

На правах рукописи

БЕССАРТ Василий Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР И АЛГОРИТМОВ
УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ
С ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ.**

Специальность 05.14.02 – электрические станции и
электроэнергетические
системы.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт - Петербург – 2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Орлов Анатолий Васильевич.

Официальные оппоненты: академик РАН, доктор технических наук,
профессор
Данилевич Януш Брониславович
кандидат технических наук, доцент
Беляев Андрей Николаевич

Ведущая организация: Инженерный Центр Научно-производственного объединения “Звезда”.

Защита состоится “ 16 ” мая 2003 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при Санкт-Петербургском Государственном Политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая 29, главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского Государственного Политехнического университета.

Автореферат разослан “ 14 ” апреля 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Е.Н.Попков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. В последние годы резко возросла проблема энергоснабжения автономных объектов. Многие районы Российской Федерации находятся в зонах, удаленных от электрических сетей, особенно на ее северных территориях. Традиционно в качестве источника энергии на таких объектах используются дизельные электростанции (ДЭС) и котельные агрегаты или только ДЭС. Рост цен на топливо приводит к его острому дефициту для потребителей автономных объектов. Обеспечение удаленных районов топливом во многом осложняется отсутствием развитой транспортной сети. Его доставка морским путем в северные регионы возможна только в короткие периоды навигации. В результате транспортных расходов цена жидкого топлива в несколько раз превышает его начальную стоимость. На многих объектах существующие ДЭС выработали свой ресурс и нуждается в замене. Существенны также экологические проблемы, связанные с выбросом в атмосферу отработанных газов, доставкой жидкого топлива и последующей утилизацией транспортировочных емкостей. Все это приводит к необходимости искать нетрадиционные пути энергообеспечения автономных объектов.

В настоящее время все более пристальное внимание уделяется возможности использования возобновляемых источников энергии. Наиболее перспективным направлением в области автономного энергоснабжения с использованием возобновляемой энергии на территории Российской Федерации является ветроэнергетика. Северные территории обладают существенными ветровыми ресурсами, и очевидно, что их можно использовать. Однако до настоящего времени эти работы велись слабо из-за нескольких неудачных результатов использования ветроэнергетических установок (ВЭУ). Причина этих неудач в том, что нерационально строились структуры энергопотребления автономных объектов. ВЭУ использовались только для выработки электроэнергии и включались параллельно с ДЭС. В результате проектируемые системы энергоснабжения получались неоправданно дорогими, а их использование становилось экономически невыгодным. Энерготехнологический аудит объектов на севере показывает, что ВЭУ необходимо использовать преимущественно для получения тепловой энергии. При этом важное значение имеет возможность использования аккумуля-

лирующих способностей систем теплоснабжения. В результате можно упростить конструкцию ВЭУ и значительно снизить общую стоимость системы энергообеспечения от ВЭУ.

Поэтому создание общей методики проектирования систем автономного энергообеспечения (САЭ) с ВЭУ и ДЭС, в которых бы учитывались структура потребления энергии на автономных объектах, ветроресурсы, особенности ВЭУ и экономические факторы, является актуальной научно-практической задачей.

Целью диссертационной работы является создание общей методики проектирования систем автономного энергообеспечения с ВЭУ и ДЭС, обеспечивающей их наиболее эффективное использование в составе системы автономного энергоснабжения. Основные части общей методики:

1. Методика экономического обоснования целесообразности применения ВЭУ в автономных системах энергоснабжения.
2. Методика обеспечения оптимальной работы ВЭУ за счет управления режимами энергопотребления автономного объекта.
3. Рекомендации по синтезу структур систем автономного энергоснабжения с ВЭУ.
4. Рекомендации по синтезу структур и алгоритмов функционирования систем автоматического управления САЭ с ВЭУ.

Такая методическая база позволит объективно оценивать целесообразность и возможность применения ВЭУ в САЭ и создавать структуры САЭ с ВЭУ, имеющие минимальный срок окупаемости.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. В области анализа и теоретических исследований:
 - Анализ вариантов структурных схем САЭ с ВЭУ и ДЭС на предмет их возможности и технической целесообразности применения.
 - Разработка математических моделей САЭ с ВЭУ и ДЭС.
 - Исследование на математической модели работоспособности САЭ с ВЭУ и ДЭС при их совместной работе.
 - Разработка математических моделей САЭ для управления нагрузками.
2. В области методической:
 - Создание методики экономического обоснования целесообразности применения ВЭУ в автономных системах энергоснабжения.

