – индивидуальный коэффициент ветротурбины, который имеет неизменное значение.

Оптимальное значение угловой скорости определяется по выражению

$$\Omega_{\text{опт}} = \frac{Z_{\text{опт}}}{R} \cdot V,$$

где R – радиус ветротурбины; V – скорость ветра.

Алгоритм формирования оптимального режима заключается в следующем. В определенный момент времени сравниваются текущие значения мощности ВЭУ и оптимального значения мощности, соответствующего текущему значению угловой скорости. Если текущая мощность ВЭУ меньше оптимальной мощности по значению, то ветротурбина работает в режиме недогрузки, при этом есть возможность увеличить нагрузку ВЭУ. В противном случае, необходимо разгружать ВЭУ, так как рабочая точка может переместиться на неустойчивый участок характеристики.

Поскольку режим работы ВЭУ

характеризуется нестабильными во времени параметрами, то при изменениях скорости ветра и/или мощности нагрузки возможны условия, при которых ВЭУ не развивает требуемую мощность. Учитывая названные причины, лучшим принципом управления ВЭУ является управление электрической нагрузкой поисковым (пошаговым) методом. Структура алгоритма обеспечения устойчивой работы ВЭУ и возможного увеличения выработки электроэнергии представлена на рисунке 8.

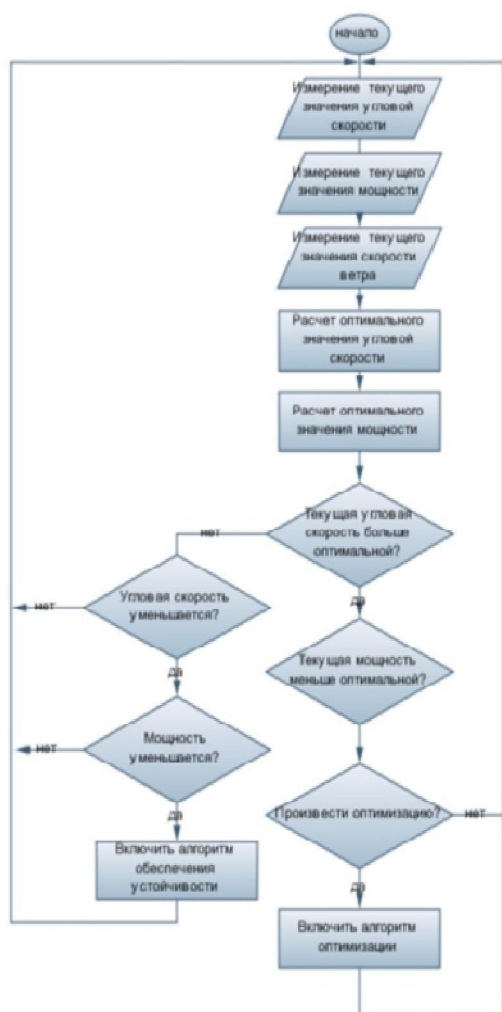


Рисунок 8 – Общий алгоритм управления режимами ВДЭС

Алгоритм управления ВЭС по угловой скорости включает в себя подалгоритм обеспечения устойчивой работы на устойчивых частях характеристик (рисунок 9, а) и алгоритм повышения энергоэффективности (рисунок 9, б), при котором реализуется максимально возможная генерация электрической энергии.

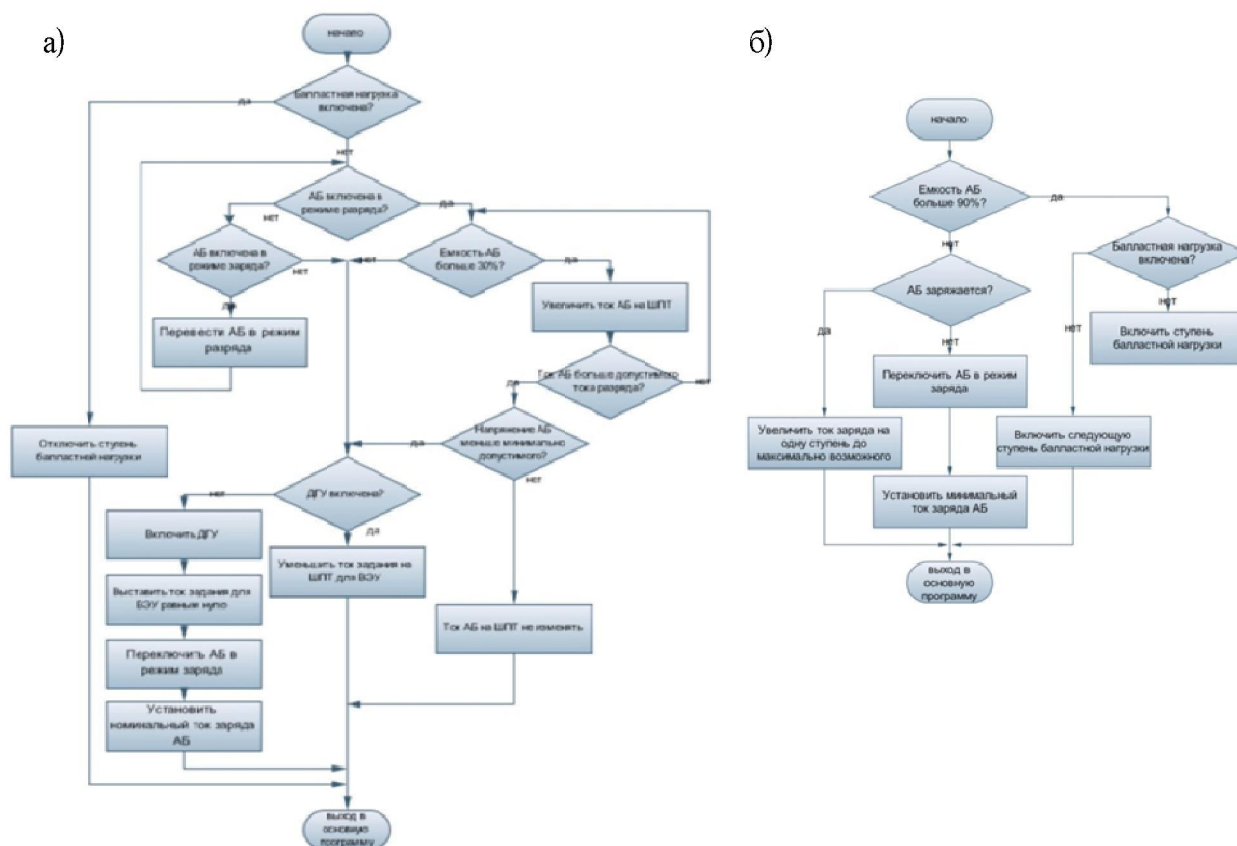


Рисунок 9 – Подалгоритмы устойчивости а) и энергоэффективности б)

