

на правах рукописи



ОБУХОВ Сергей Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института

Научный консультант: **Лукутин Борис Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хрущев Юрий Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, профессор кафедры
«Электрические сети и электротехника»

Горелов Валерий Павлович,
доктор технических наук, профессор,
Новосибирская государственная академия водного
транспорта, профессор кафедры
«Электроэнергетические системы и
электротехника»

Пантелеев Василий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
Сибирский Федеральный университет, заведующий
кафедрой «Электротехнические комплексы и
системы»

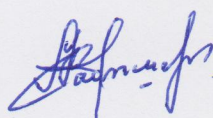
Ведущая организация: **Институт систем энергетики им.Л.А.Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии
наук, г.Иркутск.**

Защита состоится «18» декабря 2013 г. в 10 часов 00 мин. 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 ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г.Томск, ул.Белинского, 53а.

Автореферат разослан «5» ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.

 А.В.Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Огромную роль в экономике страны играют Восточные и Северные регионы. К зоне Севера и Востока относится почти 2/3 территорий России, на которых проживают около 20 млн. человек. Только незначительная часть Восточных и Северных территорий России находится в зоне централизованного электроснабжения, большая же часть потребителей получает электроэнергию от автономных изолированных энергетических систем. Надежное электроснабжение децентрализованных регионов является актуальной задачей энергетики России, от успешного решения которой зависит не только ее социально-экономическое развитие, но и безопасность значительной части населения.

Основу локальной энергетики России составляют дизель-генераторы (ДГ) и дизельные электростанции (ДЭС) на их основе. Как источники электроэнергии автономных систем электроснабжения они обладают очевидными достоинствами и известными недостатками, к главным из которых относятся большой расход органического топлива на выработку одного кВт·ч электроэнергии и загрязнение окружающей среды. В тоже время полноценной замены им нет. Серьезной проблемой изолированных от центральных энергосистем потребителей является дальний и дорогостоящий транспорт топлива, ограниченный сроками сезонного завоза, что является одной из главных причин снижения надежности электроснабжения.

Учитывая дефицитность, высокую стоимость и трудность доставки топлива в отдаленные регионы России, важнейшей задачей становится коренное повышение эффективности использования топлива объектами малой энергетики за счет применения современного высокоэффективного оборудования, оптимизации рабочих режимов генерирующих установок, использования нетрадиционных, возобновляемых и местных энергоресурсов. Так как для потребителей электроэнергии децентрализованных зон необходим гарантированный источник питания, наиболее перспективным вариантом построения изолированных энергетических систем представляются комбинированные автономные системы электроснабжения с энергетическими установками возобновляемой энергетики.

Методологическое и научно-техническое обоснование ресурсов возобновляемых источников энергии и направлений их практического применения отражено в работах известных российских ученых Н.Е.Жуковского, Г.Х.Сабина, В.П.Ветчинкина, Ж.И.Алферова, В.П.Харитонов, П.П.Безруких, В.В.Елистратова, В.И.Виссарионова, О.С.Поппеля, Д.С.Стребкова, В.Г.Николаева и др. Разработке и совершенствованию автономных систем электроснабжения посвящены работы Д.А.Бута, В.А.Балагурова, Л.М.Паластина, Ф.Ф.Галтеева, А.А.Малоземова, Б.В.Лукутина и др. Однако, научные и технические проблемы, связанные с объединением в составе единой изолированной энергетической системы разнотипных энергетических установок остаются во многом нерешенными.

Основной технической проблемой, возникающей при практическом использовании установок возобновляемой энергетики в составе изолированных энергетических систем, является необходимость согласования режимов производства и потребления энергии. Соизмеримость мощностей генерирующих источников и потребителей в автономных системах электроснабжения приводит к ухудшению качества выходного напряжения в периоды пиков электрической нагрузки, неэффективному использованию природной возобновляемой энергии, снижает общий уровень надежности электроснабжения потребителей.

Большинство, находящихся в эксплуатации и предлагаемых на рынке автономных энергетических систем, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ), являются технически законченными изделиями, адаптированными под строго определенный тип энергетического оборудования, не допускают расширения их функциональных возможностей и наращивания мощностей за счет подключения новых генерирующих установок. Такая ситуация обусловлена главным образом тем обстоятельством, что параметры генерируемой электроэнергии установками возобновляемой энергетики существенно различаются по основным техническим показателям, таким как род тока, частота и величина выходного напряжения.

Отсутствие на рынке возобновляемой энергетики универсальных технических устройств, обеспечивающих возможность объединения в рамках единой энергетической системы разнотипных энергетических установок с возможностью эффективного управления режимами их работы, является негативным фактором развития малой энергетики России и в то же время актуальной научной и технической задачей для практического решения.

Создание комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии требует решения **научной проблемы** управления процессами преобразования и распределения энергии в изолированных энергетических системах с генерирующими установками различной физической природы по определенным законам, обеспечивающим их высокую энергетическую эффективность, имеющей важное социально-экономическое значение для децентрализованных регионов страны.

Научные исследования проводились в рамках реализации федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.», «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 гг.», единого заказ-наряда Минобразования РФ в 2004-2009 гг..

Объектом исследования являются комбинированные автономные системы электроснабжения на основе ветровых, солнечных и дизельных электростанций.

Предмет исследования: физические процессы генерирования, преобразования и передачи энергии в комбинированных автономных системах электроснабжения потребителей с возобновляемыми источниками энергии,

энергетические параметры и режимы работы генерирующих и преобразовательных установок изолированных энергетических систем.

Цель работы состоит в разработке научного обоснования, технических и технологических решений по повышению эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения, использующих ДЭС и электроустановки возобновляемой энергетики.

Идея работы заключается в создании универсального энергетического комплекса, обеспечивающего возможность рационального объединения в составе изолированной электроэнергетической системы разнотипных электрических станций и формирование эффективных режимов их работы в зависимости от временных изменений доступной генерируемой и потребляемой мощности.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе определены и решены следующие **задачи**:

- выполнен технико-экономический анализ автономных систем электроснабжения децентрализованных потребителей на основе типовых ДЭС и определены пути повышения их эффективности;
- разработана концепция построения комбинированных автономных систем электроснабжения малой мощности с возобновляемыми источниками энергии;
- разработаны математические модели энергетических процессов преобразования и распределения потоков энергии в изолированных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии, позволяющие проводить анализ энергетических характеристик и синтезировать эффективные алгоритмы управления рабочими режимами генерирующих установок;
- разработаны перспективные технические и технологические решения, обеспечивающие повышение энергетической эффективности автономных дизельных электростанций;
- теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность перевода рабочего режима автономной дизель-генераторной установки с постоянной частоты вращения на переменную, оптимизированную по величине электрической нагрузки электростанции;
- разработана, спроектирована и реализована в действующей полунатурной модели дизель-генераторная установка, работающая на переменной частоте вращения;
- выполнены теоретические и экспериментальные исследования рабочих режимов комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии;
- обоснована структура и разработана стратегия управления режимами комбинированных автономных энергетических комплексов с установками возобновляемой энергетики;
- разработана, спроектирована и реализована в действующем экспериментальном образце система буферного накопления энергии,

предназначенная для согласования режимов производства и потребления электроэнергии в изолированных энергетических системах, включающих несколько независимых генерирующих установок различной физической природы;

- разработаны методики выбора и оценки технико-экономической эффективности применения установок возобновляемой энергетики в комбинированных автономных системах электроснабжения.

Используемые в работе **методы исследования** базируются на общепринятой теории электромеханического преобразования энергии, общей теории сложных технических систем, вероятностно-статистических методов анализа данных; теории автоматического управления, математического моделирования и оптимизации, численных и натуральных экспериментов.

Достоверность научных положений подтверждена сопоставлением с результатами других аналогичных исследований, соответствием результатов имитационного компьютерного и полунатурного моделирования установившихся и динамических режимов комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии.

Научную новизну имеют следующие положения, выносимые на защиту:

1. Концепция построения комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, позволяющая объединять в составе единой изолированной энергетической системы разнотипные энергетические установки различной физической природы с генерирующими мощностями отдельных агрегатов до 100 кВт.
2. Вероятностно-статистические математические модели компонентов комбинированных автономных систем электроснабжения, построенные на базе их энергетических характеристик, позволяющие исследовать и оптимизировать их рабочие режимы и синтезировать эффективные алгоритмы управления.
3. Метод моделирования механических характеристик ветротурбин малой мощности по данным их технической спецификации, учитывающий конструктивные и геометрические особенности моделируемых ветродвигателей.
4. Способы управления рабочими режимами автономной дизельной электростанцией по прогнозному графику электрических нагрузок, обеспечивающие экономию дизельного топлива и увеличение эксплуатационного ресурса дизельных двигателей.
5. Впервые выявлены качественные и количественные характеристики эксплуатационных, экологических и эргономических показателей ДЭС при работе на переменной частоте вращения, установлена универсальная функциональная зависимость частоты вращения вала дизеля от электрической нагрузки дизель-генератора, обеспечивающая минимальный расход топлива.

6. Методика технико-экономического анализа характеристик ветродизельных электростанций с буферным накопителем энергии, обеспечивающая рациональный выбор основного генерирующего оборудования.

Новизна результатов подтверждена авторскими свидетельствами и патентами.

Практическую ценность работы составляют разработанные технические и технологические решения, обеспечивающие создание энергетически эффективных систем автономного электроснабжения потребителей, которые по своим техническим характеристикам не уступают лучшим зарубежным и отечественным объектам-аналогам, но обладают большими функциональными возможностями. Полученные результаты могут быть использованы разработчиками и производителями оборудования для установок возобновляемой энергетики, а также предприятиями, занимающимися вопросами энергообеспечения удаленных децентрализованных регионов России.

Личный вклад автора. Диссертация является результатом самостоятельных исследований автора, которые проводились под его руководством или с непосредственным участием. Все научные положения и результаты, определяющие научную новизну и практическую ценность работы, получены соискателем лично. Личное участие автора подтверждено публикациями и выступлениями на конференциях. В опубликованных в соавторстве печатных работах, автору принадлежит научное обоснование принятых технических решений; разработка математических моделей, методик и алгоритмов; анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции «Возобновляемая энергетика в изолированных системах Дальнего Востока России» (г.Якутск, 2013 г.), XII Международной научной конференции «Интеллект и наука» (г.Железногорск, 2012 г.), V Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (г.Томск, 2012 г.), II Международной конференции по возобновляемым источникам энергии и альтернативным видам топлива «REenergy» (г.Москва, 2011 г.), Международной конференции «Эффективная генерация энергии» (г.Москва, 2011 г.), научно-практической конференции «Локальная энергетика: опыт, проблемы, перспективы развития» (г.Якутск, 2010 г.).

Реализация результатов работы. Полученные результаты работы нашли практическое применение при разработке, проектировании и изготовлении технологических элементов системы автоматического управления ДЭС на переменной частоте вращения по договору № 05-1/12-АЭ от 01.07.2012 г. с ОАО «Сахаэнерго»; при разработке, проектировании, изготовлении и испытаниях экспериментального образца гибридной системы

буферного накопления энергии по госконтракту № 16.516.11.6033 от 21.04.2011 г. с Минобрнауки РФ; при разработке схем контроллера системы управления ветро-дизельной электростанцией по госконтракту №П627 от 18.05.2010 г. с Минобрнауки РФ; при разработке способов управления рабочими режимами автономной дизельной электростанцией по прогнозному графику электрических нагрузок по договору № 7-205/10 от 01.09.10 г. с ОАО «Сахаэнерго»; при выполнении работ по договорам № 7-156-159/07 от 29.08.07 г. с ГУ «Кузбасский центр энергосбережения».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 46 печатных работах, в том числе 4 монографиях, 26 статьях в изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК РФ, 7 патентах на изобретения и полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертационная работа объемом 340 страниц основного текста, состоит из введения, шести глав, заключения, 4 приложений, списка использованных источников из 180 наименований; содержит 31 таблицу и 132 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи работы, обозначены новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен сравнительный анализ систем автономного электроснабжения децентрализованных потребителей и определены пути повышения их энергетической эффективности, из которых наиболее перспективными являются: использование в энергетическом балансе регионов возобновляемых источников энергии и оптимизация режимов работы основного энергетического оборудования, в том числе перевод ДГ на переменную частоту вращения в зависимости от электрической нагрузки ДЭС.

Климатические и географические особенности децентрализованных зон определяют практическую возможность использования из всех видов возобновляемых энергоресурсов только энергию ветра и солнечного излучения. Непостоянство энергии, вырабатываемой установками возобновляемой энергетики, приводит к необходимости их дублирования гарантированным энергетическим источником, в качестве которого целесообразно использовать действующие ДЭС. Стохастический характер нагрузки потребителя и энергии, вырабатываемой установками возобновляемой энергетики, требует присутствия в составе автономной системы электроснабжения буферного накопителя энергии и специализированной системы управления, способной обеспечить энергетически эффективный режим работы всего энергетического комплекса.

Установлено, что наиболее востребованной областью использования технологий возобновляемой энергетики в условиях России являются мелкие изолированные энергетические системы с единичной установленной мощностью генерирующего оборудования до 100 кВт.