- Создание методики обеспечения оптимальной работы ВЭУ за счет управления режимами энергопотребления автономного объекта.
 - Определение методических основ проектирования системы автоматического регулирования САЭ с ВЭУ и ДЭС.
3. В области практической реализации:
- Разработка типовых структур энергообеспечения автономных объектов от ВЭУ и ДЭС.
 - Разработка структуры алгоритмов управления САЭ с ВЭУ и ДЭС.
 - Разработка рекомендаций по проектированию САЭ с ВЭУ и ДЭС.

Методика выполнения исследований. Для исследования совместной работы ВЭУ и ДЭС в САЭ использовался метод математического моделирования на ЭВМ переходных процессов на основе системы уравнений Парка-Горева.

Для исследования путей обеспечения оптимальной нагрузки ВЭУ в САЭ использовался метод системного анализа и математического моделирования на ЭВМ режимов работы потребителей автономного объекта, а также метод линейного программирования с направленным перебором вариантов.

Для доказательства отдельных положений использовались результаты натурных исследований математического моделирования.

Научная новизна. Создана общая методика проектирования систем автономного энергообеспечения с ветроэнергетическими установками.

Разработана математическая модель совместной работы ВЭУ и ДЭС с генератором, маховиком и разобщающей муфтой.

Обоснованы новые принципы использования ветроэнергетических установок в системах автономного энергоснабжения, позволяющие упростить конструкцию и снизить общую стоимость системы энергообеспечения.

Разработаны математические модели оптимального управления потребителями автономного объекта. На их базе создана методика, алгоритм и программное обеспечение для ЭВМ, позволяющее проводить широкий спектр расчетов режимов работы потребителей автономного объекта.

Разработана структура и алгоритмы системы автоматического регулирования и даны рекомендации по ее практическому внедрению.

Создана методика технико-экономической оценки целесообразности применения ВЭУ в системе энергообеспечения автономного объекта.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. Разработанная структура системы энергообеспечения может быть реально воплощена с минимальными затратами как при строительстве новых, так и при частичной замене оборудования на существующих автономных объектах.

Созданная программа расчетов на ЭВМ режимов работы потребителей для обеспечения оптимальной работы ВЭУ в системе автономного энергоснабжения позволяет, при наличии соответствующей аппаратной части, организовать оптимальное управление потребителями, участвующими в технологическом процессе реального автономного объекта. При этом, используя данные краткосрочного прогноза ветровой активности для места расположения автономного объекта, можно заранее прогнозировать оптимальную нагрузку на ВЭУ. Разработанная структура и алгоритмы функционирования системы автоматического регулирования позволяют максимально использовать установленную мощность ВЭУ, ДЭС и обеспечить их наиболее эффективную работу в составе САЭ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах” (Санкт-Петербург, 2002), Первой Европейской конференции по проблемам центров возобновляемой энергии (Хуруп (Дания), 2001), VI Международном молодежном научном форуме стран Балтийского региона “Экобалтика 2002” (Санкт-Петербург, 2002), Всероссийской научно-технической конференции “Энергетическая безопасность и малая энергетика. XXI век” (Санкт-Петербург, 2002), V Санкт-Петербургской ассамблее молодых ученых и специалистов: “Технические науки – предприятиям региона” (Санкт-Петербург, 2000), Международной научно-практической конференции: “Постсоветское градостроительство, проблемы и перспективы” (Санкт-Петербург, 2001), Втором Политехническом симпозиуме: “Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона” (Санкт-Петербург, 2002).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 176 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками и таблицами на 27 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 102 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируется современное состояние систем энергоснабжения автономных объектов. Обосновывается актуальность и направленность темы диссертационной работы. Указываются причины слабого развития в нашей стране автономных систем энергоснабжения с использованием энергии ветра. Формулируется цель и задачи исследования диссертационной работы.

В первой главе производится анализ ветроэнергетических установок как источника энергии. Дается их классификация по различным признакам, таким как: конструкционное исполнение, назначение и область применения, виды систем генерирования. Рассматриваются наиболее распространенные пути энергообеспечения автономных объектов: электроснабжение от ДЭС, теплоснабжение от котельных установок, работающих на угле и мазуте, или от ДЭС. Приводится классификация автономных объектов различной инфраструктуры и назначения.