Алгоритм управления ВЭС по угловой скорости измеряет текущее значение угловой скорости и развиваемой мощности, затем по измеряемой скорости ветра рассчитываются координаты точки оптимума. Полученные измеряемые текущие и оптимальные значения параметров оцениваются, после чего делается вывод о возможности обеспечения устойчивой работы.

Когда наблюдается переход рабочей точки на неустойчивую часть характеристики, в работу вводится алгоритм предотвращения полного останова ВЭС. Принцип действия алгоритма основан на разгрузке ВЭС путем первоочередного отключения балластной нагрузки или питания потребителей от аккумуляторных батарей при достаточном заряде последних. При недостаточном заряде аккумуляторных батарей и отсутствии балластной нагрузки в работу вводится дизельная электростанция.

В целях экономии дизельного топлива и повышения загрузки ДЭС при емкости накопителей электрической энергии меньше верхнего порогового уровня АБ переключаются в режим заряда.

Также в системе управления ВЭС предполагается контроль входных параметров по минимальным и максимальным значениям. В первую очередь не допускается работа ВЭС при малом напряжении и большом токе генератора, что соответствует режиму перегрузки выше номинальной мощности. В данном алгоритме подобные функции не представлены, поскольку считаются стандартными.

В случае когда, необходимо повышение выработки электрической энергии, вводится в работу алгоритм поиска точки оптимума, который осуществляет дополнительную загрузку ВЭС. Развиваемая мощность ветротурбины кубически зависит от скорости ветра, которая

крайне не стабильна во времени. Поэтому система «ВЭС - нагрузка» всегда работает в динамических режимах, при которых излишняя кинетическая энергия ветра при неизменной мощности нагрузки расходуется на увеличение угловой скорости (частоты вращения) вала ветрогенератора. Порывистый характер ветра определяет задачу эффективного использования энергии порывов ветра. Алгоритм повышения выработки электростанции настроен таким образом, чтобы «дополнительной энергией» в первую очередь осуществлялся заряд АБ, затем подключение балластной нагрузки.

Заряд свинцово-кислотных аккумуляторов желательно осуществлять по методу «ток-напряжение», происходящий в две ступени. Метод заряда АБ «ток-напряжение» возможен лишь при стабилизации тока в течение длительного времени, что не возможно обеспечить в условиях стохастического изменения скорости ветра и, соответственно, вырабатываемой энергии.

По этой причине заряд АБ осуществляется доступной мощностью ветротурбины, т.е. потенциально возможной выработкой электроэнергии при имеющейся скорости ветра.

В качестве примера на рисунке 10 Рисунок приведена работа алгоритма при включении и отключении балластной нагрузки, работа которого заключается в следующем. В момент запуска ВЭС работает без нагрузки, при этом рабочая точка ветротурбины по мощностной характеристике $P_{ВТ}$ выходит на участок устойчивой работы. В момент времени 10 с происходит включение полезной нагрузки $P_{Н}$, поскольку оптимальная мощность $P_{опт}$ при данной скорости ветра больше текущей мощности ветротурбины, что означает ее возможную догрузку, то разработанный алгоритм постепенно и ступенчато включает балластную нагрузку $P_{БН}$. Затем в момент времени 30 с происходит наброс полезной нагрузки при максимально введенной балластной нагрузке, в результате чего угловая скорость ветротурбины $\Omega_{ВТ}$, постепенно уменьшаясь, становится меньше оптимального значения, поэтому в целях предотвращения неустойчивого режима алгоритм отключил одну ступень балластной нагрузки.