Сформулированы требования, предъявляемые к комбинированным системам автономного электроснабжения, анализ которых показал, что для создания энергетически эффективных комбинированных систем автономного электроснабжения на базе существующих ДЭС небольшой мощности, необходимо решить техническую проблему их сопряжения с энергетическими установками возобновляемой энергетики.

Сравнительный анализ возможных способов сопряжения установок возобновляемой энергетики и ДЭС показал, что при мощностях генерирующих установок до 100 кВт наиболее универсальным является способ с использованием промежуточной шины постоянного тока и двойным преобразованием электроэнергии.

Предложена концепция построения комбинированных систем автономного электроснабжения (рис.1), включающая промежуточную шину постоянного тока (ШПТ), к которой через индивидуальные преобразователи (Пр) подключаются энергетические установки (ЭУ) и буферная система накопления энергии (БНЭ), которая выполняет все основные функции по распределению и управлению потоками энергии в изолированной энергетической системе.

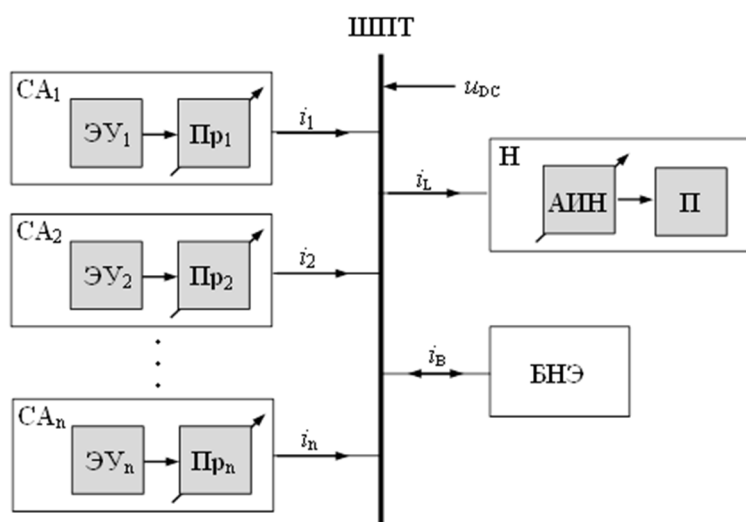


Рисунок 1 – Структурная схема комбинированной системы автономного электроснабжения со вставкой постоянного тока

Автономная система электроснабжения, в общем случае, состоит из произвольного числа силовых агрегатов (СА), которые могут быть построены на различных физических принципах преобразования энергии. Нагрузка (Н) в данной системе представлена в виде потребителя (П), получающего электроэнергию с требуемыми параметрами через трехфазный управляемый автономный инвертор напряжения (АИН). В общем случае количество блоков (Н)

в системе может быть произвольным. Также могут быть потребители, непосредственно подключенные к вставке постоянного тока.

Система управления БНЭ должна обеспечивать отбор мощности в накопитель в моменты ее избытка и отдачу мощности при ее нехватке в системе, обеспечивая оптимальные режимы заряда первичных накопителей энергии и контроль их текущей емкости. Здесь система БНЭ выполняет не только роль накопителя как такового, но и обеспечивает управление потоками мощности в системе.

Предложенная концепция построения комбинированных систем автономного электроснабжения защищена патентом РФ [31] и обладает следующими конкурентными преимуществами:

- возможность включения в состав системы любой автономной энергетической установки независимо от установленного силового оборудования;
- эффективное использование потенциала первичных энергоносителей установками возобновляемой энергетики;
- модульный принцип построения, обеспечивающий простое изменение конфигурации энергетической системы в соответствии с требованиями потребителя.

Предложенная концепция предполагает разработку и создание достаточно сложной системы управления комплексом, обеспечивающей выполнение ряда специализированных функций. Большинство элементов разрабатываемой энергетической системы характеризуются нелинейными параметрами, часть из которых имеют явно выраженный стохастический характер.

Сложность объекта изучения предопределила формулировку поставленных задач исследования, которые предполагают разработку математических моделей и методов исследования энергетических процессов преобразования и распределения потоков энергии в изолированных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии, позволяющие исследовать и оптимизировать их рабочие режимы и синтезировать эффективные алгоритмы управления.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей и методов исследования энергетических процессов преобразования и распределения потоков энергии в изолированных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии, позволяющих проводить анализ энергетических характеристик и разрабатывать перспективные технические и технологические решения, обеспечивающих повышение их энергетической эффективности.

Обобщенная структурная схема модели комбинированной системы автономного электроснабжения с установками возобновляемой энергетики и системой буферного накопления электроэнергии представлена на рисунке 2.

В процессе выполнения исследований были разработаны математические модели 4 типов генерирующих установок:

ДЭС – модель дизельной электростанции, которая включает модель дизельного двигателя (ДД) и модель синхронного генератора с электромагнитным возбуждением (СГ);

ВЭУ – модель ветроэнергетической установки: включает модель ветра (В), модель ветротурбины малой мощности (ВТ), модель синхронного генератора на постоянных магнитах (СГПМ);

ФЭС – модель фотоэлектрической станции: включает модель солнечной радиации (СР) и модель солнечной батареи (СБ);

БНЭ – модель буферного накопителя электроэнергии: включает модель аккумуляторной батареи (АБ).

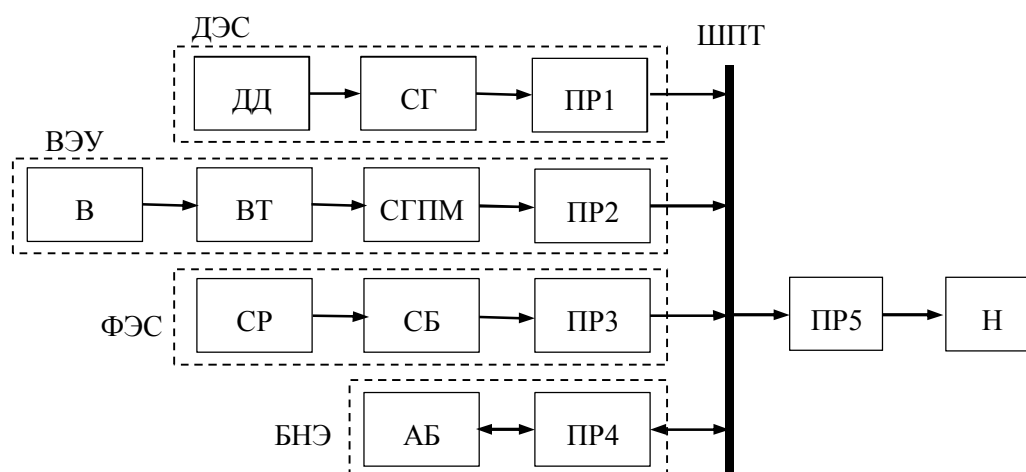


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема модели комбинированной системы автономного электроснабжения

Все генерирующие установки работают на общую шину постоянного тока (ШПТ), к которой через преобразователь (ПР5) подключается электрическая нагрузка, имитирующая объект автономного потребления электрической энергии (Н).

Для каждой генерирующей установки используется индивидуальный преобразователь электрической энергии (ПР1-ПР4), обеспечивающий ее подключение к шине постоянного тока.

Разноплановость, решаемых при выполнении настоящей работы задач, потребовала создания целого комплекса разнотипных моделей, направленных на решение конкретных проблем.

Для изучения и исследования баланса мощностей в изолированной энергетической системе были разработаны простые «энергетические» модели компонентов комплекса, основанные на математических соотношениях, связывающих их входные параметры с выходными энергетическими характеристиками. Данный вид моделей позволяет проводить исследования установившихся рабочих режимов разрабатываемой системы на длительных временных интервалах, и использовался в работе для решения задач рационального выбора основного энергетического оборудования, проведения технико-экономического анализа, разработки эффективных алгоритмов формирования рабочих режимов электростанции.

Для разработки систем автоматического регулирования, определения параметров и настройки регуляторов использовались динамические модели компонентов, построенные на основе дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы преобразования энергии. Данный класс моделей позволяет проводить исследования переходных режимов работы компонентов электротехнического комплекса, при этом математические модели являются достаточно сложными, предполагают использование численных методов расчета, которые хорошо реализованы в программном комплексе

MATLAB Simulink, что предопределило его выбор в качестве основного программного продукта при проведении исследований.

Для описания физических процессов, имеющих стохастическую природу: скорость ветра, интенсивность солнечной радиации и величина электрической нагрузки в зависимости от времени, разработаны вероятностно-статистические модели данных компонентов, основанные на известных статистических методах обработки экспериментальных данных.

Большая часть, математических моделей, используемых при выполнении исследований, являются оригинальными разработками автора.

Результаты научных исследований автора в области малой ветроэнергетики позволили разработать универсальный метод математического моделирования механических характеристик малых ветротурбин крыльчатого типа с горизонтальной осью вращения по данным их технической спецификации.

В основу предлагаемого метода моделирования положена теория реального ветродвигателя профессора Г.Х.Сабинина и результаты проведенных им экспериментальных исследований ветротурбин малой мощности.

Предлагаемый метод моделирования основан на допущениях, что углы заклинивания лопастей малых ветротурбин остаются неизменными вплоть до номинальной скорости ветра $V_{\text{ном}}$, а нормальная быстроходность ветроколеса Z_n соответствует максимально возможному для данного профиля лопасти коэффициенту использования энергии ветра C_{p_max} .

Для нахождения численного значения C_{p_max} нужно по имеющейся в технической спецификации рабочей характеристике ВЭУ $P_{wt}=f(V)$, построить в тех же осях графическую зависимость коэффициента использования энергии ветра C_p от скорости набегающего на ветроколесо воздушного потока V , рассчитав ее по выражению:

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{wt}}{\eta_{wt} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}, \quad (1)$$

где R – радиус ветроколеса; η_{wt} – полный коэффициент полезного действия ветродвигателя (с учетом КПД генератора и трансмиссии); P_{wt} – выходная электрическая мощность ВЭУ (Вт).

По построенному графику определяются значение оптимальной скорости ветра $V_{\text{опт}}$, соответствующее нормальной быстроходности Z_n , номинальная выходная электрическая мощность $P_{\text{ном}}$ и номинальная скорость ветра $V_{\text{ном}}$, которые обычно соответствуют точке начала аэродинамического регулирования (точка перегиба кривой мощности) и максимальная рабочая скорость ветра V_{max} , при которой ветродвигатель останавливают.

Величина коэффициента использования энергии ветра C_p в режиме нормальной быстроходности определяется коэффициентом торможения воздушного потока e , обратным качеством крыла μ и величиной нормального числа модулей Z_n . Все эти величины являются взаимозависимыми и их прямое аналитическое определение невозможно.

Однако, если использовать для количественной связи неизвестных параметров формулы для расчета потерь ветроколеса при фиксированном значении μ , и решив оптимизационную задачу на максимум по определению C_p , искомыми переменными в которой являются e и Z_n , можно определить максимальное значение коэффициента использования энергии ветра:

$$C_p = f(e, Z_n) \Rightarrow \max, \text{ при } \mu = \text{const} \quad (2)$$

Конечным результатом решения оптимизационной задачи являются численные значения Z_n , e и μ , определенные по данным технической спецификации ветротурбины.

По известным численным значениям C_{p_max} и Z_n , определяется действительная аэродинамическая характеристика моделируемого ветродвигателя, после чего строится семейство его механических характеристик.

Предложенный метод моделирования подробно описан в [9,12], был протестирован на ряде ВЭУ различного типоразмера и с разным числом лопастей и показал удовлетворительные результаты. Результаты моделирования не противоречат теоретической аэродинамике и хорошо согласуются с характеристиками ветродвигателей, полученных экспериментальным путем.

Предлагаемый метод моделирования достаточно прост в использовании, при этом в нем учитываются конструктивные и геометрические особенности моделируемых ветродвигателей, что выгодно отличает его от аналогов.

Расчетные мощностные и механические характеристики ветротурбины Scirocco E5.6-6, полученные с помощью предложенного метода, представлены на рис.3.

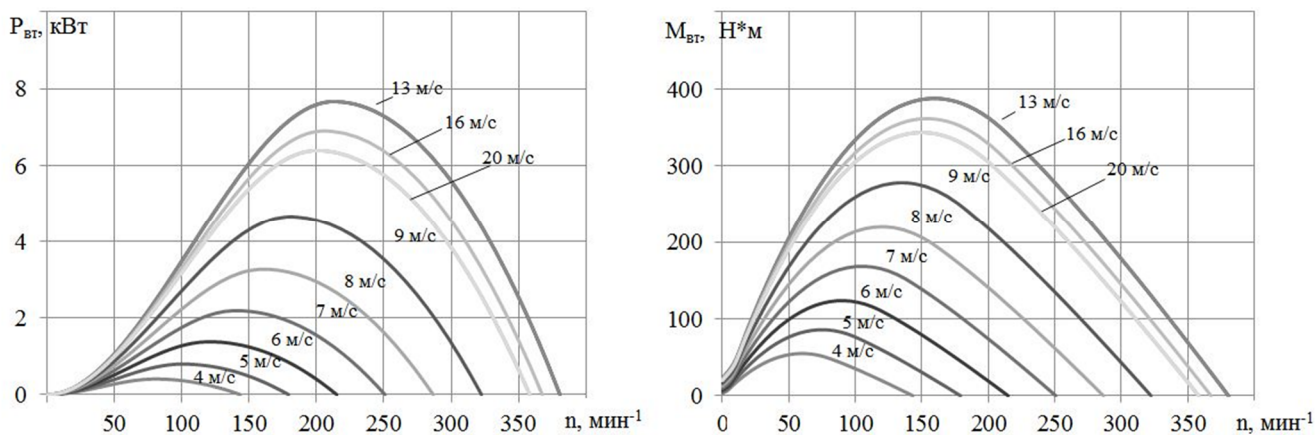


Рисунок 3 – Мощностные и механические характеристики ветротурбины Scirocco E5.6-6

Автором разработана оригинальная динамическая модель продольной составляющей скорости ветра, построенная на основе модели спектральной плотности Каймала, рекомендованной международными стандартами по ветроэнергетике [1,41].

