

На правах рукописи

Сурков Михаил Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ВЕТРО-
ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Энергетическом институте ФГОУ ВПО
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
г. Томск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лукутин Борис Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пантелеев Василий Иванович

кандидат технических наук
Богданов Александр Александрович

Ведущая организация: Обособленное подразделение «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского университета систем управления и радиоэлектроники»,
г. Томск

Защита состоится «24» июня 2011 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.11 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «23» мая 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Около 70 % территории России относится к зонам децентрализованного электроснабжения, в которых проживает по разным оценкам от 10 до 20 млн. человек. Большинство этих территорий расположены в районах с суровыми климатическими условиями – Сибирь, Дальний Восток, Крайний Север. Для построения автономных систем электроснабжения обычно используются автономные дизельные (ДЭС) или бензиновые электростанции. Применение возобновляемых источников энергии в составе автономных энергетических систем позволяет снизить топливную составляющую в себестоимости вырабатываемой электроэнергии, что существенно повышает их технико-экономическую эффективность.

Перспективность и актуальность применения возобновляемых энергоресурсов для экономии органического топлива сегодня отмечена как отечественными, так и зарубежными специалистами в области электроэнергетики и теплоснабжения. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года предусматривает замещение 20 млн. т.у.т. традиционных энергоносителей за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Достижение этой отметки невозможно без комплексного рассмотрения многокритериальной задачи повышения технико-экономической эффективности рабочих режимов автономных электротехнических комплексов с использованием рассредоточенных источников энергии, часть из которых возобновляемые.

Поэтому поставленные в работе цели и задачи повышения энергоэффективности автономных ветро-дизельных электротехнических комплексов (ВДЭТК) являются актуальными для электроэнергетической науки и практики.

Представленная работа выполнена в соответствии с международными программами развития малой энергетики, федеральным законом Российской Федерации №42ФЗ "Об энергосбережении" от 05.04.2003 г.; распоряжениями Правительства Российской Федерации №1234 от 28.07.2003 г. «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года» и №1715-р от 13.11.2009 г. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года».

Объектом исследования является автономный электротехнический комплекс, представляющий собой локальную систему электроснабжения с использованием ветро-дизельной электростанции.

Предметом исследования являются совместные режимы работы ДЭС и ветроэлектростанций (ВЭС) в составе автономного ВДЭТК.

Целью работы является разработка алгоритма согласования работы основного энергетического оборудования рассредоточенных источников энергии широкого диапазона установленных мощностей в составе автономного ветро-дизельного электротехнического комплекса,

позволяющего обеспечить энергоэффективный режим производства электроэнергии в условиях неопределенности ветрового потенциала и электрических нагрузок.

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

1. Разработка математических моделей энергопреобразования автономного электротехнического комплекса, обеспечивающих формирование рациональных режимов совместной работы ДЭС и ВЭС:

- Разработка универсальной методики моделирования энергетических характеристик ВЭС в диапазоне до 1000 кВт установленной мощности;
- Определение универсальных методик расчета потребления топлива ДЭС в диапазоне до 1 МВт установленной мощности в зависимости от нагрузки потребителей;
- Анализ и построение алгоритма заряда/разряда аккумуляторных батарей в составе ВДЭТК в условиях неопределенности ветрового потенциала и электрических нагрузок.

2. Разработка модели энергопреобразования в ВДЭТК, позволяющей анализировать совместные режимы работы основного энергетического оборудования комплекса с целью снижения расхода топлива на производство электроэнергии, универсальной в широком диапазоне единичных мощностей установленного оборудования ВЭС, ДЭС, АБ, потребителей электрической энергии.

3. Разработка практических рекомендаций по построению ВДЭТК и законов управления балансом электроэнергии в автономных ветро-дизельных электротехнических комплексах, позволяющих минимизировать расход топлива в зависимости от графиков электрических нагрузок потребителей и ветровых условий местности.

4. Определение условий эффективного объединения рассредоточенных источников энергии различной физической природы в микросети.

Методы исследований:

Исследования проводились с использованием методов расчета систем электроснабжения, методов расчетов технико-экономических показателей энергоустановок, статистических методов обработки данных ветрового режима местности, графиков нагрузок потребителей электроэнергии, а также теории математического моделирования, теории нейронных сетей и нечетких множеств. Численное моделирование реализовано в средах Matlab, MS Excel.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, определяется корректностью принятых допущений, адекватностью математических моделей, построенных на основе реальных характеристик энергетического оборудования, апробацией, сравнением с известными моделями других авторов и имеющимися экспериментальными данными, применением современных программных продуктов.

Научная новизна. В результате проведенных исследований получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана математическая модель ветро-дизельного электротехнического комплекса, обеспечивающая выбор рациональных режимов работы, в зависимости от изменения мощности нагрузки, соотношения установленных мощностей ветровой и дизельной составляющей генерирующего оборудования и ветровых условий района электроснабжения.

2. Предложен интеллектуальный алгоритм на основе нейронных сетей и нечетких множеств, позволяющий формировать энергоэффективные режимы работы основного оборудования автономного ВДЭТК с рассредоточенными источниками энергии и наличии аккумуляторов электрической энергии в условиях неопределенности нагрузки потребителей.

3. Установлены соотношения мощностей и параметры режимов рациональной совместной работы ВЭС и ДЭС в автономных электротехнических комплексах, позволяющие обеспечить экономию дизельного топлива.

Практическая значимость работы:

1. Реализован пакет программ, позволяющих формировать рациональные режимы согласования вырабатываемой электрической энергии ветро-дизельного электротехнического комплекса с графиком электрической нагрузки с целью повышения эффективности использования ВЭС и снижения топливной составляющей в себестоимости электроэнергии.

2. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять условия объединения в микро сеть рассредоточенные ветровые и дизельные источники энергии с приоритетным использованием энергии ветра.

3. Разработаны рекомендации по выбору соотношения мощностей ветровой, дизельной электростанций и ёмкости аккумуляторных батарей, по критерию минимального расхода дизельного топлива.

Реализация результатов работы.

Результаты выполненной работы использованы в учебном процессе на кафедре Электроснабжения промышленный предприятий Энергетического института Томского политехнического университета для студентов специальностей «Возобновляемые источники энергии», «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения», при разработке методических рекомендаций для выполнения практических работ и курсовых расчетов. Предложенные в диссертационной работе решения использованы при выполнении хоздоговоров и госбюджетных НИР: «Интеллектуальные автономные системы электроснабжения на базе гибридных ветро-дизельных установок» (г/к № П627), «Исследование процессов преобразования и распределения потоков энергии в интегрированных энергетических комплексах с возобновляемыми энергоисточниками» (г/б № 9/10.09), «Разработка эффективных энергетических комплексов децентрализованных зон Республики Саха (Якутия)» (х/д № 7-85/09), «Разработка рекомендаций

по использованию возобновляемой энергетики в системах локального электроснабжения ОАО «Сахаэнерго» (х/д № 7-205/10).

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Математическая модель энергопреобразования в ветро-дизельном электротехническом комплексе, учитывающая структуру ВДЭТК, работающего в условиях неопределенности электрической нагрузки и ветрового режима района электроснабжения.

