

на правах рукописи

Парников Николай Макарович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
КОМПЛЕКСОВ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
на примере Республики Саха (Якутия)**

Специальность 05.09.03. - Электротехнические комплексы и системы.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Лукутин Борис Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Литвак Валерий Владимирович

кандидат технических наук, доцент
Семенов Валерий Дмитриевич

Ведущая организация: Институт Физико-технических
проблем Севера СО РАН,
(г. Якутск)

Защита состоится 09 декабря 2009 г. в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.11 при Томском политехническом университете в ауд. 217 8-го учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г.Томск, ул.Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г.Томск, ул.Белинского, 55 или на сайте: www.lib.tpu.ru

Автореферат разослан ____ ноября 2009 г.

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

_____ Ю.Н.Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Базовой отраслью промышленности любого государства является энергетика, уровень развития которой во многом определяет условия жизни и быт граждан. В силу особенностей природно-географического положения Якутии энергетическая отрасль имеет для нее особое значение.

Республика Саха (Якутия) расположена на северо-востоке Сибири и является крупнейшим административно-территориальным образованием в Российской Федерации: ее территория (свыше 3 млн. кв. км) составляет 18 % площади РФ. Огромная по площади территория Якутии заселена сравнительно слабо и неравномерно. Численность населения Республики составляет 950,7 тыс. чел., из которых 64 % проживают в городских поселениях и 36 % - в сельской местности. Низкая плотность населения определяет децентрализованный способ энергообеспечения значительной части жителей и хозяйственных объектов Якутии.

Основой комплекса децентрализованного электроснабжения региона является дочерняя компания АК «Якутскэнерго» - ОАО «Сахаэнерго», специализирующаяся на малой энергетике. Территория обслуживания ОАО «Сахаэнерго» составляет 2,2 млн. км² с населением 139,2 тыс. человек, проживающих в 18-ти улусах республики. Жители населенных пунктов и родовых селений северных улусов занимаются сельскохозяйственным производством: разведением крупного рогатого скота, коневодством, оленеводством, рыболовством и охотой. В регионе не функционируют крупные производственные мощности, в связи с этим энергообеспечение, в основном, носит социальный характер. Электроснабжение потребителей в зонах децентрализованного энергообеспечения осуществляется от автономных дизельных электростанций (ДЭС). Соответственно приоритетным направлением социально-экономического развития Якутии является повышение надежности и эффективности комплекса децентрализованного электроснабжения региона.

Определить основные пути совершенствования децентрализованной энергетики региона можно только на основе комплексного системного анализа основных технологических процессов производства, распределения и потребления электрической энергии в децентрализованных зонах. Исходными данными анализа являются технико-экономические характеристики основного электрооборудования, находящего на балансе ОАО «Сахаэнерго», электрические схемы ДЭС и распределительных сетей, географические и климатические условия региона, численность населения и структура секторов экономики, балансы по производству и потреблению электрической энергии за 2004-2008 гг.

Цель работы. Исследование комплекса децентрализованного электроснабжения Республики Саха (Якутия) и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности локальных систем электроснабжения, расположенных в отдаленных районах с суровыми климатическими условиями.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- провести комплексный анализ эффективности использования энергетических ресурсов и установить качественные и количественные

- определить закономерности формирования и регулирования графиков электрических нагрузок потребителей децентрализованных зон в зависимости от сезонной составляющей и времени суток;

- разработать универсальную методику, позволяющую определять необходимый типоразмер и количество силовых агрегатов для вновь проектируемых и реконструируемых дизельных электростанций (ДЭС);

- разработать математическую модель дизельной электростанции, провести исследования ее рабочих режимов с переменной частотой вращения и получить рациональные законы управления ДЭС, обеспечивающие минимизацию расхода топлива на частичных режимах работы;

- разработать методику оценки энергетической эффективности автономных ветро-дизельных энергетических комплексов, позволяющую решать широкий круг задач, связанных с оптимизацией структуры и режимов гибридных энергоустановок с источниками электропитания различных типов.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались: методы анализа и обобщения данных, приведенных в научно-технической литературе; статистические методы анализа данных; методы многофакторного и кластерного анализа совокупности показателей; методы исследования надежности энергетических систем; математические методы нечеткой логики; методы математического моделирования режимов и технико-экономических показателей объектов энергетики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлены на примере Республики Саха (Якутия) особенности энергообеспечения потребителей децентрализованных зон в условиях Крайнего Севера, и установлены функциональные зависимости основных влияющих факторов на процессы энергопотребления.

2. Разработана методика прогнозирования графиков электрических нагрузок потребителей в децентрализованных зонах с учетом численности населенного пункта, его географического положения, времени года, температуры и времени суток.

3. Разработан алгоритм оптимального выбора числа и мощности рабочих силовых агрегатов и оперативного резерва мощности автономных дизельных электростанций (ДЭС) по критерию минимума приведенных затрат.

4. Разработана универсальная методика оценки энергоэффективности автономных ветро-дизельных энергокомплексов, позволяющая оптимизировать структуру и режимы гибридных энергетических установок с источниками электропитания различных типов.

Практическая ценность работы:

- методика прогнозирования графиков электрических нагрузок потребителей децентрализованных зон может быть использована для краткосрочного и долгосрочного планирования режимов работы ДЭС, что обеспечит повышение их энергетической эффективности и надежности.

- методики оптимального выбора числа и мощности рабочих силовых агрегатов и оперативного резерва мощности ДЭС позволяют обеспечить заданный уровень надежности электроснабжения потребителей и сократить расход дизельного топлива на 10-20 %;

– доказана возможность уменьшения расхода дизельного топлива на 10-20 % за счет использования рабочего режима дизель-генераторов при переменной частоте вращения и предложен алгоритм реализации контроллера системы автоматического управления инверторной ДЭС, обеспечивающий минимизацию расхода топлива;

– предложены схемные решения энергоэффективных ветро-дизельных энергетических комплексов, разработаны методики оценки их энергетической и экономической эффективности, даны рекомендации по условиям, объемам и районам их рационального применения в Якутии.

Реализация результатов работы.

Результаты работы использованы в ОАО «Сахаэнерго» для оценки эффективности эксплуатации существующих ДЭС, прогнозирования графиков электрических нагрузок потребителей, выработки рекомендаций по повышению энергоэффективности комплекса децентрализованного электроснабжения региона, а также в учебном процессе Электротехнического института Томского политехнического университета в материалах дисциплины «Нетрадиционные способы производства электроэнергии» инновационной образовательной программы подготовки магистров «Возобновляемые источники энергии» и курса «Автоматизированные системы управления» для студентов, обучающихся по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий».

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Методика прогнозирования режимов энергопотребления децентрализованных потребителей с учетом сезонной составляющей и времени суток, позволяющая обеспечить рациональный режим работы ДЭС и минимизировать расход дизельного топлива.

2. Методики оптимального выбора числа и мощности рабочих силовых агрегатов и оперативного резерва мощности дизельных электростанций, позволяющие минимизировать капитальные и эксплуатационные затраты на станцию и обеспечить заданный уровень надежности электроснабжения потребителей.

3. Алгоритм управления рабочими режимами дизель-генераторов при переменной частоте вращения, позволяющий уменьшить расход дизельного топлива на 10-20 % в режиме малых нагрузок электростанции.

4. Методика оценки энергоэффективности автономных ветродизельных электростанций и рекомендации по их внедрению в децентрализованные зоны электроснабжения Якутии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета, на Межрегиональном научно-техническом семинаре «Энергетика Северо-Востока: состояние, проблемы и перспективы развития», г.Якутск, 2004 г., на Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г.Томск, 2008 г., на Международном научно-техническом семинаре «Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии», г.Томск, 2009 г.