В соответствии с моделью нормальной турбулентности, предполагается, что турбулентные флуктуации скорости ветра являются стационарным полем случайных векторов, составляющие которого имеют гауссово статистическое распределение с нулевым математическим ожиданием.

Спектральные плотности мощности составляющих в нормализованном виде для модели Каймала описываются уравнением:

$$\frac{f \cdot S(f)}{\sigma^2} = \frac{4 \cdot f \cdot L / \bar{V}}{(1 + 6 \cdot f \cdot L / \bar{V})^{5/3}}, \quad (3)$$

где f – частота в Гц; $S(f)$ – односторонний спектр продольной составляющей вектора скорости; σ – среднеквадратичное отклонение продольной составляющей вектора скорости; L – интегральный масштабный параметр турбулентности.

Спектральное разложение изображает стационарную случайную функцию разложенной на гармонические колебания различных частот $f_1, f_2, \dots, f_k, \dots$, при этом амплитуды гармоник являются случайными величинами.

Согласно теореме Фурье любую функцию с периодом π можно представить в виде ряда:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (4)$$

где A_k – амплитуда k -го гармонического колебания; ω_k – круговая частота гармонического колебания; φ_k – начальная фаза k -го колебания; A_0 – свободный член, представляющий собой математическое ожидание функции на интервале π .

С другой стороны дисперсия стационарной случайной функции равна сумме дисперсий всех гармоник ее спектрального разложения:

$$D = \sigma^2 = \int_0^{\infty} S(f) \cdot df = \sum_{k=0}^{\infty} D_k = \sum_{k=0}^{\infty} S(f_k) \cdot \Delta f \quad (5)$$

Если использовать один и тот же набор частот для спектрального разложения функции и ряда Фурье, то из (4)-(5) следует, что амплитуда k -го гармонического колебания ряда Фурье будет равна среднеквадратическому отклонению соответствующей гармоники спектра:

$$A_k = \sqrt{D_k} = \sqrt{S(f_k) \cdot \Delta f}, \quad (6)$$

где Δf – расстояние между соседними частотами.

Выполнив преобразования и перейдя к конечному числу частот N , получим уравнение для продольной составляющей скорости ветра, определенной на временном интервале T :

$$V(t) = \bar{V} + \sum_{k=1}^N A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (7)$$

где $\bar{V}$ – скорость ветра, осредненная на 10-ти минутном временном интервале.

В выражении (7) время моделирования T соответствует полупериоду основной гармоники: $T=\pi$, соответственно число N определяет частоту дискретизации временного сигнала:

$$\Delta t = \frac{T}{N}; \quad \Delta \omega = \frac{\pi}{T}; \quad \Delta f = \frac{1}{2 \cdot T}; \quad t = k \cdot \Delta t \quad k=1 \dots N \quad f_k = \frac{k}{2 \cdot T} \quad (8)$$

Выражения (3)-(8) позволяют построить имитационную временную модель продольной составляющей скорости ветра, по известным спектральным параметрам турбулентности, которые определяются в соответствии с требованиями, заданными в стандартах по ветроэнергетике.

На рис.4 приведен пример моделирования продольной составляющей скорости ветра на временном интервале 40 секунд с дискретизацией 0.1 с.

Моделирование проводилось при следующих условиях: средняя скорость ветра $\bar{V} = 6.0$ м/с, интенсивность турбулентности $I_{\text{ref}} = 0.16$, высота оси вращения ветроколеса $\bar{V}_{hub} = 15$ м.

Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с результатами исследований других авторов, занимающихся разработкой математических моделей ветра для ветроэнергетики. Предлагаемая модель имеет простую структуру, легко реализуется средствами простых прикладных программ и может найти практическое применение в научных исследованиях, посвященных малой ветроэнергетике.



Рисунок 4 – Результаты моделирования продольной составляющей скорости ветра

С непосредственным участием автора разработана имитационная модель дизельного двигателя, построенная по результатам его экспериментальных испытаний или имеющимся каталожным данным [5]. Модель обеспечивает адекватное воспроизведение рабочих характеристик дизеля на переменной частоте вращения, и легко интегрируется в состав

полной модели автономного энергетического комплекса для поиска и разработки эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих уменьшение расхода органического топлива.

Автором предложена «упрощенная» модель синхронного генератора в виде обобщенной внешней характеристики и разработан алгоритм ее реализации [10]. Модель обеспечивает расчет точки внешней характеристики (выходных данных – напряжения и тока) при заданных входных параметрах (величины нагрузки, тока возбуждения и частоты вращения) и расчет КПД. Модель учитывает реальную кривую намагничивания и параметры

синхронного генератора и позволяет анализировать влияние входных факторов на показатели рабочего режима.

Автором разработаны имитационная модель автономного потребителя электроэнергии и инженерная методики расчета прогнозных режимов электропотребления автономными энергетическими системами [14]. Предлагаемая инженерная методика расчета позволяет выполнить прогноз режимов электропотребления автономных энергетических систем при минимуме исходных данных. С ее помощью можно определить не только годовой объем потребленной электроэнергии, но и рассчитать суточные графики электрических нагрузок в любой день года с почасовой дискретизацией, зимний и летний максимумы нагрузок отдельно для каждой группы потребителей.

Третья глава посвящена разработке технических и технологических решений, обеспечивающих повышение энергетической эффективности автономных систем электроснабжения, построенных на базе общепромышленных дизельных электростанций.

Ввиду значительного различия ДЭС по составу основного генерирующего оборудования и режимам работы, представляется целесообразным их условное разделение на два подкласса: малой и большой мощности. К первому классу ДЭС отнесены электростанции с единичной мощностью силовых агрегатов до 100 кВт, ко второму электростанции с дизель-генераторами, номинальной мощностью более 100 кВт.

Для многоагрегатных ДЭС большой мощности с участием автора разработана методика, позволяющая определять необходимый типоразмер и количество рабочих силовых агрегатов [20]. В качестве критерия оптимизации используется минимум приведенных годовых затрат на выработку электрической энергии. Отличительной особенностью методики является возможность задания в расчетах требуемого уровня надежности электроснабжения потребителей. Предлагаемая методика апробирована в ОАО «Сахаэнерго», доказала свою эффективность и простоту в применении. Методика является универсальной и может быть использована для оптимизации состава генерирующего оборудования автономных дизельных электростанций, работающих в любых условиях эксплуатации.

По заказу ОАО «Сахаэнерго» с участием автора разработана методика рационального выбора оперативного резерва мощности автономных дизельных электростанций [16]. Методика внедрена в ОАО «Сахаэнерго» и используется для определения резерва мощности вновь проектируемых и действующих ДЭС.

Автором предложена схема построения ДЭС с автоматизированной системой оперативного управления режимами по прогнозному графику электрических нагрузок, обеспечивающая экономию топлива и оптимизацию рабочих режимов дизель-генераторов. Идея данного технического решения заключается в использовании прогнозных функциональных зависимостей между температурой, суточной выработкой электроэнергии и суточным

максимумом нагрузки автономной ДЭС, для оптимизации рабочих режимов дизель-генераторных установок.

Структурная схема построения ДЭС с автоматизированной системой оперативного управления режимами представлена на рисунке 5.

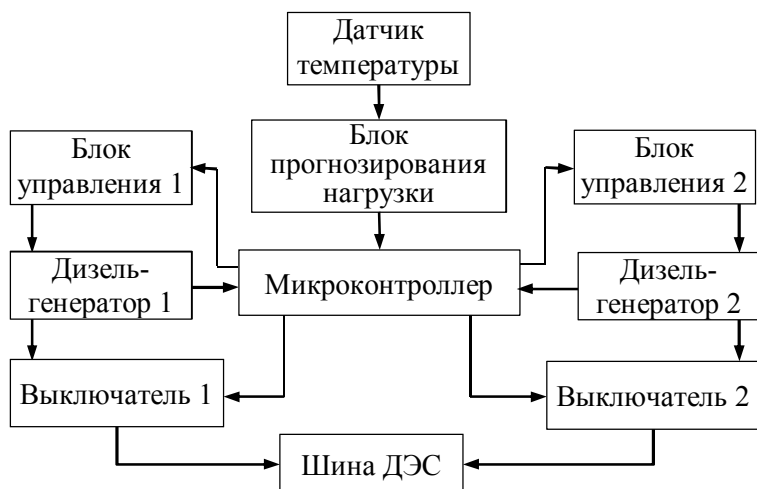


Рисунок 5 – Структурная схема построения ДЭС с системой оперативного управления режимами

Автономная система электроснабжения содержит два и более дизель-генераторов различного типоразмера, допускающих их включение на параллельную работу.

На основании измеренной температуры окружающей среды блок прогнозирования нагрузки определяет прогнозную мощность нагрузки ДЭС, в соответствии с которой микроконтроллер рассчитывает необходимое количество и тип

рабочих ДГ, которые обеспечат ее покрытие с минимальным удельным расходом топлива. С помощью соответствующих блоков управления и выключателей производится автоматический ввод/вывод ДГ в/из работы.

Положительный эффект в предлагаемом устройстве достигается за счет того, что система оперативного управления обеспечивает автоматическое распределение нагрузки между силовыми агрегатами. Так как температура окружающего воздуха с течением времени изменяется плавно, из процесса работы ДЭС исключаются режимы, при которых происходят частые пуски и остановки дизель-генераторов, и они работают в режимах, близких к номинальным. В результате происходит снижение расхода топлива и оптимизация режимов работы дизель-генераторных установок.

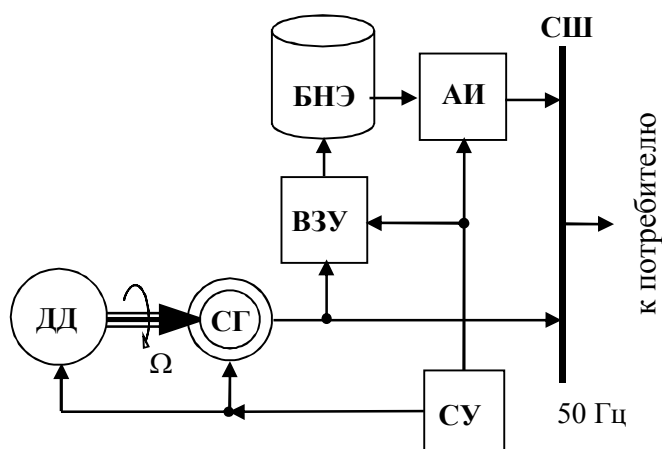


Рисунок 6 – Структурная схема ДЭС с буферным накопителем энергии

Структурная схема построения ДЭС с автоматизированной системой оперативного управления режимами защищена патентом РФ на полезную модель [32] и внедрена в ОАО «Сахазнерго».

Для ДЭС малой мощности предложена схема электростанции с буферным накопителем энергии, рис.6.

Стратегия управления электростанцией предлагаемого типа заключается в поддержании режима загрузки дизельного

двигателя на уровне средней мощности нагрузки $P_{\text{ср}}$. При этом в режимах, когда выходная мощность дизель-генератора превышает мощность нагрузки, избыток энергии аккумулируется в буферном накопителе энергии (БНЭ), а в режимах, когда выходная мощность дизель-генератора меньше мощности нагрузки, энергия из накопителя отдается потребителю. Для согласования электрических параметров отдельных элементов системы и обеспечения процессов заряда/разряда накопителя, схему ДЭС необходимо дополнить выпрямительно-зарядным устройством (ВЗУ) и автономным инвертором (АИ), управление которыми обеспечивается системой управления (СУ).

Принцип работы электростанции данного типа поясняет рис.7, в котором на вероятностно-статистический суточный график нагрузки автономного потребителя нанесены прямые, соответствующие необходимой номинальной мощности ДГ при исполнении ДЭС, построенной по стандартной схеме ($P_{\text{ном1}}$), и предложенной ($P_{\text{ном2}}$). Для удобства анализа значения активной мощности представлены на графике в относительных единицах, в которых за базисную мощность принята величина максимальной электрической нагрузки $P_{\text{max}}=1.0$.



Рисунок 7 – Вероятностно-статистический суточный график нагрузки сельских жилых домов

Выполненный технико-экономический анализ показал, что использование в ДЭС буферного накопителя энергии обеспечивает до 15 % экономии топлива в сравнении с ДЭС общепромышленного типа.

Предлагаемая схема построения ДЭС малой мощности защищена патентом РФ [33] и может быть использована в системах автономного электроснабжения потребителей.

В четвертой главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ДЭС с переменной частотой вращения.