2. Интеллектуальный алгоритм, направленный на рациональное согласование потребляемой и вырабатываемой электроэнергии в автономном ветро-дизельном электротехническом комплексе с рассредоточенными источниками энергии.

3. Рекомендации по выбору параметров режимов работы автономного ВДЭТК, направленные на повышение эффективности совместной работы ВЭС и ДЭС.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских конференциях и семинарах в России и Германии: IX-XIII, XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2003-2007 гг., 2009 г.; Winter Academy of Yong Scientist, Germany, Kassel, 2007 г.; V Всероссийский студенческий научно-практический семинар «Энергетика: экология, надежность, безопасность», г. Томск, 2003 г.; Международная научно-техническая конференция «Электроэнергия и будущее цивилизации», г. Томск, 2004г.; International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Technique and Technologies», Tomsk, 2006 г.; Международная научно-техническая конференция «Энергетика и энергоэффективные технологии», г. Липецк, 2006 г.; Всероссийский конкурс инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение», г. Томск, 2006 г.; Международный научно-технический семинар «Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии», г. Томск, 2006 г.; 12-я Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: экология, надёжность, безопасность», г. Томск, 2006 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г. Томск, 2006, 2010 гг.; II Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений», г. Томск, 2010 г.; II Всероссийская конференция «Инновационная энергетика» с международным участием, г. Новосибирск, 2010 г.; Научно-практическая конференция «Локальная энергетика: опыт, проблемы, перспективы развития», г. Якутск, 2010 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ. В том числе, в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК 3.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 228 страницы основного текста, включая 106 рисунков, 19 таблиц, списка литературы из 152 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе проведен анализ области исследований, рассмотрены состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в автономных энергосистемах, основные мировые тенденции развития автономных систем электроснабжения, в том числе ветро-дизельных электротехнических комплексов с использованием блока аккумулирования электрической энергии. Определены приоритетные задачи исследований ветро-дизельных систем электроснабжения.

Показано, что повысить надежность и эффективность энергообеспечения децентрализованных зон можно применяя гибридные комплексы с использованием различных источников энергии (солнце, дизель, ветер и т.п.). С точки зрения универсальности применения и экономических характеристик, наиболее перспективно использование ветро-дизельных электротехнических комплексов.

Проведенный анализ работ в области автономных ветро-дизельных систем электроснабжения выявил ряд нерешенных вопросов:

- Нет данных о диапазонах эффективного применения и режимах работы ВДЭТК в зависимости от: ветровых условий, установленной мощности ВЭС, ёмкости АБ, режима работы ДЭС;
- Существующие алгоритмы управления не охватывают все варианты построения ВДЭТК, не позволяют провести исследования широкого диапазона их рабочих режимов;
- Доступные модели ВЭС и ДЭС узкоспециализированны, не дают возможностей исследования распределения балансов электрической энергии между элементами ВДЭТК в широком диапазоне режимов работы применяемого оборудования

Существующие программные продукты для построения и анализа работы ВДЭТК имеют склонность к конкретному определению применяемого оборудования, что накладывает ограничения на возможные режимы работы и диапазон мощностей комплекса. Многие могут применяться только для анализа конкретных вариантов ветро-дизельных систем, либо позволяют провести упрощенный расчет в узком диапазоне типоразмеров агрегатов (особенно это касается программ от фирм-

производителей энергетического оборудования, которые включают только свое оборудование). Как правило, производители данных программ не раскрывают информацию об используемых в расчетах алгоритмах и не предоставляют возможности для самостоятельной модификации программ под требуемые задачи. Примером могут служить такие программы, как VEU от разработчиков из Новосибирска и программный комплекс HOMER, разработанный Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (США), программное обеспечение RETScreen для анализа проектов с использованием ВИЭ (Канада). Программных продуктов анализирующих режимы работы энергетического оборудования в составе микросетей в свободном доступе практически нет, разрабатываются они непосредственно в лабораториях предприятий, исследующих перспективы и технические проблемы работы микросетей и, как правило, не предоставляются третьим лицам.

Таким образом, существует острая необходимость разработки автоматизированного алгоритма проектирования и анализа режимов работы ВДЭТК позволяющего производить выбор рационального соотношения мощностей устанавливаемого энергетического оборудования и оптимизировать рабочие режимы автономных электротехнических комплексов с использованием рассредоточенных источников энергии, часть из которых возобновляемые.

Важнейшей целью разрабатываемого алгоритма является снижение расхода топлива ДЭС, что является одной из основных задач повышения эффективности работы автономных ветро-дизельных электротехнических комплексов.

Во второй главе проведен анализ основных конструкций автономных ВДЭТК, особенности их построения и формирования энергоэффективных режимов работы. Рассмотрены технико-экономические характеристики ветро-дизельных энергетических комплексов, алгоритмы взаимодействия элементов ветро-дизельного электротехнического комплекса. Предложены интеллектуальные алгоритмы формирования режимов работы ветро-дизельных электротехнических комплексов на основе нейронных сетей.

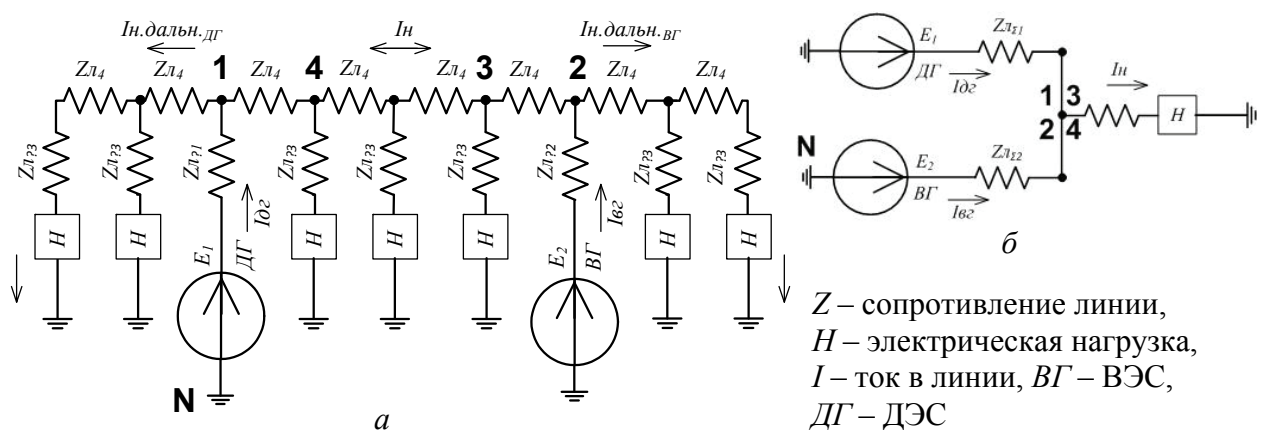


Рисунок 1. Схема электроснабжения с распределенными в пространстве источниками энергии

Для исследования выбраны три основные схемы построения ВДЭТК:

- 1) ВЭС работает с постоянным включением на сборные шины нагрузки потребителя совместно с ДЭС, работающей непрерывно на постоянных оборотах двигателя для обеспечения на выходе стабильной частоты напряжения 50Гц;
- 2) в конструкцию ДЭС внесены изменения: между дизельным двигателем и генератором установлены: соединительная муфта и небольшой инерционный аккумулятор. ДЭС может прекращать работу или переводиться на минимальный холостой ход;
- 3) дизельгенератор работает на переменных оборотах, а необходимые выходные параметры по качеству напряжения и частоты тока выполняются при помощи связки выпрямитель-инвертор. В каждом варианте допускается использование блока аккумулирования электрической энергии

Рассмотрен вариант использования нескольких рассредоточенных энергоисточников, в том числе и различной установленной мощности. На рис. 1а представлена схема замещения подобной микросети. В схеме учтены пространственные связи (линии электропередач (ЛЭП) между элементами генерирующего оборудования и электрической нагрузки. Распределение загрузки между ВЭС и ДЭС достигается путем изменения напряжения на выводах генераторов. Диапазон регулирования напряжения $\Delta U_{pВЭС}$ на выводах ветрогенератора определяется при текущей нагрузке как:

$$\Delta U_{pВЭС} = U_{в} - U_{д}, \quad \text{где} \quad U_{д} = U_{ДЭС} - \Delta U_{л1}, \text{ при } I_{ВЭС} = 0;$$

$$U_{в} = U_{ВЭС} - \Delta U_{л2}, \text{ при } I_{ДЭС} = 0;$$

$U_{ДЭС}$ – напряжение на выводах дизельгенератора; $U_{ВЭС}$ – напряжение на выводах ветрогенератора; $\Delta U_{л1}$ – потери напряжения на участке линии с сопротивлением $Z_{л1}$; $\Delta U_{л2}$ – потери напряжения на участке линии с сопротивлением $Z_{л2}$; $I_{ВЭС}$ – ток ветрогенератора; $I_{ДЭС}$ – ток дизельгенератора.

Процессы с большим процентом случайных тенденций, таких как график электрической нагрузки и ветровых условий, рекомендуется обрабатывать при помощи нейросетевых структур. Алгоритм согласования работы оборудования основан на принципах нейронной сети. Исходными данными являются матрица индексов изменения напряжений, матрица значений мощностей доступных генераторов. В зависимости от того предусмотрено ли автоматическое управление работающими генераторами или нет и какой диапазон регулирования доступен на разрешенном для управления генераторе система рассчитывает возможные комбинации производительности системы. В матрицу доступных мощностей вносится максимальная мощность ВЭС, которую ветрогенератор способен обеспечить при текущих ветровых условиях. Область загрузки ДЭС варьируется в диапазоне доступных режимов. Различным конфигурациям присваивается различный приоритет. Например, работа только от ВЭС имеет наивысший

приоритет, а работа только от дизельгенератора – низший. Алгоритм расчёта одинаков для множества доступных диапазонов регулирования мощностей.

Выходным результатом для оператора является значение оценки скорости и направления изменения напряжения определяемое как среднеарифметическое значение уровней выходных сигналов нейронов. Чем ближе это значение к «1», тем интенсивнее растёт напряжение, тем увереннее нужно считать, что оно растёт и наоборот, чем ближе это значение к «-1», тем интенсивнее в целом по контролируемой системе падает.

Принимая во внимание сложность согласования режимов оборудования автономного ВДЭТК, система контроля и управления работой комплекса должна быть компьютерной.

Исследование режимов работы ВДЭТК показало, что влияние особенностей распределенной генерации в учете потерь электроэнергии в ЛЭП оказывает значительно меньшее влияние на работу комплекса в целом в сравнении с влиянием таких параметров, как соотношение установленных мощностей ВЭС и ДЭС, режима работы ДЭС, наличия и емкости АБ. Соответственно, первоочередной задачей становится исследование работы ВДЭТК в зависимости от отмеченных определяющих факторов. Учитывая это, целесообразно использовать упрощенную модель, где ВЭС и ДЭС находятся в непосредственной близости друг от друга, что является частным случаем распределенной генерации (рис. 1б).



Рисунок 2. Структурная схема алгоритма согласования нагрузки ВДЭТК на основе нейронных сетей

Алгоритм согласования работы основного энергетического оборудования ВДЭТК включает в себя: алгоритм согласования загрузки ДЭС, алгоритм оценки количества вырабатываемой электрической энергии ВЭС, алгоритм оценки величины энергопотребления, алгоритм согласования загрузки блока аккумуляирования электрической энергии. Предлагаемый алгоритм (Рис. 2) построен на принципе приоритетной загрузки ВЭС и

максимальной экономии потребления топлива ДЭС. Система согласования загрузки ДЭС настроена так, чтобы развивать только недостающую мощность, которую не может обеспечить ветрогенератор. Данный принцип управления можно выразить как:

$$P_{ДЭС} = P_H - P_{ВЭС} \text{ (при } P_{ВЭС} \leq P_H),$$

где $P_{ДЭС}$ – мощность ДЭС, необходимая; $P_{ВЭС}$ – мощность ветрогенератора развиваемая; P_H – текущая мощность нагрузки.

При $P_{ВЭС} > P_H$ избыток вырабатываемой энергии будет обеспечивать заряд аккумуляторных батарей (АБ), либо рассеиваться на балластном сопротивлении (нагревательный элемент). Так как мощность, вырабатываемая ветрогенератором, покрывает текущие потребности в электрической энергии, дизельгенератор будет работать на холостом ходу ($P_{ДЭС} = 0$), либо находится в «горячем резерве» и работает в наиболее экономичном режиме на минимальных устойчивых оборотах, либо отключается. Мощность, доступная для заряда аккумуляторных батарей, в этом случае будет определяться следующим выражением:

$$P_{АБ} = P_{ВЭС} - P_H.$$

В случае, если $P_{ВЭС} > P_H + P_{АБ}$, избыток энергии идет будет расходоваться на балластную нагрузку.

Особенностью предлагаемого алгоритма является способность:

- оценивать направление и скорость изменения величины нагрузки;
- учитывать влияние разных потребителей на загрузку оборудования и параметры сети;
- регулировать чувствительность системы согласования нагрузки на изменения параметров сети и нагрузки потребителей;
- масштабирование алгоритма управления при изменениях параметров нагрузки в системе электроснабжения;
- учитывать различную установленную мощность ДЭС, ВЭС, АБ;
- определять предпочтительное к загрузке оборудование и выбирать наиболее рациональные режимы его работы.

Для построения рациональных схем использования ВДЭТК необходимо провести расчеты балансов поступления электроэнергии от ветроустановки и ее расхода (потребления) за любой период или в любой момент времени, что является важнейшей процедурой, позволяющей определить большинство аспектов, характеризующих эффективность работы ветро-дизельного электротехнического комплекса, решить вопросы, относящиеся к комплектации установки аккумулялирующим устройством, резервным или дублирующим агрегатом, определить перспективные сферы использования и т.д. Создание модели, описывающей возможности энергетического оборудования, без привязки к определенным моделям, фирмам производителям и установленной мощности, сохраняя при этом достаточную достоверность получаемых результатов, поможет сократить временные и трудовые затраты при оценке проектов электроснабжения с

использованием ВИЭ. Для этой цели, рационально применить машинную имитацию условий функционирования систем электроснабжения. В данной работе применен метод статистической аппроксимации для формирования рациональных режимов работы автономного ВДЭТК с целью повышения его энергоэффективности.