Публикации. Основные положения и результаты выполненных исследований отражены в 10 публикациях, в том числе 2 монографиях и двух изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержащих 174 страниц основного текста, 1 приложения, 35 таблиц, 69 рисунков и списка литературы из 74 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель диссертационной работы, поставлены основные задачи, раскрыта научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ состояния и перспектив развития комплекса децентрализованного электроснабжения Республики Якутия.

Анализ электрического баланса комплекса децентрализованного электроснабжения региона, проведенный для периода 2004 – 2008 гг., показал, что выработка электрической энергии по «Сахаэнерго» за рассматриваемый период практически не изменялась и находилась в пределах 388435 – 431013 тыс. кВт·ч. Средняя выработка на один агрегат составила – 642 – 712 тыс. кВт·ч в год.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что электрический баланс «Сахаэнерго» стабилен, и его значительные изменения в дальнейшем могут быть связаны только с введением в строй крупных объектов производственного или социально-бытового назначения. Полезный отпуск электрической энергии на уровне 80% от выработки свидетельствует о том, что имеются значительные резервы по повышению эффективности режимов работы основного электрооборудования и снижению непроизводственных потерь электрической энергии.

Основными потребителями электрической энергии в децентрализованных зонах Якутии являются сфера услуг и соцкультбыт, а также сельское и городское население. Их общее потребление составляет 82%. На долю промышленности приходится около 16 % отпускаемой с шин ДЭС электрической энергии.

Баланс использования условного топлива по ОАО «Сахаэнерго» в 2007 году представлен на рис.1. Из баланса видно, что эффективность использования топлива (энергии) в децентрализованных зонах составляет 25,2 % (без учета утилизации тепловой энергии). Наибольшие потери наблюдаются в дизель-генераторах при выработке электрической энергии и составляют 68,1 %. Расход топлива на собственные и хозяйственные нужды ДЭС составляет 1,8 % от первичной энергии. В распределительных сетях потери электрической энергии в среднем по ОАО «Сахаэнерго» составляют 4,9 %.

Для оценки региональных особенностей электроснабжения децентрализованных потребителей и выявления основных влияющих факторов, определяющих уровень энергопотребления, применен кластерный анализ обработки плохо формализуемой статистической информации.

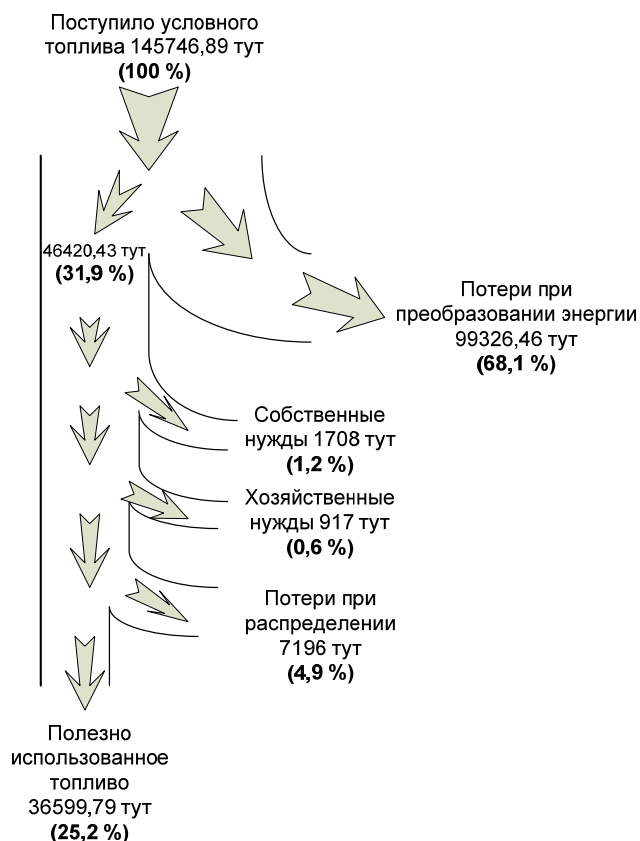


Рис. 1. Баланс эффективности использования топлива по ОАО «Сахаэнерго», 2007 год, тут (%)

Результаты анализа показали, что все ДЭС «Сахаэнерго» целесообразно разделить на три группы (кластеры) по численности обслуживаемого населения: малые, средние и крупные. К ДЭС малой мощности отнесены электростанции, предназначенные для электроснабжения населенных пунктов, численностью до 1000 чел., средней – от 1000 до 3000 чел., к крупным ДЭС – от 3000 чел. и выше.

Координаты центров кластеров приведены в табл.1.

Табл.1

№	Типы ДЭС	Численность населения	Установленная мощность, кВт
1	Малые ДЭС	409	571,3
2	Средние ДЭС	2542	6383,7
3	Крупные ДЭС	4794	14130,3

Результаты кластерного анализа позволили выявить объекты, которые наиболее удалены от центров кластеров и имеют нехарактерные для данной группы объектов характеристики, что свидетельствует о завышенной величине установленной мощности электросилового оборудования.

Получены аналитические выражения, связывающие выработку электроэнергии и численность населения для ДЭС «Сахаэнерго»:

Крупные ДЭС: $W = 8428 + 3.248 \cdot N$

Средние ДЭС: $W = - 2896 + 4.38 \cdot N$

Малые ДЭС: $W = - 284 + 2.315 \cdot N$

где W – годовая выработка электроэнергии ДЭС, тыс.кВт·ч;

N - численность населения, чел.

(1)

Для выявления функциональной взаимосвязи между выработкой электроэнергии и расходом натурального топлива проведен классификационный анализ дизельных электростанций, который позволил разделить все ДЭС «Сахаэнерго» на два класса по уровню выработки электроэнергии. Для каждого класса ДЭС получена своя количественная функциональная зависимость между выработкой электроэнергии и расходом натурального топлива. В результате выявлены ДЭС, имеющие значительные отклонения их энергетических характеристик от средних по региону, что говорит об их высокой или низкой эффективности, соответственно. Полученные зависимости могут найти практическое применение при планировании объемов завоза и необходимых резервов топлива, обеспечивающих бесперебойную работу электростанций.

Анализ состояния комплекса децентрализованного электроснабжения Республики Якутия позволяет сформулировать общие выводы и определить первоочередные задачи по повышению его энергетической эффективности

1. Основной составляющей себестоимости вырабатываемой. ДЭС электрической энергии являются затраты на топливо (цена + доставка). Соответственно, снижение объемов используемого топлива в целом по «Сахаэнерго» является важнейшей технико-экономической задачей предприятия.

2. Уменьшить удельный расхода топлива на выработку 1 кВт·ч электрической энергии возможно за счет оптимизации режимов работы основного электрооборудования.

3. Повысить энергетическую эффективность комплекса децентрализованного электроснабжения региона, обеспечив при этом значительную экономию финансовых и энергетических ресурсов, возможно за счет использования в энергетическом балансе Республики возобновляемых источников энергии.

Вторая глава работы посвящена исследованию соответствия режимов энергопотребления структуре и мощности комплекса децентрализованного электроснабжения региона.

На основе статистического анализа проведены исследования закономерностей формирования и регулирования графиков электрических нагрузок децентрализованных потребителей. Исследования показали, что в силу региональных особенностей общей закономерности в формировании суточных и сезонных графиков нагрузок объектов электроснабжения в децентрализованных зонах Якутии выявить не представляется возможным ввиду значительных различий в составе потребителей, численности населения, географического положения и климатических условий.