Важнейшим показателем энергетической эффективности ДЭС является удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч электрической энергии. С учетом того, что основную долю затрат в себестоимости вырабатываемой ДЭС электроэнергии составляют затраты на топливо, именно этот показатель является определяющим.

Выполненный анализ энергетических характеристик промышленных ДЭС показал, что заложенные в логику их работы принципы управления, не обеспечивают минимума расхода топлива при изменении электрической нагрузки станции. Повысить эффективность ДЭС можно путем перевода режима работы дизельного двигателя с постоянной частоты вращения на переменную, с применением для управления станцией специализированных регуляторов. Необходимо отметить, что при переводе ДГ на переменную частоту вращения, параметры выходного напряжения, вырабатываемого синхронным генератором, меняются. Для обеспечения заданных параметров выходного напряжения ДЭС требуется введение в систему различных преобразовательных устройств, что усложняет систему.

Проведенный сравнительный анализ научных работ в области построения ДЭС с переменной частотой вращения показал, что для ДЭС небольшой мощности (единичная мощность ДГ до 100 кВт) предпочтительной является схема с использованием промежуточной вставки постоянного тока. Дополнительными преимуществами ДЭС такого типа являются более простая интеграция в комбинированные системы автономного электроснабжения с установками возобновляемой энергетики, кроме того их можно реализовать, используя модульный принцип построения.

Результаты теоретических исследований показали, что перевод дизельного двигателя на переменную частоту вращения позволяет сократить удельный расход топлива на выработку одного кВт·ч электроэнергии до 20...30%. Конкретное значение зависит от параметров графика нагрузки автономного потребителя и используемого генерирующего оборудования.

Для проверки адекватности результатов теоретических исследований на базе дизельной электростанции Kipor KDE12EA3 была собрана экспериментальная установка. В состав электростанции KDE12EA3 входит четырехтактный дизельный двигатель KM2V80 и синхронный генератор с электромагнитным возбуждением KTS12. Выбор данной модели электростанции обоснован тем, что ее дизель имеет относительно небольшую мощность (12.0 кВт), но полноценную жидкостную систему охлаждения.

Функциональная схема экспериментальной установки с размещенными датчиками и контрольно-измерительными приборами представлена на рисунке 8. Экспериментальная установка позволяет воспроизводить рабочие режимы ДГ с фиксацией всех его основных эксплуатационных, электрических, экологических и эргономических параметров.

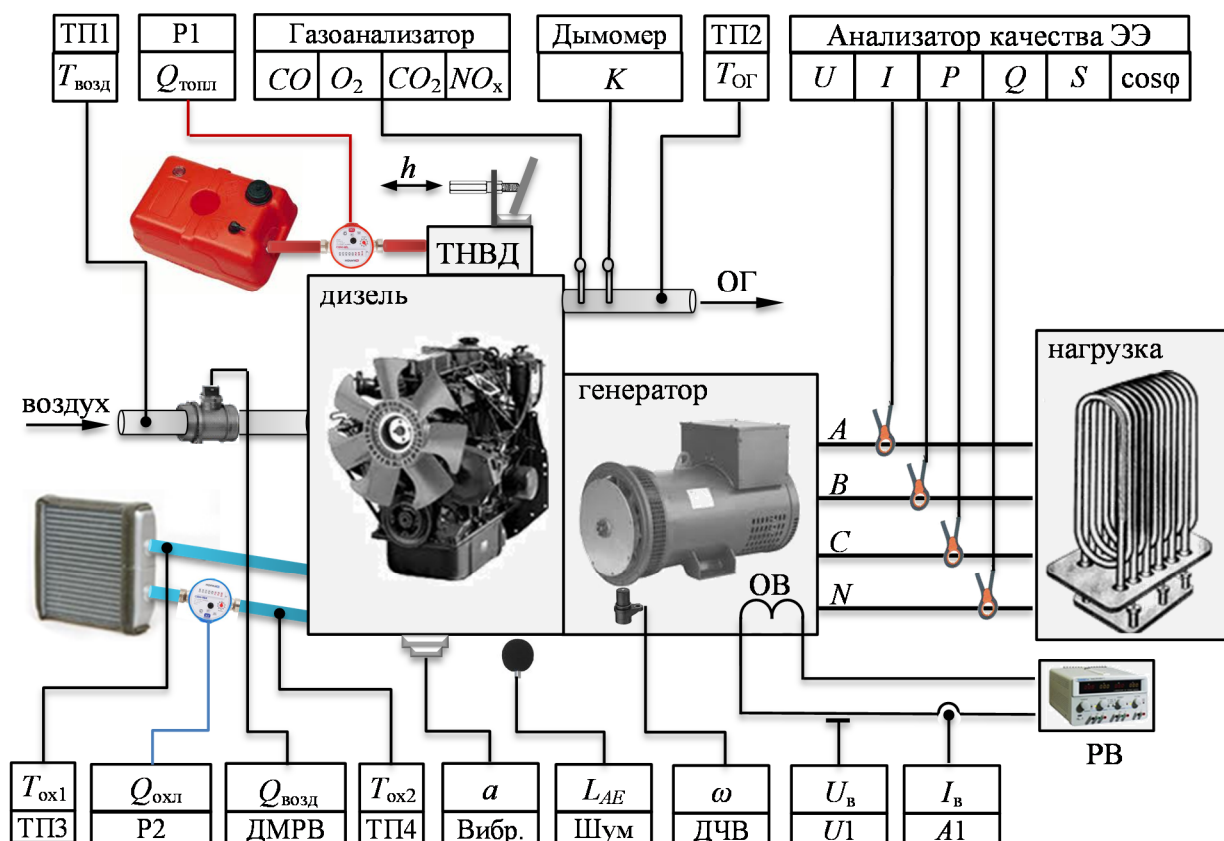


Рисунок 8 – Функциональная схема экспериментальной установки

Была разработана программа экспериментальных исследований, которая включала определение основных характеристик ДГ при работе на постоянной и переменной частотах вращения.

При проведении экспериментов по определению характеристик ДЭС, работающей на переменной частоте вращения, в стандартную конструкцию ДГ были внесены необходимые изменения:

- цепь возбуждения синхронного генератора запитана от независимого источника питания (РВ);
- рейка топливного насоса высокого давления (ТНВД) для каждого опыта выставлялась в новое положение.

Для характеристики положения регулировочного винта приняты следующие обозначения: h_0 – рейка топливного насоса находится в исходном положении (заводская установка); h_4 – рейка топливного насоса смещена на 4 мм от исходного положения в сторону уменьшения цикловой подачи топлива.

Сравнительные энергетические характеристики ДЭС, работающей в стандартном режиме ($n=\text{const}$), и на переменной частоте вращения, оптимизированной по расходу топлива ($n=\text{var}$), представлены на рисунке 9.

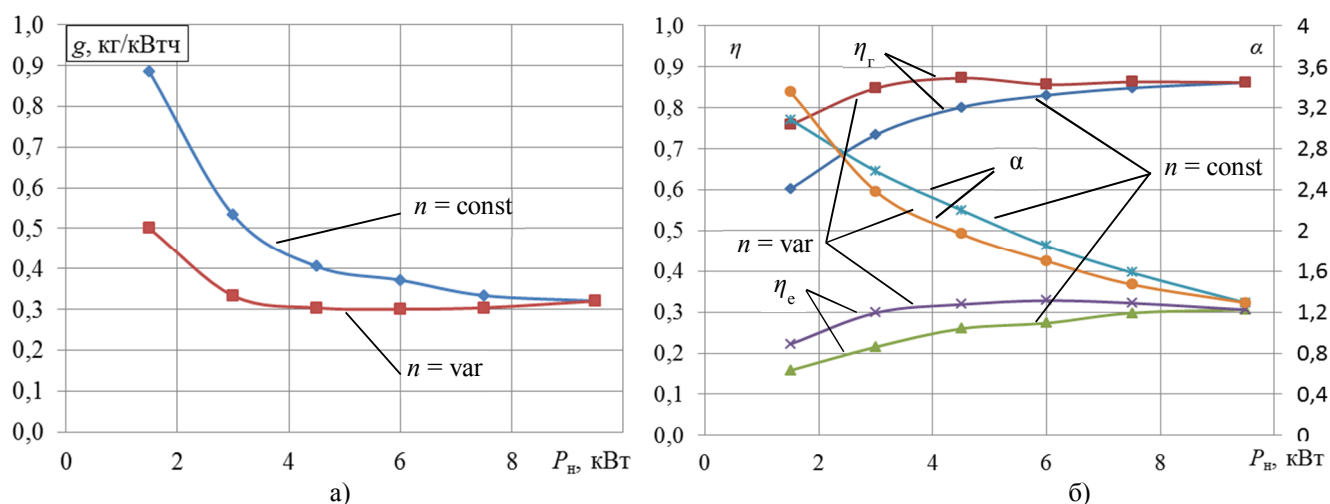


Рисунок 9 – Сравнительные энергетические характеристики ДЭС KDE12EA3 с постоянной и переменной частотой вращения

а) – удельный расход топлива g ; б) – КПД генератора η_g , дизеля η_e и коэффициент избытка воздуха α

Из рисунка 9 видно, что перевод ДГ на переменную частоту вращения обеспечивает экономию топлива во всем диапазоне рабочих режимов, при этом максимальная экономия достигается в режимах малых нагрузок.

Уменьшение удельного расхода топлива в ДЭС с переменной частотой вращения обеспечивается за счет снижения механических потерь в дизельном двигателе, повышения КПД генератора η_g и эффективного КПД дизеля η_e .

Повышение КПД преобразования энергии в электрической машине при эксплуатации на пониженных частотах вращения объясняется кардинальным изменением структуры потерь: уменьшаются потери в стали $P_{ст}$ и механические потери $P_{мех}$, но при этом увеличиваются потери в обмотке возбуждения P_v и цепи якоря P_a (влияние дополнительных потерь $P_{доб}$ на общий баланс незначительно).

Процентная структура потерь в генераторе KTS12 для нагрузки 3.0 кВт (31.5% от номинальной мощности) представлена на рисунке 10.

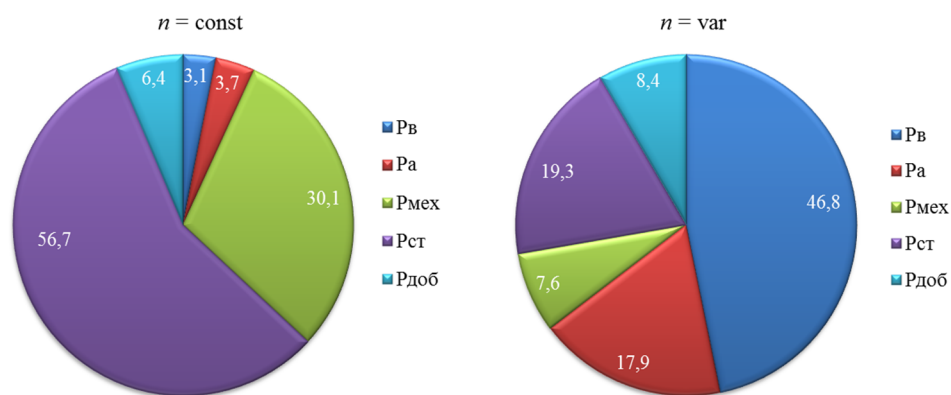


Рисунок 10 – Структура потерь в генераторе KTS12 при нагрузке 3.0 кВт

В ДЭС, работающей на постоянной частоте вращения, потери в стали и механические потери остаются практически неизменными на всех долевых режимах нагрузки, а потери в цепи возбуждения и якоря с уменьшением нагрузки падают. В режиме номинальной мощности СГ доля механических потерь составляет 18.7%, потерь в стали 37.1% от суммарных потерь, в режимах малых нагрузок эти потери становятся определяющими.

В ДЭС, работающей на переменной частоте вращения, с уменьшением нагрузки уменьшается рабочая частота, что приводит к снижению потерь в стали и механических потерь. Снижение частоты приводит также к уменьшению основного магнитного потока в электрической машине, что требует увеличения тока обмотки возбуждения. Величина тока возбуждения ограничена тепловым состоянием обмотки и не может превышать максимальных значений, определяемых конструктивным исполнением машины. Проведенные эксперименты показали, что при частотах вращения ниже 40 Гц обеспечить номинальную величину выходного напряжения невозможно даже при максимальном токе возбуждения. Соответственно, на долевых режимах малых нагрузок при частотах ниже 40 Гц величина тока возбуждения и потери в этой цепи будут неизменными и максимальными. Пониженная величина выходного напряжения в режимах малых нагрузок приводит к увеличению тока в обмотках якоря в сравнении со стандартным режимом эксплуатации СГ, вызывая увеличение доли потерь в обмотках якоря.

В режиме номинальной мощности СГ потери в цепи возбуждения составляют не более 16% от суммарных потерь, что и объясняет увеличение общего КПД генератора при его эксплуатации на пониженных частотах вращения. Так для рассматриваемого долевого режима нагрузки 3.0 кВт, суммарные потери составили 1.06 и 0.54 кВт для ДЭС с постоянной и переменной частотой вращения, соответственно.

Повышение эффективного КПД η_e преобразования энергии в ДЭС с переменной частотой вращения обеспечивается лучшим качеством горючей смеси на долевых режимах. Качество смесеобразования во многом определяет коэффициент избытка воздуха α , величина которого в современных дизелях колеблется в пределах от 1.2 до 1.8 (зависит от типа камеры сгорания и наддува). Как правило, производители обеспечивают оптимальные значения α на долевых режимах, составляющих около 80% от номинальной мощности дизеля.