Анализируются варианты совместной работы традиционного источника в системах автономного энергоснабжения и ВЭУ. Из анализа структуры потребления автономных объектов сделан вывод о том, что большая часть энергии обычно расходуется на теплоснабжение объекта. Показано, что использование ВЭУ в системе теплоснабжения дает важные преимущества. Во-первых, системы теплоснабжения обладают существенными аккумулялирующими свойствами, что позволяют легко запасать выработанную энергию в виде тепловой энергии. Во-вторых, так как при использовании ВЭУ для теплоснабжения качество напряжения и частоты не имеет большого значения, они могут быть выполнены в упрощенном конструкционном исполнении: с простейшими системами стабилизации скорости вращения ротора, без систем синхронизации с электросетью, без ряда соответствующих защит и т.д. Электрическая нагрузка объектов в этом случае может быть обеспечена за счет использования серийных источников бесперебойного питания (ИБП), представляющих собой преобразовательный комплекс с химическими накопителями электрической энергии. Это позволяет значительно снизить стоимость ВЭУ и всей системы энергообеспечения в целом. Благодаря этому, системы с ВЭУ становятся конкурентоспособными с традиционными системами энергоснабжения. Анализ процессов потребления

электроэнергии автономными объектами показывает, что лишь часть из потребителей требует гарантированного питания (потребители первой категории). Остальные потребители в той или иной степени допускают перерыв в электропитании. Эти факторы необходимо учитывать при выборе емкости аккумуляторов, затраты на которые должны определяться после оценки структуры потребителей электрической энергии каждого конкретного объекта. В результате в работе делается вывод о том, что именно использование ВЭУ преимущественно для теплоснабжения автономного объекта может сделать их применение экономически и технически целесообразным.

Далее в первой главе дается оценка основных экологических аспектов функционирования автономных объектов. В этом отношении применение ВЭУ дает ряд важных преимуществ, таких как сокращение вредных выбросов в окружающую среду за счет замещения ВЭУ части энергии, вырабатываемой ДЭС. Однако для полного анализа необходимо оценить влияние на экологическую обстановку самих ВЭУ. Экологическая оценка применения ВЭУ должна определяться совокупностью всех факторов: активных (акустический шум, вибрация, воздействие на орнитофауну), пассивных (помехи на электрооборудование, отчуждение земельных территорий, визуальное воздействие на человека) и косвенных (загрязнение окружающей среды при производстве компонентов для ВЭУ).

В заключении главы формулируются основные требования к структуре автономной системы энергоснабжения, включающие следующие основные моменты:

- Обеспечение минимальной достаточности функционально-структурного состава силового электроэнергетического и управляющего оборудования.
- Достижение технико-экономической эффективности за счет снижения капитальных и производственно-эксплуатационных затрат.
- Удовлетворение критериям надежности оборудования с учетом возможных внешних воздействий (климатических, вибрационных и т.д.).
- Обеспечение электротехнической совместимости оборудования, включая электроэнергетическую и электромагнитную совместимость.

Во второй главе дается анализ исследований и разработок, производившихся ранее по структурам САЭ с ВЭУ и ДЭС. В этом анализе показано, что рассматриваемые структуры САЭ не обеспечивают устойчивой совместной ра-

боты ВЭУ и ДЭС, не эффективны экономически и сложны в техническом исполнении.

В данной главе рассмотрена идея новой структуры, за основу которой взята серийно выпускаемая дизель-инерционная установка гарантированного питания (ДИУГП) в составе дизель – разобщающая муфта – маховик – синхронный генератор (СГ). В САЭ с ВЭУ и ДЭС новой структуры синхронный генератор ДИУГП включается параллельно с СГ ВЭУ и за счет инерционного маховика при разобщенной муфте демпфирует колебания активной и реактивной мощности в системе. При превышении энергии от ВЭУ над нагрузкой автономного объекта подключается балластная нагрузка, а переходный режим демпфируется маховиком. При недостатке энергии ветра запускается дизель и включается разобщающая муфта. Разработаны математическая модель этой системы на основе известных уравнений Парка-Горева, а также уравнений регуляторов статического типа синхронных машин и упрощенной модели автоматического регулятора частоты ДЭС.

По разработанной модели проведены исследования переходных процессов системы, которые показали, что такая система имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными, рассматриваемыми в других работах, и заслуживает дальнейших исследований и внимания. Однако на сегодняшнем этапе развития машино-вентельных систем и ВЭУ для автономных объектов с преимущественным потреблением энергоресурса на производство тепловой энергии целесообразной структурой является САЭ с раздельной работой ВЭУ и ДЭС.