В этих условиях определить основные закономерности формирования графиков электрических нагрузок децентрализованных потребителей можно только на основе системного анализа экспериментальных данных, полученных в результате эксплуатации ДЭС в течение длительного периода времени.

В качестве исходных данных при анализе использовались суточные ведомости электрических нагрузок ДЭС «Сахаэнерго» за 2007 год, годовой график среднесуточной температуры, длительность светового дня (определялась по широте установки ДЭС), суточные графики нагрузок в характерные сезоны года.

В качестве примера на рис.2 представлены основные режимные показатели работы ДЭС Чокурдах за полтора года.

Для выявления функциональных зависимостей между температурой, суточной выработкой электроэнергии и суточным максимумом нагрузки произведено нормирование режимных параметров (сортировка значений по температуре), которое позволило получить в качестве описания основных режимных параметров ДЭС не сложные полиномы высокого порядка (см. рис.2), а простые линейные тренды.

Разрешив полученные алгебраические уравнения относительно общей переменной, получены выражения, связывающие суточную выработку электрической энергии и максимальную активную нагрузку с температурой окружающего воздуха:

$$W = 19.855 - 0,358 \cdot T, \quad (2)$$

$$P_{\max} = 1018.31 - 14.887 \cdot T, \quad (3)$$

где T – среднедневная температура окружающего воздуха, °С;

W – суточная выработка электрической энергии, тыс.кВт·ч;

$P_{\max}$ – суточный максимум нагрузки, кВт.

Постоянные коэффициенты в уравнениях (2), (3) соответствуют суточной выработке электроэнергии и максимуму нагрузки при температуре 0 °С. Значения температуры введены в уравнения в абсолютных знакопеременных единицах.

Используя предложенную методику, получены аналогичные зависимости и для других ДЭС «Сахаэнерго». Полученные выражения обеспечивают среднюю погрешность прогноза не выше 14 % для выработки электрической энергии, и не более 11 % для суточного максимума нагрузки. Погрешность прогноза в основном обусловлена суточными колебаниями температуры и более существенна в летние месяцы года.

Для определения основных закономерностей формирования суточного графика нагрузок проведен детальный анализ режимов работы ДЭС с учетом сезонной составляющей. Исходными данными анализа являются фактические суточные графики нагрузок ДЭС в период с 2004 по 2008 г.

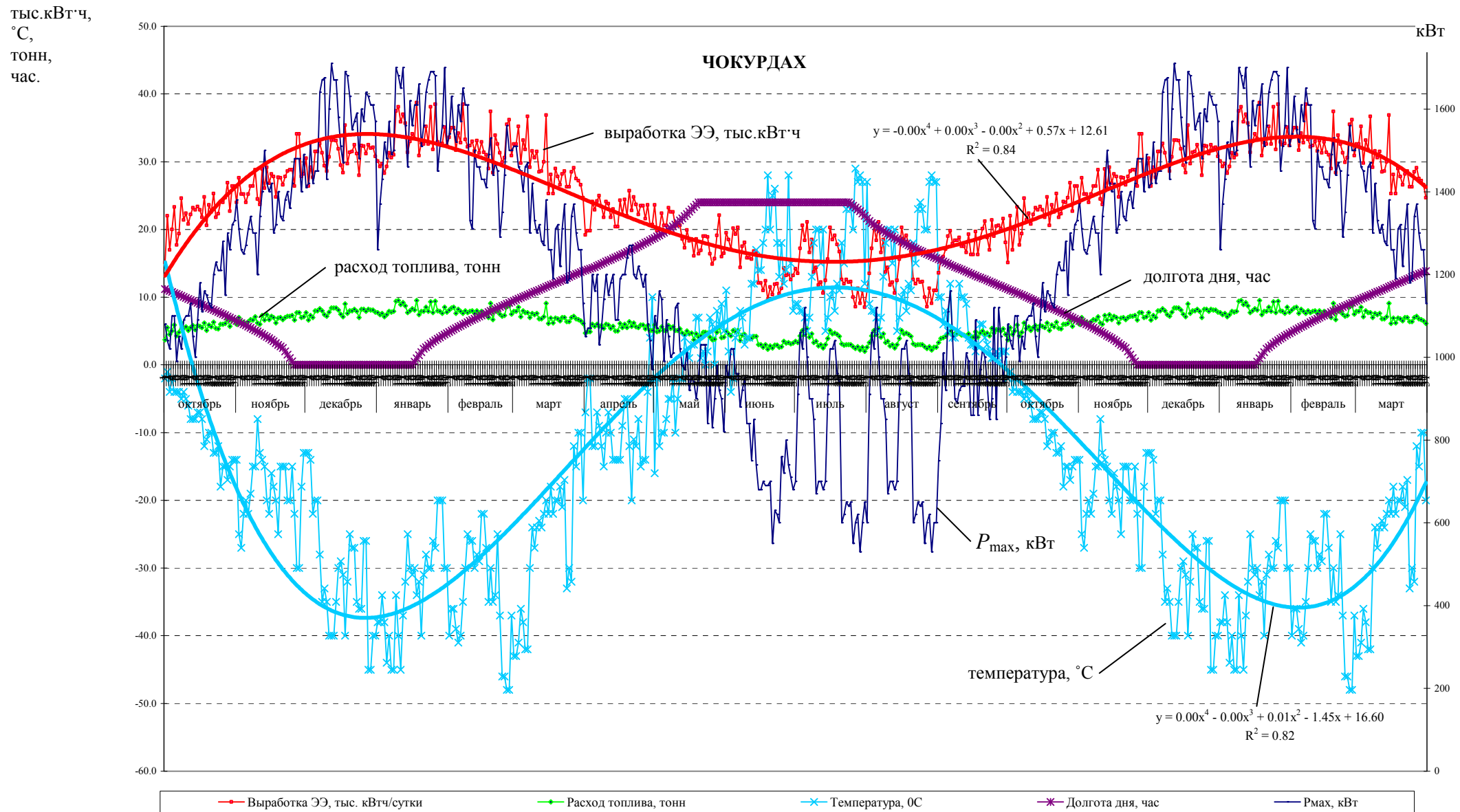


Рис.2. Экспериментальные данные режимных показателей ДЭС Чокурдах

В результате статистической обработки имеющихся экспериментальных данных получены типовые суточные графики нагрузки ДЭС для разных сезонов года. На рис.3 представлен типовой летний суточный график нагрузки ДЭС Чокурдах. График построен в относительных единицах, и его совместное использование с выражениями (2), (3) и фактической (прогнозируемой) температурой окружающего воздуха позволяет достаточно точно предсказать суточные изменение нагрузки ДЭС для любого конкретного дня года.