В ДЭС с постоянной частотой вращения расход воздуха остается практически неизменным на всех долевых режимах нагрузки, стабилизация рабочего режима ДГ обеспечивается изменением только цикловой подачи топлива, обратно пропорционально которой изменяется величина α (см. рис.9,б). В ДЭС с переменной частотой вращения при уменьшении величины нагрузки вместе с изменением цикловой подачи уменьшается и частота вращения, а соответственно и расход воздуха, благодаря чему значения α на долевых режимах будут несколько меньшими. В исследуемом дизеле применена разделенная камера сгорания с вихревой камерой, и наилучшие

условия смесеобразования обеспечиваются при значениях $\alpha \approx 1.4$. При работе ДГ с переменной частотой вращения значения α для большинства частичных режимов нагрузки будут ближе к оптимальным значениям, в сравнении с общепромышленной ДЭС.

Проведенные исследования показывают, что перевод ДЭС на переменную частоту вращения улучшает ее экологические показатели. На рисунке 11 показаны сравнительные показатели выбросов вредных веществ ДЭС при работе на постоянной ($n=\text{const}$) и переменной ($n=\text{var}$) частотах вращения.

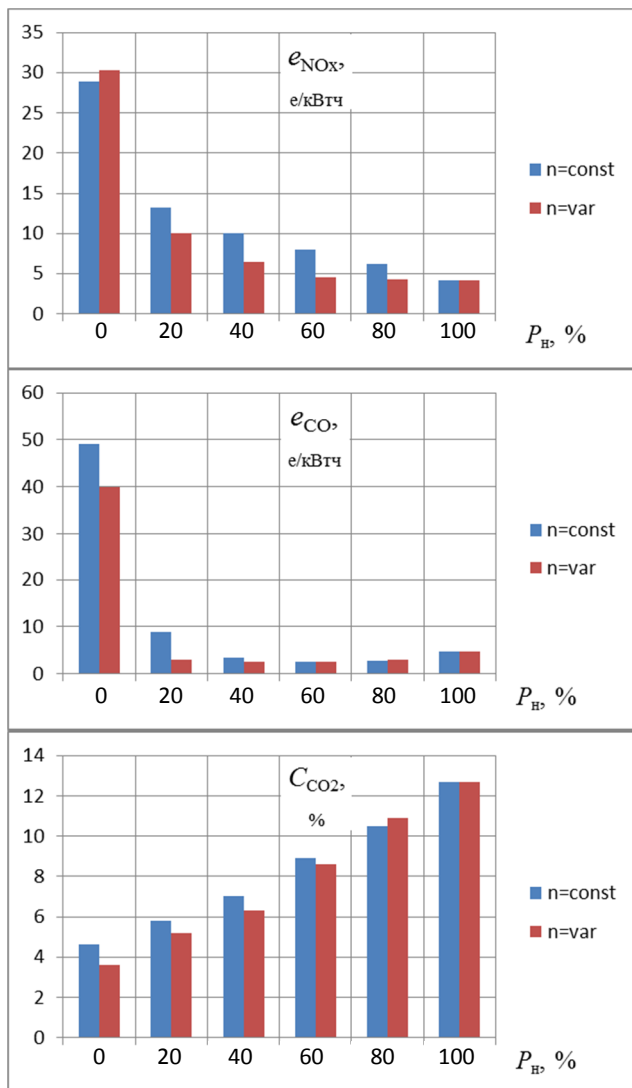


Рисунок 11 – Выбросы вредных веществ в атмосферу ДЭС KDE12EA3

электрической нагрузки, обеспечит следующие преимущества:

- уменьшение механических потерь и повышение КПД дизельного двигателя и генератора на всех долевых режимах нагрузки, кроме номинальной;
- снижение удельного расхода топлива на всех долевых режимах с экономией в режимах малых нагрузок до 40 % от базового варианта;

Из гистограмм, представленных на рис.11 видно, что при эксплуатации ДГ на частотах вращения, оптимизированных по величине электрической нагрузки, снижаются выбросы окислов азота e_{NO_x} , окиси углерода e_{CO} и углекислого газа C_{CO_2} . Величина количественного снижения выбросов будет зависеть от эксплуатационных режимов ДГ, определяемых графиком электрических нагрузок потребителя.

Важное значение при эксплуатации ДЭС имеют ее эргономические показатели, предельные значения которых определены в соответствующих ГОСТ. На рисунке 12 представлены основные эргономические показатели ДЭС: уровень шума L_{AE} (дБ) и виброускорение a (м/с^2) при ее эксплуатации на постоянной и переменной частотах вращения.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что перевод рабочих режимов ДГ на переменную частоту вращения, оптимизированную по величине

- улучшение экологических показателей: уменьшение удельных выбросов окислов азота до 20%, окиси углерода до 25%, концентрации углекислого газа до 10%;
- улучшение эргономических показателей: снижение уровня шума на 10 дБ, уменьшение вибрации до 40%.

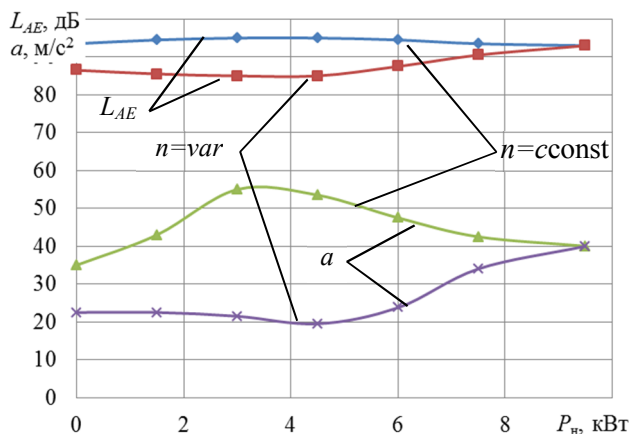


Рисунок 12 – Эргономические показатели ДЭС KDE12EA3

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволяют предложить универсальную зависимость, связывающую относительную частоту вращения вала дизеля с мощностью электрической нагрузки ДГ, при которой удельный расход топлива будет минимальным (рис. 13). Так как, частота вращения на долевых режимах однозначно определяется активной мощностью нагрузки и положением рейки

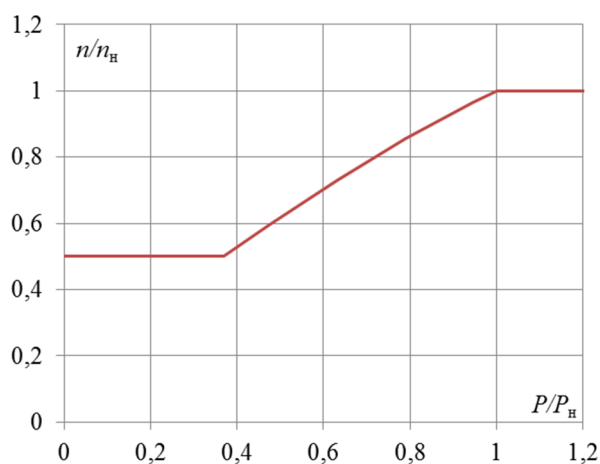


Рисунок 13 – Универсальный закон управления подачей топлива ДГ, работающего на переменной частоте вращения

Исследования проводились на базе одной конкретной модели дизель-генераторной установки, однако теория подобия двигателей внутреннего сгорания и электрических машин, а также аналогичные результаты по удельному расходу топлива в ДЭС с переменной частотой вращения, полученные другими авторами, позволяют распространить полученные выводы и на другие ДГ, того же диапазона мощностей до 100 кВт.

топливного насоса, данную зависимость можно использовать на ДГ различных типоразмеров.

Для практической реализации решений по созданию ДЭС инверторного типа была выполнена разработка структурной и функциональной схем электростанции, а также специализированной системы управления, обеспечивающей автоматическое управление рабочими режимами дизель-генераторов по критерию минимального расхода топлива на долевых режимах нагрузки.

В основу создаваемой ДЭС положен модульный принцип построения, позволяющий создавать гибкие энергетические комплексы, которые можно легко перестраивать под требования потребителей. Функциональная схема

инверторной ДЭС показана на рисунке 14. Необходимые контролируемые параметры обозначены индексами R , параметры управления – индексами S .

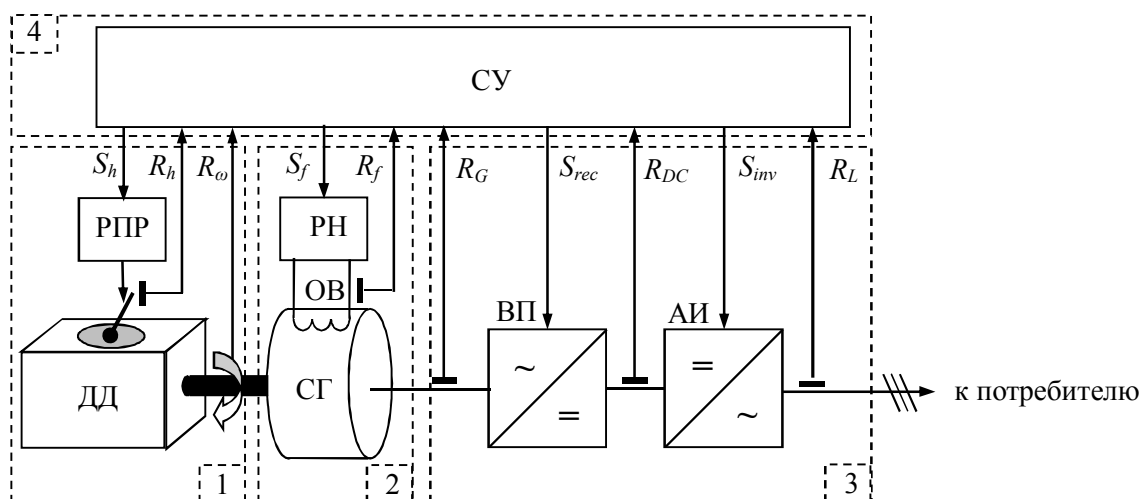


Рисунок 14 – Функциональная схема ДЭС инверторного типа

Функциональная схема электростанции включает 4 подсистемы:

- 1 – подсистема управления подачей топлива дизельного двигателя (ДД);
- 2 – подсистема управления током обмотки возбуждения (ОВ) синхронного генератора (СГ);
- 3 – подсистема преобразования выходного напряжения генератора, включающая управляемый выпрямитель-преобразователь (ВП) и трехфазный инвертор напряжений (АИ);
- 4 – центральная система управления (СУ).

Для каждой из проектируемых подсистем электростанции были разработаны специализированные регуляторы, которые были реализованы в макетных образцах.

Кинематическая схема электропривода перемещения рабочего органа топливного насоса приведена на рисунке 15.

Электропривод позволяет поступательно перемещать рабочий орган топливного насоса высокого давления в диапазоне $0 \dots 25$ мм, с точностью позиционирования, не хуже ± 0.02 мм. Электропривод представляет собой разомкнутую систему позиционирования на основе униполярного двухфазного шагового двигателя типа FL42STH47-0406A (Minebea Electronics Co). Угол шага двигателя 1.8° . Электродвигатель 1 приводит во вращение ходовой винт 3 винтовой передачи, которая в свою очередь перемещает шток 5, связанный с топливной рейкой насоса через наконечник 6. Конечное положение штока определяется количеством импульсов управления поданных на шаговый двигатель. Для контроля положения штока установлен потенциометрический датчик перемещения 8. Датчик не используется, как полноценный датчик обратной связи системы позиционирования, а служит главным образом для определения положения штока в момент включения ДГУ и для предотвращения аварийного режима работы привода.

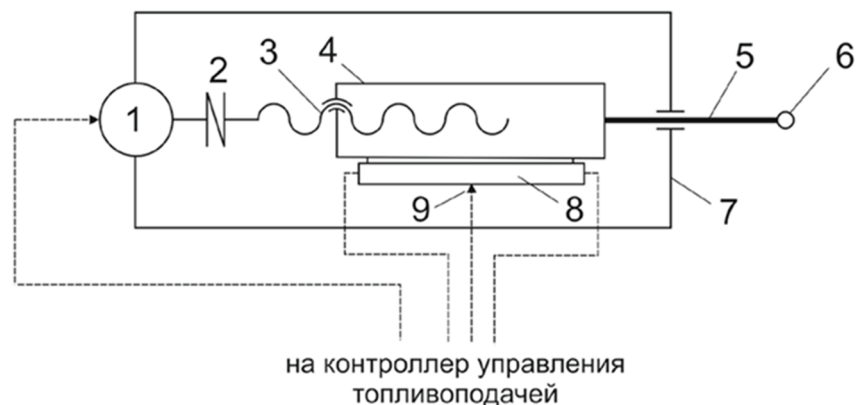


Рисунок 15 – Кинематическая схема привода рабочего органа топливного насоса
1 – шаговый двигатель, 2 – муфта соединительная, 3 – ходовой винт, 4 – гайка,
5 – шток, 6 – наконечник соединительный, 7 – корпус, 8 – датчик перемещения
потенциометрический, 9 – щетка токосъемная

Контроллер управления электроприводом построен на основе однокристального восьмиразрядного микроконтроллера ATmega8-16AU семейства AVR компании Atmel. Контроллер может работать как в ручном режиме управления, так и в автономном режиме, получая информацию о требуемом положении топливной рейки от персонального компьютера по интерфейсу RS-485 и протоколу совместимому с протоколом modbus rtu. Применение здесь микроконтроллера позволяет упростить схемотехнику данного устройства, а также легко менять алгоритмы его работы.