В третьей главе на основе требований к структуре автономной системы энергоснабжения, описанных в первой главе, производится построение типовой структуры системы автономного энергоснабжения с ветроэнергетическими установками для автономного объекта мощностью 30кВт с ВЭУ. Структурная схема такой системы изображена на рис.1. В работе делается вывод о том, что для выработки оптимального алгоритма управления такой системой необходимо, чтобы она обладала способностью при изменении возмущающих воздействий менять параметры и перестраивать свою структуру, т. е. являлась адаптивной по отношению к возмущающим воздействиям, а переход из одного состояния в другое происходил с наименьшими потерями энергии и за минимально возможное время.

Для анализа адаптивных свойств системы определяются основные каналы

передачи и преобразования энергии:

1. Преобразование энергии ветра в электрическую энергию.
2. Преобразование электрической энергии, вырабатываемой ВЭУ, с нестабильными параметрами в требуемую по качеству электрическую энергию с помощью ИБП.
3. Преобразование электрической энергии, вырабатываемой ВЭУ, с нестабильными параметрами в тепловую энергию в электробойлере.

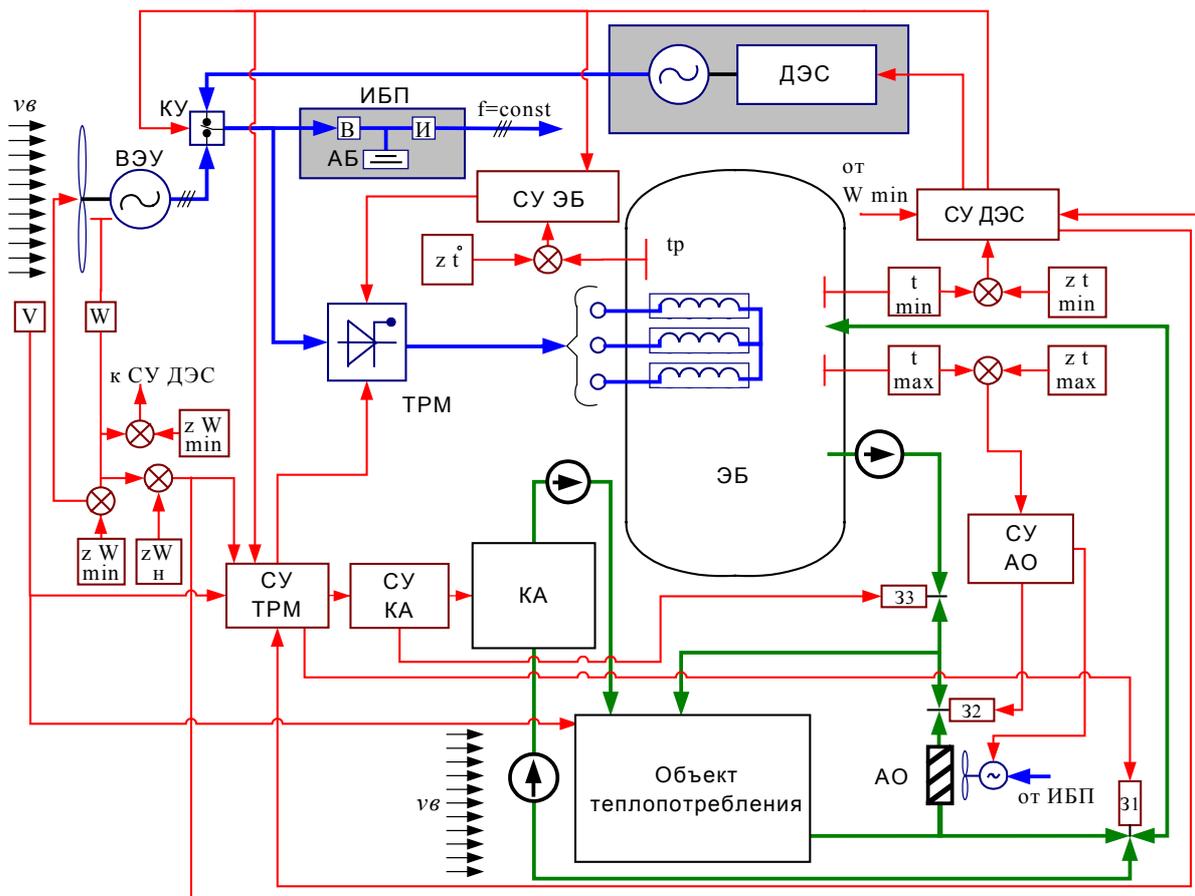


Рис. 1. Структурная схема энергоснабжения автономного объекта с ВЭУ.