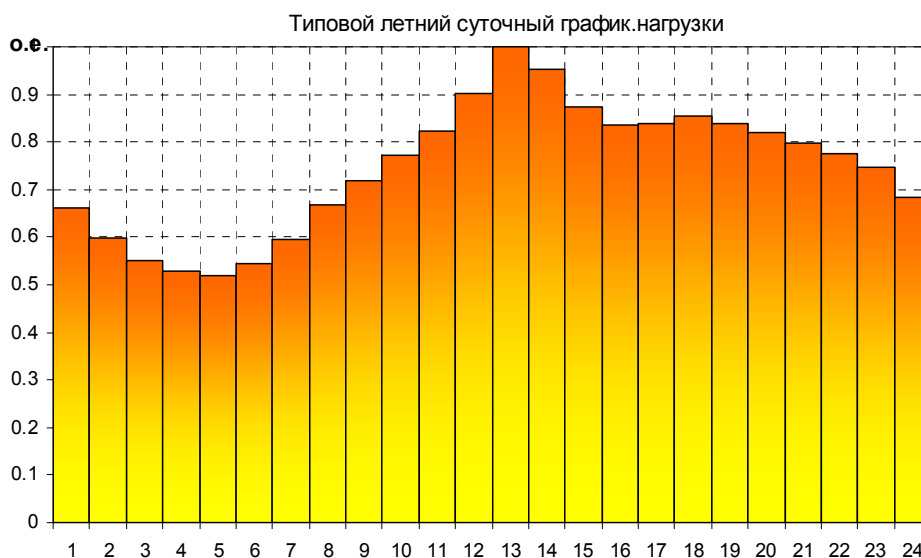


Рис.3. Летний суточный график нагрузки ДЭС Чокурдах

Предложенная методика прогнозирования графиков электрических нагрузок децентрализованных потребителей легко автоматизируется средствами простых прикладных программ и не требует от пользователя умения программирования. Методика апробирована на нескольких ДЭС «Сахаэнерго», отличается простотой в использовании и обеспечивает хорошую достоверность полученных результатов.

В рамках выполнения второй главы работы разработана методика оптимизации числа и типовой мощности рабочих дизельных электроагрегатов автономной ДЭС, используемой в качестве основного источника электроснабжения децентрализованных потребителей. В качестве критерия оптимизации используется минимум приведенных годовых затрат при заданном уровне надежности электроснабжения потребителей:

$$\zeta = A_i \cdot \hat{E} + \dot{E} + \dot{O} \Rightarrow \min \quad (4)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K – капитальные вложения в ДЭС, руб; I – годовые расходы на эксплуатацию станции, руб; V – экономический ущерб от нарушения электроснабжения потребителей, руб.

Суть методики состоит в последовательном технико-экономическом сравнении возможных вариантов исполнения ДЭС, построенной на базе силовых агрегатов различного типоразмера. Выбор суммарной установленной мощности дизель-генераторов производится по условию покрытия максимально возможной нагрузки электростанции; годовые эксплуатационные расходы

рассчитываются с учетом удельного расхода топлива на каждой i -ой ступени суточного графика нагрузки; экономический ущерб от нарушения электроснабжения потребителей определяется через математическое ожидание недоотпуска электроэнергии вследствие возможного дефицита мощности.

Для оценки уровня надежности генерирующих агрегатов ДЭС в работе использован биномиальный закон распределения вероятностей, согласно которому коэффициент готовности (одновременного рабочего состояния) m элементов из n :

$$K_{\bar{a}(m)} = C_n^m \cdot K_{\bar{a}}^m \cdot K_{\bar{a}}^{(n-m)} \quad (5)$$

где
$$C_n^m = \frac{n!}{m! \cdot (n-m)!}; \quad C_n^0 = 1; \quad C_n^n = 1 \quad (6)$$

Номинальная мощность дизель-генераторов и их коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$ определяются по ГОСТ 20439-8, после чего производится расчет ряда распределения коэффициентов мощностей электроагрегатов, находящихся в рабочем состоянии $K_{\bar{a}}^{D_{\bar{a}i}}$, где индекс $P_{\text{ги}}$ соответствует мощности ДЭС при i работающих агрегатах.

Нагрузка станции представляется в виде ряда коэффициентов $K_i^{D_{ij}}$, характеризующих относительную длительность потребляемой мощности $P_{\text{н}j}$ и вычисляемых по формуле:

$$K_i^{D_{ij}} = \frac{t(P_{ij})}{24} \quad (7)$$

где $t(P_{\text{н}j})$ – длительность потребления мощности $P_{\text{н}j}$ по заданному суточному графику, ч; j – количество ступеней суточного графика нагрузки..

При мощности нагрузки, большей суммарной мощности работающих генераторов ДЭС ($P_{\text{н}j} > P_{\text{ги}}$), в системе будет иметь место дефицит мощности

$$P_{\text{дк}} = P_{\text{н}j} - P_{\text{ги}}. \quad (8)$$

Тогда вероятность дефицита мощности:

$$K_{\bar{a}}^{D_{\bar{a}k}} = K_{\bar{a}}^{P_{\bar{a}i}} \cdot K_i^{D_{ij}} \quad (9)$$

где k – число вариантов, когда $P_{\text{н}j} > P_{\text{ги}}$.

Математическое ожидание недоотпуска электроэнергии за год вследствие дефицита мощности составит:

$$\Delta \dot{Y} = 8760 \sum_k P_{\bar{a}k} \cdot K_{\bar{a}}^{D_{\bar{a}k}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (10)$$

Математическое ожидание ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям определяется по формуле:

$$Y = \Delta \dot{Y} \cdot y_0, \text{ руб} \quad (11)$$

где y_0 – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии, руб/кВт·ч.

Абсолютный расход топлива дизель-генератором на отпуск электроэнергии на каждой i -ой ступени суточного графика определяется по формуле:

$$G_{\bar{a}i} = g_{\bar{a}(\bar{a}i)} \cdot K_{\bar{a}}^{D_{\bar{a}i}} \cdot K_{\bar{a}}^{D_{\bar{a}i}} \cdot \dot{Y}_{\bar{a}i} \cdot 10^{-3}, \text{ тонн} \quad (12)$$

где $g_{т(ном)}$ - удельный расход топлива дизелем при номинальной мощности (по паспортным данным), г/кВт·ч; $K_{изн}$ - коэффициент износа; $K_{режi}$ - режимный коэффициент, учитывающий изменение удельного расхода топлива при работе дизель-генератора с нагрузкой, меньшей номинальной; $\mathcal{E}_{вырi}$ - вырабатываемая одним дизель-генератором электрическая энергия на i -ой ступени суточного графика, кВт·ч.

Используя предложенную методику, была произведена оценка энергетической эффективности ДЭС «Сахаэнерго», которая показала, что количество и номинальная мощность силовых агрегатов многих станций выбраны неправильно. При реконструкции ДЭС, связанной с заменой физически и морально устаревших силовых агрегатов, использование предлагаемой методики позволяет обеспечить реальную экономию финансовых средств от 10 до 15 %.

Для минимизации расхода топлива необходимо не только правильно выбрать число и мощность силовых агрегатов ДЭС, но и обеспечить их рациональный режим работы. Под рациональным режимом станции следует понимать своевременный вывод из работы и подключение дизель-генераторов при соответствующем изменении нагрузки, обеспечивающих минимальный удельный расход топлива на всех долевых режимах.

Выбор числа работающих агрегатов m из n возможных для каждого типа ДЭС в расчетах производился из условия:

$$m = \min \{ 0,8 \cdot m \cdot P_{i \dot{i}} \geq D_{i \dot{o}o} \} \quad (13)$$

Физический смысл рационального режима работы ДЭС, обеспечивающего минимальный расход топлива, проиллюстрирован на примере ДЭС Жиганска, построенной на базе 5 дизель-генераторов с номинальной мощностью 630 кВт. Фактический суточный график нагрузки станции на 1 ноября 2007 года и число рабочих силовых агрегатов на каждом долевым режиме, обеспечивающих минимум расхода топлива, представлены на рис.4.