Фотография рейки топливного насоса KDE12EA3 Kipor, с установленным на ней исполнительным механизмом электропривода, приведена на рисунке 16.

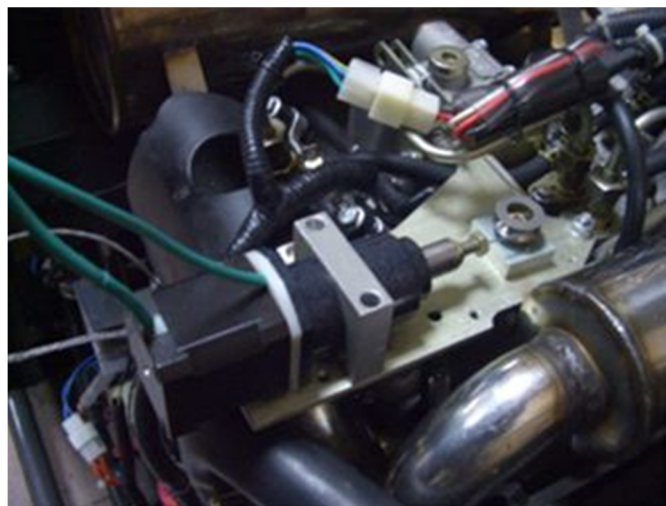


Рисунок 16 – Исполнительный механизм электропривода рейки топливного насоса

Проведенные испытания показали, что предложенная схема и практический вариант реализации подсистемы топливоподачи ДД работоспособны, обеспечивают приемлемую точность регулирования, и могут быть использованы в качестве базового варианта при проведении последующих ОКР по созданию инверторной ДЭС.

Разработанная структурная схема регулятора напряжения ДЭС инверторного типа приведена на рисунке 17.

Особенностью регулятора напряжения (РН) инверторной ДЭС является необходимость применения двухконтурной системы автоматического регулирования. Проведенные исследования показали, что в рабочем диапазоне частот выше 40 Гц регулятор должен работать в режиме регулятора

напряжения, обеспечивая стабилизацию выходного напряжения СГ. При частотах ниже 40 Гц значительно снижается магнитный поток в электрической машине и РН необходимо переключать в режим регулятора тока, обеспечивая стабилизацию тока возбуждения на уровне равном его номинальному значению. Так как величина номинального тока возбуждения зависит от конкретного типа, используемого в ДЭС генератора, необходимо явно задать данный управляющий параметр на этапе конфигурации системы управления.

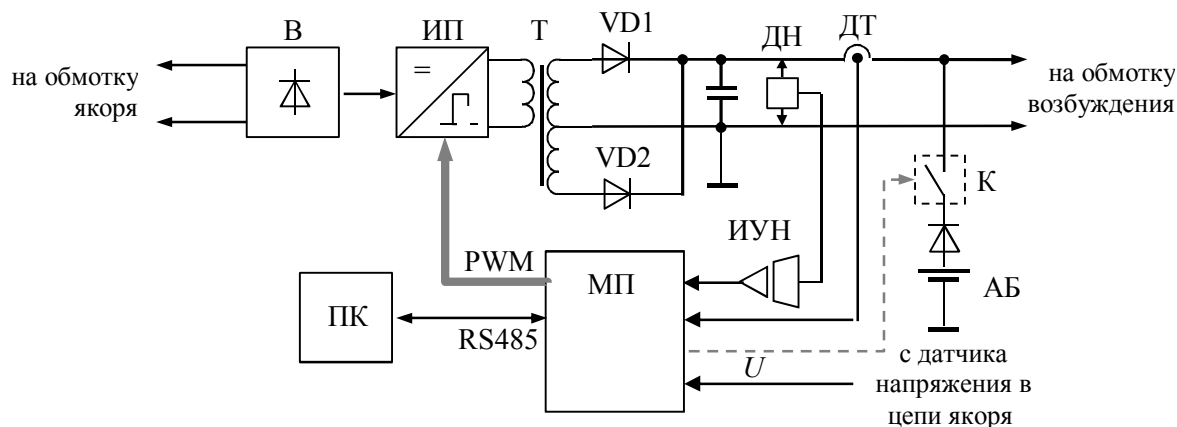


Рисунок 17 – Структурная схема регулятора напряжения

Выполненный технико-экономический анализ проектов перевода действующих ДЭС на переменную частоту вращения показал, что они являются рентабельными при среднем сроке окупаемости около 3 лет. Практическое применение ДЭС инверторного типа обеспечивает достижение следующих положительных результатов: увеличение эксплуатационного ресурса дизельных двигателей; возможность создания эффективных комбинированных энергетических комплексов с установками возобновляемой энергетики; уменьшение выброса вредных веществ с отработанными газами в атмосферу; снижение уровня шума и вибрации.

В пятой главе представлены результаты исследований комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии.

В соответствии с принятой концепцией построения комбинированных систем автономного электроснабжения была разработана структура изолированной энергетической системы и стратегия управления ее режимами.

Энергетический баланс в системе обеспечивается на ШПТ. Если величина напряжения на ШПТ стабилизирована, баланс мощностей в рассматриваемой энергетической системе можно представить в виде уравнения токов:

$$i_1 + i_2 + \dots + i_n \pm i_B = i_L \quad (9)$$

где i_k, i_B, i_L – мгновенные значения токов отдельных генерирующих установок, БНЭ и нагрузки соответственно.

Из уравнения (9) вытекают основные требования к системе управления режимами изолированной энергетической системы с точки зрения обеспечения баланса мощностей в произвольный момент времени:

- величина напряжения на ШПТ должна быть стабилизирована;
- система управления должна обеспечивать управление величиной токов отдельных генерирующих установок и БНЭ по определенным законам.

Выполнение первого требования необходимо для обеспечения устойчивости энергетической системы, содержащей несколько генерирующих источников. Кроме того, стабилизация величины напряжения на ШПТ позволяет использовать в предлагаемой схеме электростанции стандартный общепромышленный инвертор напряжения, обеспечивая тем самым хорошие экономические показатели проектируемой системы электроснабжения.

Выполнение второго требования необходимо для эффективного использования энергетических установок, входящих в состав автономного энергетического комплекса. Так как эффективность преобразования первичной энергии ВЭУ, ФЭС и ДГ во многом зависит от используемых рабочих режимов, возможность управления величиной генерируемой ими мощности позволит максимально эффективно использовать имеющийся в определенный момент времени потенциал первичных энергоносителей.

Проведенный анализ энергетических компонентов комбинированной системы автономного электроснабжения позволяет выделить два основных рабочих режима электростанции, которые упрощенно можно представить в виде простых схем замещения на основе идеализированных элементов электротехники, рис.18.

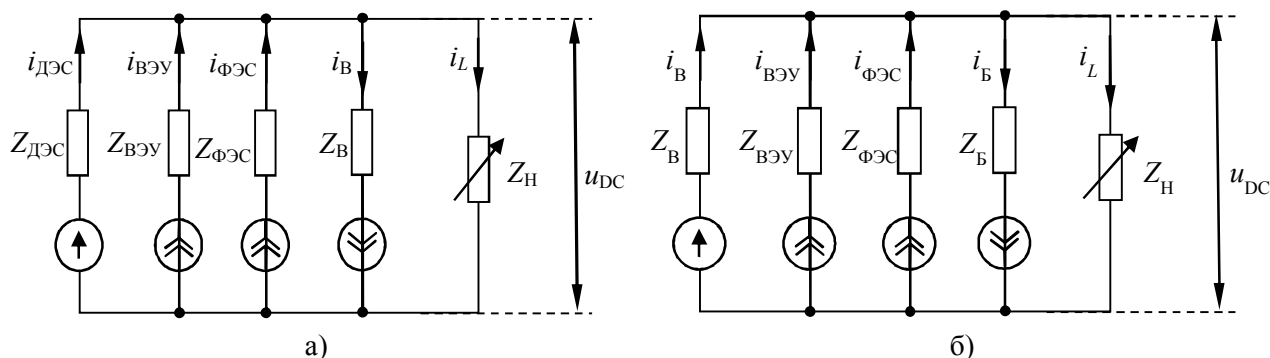


Рисунок 18 – Схемы замещения рабочих режимов комбинированной системы электроснабжения

а) – с формированием напряжения ШПТ от ДГ; б) – с формированием напряжения ШПТ от преобразователя БНЭ

Преобразователи генерирующих установок в схеме замещения представлены в виде идеальных источников тока и напряжения с соответствующими внутренними сопротивлениями, а электрическая нагрузка изображена в виде переменного сопротивления Z_H .

В первом рабочем режиме (рис.18, а) задающим источником ШПТ является дизель-генератор, накопитель энергии работает в режиме заряда аккумуляторных батарей. Поддержание величины напряжения на ШПТ в требуемых пределах в данной схеме замещения обеспечивает преобразователь ДЭС, ветроэнергетические, фотоэлектрические установки и накопитель энергии функционируют в режиме источников тока. Для управления перетоками

мощности система управления должна содержать как минимум четыре канала управления.

Во втором рабочем режиме (рис.18, б) задающим источником ШПТ является преобразователь БНЭ, накопитель энергии работает в режиме разряда аккумуляторных батарей, ДЭС выведена из работы. Поддержание величины напряжения на ШПТ в требуемых пределах в данной схеме замещения обеспечивает преобразователь БНЭ, установки возобновляемой энергетики и регулятор балластной нагрузки функционируют в режиме источников тока.

Для полного контроля и управления перетоками энергии в замкнутой энергетической системе необходимо обеспечить работу всех преобразователей генерирующих установок в режимах стабилизаторов тока и напряжения с внешним управлением. При этом внешние управляющие сигналы преобразователей должны формироваться в режиме реального времени в зависимости от характеристик основных компонентов энергетической системы, ее текущего состояния и внешних факторов.

В качестве технического устройства, обеспечивающего согласование режимов производства и потребления энергии в изолированной энергетической системе, предложено использовать гибридную систему буферного накопления электроэнергии (ГСБНЭ), структурная схема которой представлена на рис.19.

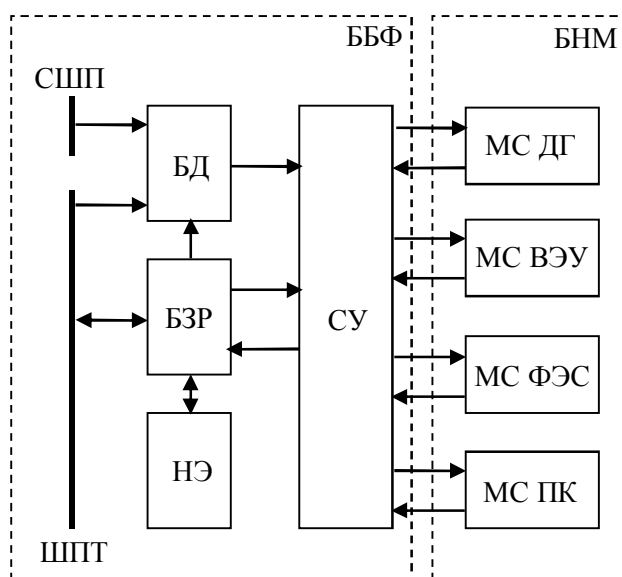


Рисунок 19 – Обобщенная структурная схема гибридной системы буферного накопления электроэнергии

Необходимым элементом ГСБНЭ является блок базовых функций (ББФ), включающий в себя блок датчиков (БД), блок заряда-разряда (БЗР), непосредственно накопитель энергии (НЭ) и систему управления (СУ).

В рассматриваемой системе используется накопитель гибридного типа, основная энергетическая емкость которого реализована на основе аккумуляторных батарей (АБ) и служит для компенсации мощности при протекании относительно медленных процессов в системе, а дополнительный конденсаторный накопитель небольшой емкости служит для улучшения динамических параметров системы в

моменты возникновения кратковременных пиковых нагрузок или резкого изменения генерирующей мощности.

БЗР содержит двунаправленный управляемый преобразователь, обеспечивающий режимы заряда/разряда накопителей по заданным системой управления алгоритмам, а также блок контроля емкости накопителей.

ББФ реализует «простой алгоритм» управления режимами работы автономной электростанции, основными функциями которого являются обеспечение баланса мощностей в изолированной энергетической системе и рациональных режимов заряда/разряда аккумуляторных батарей.

Данная стратегия управления может быть реализована при построении СУ БНЭ на базе микроконтроллера, в программу которого жестко вшиты технические характеристики используемых АБ.

Однако, функциональные возможности гибридной системы БНЭ могут быть существенно расширены за счет подключения к ней блока наборных модулей (БНМ).

Блок наборных модулей содержит опциональные модули сопряжения с конкретными объектами, например, МС ДГ – модуль сопряжения с дизель-генераторной установкой, МС ВЭУ – модуль сопряжения с ветроэнергетической установкой и т.п.