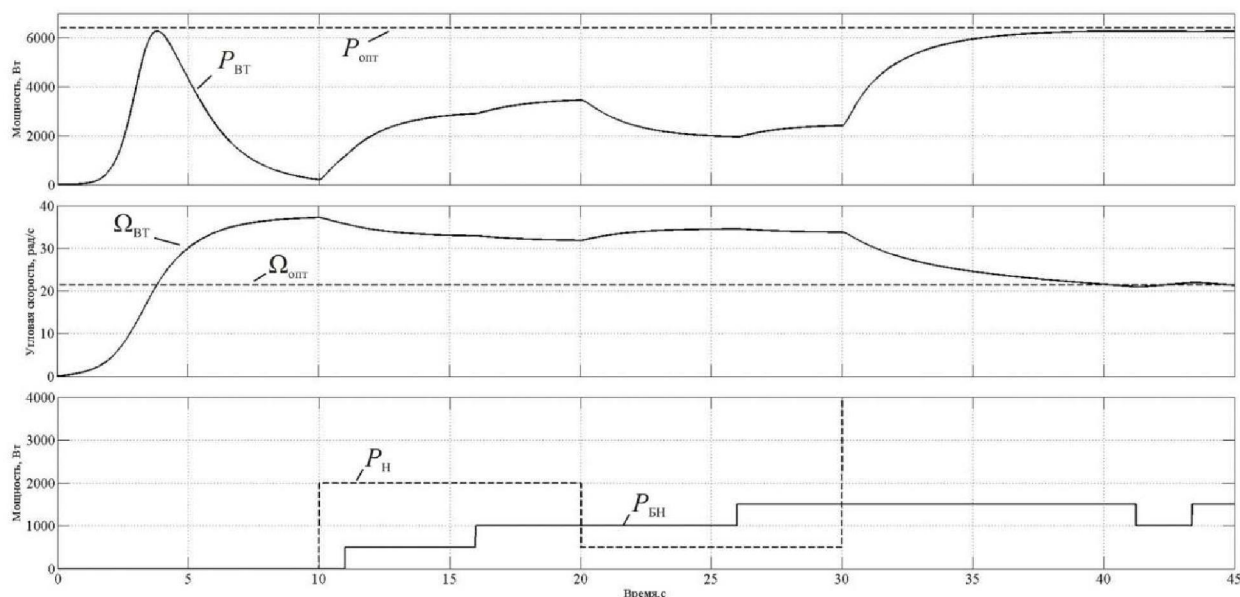


Рисунок 10 – Результаты моделирования работы алгоритма

В целом алгоритм управления ВЭС в динамических режимах можно охарактеризовать как поисковый, сущность которого заключается в определении оптимальных состава и параметров генерирующего и потребляющего оборудования по критерию устойчивости и энергоэффективности.

При использовании поискового метода задания режимов работы ВЭС возможны колебания переменных около оптимальной или критической точки. Однако подобный случай характерен лишь для неизменной скорости ветра, что в природе маловероятно.

Для разработанного алгоритма предложена общая структура системы управления ВДЭС, схема которой приведена на рисунке 11.

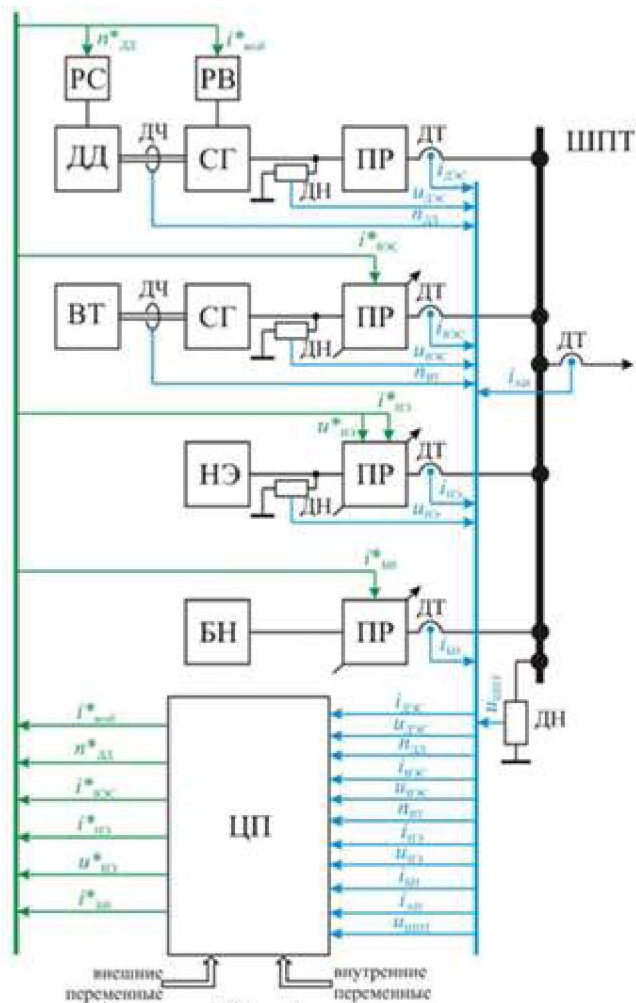


Рисунок 11 – Структура системы управления ВДЭС

В базовой конфигурации структурная схема состоит из четырех каналов управления:

1. Канал управления дизельной электрической станцией.
2. Канал управления ветровой электрической станцией.
3. Канал управления балластной нагрузкой.
4. Канал управления накопителем энергии.

Основными техническими характеристиками компонентов ВДЭС являются: число, тип и номинальная мощность генерирующих установок электростанции, механические и рабочие характеристики ВЭУ, зарядно-разрядные характеристики используемых аккумуляторных батарей и т.п. Текущее состояние энергетической системы характеризуется величиной остаточного заряда аккумуляторных батарей и типом рабочего режима на ШПТ: включена или отключена дизельная электростанция, заряд или разряд накопителей. К внешним факторам следует отнести текущее значение скорости ветра и величину электрической нагрузки потребителя. Так как для определения рациональных управляющих параметров преобразователей необходим учет и обработка в режиме реального

времени большого числа разнообразных влияющих факторов, представляется целесообразным использовать для их формирования интеллектуальную систему управления режимами ВДЭС.

Четвертая глава посвящена исследованию статической устойчивости параллельной работы дизельной и ветровой электрических станций на шине постоянного тока, разработаны системы регулирования ВДЭС и произведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

В результате работы алгоритмов управления определяются рекомендуемые режимные параметры управляемых объектов ВДЭС, а именно, оптимальное значение мощности ВЭС при текущей скорости ветра, оптимальные значения тока заряда/разряда накопителя электрической энергии, оптимальное значение тока для балластной нагрузки, степень использования ДЭС.

При формируемых значениях управляемых переменных система стремится к установившемуся режиму, который однозначно наступит в результате правильно сформированных условий работы. Однако параллельная работа на шину постоянного тока ветровой и дизельной электростанций требует проведение дополнительных исследований статической устойчивости в зоне рабочей точки.

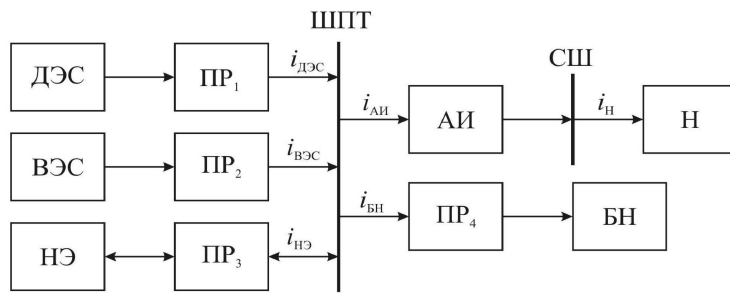


Рисунок 12 – Функциональная схема ВДЭС

Рассматриваемая ВДЭС состоит из источников электроэнергии (ДЭС, ВЭС), подключенных к шине постоянного тока (ШПТ) через индивидуальные силовые преобразователи (ПР₁, ПР₂). Накопитель электроэнергии (НЭ) подключается также к ШПТ с помощью индивидуального конвертера.