Максимум нагрузки станции в этот день года составил 1560 кВт. Для его покрытия (при загрузке дизель-генераторов не более 80 %) необходимо четыре рабочих силовых агрегата. Если количество рабочих силовых агрегатов в течении суток оставить неизменным (всегда в работе 4), то суммарный суточный расход топлива составит 5,963 тонны. Если же режим работы станции изменять в соответствии с графиком, приведенным на рис.4, суточный расход топлива составит 5,613 тонн, или на 6 % меньше.

Для обеспечения рационального режима работы ДЭС обслуживающему персоналу станции необходимо получать в реальном времени прогнозный график нагрузки потребителя в зависимости от типа станции, времени года и температуры окружающего воздуха. Данная задача может быть успешно решена при оснащении ДЭС особым рабочим местом, построенным на базе персонального компьютера и специализированного программного обеспечения, разработанного на основании методики прогнозирования режимов энергопотребления в децентрализованных комплексах Сахаэнерго, представленной выше. Расчеты показывают, что при оптимальном выборе числа и мощности силовых агрегатов ДЭС и обеспечении рационального режима работы станции можно получить реальную экономию топлива на уровне 10-15%.

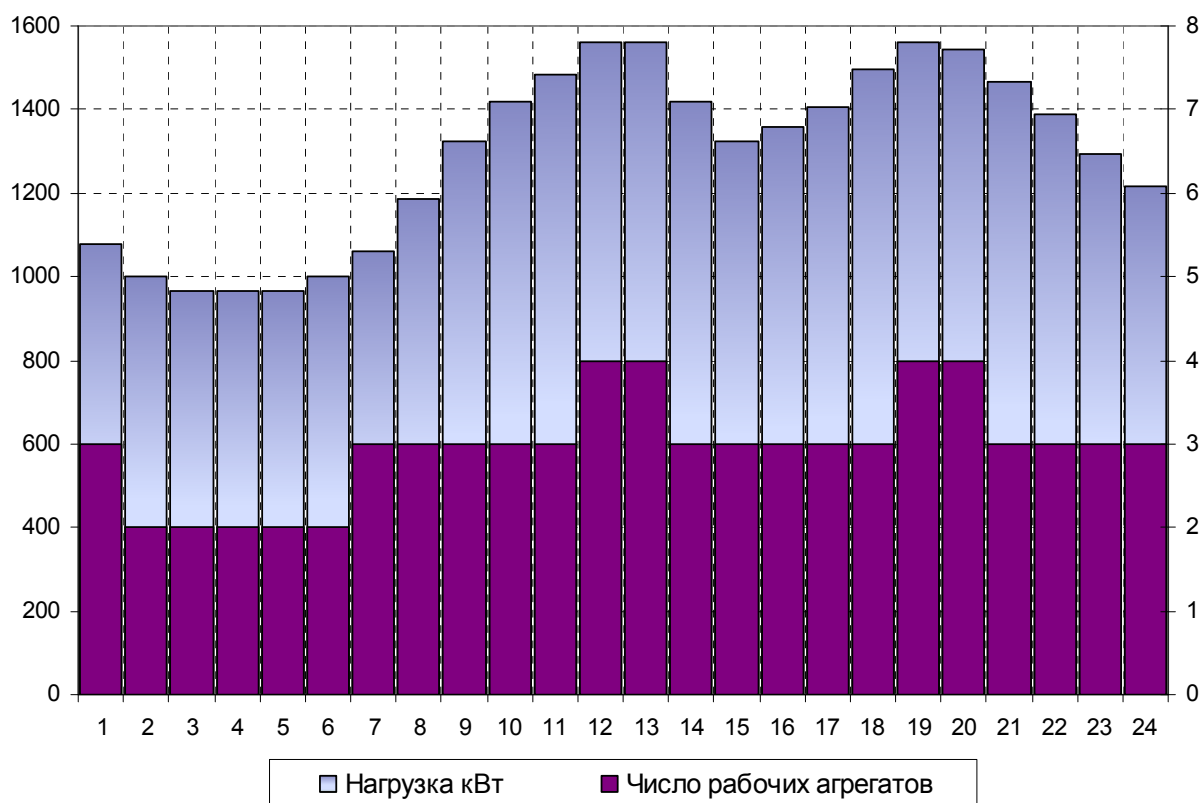


Рис.4. Оптимальные режимные показатели ДЭС Жиганск на 1 ноября 2007 года

Важнейшим показателем энергетической эффективности автономных источников электропитания является уровень надежности электроснабжения потребителей, от величины которого в условиях сурового климата региона во многом зависит энергетическая безопасность населения.

В результате проведенных исследований разработана методика определения оперативного резерва мощности ДЭС, используемых в качестве автономного источника электроснабжения децентрализованных потребителей.

В качестве критерия оптимальности в предлагаемой методике принят минимум приведенных затрат на установку и эксплуатацию дополнительно вводимой мощности силовых агрегатов:

$$\zeta = \zeta_{\Delta D} + \dot{O} = n \cdot K \cdot (\dot{A}_i + \dot{\delta}_y) + \Delta \dot{Y} \cdot \dot{o}_0, \text{ руб} \quad (14)$$

где n – количество дополнительных дизель-генераторов, шт.; K – стоимость энергоустановки на базе одного силового агрегата, руб; E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений p_3 – отчисления на амортизацию, ремонт и обслуживание дополнительных дизель-генераторов; $\Delta \dot{Y}$ – математическое ожидание ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям, кВт; y_0 – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии, руб/кВт·ч.

Методика прошла опытную апробацию на выборочных ДЭС Сахаэнерго, доказана ее адекватность и простота в использовании, и она рекомендована для определения оперативного резерва мощности и других дизельных электростанций региона.

В третьей главе проведены исследования рабочих режимов ДЭС с переменной частотой вращения дизеля и определены перспективы их применения в комплексе децентрализованного электроснабжения региона.

Предмет исследования обусловлен тем обстоятельством, что положенные в основу промышленных ДЭС принципы управления не обеспечивают минимум расхода топлива при изменении нагрузки электростанции.

График нагрузки децентрализованных потребителей изменяется в очень широких пределах, в результате чего силовые агрегаты значительную часть времени работают на частичных режимах с существенной недогрузкой при высоком удельном расходе топлива.

Построение ДЭС в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис.5, позволяет обеспечить устойчивый режим работы дизель-генераторов на частичных характеристиках с относительно меньшим расходом топлива. Для обеспечения стандартных параметров вырабатываемой электрической энергии обязательными элементами ДЭС с переменной частотой вращения дизеля (ДВС) являются выпрямитель (В), автономный инвертор (АИ), мощность которых должна быть рассчитана на полную мощность нагрузки, и система управления (СУ).

Проведенные в работе исследования статических характеристик дизельного двигателя доказали возможность его работы на более экономичных частичных характеристиках с меньшим удельным расходом топлива, которые могут быть обеспечены только при частотах вращения, меньше номинальной. Для достижения данных режимов работы ДЭС должна быть оснащена специализированной системой автоматического управления, обеспечивающей регулирование расхода топлива и напряжения возбуждения генератора по сложным законам, в соответствии с изменяющейся величиной нагрузки электростанции.