В третьей главе представлены характеристики преобразования энергии в элементах ВДЭТК, созданы математические модели

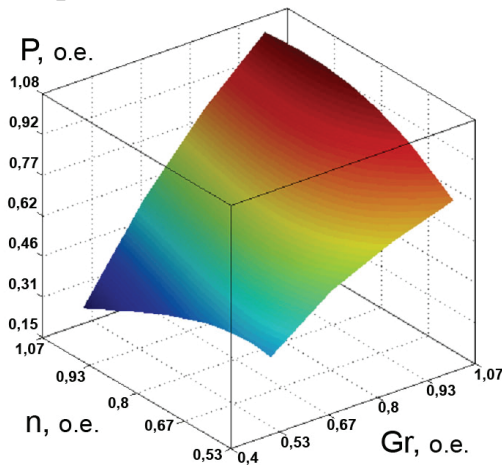


Рисунок 3. Зависимость Gr (абсолютного расхода топлива), оборотов двигателя n и развиваемой мощности ДЭС P

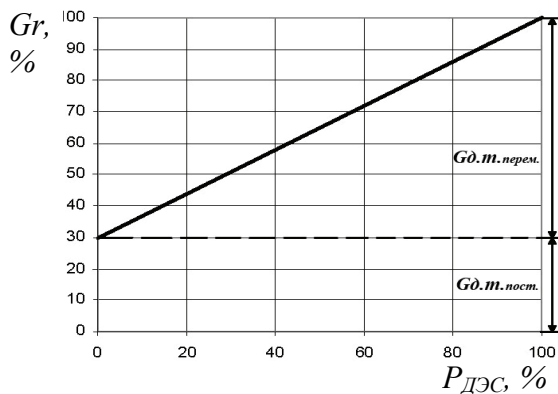


Рисунок 4. Зависимость Gr абсолютного расхода топлива от развиваемой мощности ДЭС

$$Gr = f(P, n)$$

На основе полученной модели, используя статистические данные расхода топлива ДЭС в диапазоне мощностей до 1000 кВт, была построена модель ДЭС на постоянных оборотах вращения дизельного двигателя (1). Полученное выражение можно использовать для определения расхода топлива дизельгенератора в зависимости от нагрузки в системе. Модель позволяет проводить оценку потребления топлива ДЭС $G_{д.т.}$ при различной нагрузке электрогенератора и выделяет затраты топлива на технологический процесс поддержания постоянной частоты вращения $G_{д.т.пост}$ и расход топлива на выработку электроэнергии $G_{д.т.перем}$ (Рис. 4):

энергопреобразования основных элементов ветро-дизельного электротехнического комплекса. Приведены основные энергетические характеристики ДЭС с постоянной частотой вращения двигателя, а также ДЭС инверторного типа. Рассмотрены основные энергетические характеристики ВЭС и проведено их моделирование. Проведено моделирование электрических нагрузок. Рассмотрены основные энергетические характеристики накопителей электроэнергии и проведено моделирование энергопреобразования в них. На основе полученных моделей построена обобщенная модель энергетических балансов автономного ветро-дизельного электротехнического комплекса.

Модель ДЭС на переменных оборотах предоставляет возможность оценить расход топлива двигателем при переменной нагрузке электрогенератора и соответствует поставленным целям и задачам исследования (Рис. 3):

$$G\partial.m. = G\partial.m._{пост} + G\partial.m._{перем} = (K_{XX} + (1 - K_{XX}) P\partial_{тек} / P\partial_{ном}) G\partial.m._{ном}, \quad (1)$$

где $P\partial_{ном}$ – номинальная мощность ДЭС, $P\partial_{тек}$ – текущая развиваемая мощность ДЭС, $G\partial.m._{ном}$ – номинальный абсолютный расход топлива ДЭС при номинальной нагрузке, K_{XX} – коэффициент расхода топлива ДЭС без нагрузки.

Моделирование преобразования энергии ветра в электрическую энергию осуществляется с помощью модели ВЭС. Используя выборку ВЭС разных мощностей и производителей, методом статистической аппроксимации построена усредненная зависимость генерируемой мощности ВЭС в диапазоне скоростей ветра от 3 м/с до 16 м/с (Рис. 5). В результате аппроксимации, получен полином:

$$P_{ВЭС} = P_{ВЭС.НОМ} \cdot (-4,9909 + 68,5187 \cdot V - 384,8555 \cdot V^2 + 1156,9547 \cdot V^3 - 2002,3719 \cdot V^4 + 2010,8539 \cdot V^5 - 1088,8419 \cdot V^6 + 245,7366 \cdot V^7), \quad (2)$$

где $V = V_{ТЕК} / V_{ВЭС.НОМ}$;

$V_{ТЕК}$ – текущая скорость ветра; $V_{ВЭС.НОМ}$ – номинальная скорость ветра ВЭС; $P_{ВЭС.НОМ}$ – номинальная мощность ВЭС.

Созданная модель позволяет оценивать максимально возможную выработку энергии ВЭС в условиях переменных ветровых условий для широкого диапазона установленных мощностей лопастных ВЭС с горизонтальной осью вращения. Модель дает возможность оценить характеристики ВЭС без привязки к конкретной модели оборудования для конкретной скорости ветра, что упрощает сравнительный анализ режимов работы в составе ветродизельного электротехнического комплекса. Особенностью созданной модели является универсальность и невысокая погрешность в наиболее статистически распространенном диапазоне скоростей ветра.

Модель блока накопителя электрической энергии на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (АБ), позволяет оценить возможности применения и определять рациональные режимы работы АБ в составе автономного ВДЭТК при различных режимах его работы. Модель состоит из двух частей: заряд батареи и разряд батареи.

Заряд АБ моделируется, используя метод двухстадийного заряда постоянным током $I_{АБ}^3$ и напряжением $U_{АБ}^3$ для свинцовых АБ, выполненных по технологиям AGM и Gel (сгущенной серной кислоты). В модели заряда АБ в среде MatLab задается следующее правило: ток заряда аккумуляторной

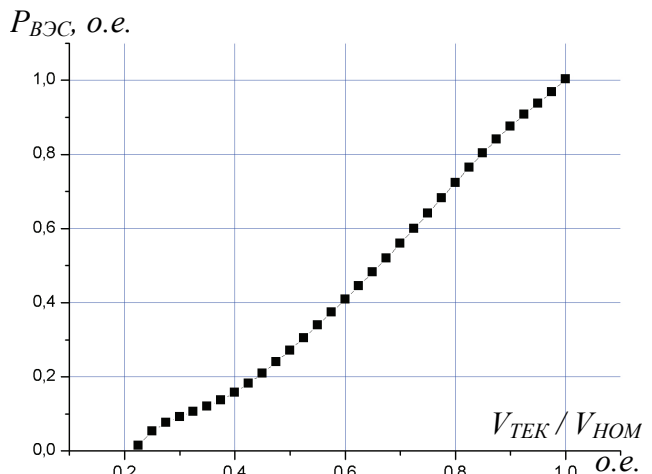


Рисунок 5. Модель развиваемой мощности ВЭС $P_{ВЭС}$ в зависимости от текущих ветровых условий $V_{ТЕК}$