Потребитель электрической энергии представлен в виде обобщенной нагрузки (Н) и подключается к сборным шинам (СШ) переменного тока через автономный инвертор (АИ). Автономный инвертор обеспечивает требуемые показатели качества электроэнергии и защиту в ненормальных режимах.

Баланс мощностей на шине постоянного тока в любой момент времени имеет вид

$$P_{\text{ДЭС}} + P_{\text{ВЭС}} \pm P_{\text{НЭ}} = P_{\text{Н}} + P_{\text{БН}},$$

где $P_{\text{ДЭС}} = u_{\text{ШПТ}} \cdot i_{\text{ДЭС}}$, $P_{\text{ВЭС}} = u_{\text{ШПТ}} \cdot i_{\text{ВЭС}}$ – генерируемые мощности ДЭС и ВЭС соответственно; $P_{\text{НЭ}} = u_{\text{ШПТ}} \cdot i_{\text{НЭ}}$ – мощность, отдаваемая (забираемая) НЭ в систему (из системы); $P_{\text{БН}} = u_{\text{ШПТ}} \cdot i_{\text{БН}}$ и $P_{\text{Н}} = u_{\text{ШПТ}} \cdot i_{\text{АИ}}$ – мощность, отдаваемая в полезную и балластную нагрузку; $u_{\text{ШПТ}}$ – мгновенное значение напряжения на ШПТ; $i_{\text{ДЭС}}$, $i_{\text{ВЭС}}$, $i_{\text{НЭ}}$, $i_{\text{БН}}$, $i_{\text{Н}}$ – мгновенные значения токов ДЭС, ВЭС, накопителя электроэнергии, балластной нагрузки и нагрузки соответственно.

При условии, что напряжение на ШПТ стабильно ($u_{\text{ШПТ}} = \text{const}$), уравнение баланса мощностей можно представить в виде баланса токов

$$i_{\text{ДЭС}} + i_{\text{ВЭС}} \pm i_{\text{НЭ}} = i_{\text{Н}} + i_{\text{БН}}.$$

Таким образом, в системе управления режимами работы ВДЭС в любой момент времени для обеспечения баланса необходимо стабилизировать напряжение на шине постоянного тока, а также оптимально управлять величиной токов источников питания, режимом заряда/разряда НЭ и величиной тока БН.

Стабильным источником питания на шине постоянного тока является дизельная электростанция, имеющая в своей структуре штатные системы регулирования величин частоты и генерируемого напряжения.

Когда предполагается работа ДЭС с неизменной частотой вращения, в функциональной схеме на рисунке 12 будет отсутствовать силовой преобразователь ДЭС. Если по технико-экономическим соображениям выгодно использовать так называемые инверторные ДЭС, то общая структура ВДЭС дополнится соответствующим силовым преобразователем.

В независимости от типа используемой ДЭС ее силовой преобразователь целесообразно реализовывать на неуправляемом трехфазном мостовом выпрямителе, а функции регулирования генерируемой электроэнергии возложить собственно на ДЭС. Тогда величина напряжения на шине постоянного тока регулируется с помощью системы возбуждения генератора ДЭС.

Частота вращения ветротурбины ВЭС зависит от скорости набегающего воздушного потока и мощности ее электрической нагрузки, в результате чего изменяется в очень широком диапазоне: от нуля до максимально возможной. При использовании в качестве генератора электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов, величина выходного напряжения ВЭС линейно зависит от частоты вращения и изменяется также в широких пределах.

Подключение ВЭС к ШПТ производится через полупроводниковый преобразователь, выполненный по схеме повышающего управляемого выпрямителя, который обеспечивает повышение величины входного напряжения ветрогенератора до уровня напряжения шины

$u_{\text{ШПТ}}$. Для эксплуатации ВЭС в режимах максимального отбора мощности преобразователь должен обеспечивать работу ветрового канала в режиме управляемого источника тока.

Функцией накопителя энергии является обеспечение баланса выработки и потребления электрической энергии на ШПТ. Во всех режимах необходимо обеспечить условия для эффективной работы НЭ, что в первую очередь обуславливает повышенные требования к силовому преобразователю НЭ. Кроме того, для оптимального управления НЭ необходима система контроля уровня напряжения и остаточной емкости НЭ.

Следует отметить, что разряд аккумуляторных батарей, входящих в состав НЭ, рекомендуется не допускать более 70% от номинальной емкости.

Работа ДЭС на ШПТ будет обуславливать условия работы силового преобразователя при разряде НЭ, т.е. при работающей ДЭС силовой преобразователь НЭ в режиме заряда будет работать в качестве управляемого источника тока. При отключенной ДЭС, выполняя функции стабилизатора напряжения на ШПТ, силовой преобразователь НЭ должен работать в качестве управляемого источника напряжения.

В случае, когда вырабатываемой электроэнергии будет больше чем необходимая электроэнергия для электрической нагрузки и возможного заряда накопителя электроэнергии, в систему ВДЭС целесообразно вводить так называемую балластную нагрузку (БН) в виде теплоэлектронагревателей (ТЭН).

Для управления ВДЭС с целью обеспечения заданных режимов работы необходимо стабилизировать напряжение на шине постоянного тока с помощью гарантированного источника питания, роль которого выполняет дизельная электростанция или накопитель энергии в режиме разряда. Оставшиеся нестабильные источники энергии (ветровая электростанция) целесообразнее подключать к ШПТ в качестве управляемого источника тока. При этом сигналы управления формируются в режиме реального времени в зависимости от текущих характеристик генерирующих установок и потребителя электроэнергии.