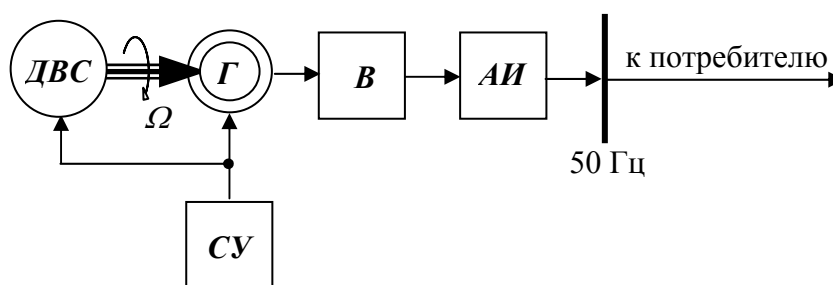


Рис.5. Функциональная схема ДЭС с переменной частотой вращения дизеля

Для определения оптимальных законов управления режимами инверторной ДЭС разработана математическая модель автономной энергетической системы, включающая математическое описание дизельного двигателя, синхронного генератора, регулирующих систем и нагрузки. В качестве инструмента моделирования использовалась среда *MATLAB*®

Для моделирования дизельного двигателя предложена простая функциональная модель, которая строится по его фактической нагрузочно-скоростной характеристике, устанавливающей зависимость эффективной мощности дизеля N_e , удельного расхода топлива g_e и других параметров от частоты вращения вала n и среднего эффективного давления p_e , рис.6

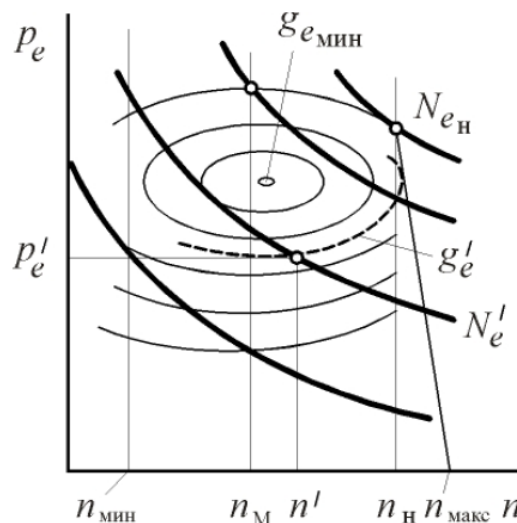


Рис. 6. Нагрузочно-скоростная характеристика дизеля

На рис.7 представлена вероятностная математическая модель дизеля В2-450АВ-03, которая представляет собой поверхность, устанавливающую однозначную взаимосвязь между скоростью вращения вала (speed), мощностью дизеля (power) и абсолютным расходом топлива (fuel_hour).

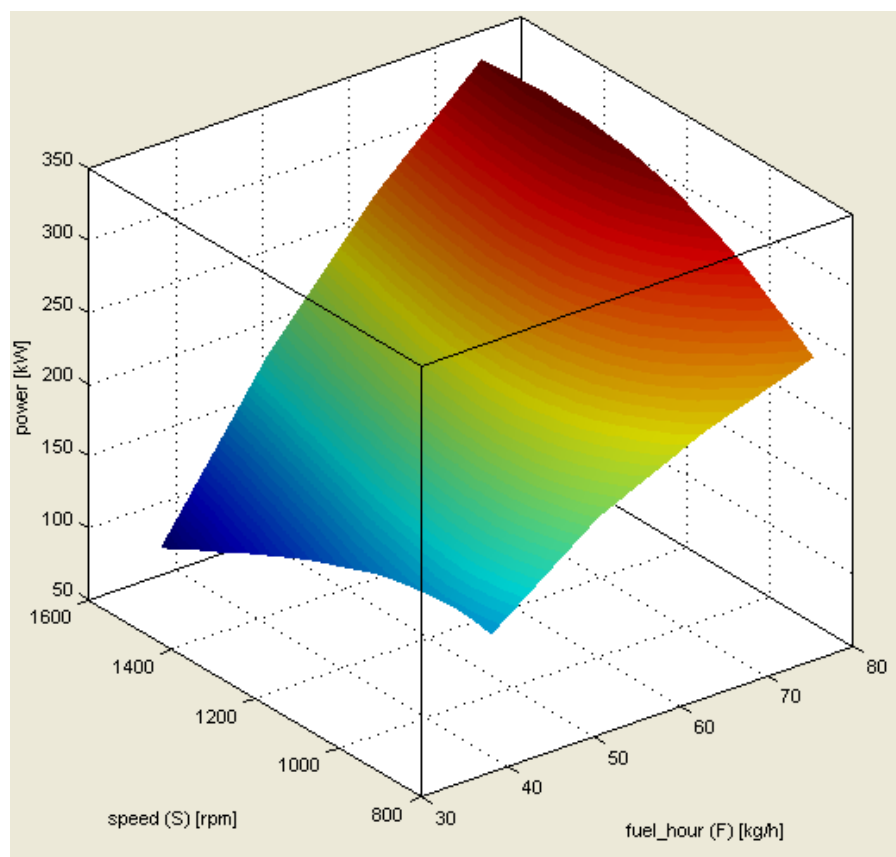


Рис. 7. Вероятностная математическая модель дизеля В2-450АВ-03

При моделировании электрического генератора, регулирующих систем и нагрузки использовались известные математические приемы и методы, общепринятые при математическом описании подобных устройств.

Проведенные с использованием математической модели ДЭС исследования ее рабочих режимов позволили определить оптимальные законы управления регулирующими системами, обеспечивающих минимум расхода топлива при изменяющейся нагрузке электростанции, рис.8,9.

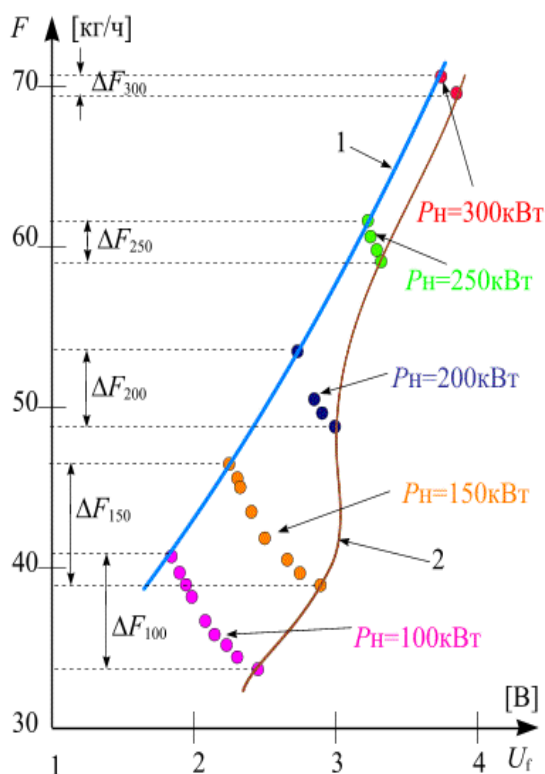


Рис.8. Законы управления топливного регулятора
1 – классической структуры ДЭС
2 – структуры инверторной ДЭС

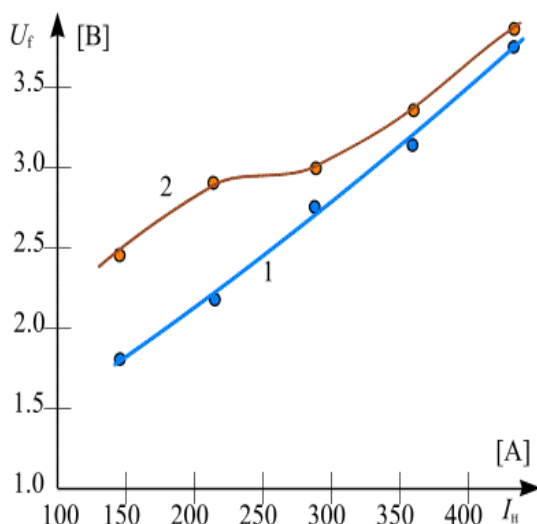


Рис.9. Законы управления регулятора возбуждения СГ
1 – классической структуры ДЭС
2 – структуры инверторной ДЭС

Результаты исследования рабочих режимов ДЭС с переменной частотой вращения дизеля показали, что для обеспечения энергетически эффективного режима работы энергоустановки, построенной на базе силовых агрегатов различного типоразмера, необходимы специализированные контроллеры, обеспечивающие соответствующие алгоритмы регулирования подачи топлива и напряжения возбуждения генератора.