батареи I_{AB}^3 зависит от текущего остаточного заряда АБ: мощность, которую может принять аккумуляторная батарея для заряда, определяется как произведение зарядного тока I_{AB}^3 и зарядного напряжения U_{AB}^3 : $P_{AB}^3 = I_{AB}^3 \cdot U_{AB}^3$, где ток заряда I_{AB}^3 и напряжение заряда U_{AB}^3 будут изменяться в зависимости от текущего заряда аккумуляторной батареи:

$$\left. \begin{aligned} 0-65\% \text{ CA: } I_{AB}^3 &= 0,2 \text{ CA}, U_{AB}^3 = f(\text{CA}), t_{AB}^3 = f(\text{CA}) \\ 65-98\% \text{ CA: } I_{AB}^3 &= f(\text{CA}), U_{AB}^3 = 2,42 \text{ В/эл-т}, t_{AB}^3 = f(\text{CA}) \\ 98-100\% \text{ CA: } I_{AB}^3 &= f(\text{CA}), U_{AB}^3 = 2,28 \text{ В/эл-т}, t_{AB}^3 = f(\text{CA}) \end{aligned} \right\} (3)$$

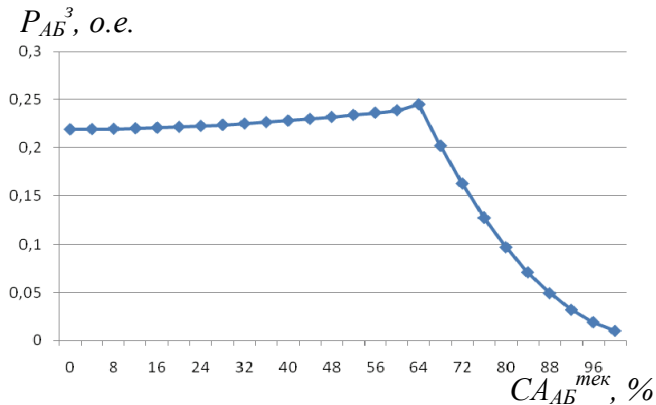


Рисунок 6. Модель зарядной характеристики АБ P_{AB}^3 от степени заряда батареи $CA_{AB}^{тек}$

Современные блоки выпрямления тока и контроля заряда аккумуляторных батарей имеют КПД 97- 99,75%, что позволяет учитывать в расчетах потери на преобразование переменного тока постоянным коэффициентом $k_{вып.}$. Для балансовых расчетов в автономном ВДЭТК удобнее использовать текущую мощность заряда АБ P_{AB}^3 , используемую для оценки количества электроэнергии, потребляемой на

заряд АБ, поэтому результирующая зависимость строиться для мощности заряда АБ (Рис. 6).

Разряд АБ должен учитывать изменение доступной энергии АБ $CA_{дост.}$ в зависимости от подключенной к АБ мощности нагрузки. Проведя анализ технических данных свинцовых аккумуляторных батарей, построена аналитическая зависимость, график которой представлен на рис. 7:

$$CA_{дост.} = (1,579 - 4,277 P_H + 7,067 (P_H)^2 - 5,194 (P_H)^3 + 1,321 (P_H)^4) \cdot CA_{ном} \quad (4)$$

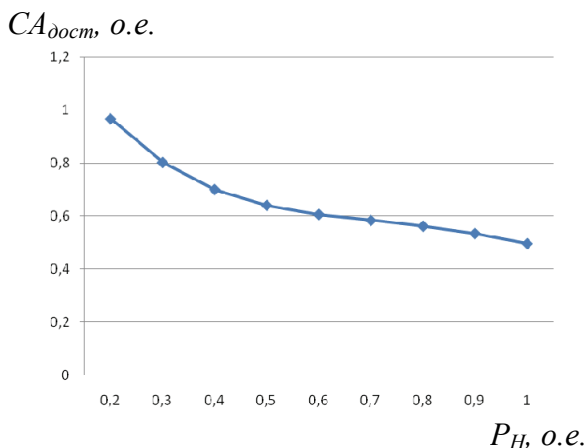


Рисунок 7. Зависимость доступной энергии АБ от мощности потребителя

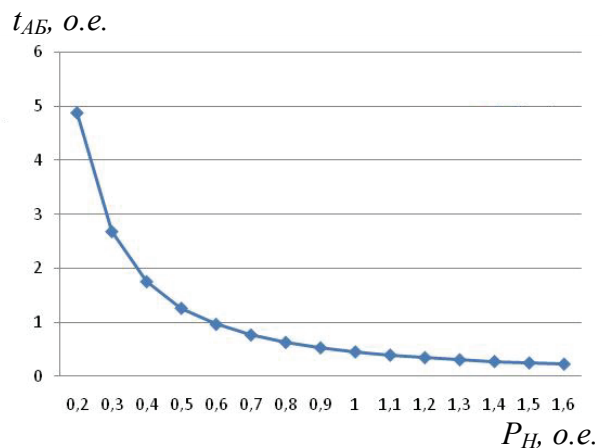


Рисунок 8. Зависимость времени работы АБ t_{AB} от нагрузки P_H

Изменение доступной энергии АБ влечет за собой изменение времени резервирования питания от АБ. Этот параметр очень важен для формирования рациональных режимов в автономном ВДЭТК. Используя выражение (4) построена зависимость максимального времени работы АБ t_{AB} от величины нагрузки P_H , с учетом текущего заряда АБ $З_{AB}$ (рис. 8):

$$t_{AB} = \exp(2,7239 - 6,32736 \cdot (P_H) + 2,52049 \cdot (P_H)^2) \cdot CA_{ном} \cdot З_{AB}$$

Созданные модели обладают достаточной для проводимого исследования точностью и соответствуют целям и задачам исследования.

Все полученные модели объединяются в единую модель автономного ВДЭТК в программной среде Matlab. На рис. 9 представлена структурная схема модели ВДЭТК. Модель обладает открытой архитектурой, адекватно отражает процессы распределения балансов мощностей и позволяет проводить исследования работы автономного ВДЭТК в широком диапазоне установленных мощностей основного энергетического оборудования.

Полученная модель позволяет связать первичные энергоресурсы (ветер, дизельное топливо), нагрузки потребителей и процессы энергопреобразования в элементах ветро-дизельного электротехнического комплекса, что дает возможность провести всестороннее исследование режимов совместной работы оборудования, определить границы энергоэффективного использования оборудования в составе микросети и задать основные принципы эффективного управления автономным электротехническим комплексом.