Ввиду сложности математического описания физических процессов, происходящих в системе «дизельный двигатель – генератор – нагрузка» в линеаризованной структурной схеме принято рассматривать дизельный двигатель и синхронный генератор двумя аperiodическими звеньями каждый. Подобное допущение не нарушает общей физической картины и соответствует решаемым задачам.

Для разработки систем автоматического регулирования ДЭС используются данные экспериментов лабораторного комплекса. Структурная схема ДЭС приведена на рисунке 13.

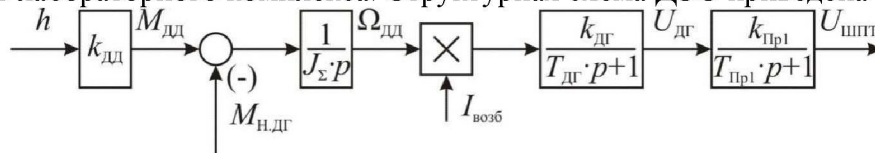


Рисунок 13 – Структурная схема ДЭС

Если рассматривать ДЭС со штатной системой регулирования частоты вращения, то можно принять угловую скорость неизменной, т.к. изменения нагрузки малозначительно

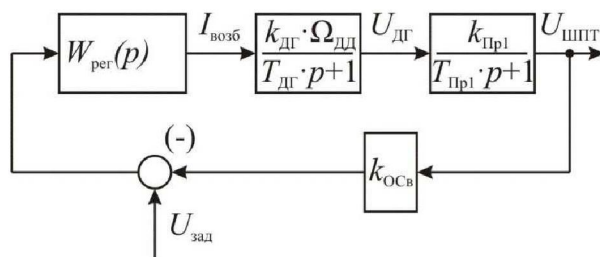


Рисунок 14 – Структурная схема ДЭС с регулятором

Структурная схема ДЭС с регулятором тока возбуждения представлена на рисунке 14.

В качестве примера на рисунке 15 приведен график переходного процесса при настройке контура регулирования напряжения на линейный оптимум (ЛО). Длительность переходного процесса составляет $t_{\text{пр}} = 0,016 \text{ с}$, установившейся значение напряжения $U_{\text{уст}} = 600 \text{ В}$.

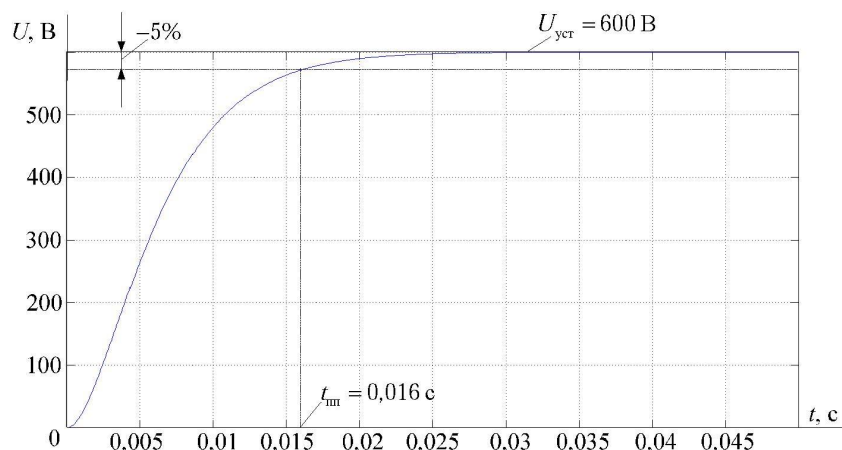


Рисунок 15 – Переходная характеристика ДЭС с регулятором при настройке на ЛО

В качестве примера на рисунках 16 показаны логарифмические частотные характеристики для замкнутой системы при настройке на линейный оптимум

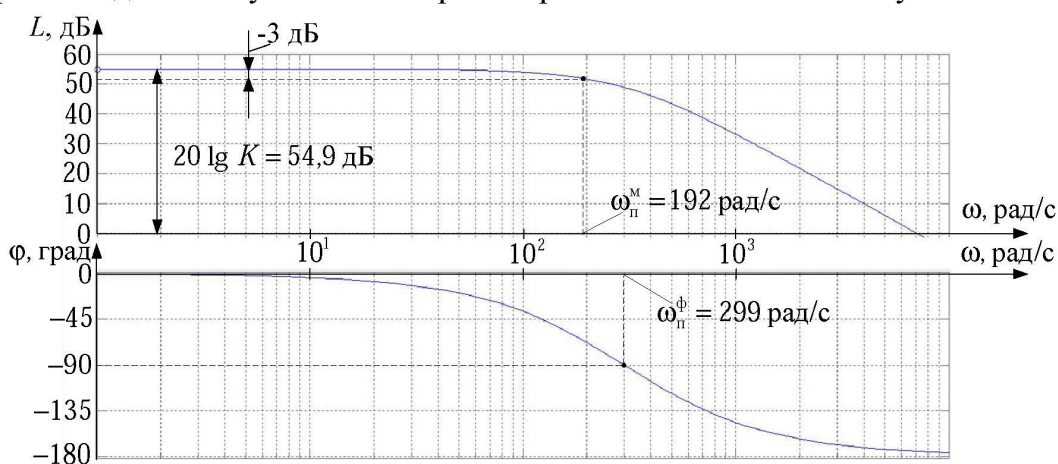


Рисунок 16 – ЛЧХ замкнутой системы при настройке на ЛО

Во всех режимах система имеет полосу пропускания по модулю $\omega_{\text{п}}^{\text{м}} = 192 \text{ рад/с}$, по фазе – $\omega_{\text{п}}^{\text{φ}} = 299 \text{ рад/с}$ и один и тот же запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 76,3^\circ$, следовательно, замкнутая система устойчива во всех режимах. Окончательные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры регулятора ДЭС

Параметр	Исходная система			Линейный оптимум		
	Мин.	Ном.	Макс.	Мин.	Ном.	Макс.
Установившееся значение, В	591,4	600	609,3	591,4	600	609,3
Ошибка регулирования, В	8,6	0	9,3	8,6	0	9,3
Время переходного процесса, с	1,5	1,5	1,5	0,016	0,016	0,016
Полоса пропускания по модулю, рад/с	1,94	1,98	1,98	190	192	190
Полоса пропускания по фазе, рад/с	34,6	34,4	34,7	300	300	299
Запас устойчивости по фазе, град	-	-	-	76,3	76,3	76,3
Коэффициент передачи регулятора	-	-	-	74,85	74,85	74,85

Из анализа полученных результатов видно, что при неизменных настройках регулятора в минимальном и максимальном режимах работы обеспечивается надлежащее качество регулирования. Важно, что при этом коэффициент передачи и постоянные времени регулятора не меняются, так как они зависят только от постоянных времени системы.