В результате проведенных исследований разработан алгоритм управления и функциональная схема контроллера (рис.10) инверторной ДЭС, построенного на нечеткой логике, который в режиме реального времени может управлять рабочими процессами электростанции в условиях динамической нагрузки.

Проведенные технико-экономические расчеты показали, что перевод ДЭС Сахаэнерго в инверторный режим работы позволит уменьшить расход дизельного топлива от 10 до 20 % в зависимости от графика нагрузки потребителей, что обеспечит предприятию годовую экономию финансовых средств до 150 млн.руб.

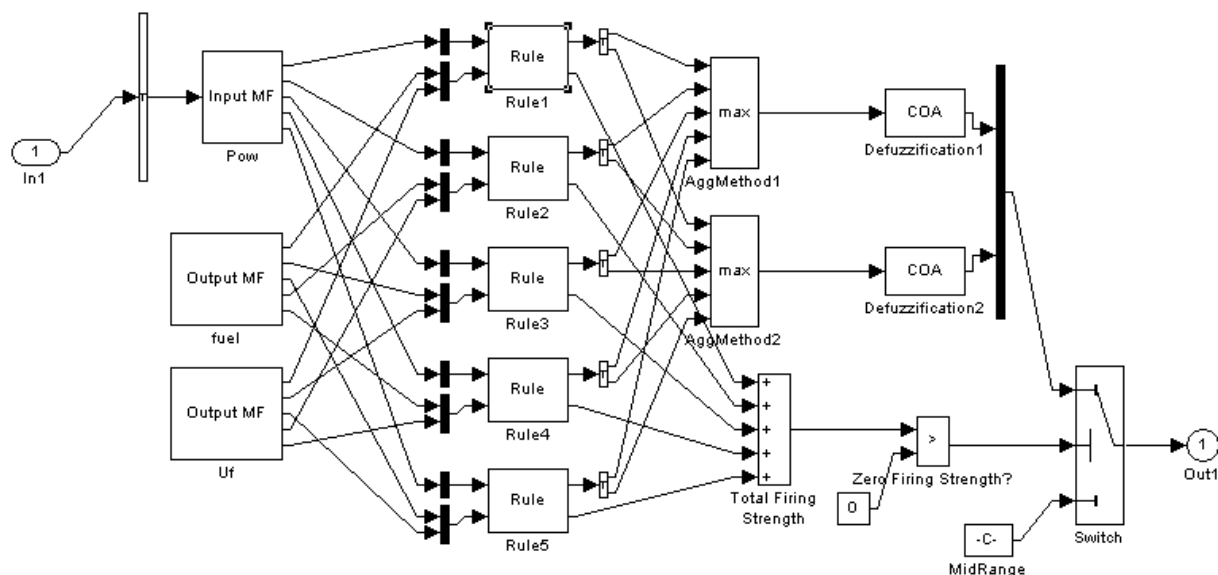


Рис. 10. Функциональная схема контроллера инверторной ДЭС

В **четвертой главе** диссертационной работы определены перспективы использования местных возобновляемых энергетических ресурсов в энергетическом балансе региона.

Сравнительная оценка экономической эффективности использования возобновляемых источников энергии показала, что единственным возобновляемым энергетическим ресурсом в регионе, который может найти практическое применение для повышения энергетической эффективности комплекса децентрализованного электроснабжения Республики, при существующих на сегодняшний день технологиях возобновляемой энергетики, является энергия ветра.

На основании статистических данных о максимальных и минимальных электрических нагрузках ДЭС Сахаэнерго за 2004-2008 годы были определены номинальные мощности ВЭУ, рекомендованные к внедрению на соответствующих электростанциях, которые представлены в табл.2.

Табл.2.

Мощность ВЭУ, рекомендованная к первоочередному внедрению в Сахаэнерго

Наименование ДЭС	$P_{ВЭУ}$, кВт	$V_{ср}$, м/с	Наименование ДЭС	$P_{ВЭУ}$, кВт	$V_{ср}$, м/с
Анабарский РЭС			Нижнеколымский РЭС		
Саскылах	250	5,6	Андрюшкино	100	5,7
Юрюнг-Хая	100		Колымское	100	
Булунские ЭС			Походск	20	
Быков Мыс	50	6,9	Янские ЭС		
Кюсюр	100		Депутатский	1000	6,0
Найба	70		Казачье	100	
Намы	50		Нижнеянск	250	
Сиктях	30		Сайылык	100	
Таймылыр	50		Тумат	30	
Тикси	750		Усть-Куйга	250	
Усть-Оленек	10		Усть-Янск	30	
			Хайыр	30	
		Юкагир	10		

Результаты расчетов экономической эффективности применения ВЭУ в энергетическом балансе комплекса децентрализованного электроснабжения Республики Саха (Якутия) представлены в табл. 3.

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что развитие ветроэнергетики в регионе требует значительных инвестиций. Наиболее перспективным районом для первоочередного использования ветроэнергетических установок в энергетическом балансе комплекса децентрализованного электроснабжения Республики Саха (Якутия) является Булунский улус. Географическое расположение улуса характеризуется высокими среднегодовыми скоростями ветра в местах установки существующих ДЭС, что требует наименьших затрат на внедрение ВЭУ.

Разработан универсальный метод оценки энергетической эффективности автономных ветро-дизельных энергетических комплексов, основанный на критерии полного коэффициента полезного действия (КПД) энергосистемы. КПД гибридного энергокомплекса определяется коэффициентами полезного действия элементов каждого канала генерирования и преобразования электроэнергии, которые, в свою очередь, определяются многими режимными и конструктивными факторами.

Табл.3

Приближенные результаты оценки экономической эффективности
применения ВЭУ в Сахаэнерго

Наименование ДЭС	$P_{ВЭУ}$, кВт	$V_{ср}$, м/с	Годовая выработка э/э, тыс.кВт·ч	Годовая экономия топлива, тонн	Стоимость ВЭУ, тыс. руб.	Срок окупаемости, лет
Анабарский РЭС						
Саскылах	250	6.98	220.7	35.3	8125	11.5
Юрюнг-Хая	100	6.43	69.0	11.0	3750	17.0
Булунские ЭС						
Быков Мыс	50	7.92	99.0	19.8	2125	5.4
Кюсюр	100	8.00	132.9	21.3	3750	8.8
Найба	70	8.00	142.9	28.6	2975	5.2
Намы	50	7.92	99.0	19.8	2125	5.4
Сиктях	30	7.48	63.6	12.7	1275	5.0
Таймылыр	50	7.92	99.0	19.8	2125	5.4
Тикси	750	8.78	762.5	122.0	18750	7.7
Усть-Оленек	10	6.90	16.7	3.3	425	6.4
Нижнеколымский РЭС						
Андрюшкино	100	6.54	72.6	11.6	3750	16.1
Колымское	100	6.54	72.6	11.6	3750	16.1
Походск	20	6.06	22.6	4.5	850	9.4
Янские ЭС						
Депутатский	1000	8.12	804.2	128.7	25000	9.7
Казачье	100	6.88	84.5	13.5	3750	13.9
Нижнеянк	250	7.07	229.3	36.7	8125	11.1
Сайбылык	100	6.88	84.5	13.5	3750	13.9
Тумат	30	6.38	39.5	7.9	1275	8.1
Усть-Куйга	250	7.07	229.3	36.7	8125	11.1
Усть-Янск	30	6.38	39.5	7.9	1275	8.1
Хайыр	30	6.38	39.5	7.9	1275	8.1
Юкагир	10	6.00	11.0	2.2	425	9.7
Итого:			4122.9	686.6	131775.0	

Функциональные схемы ДЭС с переменной частотой вращения дизеля удачно сочетаются с ветроэнергетическими установками, большинство из которых имеют в своем составе выпрямитель и инвертор, рис.11.