Приняты обозначения: ВЭУ – ветроэнергетическая установка; КА – котельный агрегат; КУ – коммутационное устройство; ДЭС – дизельная электростанция; ИБП – источник бесперебойного питания; ЭБ – электробойлер; ТРМ – тиристорный регулятор мощности электробойлера; АО – аварийный охладитель; БУ АО – блок управления аварийным охладителем; СУ ДЭС, СУ ЭБ, СУ ТРМ, СУ КА – системы управления ДЭС, ЭБ, ТРМ, КА; f – частота тока генератора ВЭУ; U – напряжение генератора ВЭУ; W – частота вращения ВЭУ; $V_{\text{в}}$ – скорость ветра; В – выпрямитель; И – инвертор; 31-33 – задвижки; $z t_{\text{max}}$, $z t_{\text{min}}$, $z t^0$, $z W_{\text{н}}$, $z W_{\text{max}}$, $z W_{\text{min}}$ – задатчики частоты вращения и температуры воды.

В этой связи определяется основная задача – приведение в соответствие кинетической энергии ветра и суммы потоков энергии, передаваемой от первого ко второму и третьему каналам. На основе анализа адаптивных свойств системы отмечаются следующие важные свойства системы: Энергетически неадаптивная ВЭУ, представляющая собой ветроколесо с нерегулируемыми лопастями, нерегулируемым редуктором или без него, генератором с постоянными магнитами с практически нерегулируемыми выходными параметрами электроэнергии, может за счет эффективного регулирования потоков энергии приобрести энергоадаптивные свойства. Система теплопотребления также может стать энергоадаптивной за счет оптимизации параметров преобразования электрической энергии в тепловую (изменение величины питающего напряжения, количества включенных нагревательных элементов и т. д.). Вся система в целом как объект автоматического управления и регулирования может быть адаптирована к системам энергоснабжения различного назначения, состава элементов и структуры путем согласования основных параметров, характеризующих объект энергопотребления, и параметров источников, обеспечивающих потребителей тепловой и электрической энергией (постоянных времени, емкостей элементов, передаточных функций, коэффициентов усиления звеньев и т. д.). Таким образом, система автоматического регулирования должна представлять собой адаптивную систему, в которой на основе сравнения текущих значений основных параметров системы с результатами моделирования энергетических процессов на эталонной модели вырабатывается управляющее воздействие, оптимальное для данного момента времени и обеспечивающее общую оптимальную структуру энергетического баланса в целом. При этом могут использоваться различные алгоритмы реализации такого управления.

На основе анализа структуры и задач системы управления энергоснабжением автономных объектов определяется, какой из алгоритмов будет наилучшим: стабилизирующий, идентификационный или прямой алгоритм адаптивного управления. При использовании стабилизирующего алгоритма используется интегральный регулятор, который обеспечивает поддержание момента на валу ВЭУ при изменении ветра за счет снижения или увеличения тепловой нагрузки потребителей (электробойлера). Если используется прямой и идентификационный алгоритм, необходимо на основании исследования объекта управления синтезировать модель, провести ее оптимизацию и создать эталонную модель.

При этом идентификационный алгоритм построен на сравнении параметров эталонной модели с реальным состоянием объекта и выработке управляющих воздействий для минимизации различия между ними. При использовании прямого алгоритма в сформированную модель вносятся коррективы непосредственно на основании текущих внешних воздействий на объект. Если используется стабилизирующий алгоритм управления, то параметры качества регулирования (точность регулирования энергопотребления и точность измерения текущих значений параметров) задаются. В случае использования идентификационного алгоритма параметры качества регулирования берутся из эталонной модели. При использовании прямого алгоритма параметры качества регулирования каждый раз самонастраиваются.

Прямой алгоритм рассматривается, как основной, а стабилизирующий и идентификационный, как его частные случаи. Поэтому для универсальности, а также для упрощения процедуры перехода между алгоритмами систему управления целесообразно сделать в блочном исполнении с следующими блоками: ввода и обработки исходных данных; обработки текущей информации; идентификации и вычисления управляющих воздействий; самонастройки (вычисления критериев качества регулирования); формирования управляющих воздействий; корректировки межрегуляторных связей (адаптер).