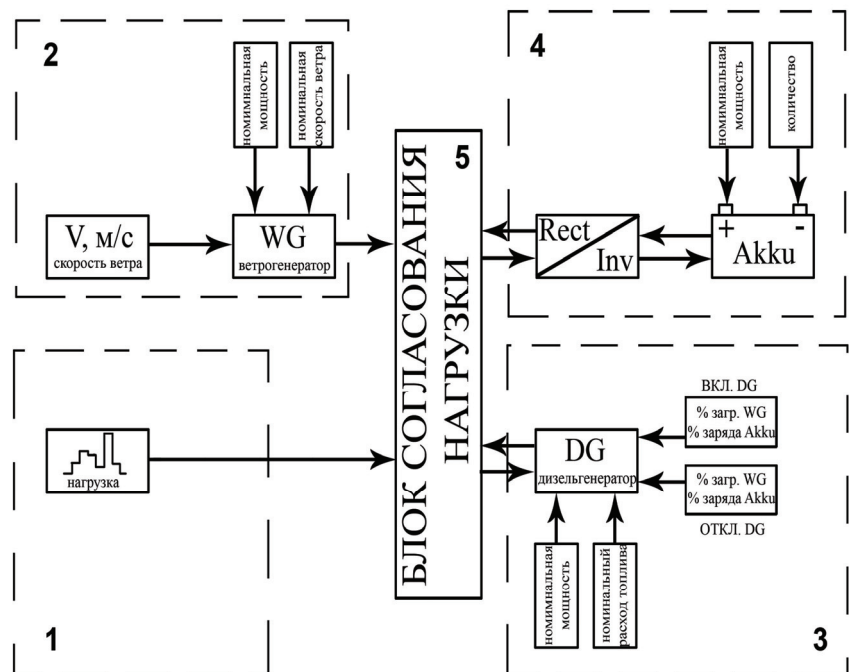


Рисунок 9. Модель ВДЭТК, включая модели: электрической нагрузки потребителей (1), ветрогенератора (2), дизельгенератора (3), заряда-разряда аккумуляторных батарей (4), блока согласования нагрузки (БСН) (5)

В четвертой главе проведен анализ работы ветро- дизельного электротехнического комплекса на базе построенной компьютерной модели в среде программирования Matlab. Определено влияние загрузки ДЭС на величину топливной составляющей в стоимости производства 1 кВт/ч электроэнергии. Диапазон рациональной загрузки дизельной электростанции с постоянными оборотами двигателя из представленной зависимости (рис.10)

выбирается в соответствии с рекомендациями: от 0 до 40% – абсолютно не приемлемый для экономичной работы ДЭС; от 40 до 70 % – условно приемлемый, работа в таком режиме показывает повышенный удельный расход топлива и, соответственно, сниженную эффективность; от 70 до 100 % – эффективный режим работы ДЭС, являющийся приоритетным для использования.

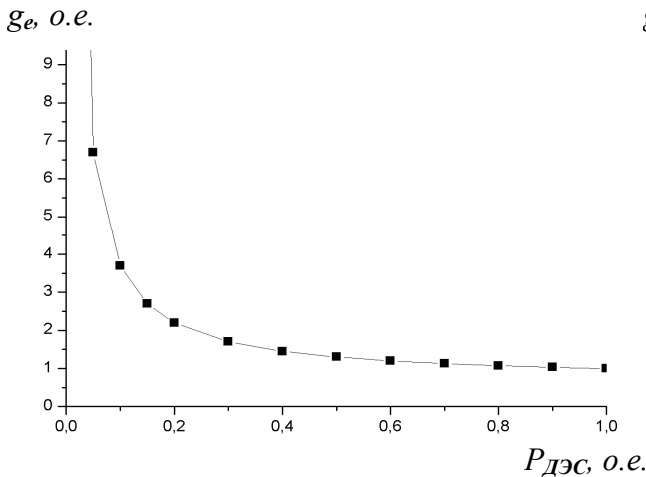


Рисунок 10. Удельный эффективный расход топлива ДЭС на постоянных оборотах двигателя

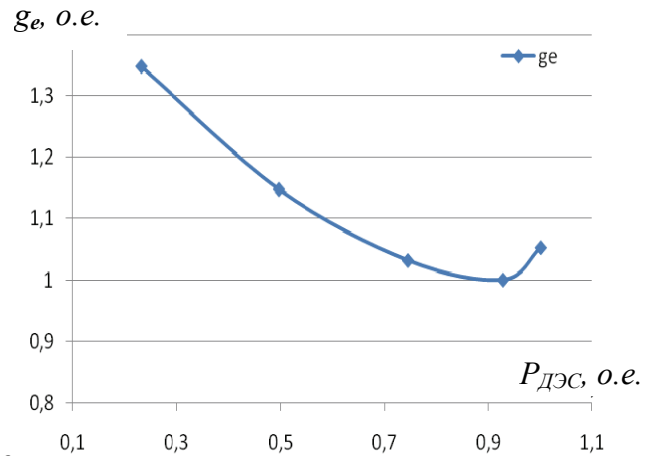


Рисунок 11. Пример типичной расходной характеристики ДЭС инверторного типа

В режимах неполной нагрузки дизельные электростанции инверторного типа всегда эффективнее ДЭС на постоянных оборотах. На рис. 11 представлена типичная зависимость удельного эффективного расхода топлива в зависимости от развиваемой дизельным двигателем мощности при переменных оборотах двигателя. По представленной зависимости можно сделать выводы о рациональной области загрузки ДЭС: от 0 до 50% показывает невысокую эффективность работы ДЭС; от 50 до 75 % является условно приемлемой, Работа в таком режиме характеризуется повышенным удельным расходом топлива; от 75 до 97 % эффективный режимом работы ДЭС, приоритетный для использования.

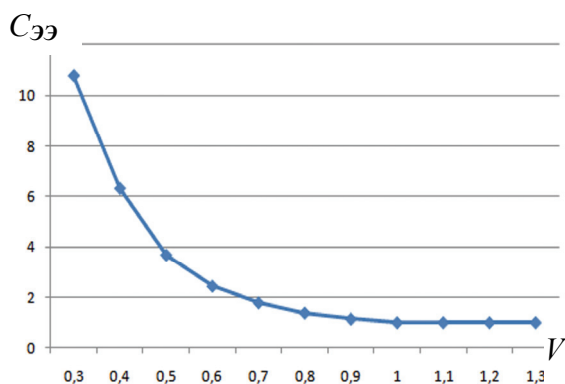


Рисунок 12. Зависимость удельной себестоимости вырабатываемой ВЭУ 1 кВт/ч электроэнергии от текущей скорости ветра V

Определено влияние скорости ветра на себестоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭС и выявлены диапазоны возможного эффективного применения ветроэнергетических установок (рис. 12): до $0,3 \cdot V_{ВЭС.НОМ}$ технически невозможна выработка электроэнергии с помощью ВЭС; от $0,3$ до $0,5 \cdot V_{ВЭС.НОМ}$ удельная себестоимость электроэнергии очень высока и применение ВЭС ограничено районами с крайне высокой себестоимостью

топлива для ДЭС; от 0,5 до $0,75 \cdot V_{ВЭС.НОМ}$ применение ВЭС будет эффективно для большинства децентрализованных потребителей электроэнергии, целесообразно подключение в качестве дополнительного источника энергии, для повышения качества электроэнергии в удаленных точках электроснабжения и в целях экономии привозного топлива для ДЭС; от 0,75 до $1,0 \cdot V_{ВЭС.НОМ}$ применение ВЭС возможно в качестве основного источника энергии (при условии дополнительного резервирования), применение ограничивается лишь возможностью утилизации всей выработанной ВЭС электроэнергии; более $1,0 \cdot V_{ВЭС.НОМ}$ необходимо обратить внимание на ветроэнергетические установки с более высокой номинальной рабочей скоростью ветра.