В работе приведены примеры проектирования подобных комплексов и предложена методика оценки их энергетической и экономической эффективности.

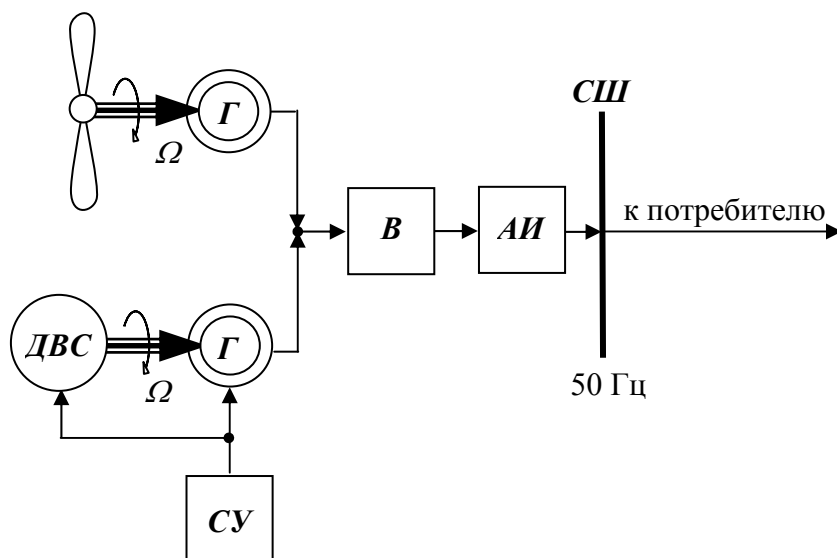


Рис.11. Ветродизельный энергетический комплекс с переменной частотой вращения дизеля

В **заключении** сформулированы основные научные результаты работы, даны рекомендации по их практическому использованию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в диссертационной работе исследований, направленных на повышение энергетической эффективности комплексов децентрализованного электроснабжения, можно сделать следующие выводы:

1. Проведен детальный анализ состояния комплекса децентрализованного электроснабжения Якутии и определены основные направления повышения его энергоэффективности. Энергетическая эффективность комплекса может быть повышена за счет сокращения расхода дизельного топлива, что достигается путем оптимизации необходимых типоразмеров и количества силовых агрегатов ДЭС, реализацией рациональных режимов работы электростанций, замещения части органического топлива ветроэнергетическими установками. Заданный уровень надежности электроснабжения потребителей может быть обеспечен за счет оптимального выбора оперативного резерва мощности ДЭС.

2. Выявлены основные закономерности формирования и регулирования графиков электрических нагрузок децентрализованных потребителей региона, разработан метод прогнозирования режимов энергопотребления децентрализованных потребителей с учетом сезонной составляющей и времени суток, позволяющий реализовать эффективное управление рабочими режимами ДЭС в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

3. Разработана математическая модель автономной дизельной электростанции, позволяющая проводить исследования ее рабочих режимов. Для моделирования дизельного двигателя предложена простая вероятностная модель, которая строится по его фактическим экспериментальным характеристикам, а достоверность модели оценивается статистическими параметрами.

4. Проведены исследования рабочих режимов ДЭС с переменной частотой вращения дизеля, доказана возможность уменьшения расхода дизельного топлива на 15-20 % за счет реализации эффективных рабочих режимов

электростанции, получены рациональные законы управления подачей топлива и регулирования напряжения возбуждения синхронного генератора. На основе нечеткой логики реализован алгоритм системы автоматического управления рабочими процессами инверторной ДЭС, обеспечивающий минимальный расход топлива в условиях изменяющейся нагрузки.

5. Проведена оценка экономической эффективности использования возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе децентрализованных зон и установлены приоритетные направления и объемы их применения. Определены первоочередные места размещения ветроэнергетических установок, предложены способы их эффективного сопряжения с действующими ДЭС. Разработан универсальный метод оценки энергетической эффективности автономных ветро-дизельных энергетических комплексов, проведена оценка их энергетической и экономической эффективности, даны рекомендации по их построению и условиям рационального применения.

6. Показаны технико-экономические возможности гибридных энергетических комплексов с аккумулированием энергии, предложены их эффективные схемные решения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Безруких П.П., Парников Н.М. и др. Концепция использования ветровой энергии в России / Под редакцией Безруких П.П. – М.: Книга-Пента, 2005. – 128 с.
2. Ильковский К.К., Парников Н.М. и др. Дизельные электростанции / Под редакцией Левинского А.П. – Хабаровск: Изд. дом «Приамурские ведомости», 2003. – 160 с. + 16 с. вкл., ил.
3. Ильковский К.К., Парников Н.М. и др. Проблемы малой энергетики в энергоизолированных районах Сибири и Дальнего Востока. Горный журнал. Спец. выпуск, 2004. – М.: Московская типография №13.
4. Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Исследование закономерностей формирования графиков электрических нагрузок децентрализованных потребителей Республики Саха (Якутия) // Электрические станции, 2008. - т. - № 9. - С. 53-58
5. Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., 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
6. Лукутин Б.В., Парников Н.М. Энергоэффективность автономных ветродизельных комплексов // Электрика, 2007. - т. - № 9. - С. 19-23
7. Парников Н.М. Большие проблемы малой энергетики в Республике Саха (Якутия) // Малая энергетика, 2004. - №1. – С.59-68
8. Парников Н.М. Оптимизация режима работы дизельных электростанций ОАО «Сахаэнерго» // Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: материалы Международного научно-технического семинара. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С.3-4.

9. Парников Н.М. Оценка энергетической эффективности комплекса децентрализованного электроснабжения республики САХА (Якутия) // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы всероссийской научно-технической конференции - Томск, 12-14 мая 2008. - Томск: ТПУ, 2008. - С. 182-184
10. Парников Н.М. Техническая политика в области развития малой энергетики Севера // Межрегиональный научно-технический семинар Энергетика Северо-Востока: состояние, проблемы и перспективы развития: Сборник докладов и научных статей. Якутск, 2004. –ЭФ ГУ и Изд-во СО РАН. – С.237-240.

Личный вклад автора. Публикации [8] – [10] выполнены без соавторов. В публикации [1] автору принадлежит обоснование потенциального спроса на ветроустановки в составе автономных систем энергоснабжения (10 %), в публикации [2] предложения по автоматизации режимов работы дизельных электростанций (15 %), в публикациях [5], [6] разработка универсального метода оценки энергетической эффективности автономных ветро-дизельных энергетических комплексов (60 %), в публикациях [3], [4] методика прогнозирования режимов энергопотребления децентрализованных потребителей и технико-экономическая оценка гибридных энергетических установок (80 %).