В заключении главы приводится обобщенная блочная структура системы управления автоматического регулирования автономного объекта.

В четвертой главе на основе анализа состава потребителей автономного объекта делается вывод о том, что большая их часть, особенно потребители тепловой энергии, обладает существенными аккумулялирующими свойствами, т.е. способностью создавать запас энергии (технологический задел). Такие потребители названы потребителями-регуляторами. Величина потребляемой ими энергии может быть либо изменена без существенного ущерба для автономного объекта, либо снижена в часы малой выработки электроэнергии ВЭУ за счет соответствующего увеличения в часы активной ветровой нагрузки. Сущность использования потребителей-регуляторов для обеспечения оптимальных нагрузок ВЭУ заключается в выборе моментов их включения и отключения. Для каждого из i потребителей определяются параметры рабочего цикла с длительностью $t_{\text{ц}}^i$: временем работы $t_{\text{р}}^i$ и временем паузы $t_{\text{п}}^i$, которые в общем виде

могут быть записаны:

$$t_p^i = \frac{V_{\max}^i}{Q_{\text{in}}^i - Q_{\text{out}}^i} \quad t_{\Pi}^i = \frac{V_{\max}^i}{Q_{\text{out}}^i}; \quad t_{\Sigma}^i = t_p^i + t_{\Pi}^i. \quad (1)$$

где V_{\max}^i - максимальное значение запаса технологического запаса, Q_{out}^i - скорость расходования технологического запаса, Q_{in}^i - номинальная производительность потребителя-регулятора.

Далее производится постановка задачи разработки механизма управления режимом работы потребителей, позволяющим определять такое время работы и паузы каждого из них, чтобы общее потребление автономного объекта соответствовало необходимой для оптимальной работы ВЭУ нагрузке. В работе проанализированы различные математические методы для организации синхронно-периодического режима работы потребителей-регуляторов. В результате выбран модифицированный метод линейного программирования с направленным перебором вариантов. Сущность метода заключается в разделении всех потребителей-регуляторов, представленных в виде ветвей $a_{n,m}$, по сечениям S_n , где n – номер сечения, а m – номер ветви. В соответствие длинам ветвей $l_{n,m}$ ставится продолжительность работы потребителей, а емкостям $p_{n,m}$ – их потребляемая мощность. Длину сечения L_n определяет ветвь с максимальной длиной, а емкость P_n – сумма емкостей ветвей, входящих в данное сечение.

Цель моделирования – за счет изменения состава сечений обеспечить емкость модели, равной оптимальной нагрузке на ВЭУ. Для этого определены следующие способы преобразования модели: последовательная перестановка ветвей с максимальными длинами с ветвями, меньшими по длине из других сечений, разбиение ветви сечения с максимальной длиной на подветви, с последующим переносом одной из подветвей в другое сечение, последовательное соединение ветвей внутри одного сечения.

Преобразование модели ведется до тех пор, пока длина модели не будет соответствовать времени цикла потребителя с наименьшей длительностью, а

емкость модели не станет близкой к нагрузке, необходимой для оптимальной работы ВЭУ. При изменении состояния или параметров любого потребителя происходит пересчет режима работы остальных потребителей-регуляторов с учетом накопленного ими к этому моменту технологического запаса.

На основании модели построен алгоритм для расчета установившегося и переходного режима работы потребителей. По алгоритму на основе объектно-ориентированного программирования составлена программа для ЭВМ, позволяющая производить широкий спектр расчетов режимов работы потребителей автономного объекта. В программе реализована функция ведения оперативного журнала с учетом вывода в ремонт по заданному графику существующих и ввода в работу новых потребителей в процессе эксплуатации объекта. Кроме того, в программе есть возможность занесения данных графика прогнозируемой нагрузки. Это позволяет использовать ее в комплексе с программами краткосрочного прогноза ветровой активности. Функции данного программного обеспечения позволяют организовать управление потребителями, участвующими в технологическом процессе реального автономного объекта.

В пятой главе представлена методика, позволяющая определить целесообразность применения ВЭУ, а также математический аппарат оценки эффективности их применения в системе энергообеспечения автономного объекта. Анализ энергетического баланса производится на основе следующих критериев: сравнения выработки электроэнергии и общей потребности автономного объекта в энергии по коэффициенту использования установленной мощности ДЭС, по коэффициенту неравномерности графика электрической нагрузки и по коэффициентам сезонного изменения энергопотребления.