Для исследования режимов работы ВДЭТК использованы характерные графики нагрузок удаленных потребителей: сельскохозяйственный (С/Х), производственный (деревообработка (Wood), смешанная и прочая несельскохозяйственная (Parn). Определено влияние соотношения установленных мощностей ветро- и дизельгенератора ($P_{ВГ}/P_{ДГ}$) в автономном гибридном ВДЭТК для характерных режимов работы электротехнического комплекса. Выделены следующие области: $P_{ВГ}/P_{ДГ} < 1,2$ –1,4 – эффективное применение ВЭС со значительной экономией расхода топлива ДЭС; $P_{ВГ}/P_{ДГ} > 1,5$ –1,8 не дает заметной экономии топлива. Типичные зависимости среднесуточного расхода топлива $Gr = f(P_{ВГ}/P_{ДГ})$ представлены на рис. 13. Изменение графика нагрузки при сохранении неизменными коэффициента заполнения графика нагрузки K_z и коэффициента неравномерности графика нагрузки K_n не оказывает существенного влияния на эффективность работы ВДЭТК.

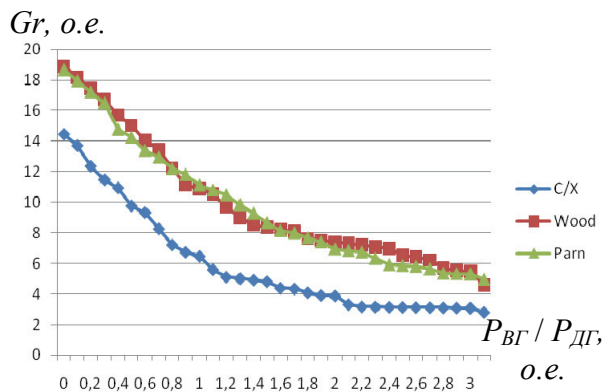


Рисунок 13. Влияние графиков нагрузок на расход топлива ДЭС

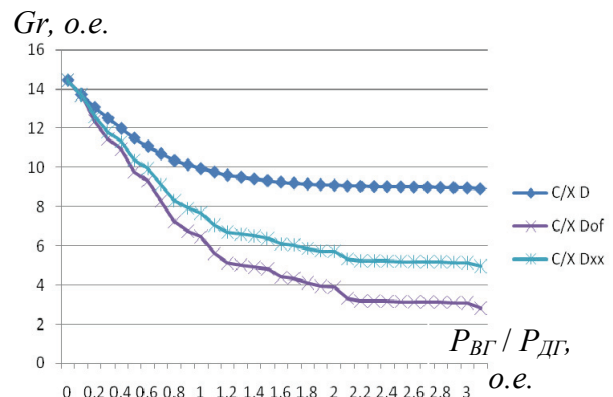


Рисунок 14. Влияние режима работы ДЭС на расход топлива

Выявлено влияние режима работы ДЭС в составе автономного ВДЭТК на расход топлива ДЭС и, следовательно, на эффективность работы комплекса в целом. При расчетах использовались три основных режима работы ДЭС: на постоянных оборотах двигателя (D), с выводом дизельного двигателя на минимальный холостой ход (Dxx), полное отключение двигателя в периоды с благоприятными ветровыми условиями (Dof) (рис. 14). Выделены следующие диапазоны соотношения мощностей: $P_{ВГ}/P_{ДГ} < 0,5$ – изменение режима работы ДЭС не дает ощутимого эффекта; $P_{ВГ}/P_{ДГ} > 0,5$ –

целесообразен вывод ДЭС в режим минимального холостого хода (D_{xx}); $P_{BG} / P_{DG} > 1,0$ – целесообразно отключение двигателя ДЭС в периоды избыточной мощности ВЭС (Dof). Работа на номинальном холостом ходу (D) является наименее рациональным режимом работы ДЭС.

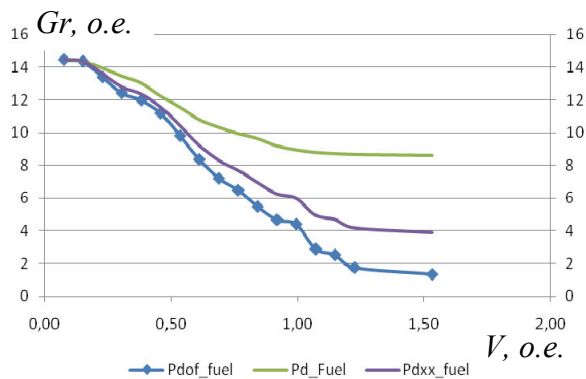


Рисунок 15. Влияние скорости ветра на расход топлива ДЭС

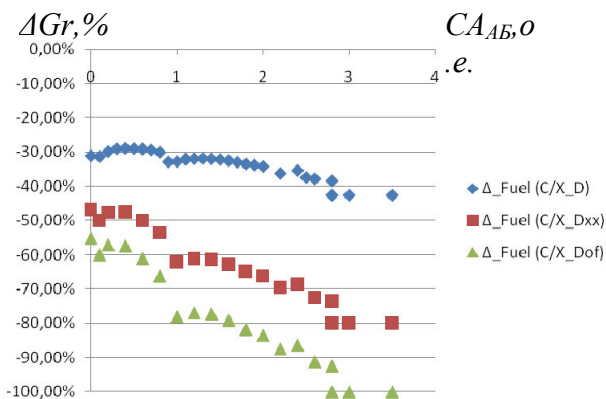


Рисунок 16. Зависимость экономии расхода топлива ДЭС ΔGr от установленной емкости АБ при различных режимах работы ВДЭТК

отключением. В остальных случаях применение АБ не дает ожидаемого эффекта; $CA_{AB} < 2,5 \cdot W$ – эффективная работа не зависит от значения Kz , во всех режимах работы ДЭС, кроме режима холостого хода на номинальных рабочих оборотах двигателя; $CA_{AB} > 2,5 \cdot W$ – максимальная эффективность работы комплекса с блоком АБ, нецелесообразно использование режима работы дизельгенератора на номинальных рабочих оборотах холостого хода двигателя в периоды недостаточной загруженности ДЭС; $CA_{AB} > 3-3,2 \cdot W$ нежелательно, так как, при увеличении капитальных и эксплуатационных затрат на оборудование, не дает увеличения эффективности работы системы в целом и, в некоторых режимах, способно дополнительно перегружать оборудование большими зарядными токами.

Анализ полученных графиков показал отсутствие однозначной зависимости расхода топлива ДЭС в составе ВДЭТК от ограничения значений минимального разряда или максимального заряда АБ от ДЭС независимо от графика электрической нагрузки.