Для разработки системы автоматического регулирования канала ВЭС используется расчетные данные по ветротурбине Abates-2000 и опытные данные по испытываемому синхронному генератору с постоянными магнитами. Структурная схема ВЭС представлена на рисунке 17.

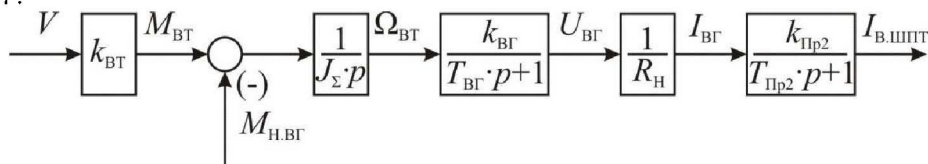


Рисунок 17– Структурная схема ВЭС

Следует отметить, что ВЭС является сложным управляемым объектом ввиду стохастического изменения, в первую очередь скорости ветра, поэтому управлять режимами ВЭС предлагается с помощью регулирования электрической нагрузки.

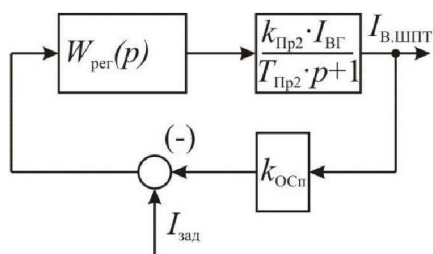


Рисунок 18 – Структурная схема канала ВЭС с регулятором

Исходя из баланса мощностей на ШПТ, подаваемый ток на ШПТ от ВЭС возможно регулировать силовым преобразователем ветрогенератора.

Структурная схема канала потока энергии ВЭС с регулятором преобразователя представлена на рисунке 18.

Переходный процесс по току преобразователя ВЭС имеет аналогичный качественный вид, представляющий собой переходный процесс апериодического звена второго порядка. Показатели качества переходного процесса приведены также в таблице 2.

Таблица 2 – Сводные данные по качеству регулирования

Параметр	Исходная система	Линейный оптимум
Установившееся значение, А	3,873	4,74
Ток задания, А	4,74	4,74
Ошибка регулирования, А	0,867	0
Время переходного процесса, с	0,005	0,0158
Полоса пропускания по модулю, рад/с	598	191
Полоса пропускания по фазе, рад/с	-	299
Запас устойчивости по фазе, град	-	76,3
Ошибка регулирования, %	18,29	0
Коэффициент передачи регулятора	-	183,23

Аналогичным образом определяются логарифмические частотные характеристик, согласно которым, полоса пропускания по модулю составила $\omega_{п}^M = 191$ рад/с, полоса пропускания по фазе составила $\omega_{п}^{\phi} = 299$ рад/с. Запас устойчивости по фазе в данном случае составит $\Delta\phi = 76,3^{\circ}$.

Общая структурная схема канала дизельной генерации с регулятором возбуждения генератора ДЭС приведена на рисунке 19, где $k_{рег} = 74,85$.

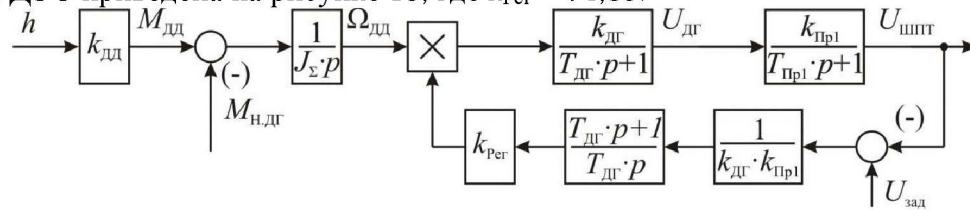


Рисунок 19 – Структурная схема ДЭС с регулятором

Общая структурная схема канала ветровой генерации с регулятором для силового преобразователя приведена на рисунке 20, где $k_{рег} = 183,23$.

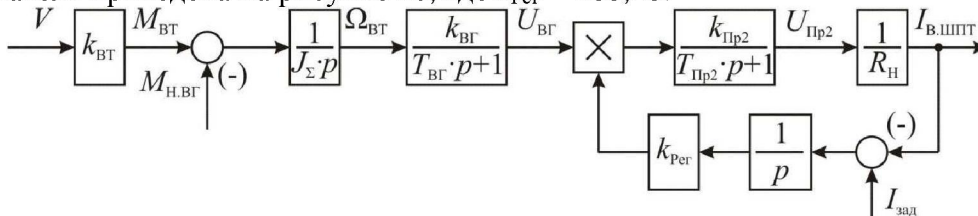


Рисунок 20 – Структурная схема ВЭС с регулятором

Настройка контуров регулирования при параллельной работе ДЭС и ВЭС позволяет обеспечить статическую устойчивость при управлении режимами работы ВДЭС. При неизменных настройках регуляторы демонстрируют хорошие показатели качества регулирования в минимальных и максимальных режимах работы.

Для подтверждения разработанных решений проведена серия экспериментов при совместной работе ДЭС и ВЭС на общую шину постоянного тока. В качестве преобразователя дизель-генератора использовался трехфазный мостовой выпрямитель, стабилизация выходного напряжения обеспечивалась разработанным регулятором напряжения генератора. В качестве преобразователя ВЭС использовался управляемый выпрямитель.

На рисунке 21 приведены осциллограммы токов (слева) и напряжения (справа) на ШПТ при отсутствии ветра.