Первоначально производится анализ ветровой активности в местах предполагаемой установки ВЭУ и определяется принципиальная возможность их использования. Далее на основе вышеуказанных критериев предварительно определяется процент использования ВЭУ для выработки тепловой и электрической энергии, а также выбирается установленная мощность и количество ВЭУ. На последнем этапе проводится оценка технико-экономической эффективности использования ВЭУ и оцениваются варианты их конструкционного исполнения (диаметр лопастей, высота башни и т.д.).

Далее приведены общие экономические положения, принятые в методике оценки технико-экономической эффективности, а также условия для ее расчета.

Система автономного энергоснабжения, состоящая из ДЭС и ВЭУ, должна обеспечивать потребителей электроэнергией требуемого количества и качества в течение заданного срока эксплуатации. Соответственно, затраты на выработку необходимого количества электроэнергии W будут включать в себя единовременные капитальные вложения K на приобретение оборудования ДЭС ($K_{у.д}$) и ВЭУ ($K_{у.в}$), а также эксплуатационные расходы C , затрачиваемые ежегодно при эксплуатации системы. Дополнительно введены составляющие, учитывающие расход ресурса ДЭС и ВЭУ в течение срока окупаемости затрат на приобретение оборудования $T_{ок}$. Время работы ВЭУ $T_{р.в}$ в разработанной методике принято равным числу часов использования его установленной мощности. Время работы ДЭС $T_{р.д}$ определяется с учетом количества энергии, вырабатываемой ВЭУ (W_B) в течение года следующим образом:

$$T_{р.д} = \frac{W_d}{k_3 \cdot P_{н.д}} = \frac{W_\Gamma - W_B}{k_3 \cdot P_{н.д}} = \frac{W_\Gamma - P_{н.в} \cdot T_{р.в}}{k_3 \cdot P_{н.д}}, \quad (2)$$

где k_3 – коэффициент загрузки ДЭУ, W_Γ - годовая выработка САЭ, [кВт/ч]

При расчете затрат также необходимо учитывать амортизационные отчисления на ремонт и восстановление оборудования в процессе эксплуатации. В результате выражение для определения среднегодовой стоимости электроэнергии, вырабатываемой системой автономного энергоснабжения с ВЭУ, имеет вид:

$$\begin{aligned} C_{ср} = & \frac{P_{н.д} \cdot K_{у.д}}{W_\Gamma \cdot T_{ок}} \cdot \left(1 + \frac{T_{ок}}{R_d} + T_{р.д} + 0,05 \cdot T_{ок}\right) + \\ & + \frac{P_{н.в} \cdot K_{у.в}}{W_\Gamma \cdot T_{ок}} \cdot \left(1 + \frac{T_{ок}}{R_B} + T_{р.в} + 0,01 \cdot T_{ок}\right) + \frac{1,6 \cdot V_T \cdot T_{р.д} \cdot C_{т.д}}{W_\Gamma} \end{aligned} \quad (3)$$

где V_T – часовой расход топлива ДЭС, [кг/ч]; $C_{т.д}$ – цена топлива для ДЭС, [руб/кг]; R_B (R_d) – нормативный срок службы ВЭУ (ДЭС), [лет].

В заключение главы представлен пример расчета значений средней годовой стоимости электроэнергии для системы автономного энергообеспечения с ВЭУ мощностью 30 кВт.

