


На правах рукописи



СЕРЕБРЯКОВ Артем Владимирович

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
С ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКОЙ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Иваново – 2013 г.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ).

Научный руководитель **Крюков Олег Викторович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты **Онищенко Георгий Борисович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО "Московский государственный
машиностроительный университет", профессор
кафедры "Электрических систем"
Виноградов Анатолий Брониславович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», профессор
кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Ведущая организация ООО «ПРОТОН ЭЛЕКТРО СЕРВИС»,
г. Нижний Новгород

Защита состоится «01» ноября 2013г. в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Учёный совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», автореферат размещён на сайте www.ispu.ru.

Автореферат разослан «27» сентября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Тютиков
Владимир Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Положительная динамика развития отечественной промышленности и увеличение уровня потребления электроэнергии населением стимулируют расширение масштабов исследований и разработок, направленных на совершенствование топливно-энергетического комплекса РФ и экономии традиционных углеводородных источников электроэнергии (ТИЭ). Это обусловило поиск новых стратегий энергоэффективного и экономичного энергообеспечения российских потребителей с привлечением нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ).

Особенность географического положения Российской Федерации и наличие больших территорий (около $\frac{2}{3}$ общей площади) с низкой плотностью населения 20 млн. человек обуславливает необходимость автономного энергообеспечения данных районов электроэнергией. В качестве автономных источников электроэнергии (АИЭ) здесь использовались дизельные электростанции и котельные агрегаты на угле, мазуте или другом невозобновляемом топливе. Однако эти средства энергообеспечения становятся сегодня все более затратными и неэкологичными.

Вместе с тем, в мировой и отечественной электроэнергетике уже накоплен большой опыт создания и использования современных НВИЭ как альтернатива или в сочетании с углеводородными. Суммарная мощность ВЭУ в мире достигла 194 ГВт с КПД до 0,593 и выработкой более 430 ТВт·ч в 2011г.

В развитие теории и практики АИЭ, включая НВИЭ, ветроэнергетические установки (ВЭУ) и прочие автономные генераторные комплексы (АГК) для различных потребителей значительный вклад внесли отечественные ученые – д.т.н., профессора А.Е. Козярук, А.М. Магомедов, Г.Б. Онищенко, В.Г. Титов, Ю.Г. Шакарян и др. из отраслевых НИИ, НПО и ВУЗов – ВНИИЭ, ИГЭУ, МЭИ (ТУ), МГОУ, СПбГГУ, НГТУ им. Р.Е.Алексеева и др.

Инновационные исследования по совершенствованию возобновляемых и комбинированных АИЭ не потеряли актуальности и в настоящий момент. Более того, новая аппаратная база электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники дополнительно стимулирует разработчиков на создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых агрегатов и систем. Особенно это актуально для питания вдольтрассовых потребителей газотранспортных систем России, где особенно высоки требования по обеспечению надежности и энергоэффективности АИЭ.

Среди всего многообразия АИЭ и НВИЭ в условиях географических и климатических особенностей территории Российской Федерации наибольшее распространение получили разработки ВЭУ, ветряных ферм (станций) и ветродизельных энергоустановок (ВДЭУ). Это связано с известными преимуществами их перед другими типами НВИЭ: низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы, высокие показатели КПД, надёжности и наработки на отказ, отсутствие расхода углеводородного топлива и экологически вредных выбросов и шума. Наконец, средства автоматизированного управления

и регулирования позволяют обеспечить оптимальные режимы генерирования, энергосбережения, мониторинга и устойчивости работы систем электроснабжения (СЭС) для удаленных маломощных потребителей.

Несмотря на полувековую историю проектирования и создания СЭС на базе ВЭУ и наличия нормативных документов государственного масштаба, исследованиям по повышению энергоэффективности, устойчивости, экологичности и надёжности их работы уделяется недостаточное внимание. Типовые решения СЭС с ВЭУ реализуют только частные задачи, не обеспечивая комплекса проблем создания конкурентоспособных интеллектуальных источников электроснабжения (ИИЭ) на основе принципов активно-адаптивных «разумных» электросетей. Принятые в последнее время нормативные акты РФ стимулируют поиск инновационных энергосберегающих технологий СЭС на базе ВЭУ для объектов и потребителей различных отраслей (сельскохозяйственных, геологоразведочных, газотранспортных и проч.).

В этой связи, **целью диссертационной работы** является разработка и исследование ветроэнергетических установок для автономных систем электроснабжения, обеспечивающих высокую энергоэффективность и оперативный мониторинг состояния системы.

В связи с поставленной целью сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Анализ технологических режимов работы автономных СЭС, электропитания потребителей и структур ВЭУ с целью выработки требований к комбинированным генераторным комплексам, обеспечивающим выполнение нормативных показателей качества параметров электроснабжения.

2. Выбор рациональных структур современных ВЭУ на базе синхронных генераторов с автономными инверторами напряжения для оптимального преобразования мощности ветрового потока и реализацией всех нормативных требований СЭС потребителей.

3. Разработка математических моделей элементов автономных генераторных комплексов, включая ВЭУ, систему «синхронный генератор-преобразователь частоты» (СГ-ПЧ) и СЭС, наиболее полно учитывающих процессы генерирования и потребления с учетом внешних возмущений.

4. Структурно-параметрический синтез оптимизированной системы управления ВЭУ с программным заданием параметров комплекса на базе регрессионных алгоритмов управления для стабилизации параметров амплитуды и частоты вырабатываемого напряжения.

5. Разработка методологических, алгоритмических и аппаратных средств оперативного мониторинга и прогнозирования технического состояния электромеханических систем ВЭУ.