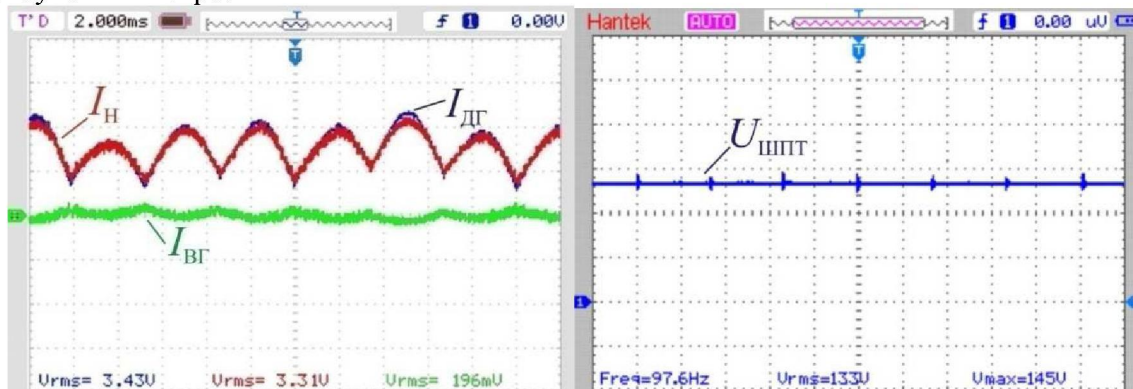


Рисунок 21 – Осциллограммы токов и напряжения на ШПТ при отсутствии ветра

В данном режиме ветрогенератор не работает, соответственно выходной ток преобразователя ВЭС равен нулю, поэтому токи нагрузки и дизель-генератора равны. Для приведенного на рисунке 21 режима величина электрической нагрузки составляет 3,0 кВт, а выходной ток ШПТ 5 А. На правой осциллограмме рисунка 4.39 показан сигнал напряжения (600 В) на ШПТ, которая жестко стабилизирована, коэффициент пульсаций не превышает 2,5 %.

На рисунке 22 представлены осциллограммы токов (слева) и напряжения (справа) на ШПТ для режимов работы системы при изменяющейся мощности нагрузки и малом изменении генерируемой мощности ветрогенератора.

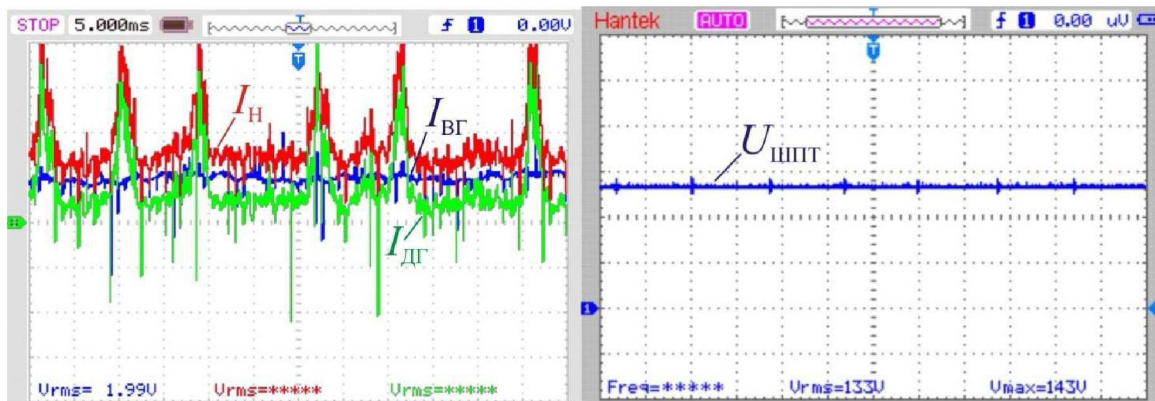


Рисунок 22 – Осциллограммы токов и напряжения на ШПТ при изменении скорости ветра

В данном режиме изменяется мощность нагрузки, а генерируемая мощность ветрогенератора изменяется незначительно, что обусловлено некоторым ограничением использования физической модели ВЭС, реализуемой с помощью электромеханического модуля «двигатель постоянного тока – синхронный генератор на постоянных магнитах». Изменение мощности электрической нагрузки происходит в пределах от 0,5 до 2,0 кВт, а изменение мощности ветрогенератора происходит в пределах 0,5 кВт. Из осциллограммы токов рисунка 22 видно, что при изменении выходной мощности ветрогенератора, генерируемая мощность дизель-генератора изменяется, чтобы обеспечить баланс токов на ШПТ.

Инерционность контуров регулирования, обусловленная, главным образом, электромагнитными и электромеханическими постоянными времени синхронного генератора и дизельного двигателя приводят к тому, что генерируемая мощность на ШПТ также носит пульсирующий характер.

В результате проведенной серии опытов установлено, что для всех рабочих режимов совместной работы ДЭС и ВЭС на общую шину постоянного тока величина изменения напряжения на ШПТ не превышает 5 В (не более 1 %), что обеспечивает питание инвертора качественным напряжением.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Доказана актуальность работ, производимых с целью повышения эффективности систем автономного электроснабжения.
2. Определены наиболее перспективные способы сопряжения генерирующего оборудования автономных систем электроснабжения, имеющих в структуре возобновляемые источники энергии.
3. Обоснован вариант электрического сопряжения ветровой и дизельной электрических станций установленной мощностью до 100 кВт с помощью звена постоянного тока с двойным преобразованием электрической энергии.
4. Разработаны оригинальные математические модели элементов автономной ветродизельной электрической станции малой мощности на основе аэродинамических характеристик ветротурбин и результатов экспериментальных исследований энергосилового оборудования.
5. Созданные модели реализованы в программной среде Simulink Matlab, позволяющей производить имитационное моделирование динамических процессов в ВДЭС в режиме реального времени и на заданных временных интервалах. Адекватность предлагаемых моделей подтверждается результатами сравнения с данными экспериментов. Погрешность не превышает 10%.
6. Большая инерционность вращающихся масс ветротурбин относительно инерционности дизельной генераторной установки позволяет проводить анализ переходных

режимов работы ВДЭС, отдельно рассматривая электромагнитные и электромеханические процессы.