Определено влияние отношения интегрального значения скорости ветра к номинальному $V/V_{BЭС.НОМ}$ на расход топлива ДЭС Gr в составе автономного ВДЭТК при различных режимах работы ДЭС. Диапазон $V/V_{BЭС.НОМ} < 0,5$ наиболее эффективный, к значению 1,0-1,3 потребление топлива достигает своего минимума и ограничивается, прежде всего, расходом ДЭС в диапазоне малых нагрузок и на холостом ходу (рис. 15).

Проведен выбор рациональных диапазонов емкостей АБ в составе автономного ВДЭТК (рис. 16): $CA_{AB} < 1,2 \cdot W$ (где $W = P_{MAX} \Delta t$ – потребление электроэнергии за 1 час при максимальной мощности нагрузки) – эффективный, при условии неравномерности графика нагрузки ($Kz < 0,35$) и использовании режима работы ДЭС с выводом из синхронизма на минимальных холостой ход или полным

В заключении изложены выводы и основные результаты исследований, представленных в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм согласования работы основного энергетического оборудования ВДЭТК в диапазоне до 1000 кВт установленной мощности оборудования, допускающий работу в условиях неопределенности ветровых условий и электрической нагрузки потребителей.

2. Разработаны математические модели энергопреобразования основных элементов автономного электротехнического комплекса, позволяющие формировать рациональные режимы совместной работы ДЭС и ВЭС.

3. Разработана модель энергопреобразования в ВДЭТК, позволяющая решать многокритериальную задачу анализа совместных режимов работы основного энергетического оборудования комплекса с целью снижения расхода топлива на производство электроэнергии, отличающаяся универсальностью по отношению к структуре, режимам, мощностям.

4. Проведен анализ автономных ветро-дизельных электротехнических комплексов и режимов их работы в условиях рассредоточенности энергоисточников и разработаны законы управления балансом электроэнергии, повышающие эффективность применения электротехнических комплексов с использованием ветроэнергетических энергоресурсов.

5. Разработаны практические рекомендации по построению ВДЭТК в зависимости от графиков электрических нагрузок потребителей и ветровых условий местности, позволяющие экономить от 20 до 80 % топлива.

6. Предложенные рекомендации по выбору оптимальных соотношений мощностей ветро- и дизельгенераторов, пакет программ моделирования режимов работы ветро-дизельных электротехнических комплексов используются в ОАО «Сахаэнерго» при разработке новых инвестиционных проектов модернизации автономных систем электроснабжения малых потребителей в северных улусах Якутии с использованием возобновляемых источников энергии, математические модели и методика расчета в учебном процессе при подготовке магистров направления 140200 «Электроэнергетика» в Томском политехническом университете.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Сурков М.А. Анализ расхода топлива дизельной электростанции при постоянных оборотах генератора. Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы Всероссийской научно-технической конференции / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 351с.

2. Сурков М.А. Выбор оптимальных мощностей дизельгенераторов в составе дизельэлектростанций // Современные техника и технологии:

Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных - Томск, 4-8 мая 2009. - Томск: ТПУ, 2009. - с. 99-101

3. Сурков М.А. Оценка экономической эффективности использования ВИЭ для децентрализованного энергоснабжения // Энергетика: экология, надёжность, безопасность: труды пятого Всероссийского студенческого научно-технического семинара - Томск, 23-24 апреля 2003. - Томск: Изд. ТПУ, 2003. - с. 63-65

4. Сурков М.А. Автоматизация процесса оценки экономической эффективности использования ВИЭ //Материалы IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» - Томск, 7-11 апреля 2003. - Томск: Изд. ТПУ, 2003. - с. 67

5. Сурков М.А. Расчет вырабатываемой мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ) //Электроэнергия и будущее цивилизации: Материалы международной научно-технической конференции - Томск, 19-21 мая 2004. - Томск: Изд-во ТГУ, 2004. - с. 194-196

6. Сурков М.А. Расчет мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ) //Современные техника и технологии: Труды Десятой Юбилейной Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 400-летию г. Томска: в 2 т. - Томск, 29 марта-2 апреля 2004. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - с. 61-62

7. Сурков М.А. Децентрализованная система электроснабжения с рассредоточенными источниками энергии //Современные техника и технологии (СТТ'2005): Труды XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 2 т. - Томск, 29 марта-2 апреля 2005 г. - Томск: Изд. ТПУ, 2005. - с. 77-79

8. Сурков М.А. Объединение рассредоточенных источников энергии в микросеть //Современные техника и технологии: Труды XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых - Томск, 27-31 марта 2006. - Томск: ТПУ, 2006. - с. 55-57

9. Сурков М.А., Коновалова Л.П. Математическая модель систем автономного электроснабжения на возобновляемых источниках энергии //Всероссийский конкурс инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение»: Каталог заявленных инновационных проектов - Томск, 26-30 сентября 2006. - Томск: ТПУ, 2006. - с. 15

10. Сурков М.А. Соотношение мощностей ветро- и дизельгенератора в гибридной ветродизельной системе // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – с. 116-118.

11. Сурков М.А., Лукутин Б.В., Коновалова Л.П. Эффективность децентрализованного электроснабжения Томской области с использованием

энергии ветра //Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2007. - т. - № 2. - с. 35-39

12. Сурков М.А., Лукутин Б.В. Расчет вырабатываемой мощности ветроэнергетической установки. // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности – Чита: РИК ЧитГУ, 2010. – Т15, №4. – с. 133-137

13. Сурков М.А. К вопросу о секционировании дизельных электростанций в автономных системах электроснабжения // Инновационная энергетика 2010: материалы второй научно-практической конференции с международным участием. –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 364 с., с.128-132 (ISBN 978-5-7782-1495-8)

14. Сурков М.А. Секционирование дизельных электростанций в автономных системах электроснабжения до 500 кВт // Локальная энергетика: опыт, проблемы, перспективы развития: сборник материалов научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 96 с.

15. Сурков М.А. К вопросу о секционировании дизельных электростанций в автономных системах электроснабжения // Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых. 23 - 25 ноября 2010 г. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — с. 251-252.

16. Сурков М.А. Алгоритм управления автономной ветродизельной системы // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы двенадцатой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, 6-8 декабря 2006. - Томск: ТПУ, 2006. - с. 81-83

17. Сурков М.А. Соединение рассредоточенных источников энергии в микросеть // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сборник докладов международной научно-технической конференции посвященной 50-летию ЛГТУ – Липецк, 18-20 октября 2006.– Липецк:ЛГТУ,2006.– с. 18-22

18. Easy calculation of wind energy generator output // Modern Technique and Technologies: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists - Tomsk. - 27-31 March 2006. - Tomsk: TPU Press. - 2006 - Т. 1. - с. 112-115

19. Сурков М. А., Обухов С. Г., Хошнау З. П. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2011 - №. 2 - С. 25-30 - 5603-2011

Личный вклад автора. Публикации [1]-[8], [10], [13]-[18] выполнены без соавторов. В публикации [9] автору принадлежит создание математической модели энергопреобразования в ДЭС и ВЭС (70%), [11] - разработка модели ВЭУ (30%), в публикации [12] – разработка математической модели энергопреобразования первичного энергоносителя в электрическую энергию в ветроэнергетической установке, анализ методов моделирования ВЭС (80%), в публикации [19] - анализ методов моделирования ВЭУ (30%).