ВЫВОДЫ

1. Произведенный анализ показал, что использование энергии ветра для систем автономного энергоснабжения является перспективным направлением для автономных объектов различной инфраструктуры и назначения, так как позволяет не только уменьшить затраты на топливо и экономить ресурс теплоэнергетических установок, а еще и снизить количество вредных выбросов в окружающую среду и приведет к общему благоприятному воздействию на экологическую обстановку вокруг автономных объектов.
2. Исследования предложенной в работе новой структуры САЭ в составе дизель – разобщающая муфта – маховик – синхронный генератор показали, что такая система имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными и перспективна для дальнейших исследований.
3. Из анализа структуры потребления автономных объектов следует, что ветроэнергетические установки наиболее эффективны при их использовании преимущественно для теплоснабжения, так как это позволяет упростить конструкцию ВЭУ и значительно снизить ее стоимость, поэтому для автономных объектов с преобладающим потреблением тепловой энергии целесообразной структурой является САЭ с отдельной работой ВЭУ и ДЭС.
4. На основании проведенных исследований выяснено, что наиболее эффективный путь управления ВЭУ – это обеспечение необходимого противодействующего момента на валу ВЭУ за счет регулирования нагрузки с использованием потребителей-регуляторов автономного объекта и балластной нагрузки.
5. На основании анализа систем автоматического регулирования энергообеспечения автономных объектов показано, что они должны представлять собой адаптивные системы, в которых на основе моделирования энергетических процессов вырабатывается управляющее воздействие, оптимальное для данного момента времени и обеспечивающее общую оптимальную структуру энергетического баланса в целом.
6. Анализ систем энергообеспечения и состава потребителей автономных объектов показал, что энергоблоки, состоящие из ВЭУ и ДЭС, могут быть

адаптивны к системам энергоснабжения автономных объектов различного назначения при соответствующей их структуре и согласовании основных параметров, характеризующих объект энергопотребления с параметрами ВЭУ и ДЭС.

7. Исследования ВЭУ как источника с вероятностным характером и неравномерностью выработки электроэнергии показали, что большое значение имеет наличие нагрузки с естественными аккумулялирующими свойствами. Вместе с тем, произведенный анализ нагрузки автономных объектов показал, что большинство потребителей, работающих в повторно-кратковременном цикле, обладает существенной аккумулялирующей способностью и может быть использовано в качестве потребителей-регуляторов.
8. Исследования показали, что при оценке целесообразности применения ВЭУ в системах энергообеспечения необходимо оценивать не только ветровую активность в зоне расположения автономного объекта, но и состав потребителей и общую структуру потребления тепловой и электрической энергии автономного объекта и проводить анализ их аккумулялирующих свойств.
9. Разработанная модель расчета режима работы потребителей-регуляторов и созданный на ее основе алгоритм и программа для ЭВМ позволяют обеспечить оптимальную нагрузку ВЭУ в широком спектре режимов работы автономного объекта. При этом, используя данные краткосрочного прогноза ветровой активности для места расположения автономного объекта, можно заранее прогнозировать оптимальную нагрузку на ВЭУ.
10. Разработанный набор показателей для предварительной оценки эффективности использования ВЭУ в САЭ позволяет на этапе проектирования объекта с достаточной степенью точности оценить целесообразность использования ВЭУ для каждого конкретного автономного объекта.
11. Разработанная методика технико-экономической оценки позволяет проводить анализ капитальных расходов на создание системы автономного энергообеспечения с ВЭУ при различных вариантах ее финансирования и эксплуатационных затратах, а также оценивать общий срок окупаемости САЭ с ВЭУ.

Основные работы, опубликованные по материалам диссертации:

1. Вессарт В.В. Построение алгоритма управления системой энергоснабжения автономных объектов с ВЭУ // *Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы* / СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.
2. Галат А. И., Толмачев В. Н., Вессарт В. В. Техничко-экономическая эффективность использования ветроэнергетических установок для теплоснабжения // В сб. докладов и тезисов международной научно-практической конференции “Постсоветское градостроительство. Проблемы и перспективы” / СПб., 2001.
3. Вессарт В.В. Методика технико-экономической оптимизации энергетического баланса автономных систем энергоснабжения с ВЭУ // *Пятая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов* / СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2000.
4. Вессарт В.В. Структура и алгоритм управления автономными системами энергоснабжения с ВЭУ // *Второй Потитехнический симпозиум “Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона”*. Материалы конференции – “Технические науки – промышленности региона”/ СПб., 2002.
5. Орлов А.В., Толмачев В.Н., Вессарт В.В. Принципы адаптивной системы управления энергоснабжением автономных объектов с ветроэнергетическими установками // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.*, 2002, №4. – с. 61-66.
6. Толмачев В.Н., Вессарт В.В. Формирование алгоритма управления на основе адаптивных свойств системы энергообеспечения автономных объектов с ветроэнергетическими установками // *Энергетическая безопасность и малая энергетика. XXI век. ЭбиМЭ-2002: Сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции* / СПб., 2002.
7. Vessart V.V. Provision of optimal operational mode of wind-diesel systems in power supply of autonomous units. // *IV-th International Youth Environmental Forum “Ecobaltica’2002”*. Book of Abstracts and Papers/ St.Petersburg, 2002.