Основная цель установки модулей сопряжения – улучшение энергетических и эксплуатационных характеристик силовых агрегатов, функционирующих в составе автономной системы электроснабжения. Необходимым условием использования модулей расширения являются имеющиеся технические возможности по управлению режимами подключаемого силового агрегата. Например, если величину выходного тока статического преобразователя ВЭУ или ФЭС можно регулировать внешним управляющим сигналом, то установка соответствующего модуля сопряжения позволит реализовать функцию максимального отбора мощности для данной энергетической установки. Модуль сопряжения с ВЭУ или ФЭС должен обеспечивать прием входного сигнала с метеорологической станции, его обработку и передачу в систему управления, которая в режиме реального времени формирует управляющий сигнал, передаваемый через тот же модуль на преобразователь энергетической установки.

Так как состав и основные технические характеристики энергетических установок, подключаемых к автономной системе электроснабжения, могут существенно различаться, различными будут и рациональные стратегии управления автономной энергетической системой. Соответственно, при включении в систему БНЭ блока наборных модулей необходимо обеспечить ввод необходимых исходных данных о технических характеристиках подключаемых силовых агрегатах и их соответствующую обработку.

Для рационального выбора и настройки параметров регуляторов основных энергетических компонентов использовались результаты математического моделирования, полученные с применением оригинальных математических моделей.

Компьютерная реализация математической модели комбинированной системы автономного электроснабжения, которая использовалась для проведения вычислительных экспериментов, связанных с настройкой систем управления, представлена на рисунке 20.

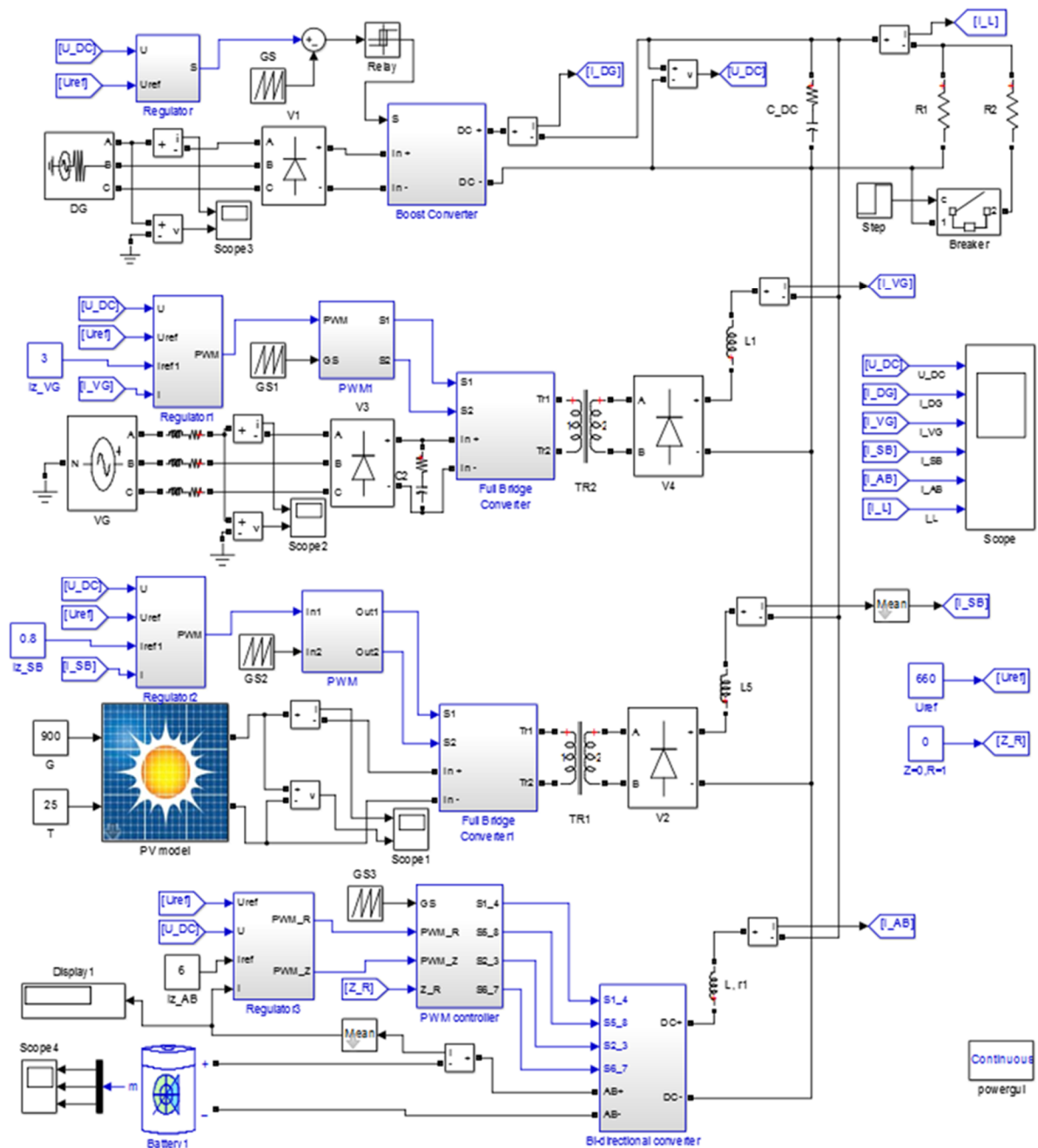


Рисунок 20 – Модель системы комбинированного электроснабжения

Представленная на рис.20 модель, реализована в MatLab Simulink и содержит подмодели всех основных компонентов комплекса: дизель-генератора (DG), ветрогенератора (VG), фотоэлектрического преобразователя (PV model) и накопителя электрической энергии на основе аккумуляторной батареи (Battery). Все генерирующие установки подключены к шине постоянного тока через соответствующие полупроводниковые преобразователи (Boost Converter, Full

Bridge Converter, Bi-directional converter), для управления которыми используются контроллеры широтно-импульсной модуляции (PWM) и регуляторы (Regulator).

Следует отметить, что параметры компонентов модели соответствуют параметрам физической экспериментальной установки, что позволяет с одной стороны оценить адекватность полученных результатов, с другой выполнить большую часть работ по выбору и настройке параметров экспериментального образца ГСБНЭ.

Для практической апробации принятых технических и технологических решений по повышению эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии был разработан и изготовлен экспериментальный образец гибридной системы буферного накопления энергии ГСБНЭ-2/5-ШПТ и комплект эскизной конструкторской и эксплуатационной документации на него.

Внешний вид экспериментального образца гибридной системы буферного накопления энергии ГСБНЭ-2/5-ШПТ показан на рисунке 21.



Рисунок 21 – Внешний вид экспериментального образца гибридной системы буферного накопления энергии ГСБНЭ-2/5-ШПТ. Вид спереди, передняя дверь открыта

Проведенные испытания показали, что экспериментальный образец разрабатываемого устройства обеспечивает выполнение требуемых функций и имеет хорошие перспективы практического внедрения.

Разработанное устройство обеспечивает объединение в автономной энергетической системе разнотипных энергетических установок, использующих первичные энергоносители различной физической природы, и управление режимами их работы по законам, обеспечивающим их максимальную энергетическую эффективность. ГСБНЭ-2/5-ШПТ позволяет реализовать функции «максимального отбора мощности» для энергоустановок возобновляемой энергетики и функцию управления рабочими режимами дизель-генераторов по критерию минимизации расхода топлива, что обеспечивает повышение энергетической эффективности всего

энергетического комплекса за счет:

- снижения себестоимости вырабатываемой электрической энергии до 20 % в сравнении с традиционными системами автономного электроснабжения;
- уменьшения установленной мощности автономных электростанций до 20 % от базового варианта и повышение ресурса основного генерирующего оборудования на 10 %;
- экономии до 15 % дорогостоящего дизельного топлива в сравнении со стандартными схемами построения дизельных электростанций;
- повышение качества выходного напряжения в периоды пика нагрузок за счет уменьшения величины отклонения амплитуды и частоты выходного напряжения не менее, чем на 30 % в сравнении с традиционной дизельной электростанцией.

Выполненная оценка рыночного потенциала применения гибридной системы буферного накопления энергии в реальном секторе экономики показала, что разработанное устройство обладает конкурентоспособностью на российском и мировом рынках и имеет хорошие перспективы внедрения.

Предлагаемый модельный ряд ГСБНЭ перекрывает диапазон потребляемой мощности наиболее распространенных систем автономного электроснабжения в децентрализованных зонах (до 100 кВт), а модульный принцип построения устройства позволяет унифицировать его основные узлы и детали при организации производства. Оптимистический прогноз объема рынка для ГСБНЭ только в России составляет от 15 до 25 тысяч единиц, а в денежном выражении от 6.0 до 20.0 млрд. руб.

В **шестой главе** рассмотрены вопросы технико-экономической оценки эффективности применения комбинированных систем автономного электроснабжения.

В результате выполненных исследований разработана автоматизированная методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности для комбинированных систем автономного электроснабжения. Высокая достоверность предлагаемой методики обеспечивается использованием фактических данных метеонаблюдений в предполагаемом месте установки электростанции, а также реальных технических характеристик конкретной модели ВЭУ, определяемых по данным ее технической спецификации.

Предлагаемый алгоритм выбора ВЭУ представлен на рис.22.

Оценка экономической эффективности применения ВЭУ в предлагаемой методике выполняется в соответствии с методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов, и включает расчет чистого денежного потока проекта, чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности и периода возврата капитала.

Предлагаемая методика протестирована на конкретных примерах, доказала свою работоспособность, удобство применения и может быть полезна для большого круга потребителей, рассматривающих возможность практического применения установок малой энергетики в целях электроснабжения.

Важными задачами проектирования комбинированных систем электроснабжения являются рациональный выбор основного энергетического оборудования и технико-экономическое обоснование проекта.

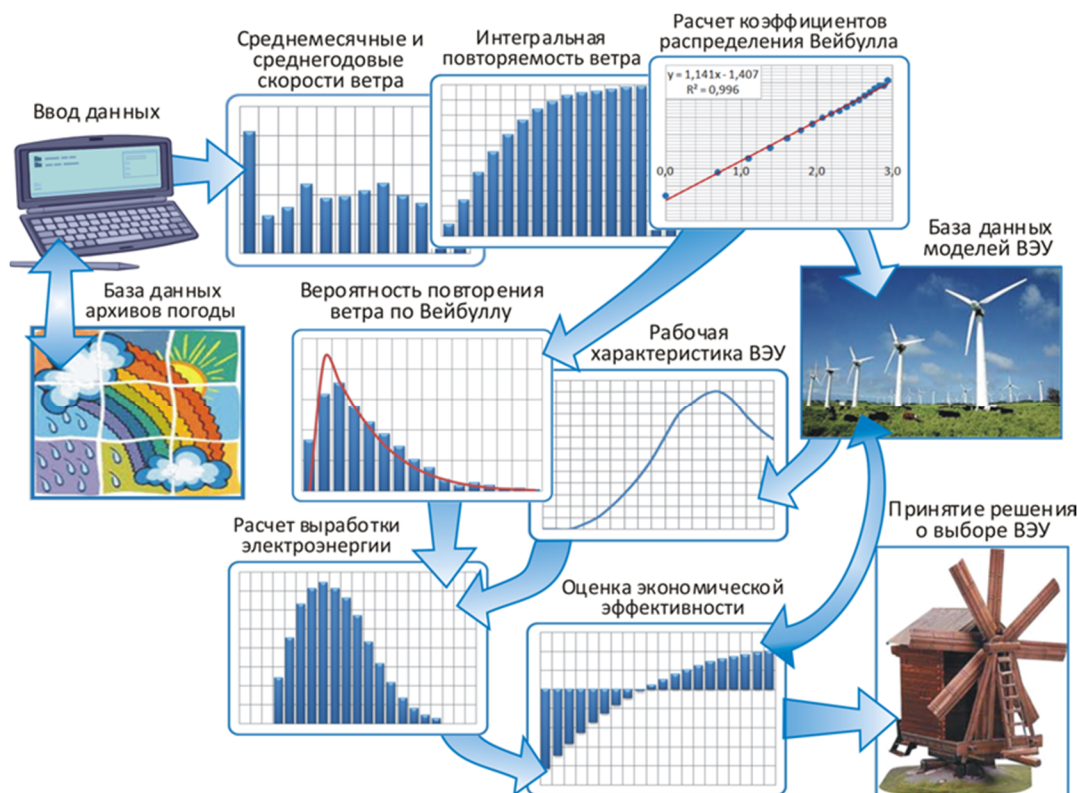


Рисунок 22 – Алгоритм выбора ВЭУ

Разработана методика оценки технико-экономической эффективности ветродизельных электростанций (ВДЭС), позволяющая производить расчет экономического эффекта и сроков окупаемости проекта. Отличительной особенностью методики является оригинальная имитационная энергетическая модель электростанции, разработанная автором. Для расчета экономических показателей ВДЭС создан специализированный программный модуль, который совместно с энергетической моделью электростанции позволяет проводить сравнительный анализ ее технико-экономических характеристик. Программный модуль реализован в популярном приложении Microsoft Excel, что обеспечивает пользователям простую и комфортную работу с приложением.

Укрупненная блок-схема расчета технико-экономических характеристик ВДЭС представлена на рисунке 23.