7. При настройке систем управления ВДЭС необходимо учитывать механическую инерционность вращающихся частей ветротурбины, от которой в значительной степени зависят показатели переходного процесса, в особенности время переходного процесса.

8. При мгновенных изменениях мощности нагрузки и относительно длительных изменениях скорости ветра разработанный алгоритм обеспечивает динамическую устойчивость ВДЭС за счет регулирования потребляемой мощности при максимальном использовании энергии ветра.

9. Предложена структура системы и алгоритм управления ВДЭС, обеспечивающая динамическую устойчивость и энергоэффективность системы в целом.

10. Разработаны системы регулирования и определены параметры каналов дизельной и ветровой генерации, обеспечивающие статическую устойчивость для формируемых режимных параметров.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Лукутин Б.В., Сарсикеев Е.Ж. Методика исследования динамических характеристик ветрогенераторов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 140-143.

2. Обухов С.Г., Сарсикеев Е.Ж. Математическая модель ветротурбины малой мощности в MATLAB SIMULINK // Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал. – 2012. – № 2. – С. 42–48 .

3. Обухов С.Г., Плотников И.А., Сарсикеев Е.Ж. Буферная система накопления электроэнергии для возобновляемой энергетики // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 9 (113). – С. 137–141.

4. Сурков М.А., Лукутин Б.В., Сарсикеев Е.Ж., Киушкина В.Р. Мировые тенденции в области построения автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] // Науковедение. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/42tvn412.pdf>.

5. Ляпунов Д.Ю., Сарсикеев Е.Ж. Расчет параметров электропривода постоянного тока для моделирования механических характеристик ветротурбин [Электронный ресурс] // Науковедение. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/65tvn412.pdf>.

Научные публикации в других изданиях:

6. Сарсикеев Е.Ж. Ветродизельные электростанции в автономном электроснабжении // Материалы X межрегиональной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (с международным участием) – Нерюнгри, 3-4 апреля 2009. – Нерюнгри: ТИ(Ф) ЯГУ, 2009. – С. 121–123.

7. Сарсикеев Е.Ж. Комбинированные системы электроснабжения с использованием энергии ветра // IX Сатпаевские чтения: Материалы международной научной конференции молодых ученых, студентов и школьников – Павлодар, 9-10 апреля 2009. – Павлодар: Кереку, 2009. – С. 192–196.

8. Сарсикеев Е.Ж. Система автономного электроснабжения // Всероссийский открытый конкурс на лучшую научную работу студентов вузов 2009 года. Раздел 51. «Автоматизация промышленных установок и технических комплексов». Институтский тур всероссийского открытого конкурса: Каталог заявленных работ – Томск, 15-30 января 2010. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 115.

9. Сарсикеев Е.Ж., Никитин М.В. Анализ динамических режимов работы локальных ветроэнергетических установок // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 12-16 Апреля 2010. – Томск: ТПУ, 2010. – Т. 1. – С. 110–112.

10. Никитин М.В., Сарсикеев Е.Ж. Система аккумулирования энергии ветроэнергетических установок // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI

Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 12-16 Апреля 2010. – Томск: ТПУ, 2010. – Т. 1. – С. 85–86.

11. Сарсикеев Е.Ж. Hybride Energiekomplexe // Мировая культура и язык: Взгляд молодых исследователей: Материалы IX Российской научной конференции преподавателей, аспирантов, студентов вузов и учащихся старших классов альтернативных учебных заведений. – Томск, 16-18 апреля 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 165–167.

12. Сарсикеев Е.Ж. Электроснабжение децентрализованных потребителей на базе ветродизельных комплексов // Тинчуринские чтения: Материалы докладов V Международной молодежной научной конференции. – Казань, 28-29 апреля 2010. – Казань: КГЭУ, 2010. – С. 151–152.

13. Сарсикеев Е.Ж. Моделирование динамических процессов ветротурбины с горизонтальной осью вращения // IV чтения Ш. Шокина: Материалы IV Международной научно-технической конференции. – Павлодар, 8 декабря 2010. – Павлодар: ПГУ им. С.Торайгырова, 2010. – С. 147–154.

14. Лукутин Б.В., Сарсикеев Е.Ж. Гибридная система накопления электроэнергии для автономных ветроэлектрических станций // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2011. – № 25. – С. 71–73.

15. Баранов И.Е., Сарсикеев Е.Ж. Исследование синхронных генераторов ветроэнергетических установок с возбуждением от постоянных магнитов [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9-13 Апреля 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – Т. 1. – С. 19–20.

16. Сарсикеев Е.Ж., Плотников И.А. Компьютерная имитационная модель автономного ветрогенератора // XII Сатпаевские чтения: материалы Международной научной конференции молодых ученых, студентов и школьников, Павлодар, 11-13 Апреля 2012. – Павлодар: КЕРЕКУ, 2012. – Т. 21. – С. 196–201.

17. Обухов С.Г., Сарсикеев Е.Ж. Динамическая модель скорости ветра // Интеллект и наука: труды XII Международной научной конференции, Железногорск, 25-27 Апреля 2012. – Красноярск: СФУ, 2012. – С. 215–216.

18. Обухов С.Г., Сарсикеев Е.Ж. Моделирование продольной составляющей скорости ветра // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 17-18 Мая 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 74–75.

19. Сарсикеев Е.Ж. Система управления автономной ветро-дизельной электростанцией // V Шокинские чтения: материалы Международной научно-технической конференции, Павлодар, 1-3 Октября 2012. – Павлодар: Кереку, 2012. – С. 117–121.

Личный вклад автора. Публикации [6]–[8], [11]–[13] и [19] выполнены без соавторов. В публикациях [3] и [4] автором выполнено 40%. В публикациях [1], [5], [9], [10], [14], [16]–[18] автором внесен вклад на 50%. В публикациях [2], [15] личный вклад автора составляет 70%.