Необходимость использования подобных инструментов технико-экономического анализа обусловлена тем, что рациональное соотношение установленных мощностей ДЭС, ВЭУ и БНЭ не является типовым, а определяется индивидуально для каждой электростанции с учетом конкретных условий ее размещения и эксплуатации, поэтому в качестве критерия выбора основного энергетического оборудования целесообразно использовать технико-экономические показатели.



Рисунок 23 – Укрупненная блок-схема сравнительной оценки технико-экономических характеристик ВДЭС

Предлагаемые методики позволяют значительно сократить сроки предпроектных работ и сделать обоснованный выбор варианта построения электростанции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований разработаны технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности комбинированных автономных электростанций на базе ДЭС с использованием возобновляемых источников энергии. Наиболее существенные научные и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Выполнен технико-экономический анализ автономных систем электроснабжения децентрализованных потребителей, сформулированы требования, предъявляемые к комбинированным системам автономного электроснабжения, определены направления повышения их энергетической эффективности.

2. Разработана концепция построения комбинированных систем автономного электроснабжения, включающая промежуточную шину постоянного тока, к которой через индивидуальные преобразователи подключаются энергетические установки и буферная система накопления энергии, обеспечивающая реализацию всех основных функций по распределению и управлению потоками энергии в изолированной

энергетической системе. Предложенная концепция обладает следующими конкурентными преимуществами: возможность включения в состав системы любой энергетической установки независимо от установленного силового оборудования; эффективное использование потенциала установок возобновляемой энергетики; модульный принцип построения, обеспечивающий быструю и простую модификацию системы в соответствии с требованиями потребителя.

3. Разработаны математические модели энергетических процессов преобразования и распределения потоков энергии в изолированных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии, позволяющие проводить анализ энергетических характеристик и синтезировать эффективные алгоритмы управления рабочими режимами генерирующих установок. Разработан универсальный метод моделирования механических характеристик ветротурбин малой мощности по данным их технической спецификации, учитывающий конструктивные и геометрические особенности моделируемых ветродвигателей, что выгодно отличает его от аналогов. Разработана оригинальная динамическая модель продольной составляющей скорости ветра, построенная на основе модели спектральной плотности Каймала, рекомендованной международными стандартами по ветроэнергетике.

4. Разработаны технические и технологические решения, обеспечивающие повышение энергетической эффективности автономных дизельных электростанций. Предложен и обоснован способ управления рабочими режимами автономной дизельной электростанцией по прогнозируемому графику электрических нагрузок, обеспечивающий экономию дизельного топлива до 10% и увеличение эксплуатационного ресурса дизельных двигателей. Предложена, обоснована и исследована схема построения автономной ДЭС с буферным накопителем энергии, обеспечивающая до 15% экономии дизельного топлива, позволяющая уменьшить до 1.8 раз установленную мощность генерирующего оборудования, обеспечивающая повышение моторесурса ДГ за счет оптимизации рабочих режимов.

5. Теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность перевода рабочего режима автономной дизель-генераторной установки с постоянной частоты вращения на переменную, оптимизированную по величине электрической нагрузки электростанции. Разработана, спроектирована и реализована в действующей полунатурной модели дизель-генераторная установка, работающая на переменной частоте вращения. Получена универсальная зависимость, связывающая относительную частоту вращения вала дизеля с мощностью электрической нагрузки ДГ, при которой удельный расход топлива будет минимальным. На основании проведенных исследований установлено, что перевод рабочих режимов ДГ на переменную частоту вращения, обеспечивает следующий положительный эффект: снижение удельного расхода топлива на всех долевых режимах с экономией в режимах малых нагрузок до 40%; улучшение экологических показателей: уменьшение удельных выбросов окислов азота до 20%, окиси углерода до 25%,

концентрации углекислого газа до 10%; улучшение эргономических показателей: снижение уровня шума на 10 дБ, уменьшение вибрации до 40%.

6. Обоснована структура и разработана стратегия управления режимами комбинированных автономных энергетических комплексов с установками возобновляемой энергетики. Разработана, спроектирована и реализована в действующем экспериментальном образце система буферного накопления энергии, предназначенная для согласования режимов производства и потребления электроэнергии в изолированных энергетических системах, включающих несколько независимых генерирующих установок различной физической природы. Доказано, что разработанное устройство обеспечивает повышение эффективности автономной энергетической системы за счет снижения себестоимости вырабатываемой электрической энергии до 20% в сравнении с традиционными системами автономного электроснабжения; уменьшения установленной мощности генерирующего оборудования до 20% от базового варианта и повышение его эксплуатационного ресурса на 10%; экономии до 15% дорогостоящего дизельного топлива в сравнении со стандартными схемами построения дизельных электростанций; повышения качества выходного напряжения в периоды пика нагрузок за счет уменьшения величины отклонения амплитуды и частоты выходного напряжения не менее, чем на 30% в сравнении с традиционной дизельной электростанцией.

7. Разработаны методики выбора и оценки технико-экономической эффективности применения установок возобновляемой энергетики в комбинированных автономных системах электроснабжения. Предлагаемые методики позволяют значительно сократить сроки предпроектных работ и сделать обоснованный выбор технического варианта построения электростанции.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Обухов С.Г. Ветроэнергетические установки малой мощности. Технические характеристики, моделирование, рациональный выбор. - Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012 – 88 с.
2. Обухов С.Г., Наумов А.Н., Артюшин А.Б., и др. Перспективы возобновляемой энергетики Кузбасса.- Кемерово: Агентство Рекламных Форм, 2008. - 236 с.
3. Обухов С.Г., Данченко А.М., Заде О.Г., и др. Кадастр возможностей. – Томск: Изд-во НТП, 2002. –280 с.. ил.
4. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001 – 120 с.

Публикации в изданиях, из Перечня ВАК РФ:

5. Обухов С.Г., Дураев Н.Н., Плотников И.А. Имитационная модель дизельного двигателя для исследования его рабочих характеристик на

- переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 322 - №. 4. - С. 48-52
6. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Шутов Е.А., Хошнау З.П. Применение накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций // Электричество. - 2012 - №. 6 - С. 24-28
 7. 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
 8. Обухов С.Г., Плотников И.А. Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики // Промышленная энергетика. - 2012 - №. 7 - С. 46-51
 9. 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
 10. Обухов С.Г., Сипайлова Н.Ю., Плотников И.А., Сипайлов А.Г. Математическая модель синхронного генератора инверторной дизельной электростанции // Известия вузов. Проблемы энергетики. - 2012 - №. 9-10 - С. 112-120
 11. Обухов С.Г., Сипайлова Н.Ю., Плотников И.А., Сипайлов А.Г. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе инверторной дизельной электростанции // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2012 - №. 5 - С. 41-45
 12. Обухов С.Г. Метод моделирования механических характеристик ветротурбин малой мощности // Альтернативная энергетика и экология. - 2011 - №. 1 - С. 10-15
 13. Обухов С.Г., Плотников И.А., Маров Д.Ю. Физическая модель электрических нагрузок автономных энергетических систем // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2011 - №. 11 - С. 37-40
 14. Обухов С.Г., Хошнау З.П. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // Электрические станции. - 2012 - №. 11 - С. 43-47
 15. Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2011 - №. 2 - С. 25-30
 16. Обухов С.Г., Парников Н.М. Выбор рационального оперативного резерва мощности автономных дизельных электростанций ОАО Сахаэнерго // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2010. - № 3-4/1 -с. 59-63
 17. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Шутов Е.А., Парников Н.М. Энергетическая эффективность комплекса децентрализованного электроснабжения республики САХА (Якутия) // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2008. - т. 1 - № 7-8/1 -с. 124-130
 18. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Шутов Е.А., Парников Н.М. Исследование закономерностей формирования графиков электрических

- нагрузок децентрализованных потребителей Республики Саха (Якутия) //Электрические станции, 2008. -№ 9 -с. 53-58
- 19.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Шутов Е.А., Парников Н.М. Исследование работы инверторной дизельной электростанции на частичных характеристиках дизеля //Электричество, 2009. -№ 12 -с. 41-44
- 20.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Шутов Е.А., Парников Н.М. Оптимизация числа и мощности дизель-генераторов автономной дизельной электростанции //Промышленная энергетика, 2009. -№ 11 -с. 27-32
- 21.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Шутов Е.А., Парников Н.М. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа //Известия вузов. Электромеханика, 2009. -№ 6 -с. 80-82
- 22.Обухов С.Г., Лукутин Б.В. Регулятор балластной нагрузки автономной микроГЭС // Известия Томского политехнического университета, 2004, - Том 307, №3 - с.121-126
- 23.Обухов С.Г., Лукутин Б.В. Парадоксы малой энергетики // Электрика, 2002, - №6 - с.3-5
- 24.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы повышения качества выходного напряжения микрогидроэлектростанции с тиристорным автобалластом // Промышленная энергетика, 2000,- №8 - с.49-52.
- 25.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Озга А.И. Выбор параметров цифрового регулятора частоты автономной микрогидроэлектростанции // Гидротехническое строительство, 1992, - №9- с.40-43.
- 26.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Особенности работы микроГЭС на асинхронный двигатель соизмеримой мощности // Электротехника, 1991, - №7 - с.36-40.
- 27.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Микрогидроэлектростанция с автобалластной нагрузкой, регулируемой по частоте выходного напряжения // Электромеханика, 1990, -№6. -с. 111-119.
- 28.Обухов С.Г., Лукутин Б.В. Выбор способа регулирования микрогидроэлектростанций с автобалластной нагрузкой // Гидротехническое строительство, 1990, - №7 - с.33-35.
- 29.Обухов С.Г., Лукутин Б.В. Динамика микрогидроэлектростанции с автобалластной стабилизацией напряжения // Электротехника, 1989, - №10- с.9-12.
- 30.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Эквивалентная нагрузка генератора микрогидроэлектростанции с автобалластной нагрузкой // Электромеханика, Изв. Вузов, 1988, - №5 - с. 99-104.

Авторские свидетельства, патенты на изобретения и полезные модели:

- 31.Электроэнергетическая система на возобновляемых источниках энергии: патент на изобретение 2476970 Рос. Федерация МПК51 H02J 3/32 / Б.В.Лукутин, С.Г.Обухов и др.; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - № 2011150333/07; заявл. с 09.12.2011; опубл. : 27.02.2013, Бюл. № 6. – 8 с.

32. Дизельная электростанция: патент на полезную модель 109801 Рос. Федерация МПК51 F 02 B 63/00 / Б.В.Лукутин, С.Г.Обухов и др.; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - № 2011121488/28; заявл. с 27.05.2011; опубл. : 27.10.2011, Бюл. № 30. – 8 с.
33. Дизельная электростанция: патент на полезную модель 113885 Рос. Федерация МПК51 H 02 J 7/34/ Б.В.Лукутин, С.Г.Обухов и др.; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - № 2011132004/07; заявл. с 29.07.2011; опубл. : 27.02.2012, Бюл. № 6. – 6 с.
34. Выблов А.Н., Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Устройство для регулирования амплитуды и частоты напряжения автономного электрогенератора. Свидетельство на полезную модель RU 16320 U1 7 H02 P 9/04 , 2000 г.
35. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Устройство для регулирования частоты вырабатываемого тока электрогенератора. Свидетельство на полезную модель RU6958U1 6H02p 9/04. Опубл. В бюлл.№ 6 16.06.98
36. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Система управления затвором микрогидроэлектростанции. Патент K11 2005138C1 P03B15/06. Опубл. БИ№47.48, 1993.
37. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанция. А. с. № 1305429 СССР: P 03 B. Опубл. 13.06.87, Бюл. № 17

Другие работы автора:

38. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Коновалова Л.П. Перспективы развития биоэнергетики в Томской Области // Ресурсы Регионов России, 2005. -№ 6 - с. 44-48
39. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Яворский М.И. Оценка эффективности регионального использования возобновляемых энергоресурсов // Технологии ТЭК. Москва, 2003, - № 2. - с. 65-71.
40. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Яворский М.И. Перспективы малой энергетики в Томской области / Ресурсы регионов России. Москва, 2002, - №4, с.25-32
41. 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
42. 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
43. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Шутов Е.А. , Хошнау З. П. Обоснование применения буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветро-дизельных электростанций // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т 1.

- Радиоэлектроника, электротехника и электроэнергетика, Томск, 6-8 Октября 2011. - Томск: СПБ Графикс, 2011 - С. 41-50
- 44.Обухов С.Г., Луговская О.Г. Система оперативного управления автономной ДЭС // Локальная энергетика: опыт, проблемы, перспективы развития: сборник материалов научно-практической конференции, Якутск, 20-21 Декабря 2010. - Томск: Изд-во ТПУ, 2011 - С. 64-65
- 45.Обухов С.Г., Вихарева Е.В. Выбор ВЭУ малой мощности по реальным характеристикам ветрового режима // Энергосберегающие технологии: материалы Международной молодёжной конференции, Томск, 28-30 Июня 2011. - Томск: Изд-во ТПУ, 2011 - Т. 2 - С. 16-18
- 46.Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Климова Г.Н. Перспективные виды возобновляемых энергоисточников в зонах децентрализованного электроснабжения Кузбасса //Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы всероссийской научно-технической конференции - Томск, 12-14 мая 2008. - Томск: ТПУ, 2008. - с. 132-133