6. Разработка физического макета электромеханической части АГК в виде лабораторной установки и проведение исследований для реализации полученных алгоритмов и структур комбинированных источников с ВЭУ.

Методы исследования:

Для теоретических исследований использовались: теория электрических машин переменного тока, теория вероятностей и математической статистики, теория планирования эксперимента, теория автоматического управления и регулирования, аппарат нечеткой логики. Экспериментальные исследования проводились на макетных образцах ВДЭУ на базе синхронного генератора с помощью современной измерительной аппаратуры и средств автоматизации обработки результатов эксперимента. Исследования динамических режимов проводились методами математического моделирования с привлечением современных компьютерных продуктов, в частности, пакетов ПО Matlab.

Научная новизна:

1. Разработан теоретически обоснованный подход к построению структуры энергоэффективных ВДЭУ на базе синхронных генераторов с преобразователями частоты для надежного электроснабжения автономных и удаленных объектов.

2. Разработаны математические модели элементов системы ВЭУ, позволяющие учесть влияние основных физических процессов в АГК и внешних возмущений и обеспечивающие получение энергоэффективных алгоритмов регулирования выходного напряжения.

3. Синтезированы варианты комбинированных САР стабилизации параметров напряжения, инвариантные к действию основных возмущений технологического и природного характера.

4. Разработаны модели и система оперативного мониторинга с элементами прогнозирования технического состояния, базирующиеся на дискретных методах представления объекта диагностирования и позволяющая с единых методологических позиций оценивать режимы работы ВЭУ.

Практическая ценность

1. Разработанная модульная структура альтернативной системы электроснабжения автономных объектов обладает высокой степенью универсальности и надежности, что позволяет использовать ее для решения большого числа задач обеспечения автономности различных объектов, включая потребителей первой категории надежности.

2. Реализованные и экспериментально исследованные перспективные методы регулирования АГК на базе ВДЭУ с синхронными генераторами различной мощности позволяют устойчиво работать с различными потребителями и технологическими параметрами на оборудовании ведущих европейских фирм и отечественных производителей.

3. Разработанный комплекс алгоритмов и программ для оперативного диагностирования выходных параметров электроэнергии ВДЭУ представляет собой законченный продукт и может быть тиражирован и интегрирован в ПО АСУ ТП любой сложности.

4. Разработанные компьютерные и физические модели ВДЭУ на базе синхронных генераторов за счет универсальности источников информации и

микропроцессорной аппаратной базы могут быть использованы при разработке других АИЭ и НВИЭ, включая их работу совместно в составе больших АГК.

5. Лабораторный образец интеллектуальной системы ВДЭУ прошел регламентные испытания и используется в учебном процессе кафедры НГТУ им. Р.Е. Алексеева и при апробациях исследований магистров и аспирантов.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Принципы и структуры построения энергоэффективных СЭС на основе альтернативных и возобновляемых источников энергии для автономных объектов, включая особенности ветровых потоков и нагрузки потребителей.

2. Методика получения и исследования математических моделей ВЭУ, электромеханической системы и СЭС потребителей в структуре инвариантной САР параметров вырабатываемой электроэнергии.

3. Принципы и методология получения регрессионных уравнений для оптимизации системы управления и энергоэффективного регулирования параметров ВЭУ на основе аппаратных и программных средств.

4. Методика разработки диагностических моделей и аппаратно-алгоритмических средств оперативного мониторинга параметров ВЭУ в структуре комбинированных генераторных комплексов.

5. Структура и программно-аппаратные решения по созданию экспериментального макета АГК с САУ ВДЭУ и организация проведения комплексных испытаний инновационных алгоритмов.

Реализация результатов работы.

Разработан действующий экспериментальный стенд для исследования алгоритмов и характеристик работы ВДЭУ. Результаты работы могут быть использованы при разработке и внедрении автономных систем электроснабжения на базе ВДЭУ для локальных электроэнергетических систем удаленных объектов, на кафедре «Электрооборудование судов» НГТУ им. Р.Е.Алексеева в учебном процессе по курсам «Автоматизированные электромеханические системы автономных объектов», «Гребные электрические установки», а также в курсовом и дипломном проектировании.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Энергетические комплексы и системы:

в части формулы специальности – «... исследования по общим закономерностям преобразования, накопления, передачи и использования электрической энергии и электротехнической информации, а также принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем... В рамках научной специальности объектами изучения являются электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии ... Электротехнические комплексы и системы ... могут рассматриваться как самостоятельные технологические комплексы и должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование этих систем в широком диапазоне внешних воздействий.»;

в части области исследования – п. 1: «...физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п. 3: «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.»; п. 4: «Исследование работоспособности ... комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Апробация работы.

Основные положения, результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы доложены, обсуждены и получили положительные отзывы на следующих научно-технических конференциях:

- II Всероссийская научно-техническая конференция «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий», Уфа, 5 апреля, 2009;
- XVII Международная научно-техническая конференция “Состояние и перспективы развития электротехнологии” (Бернадосовские чтения), Иваново, 1-3 июня, 2011;
- XVIII Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии (ИСТ-2012)”, Н.Новгород, 20 апреля, 2012;
- X Международный симпозиум “Интеллектуальные системы (INTELS’2012)”, МВТУ им. Н.Э. Баумана, Вологда, 25-29 июня 2012;
- XIV МНТК «ICEEE-2012», МЭИ, Алушта, 23-29 сентября 2012;
- V научная конференция «Управление в технических системах (УТС-2012)» в рамках 5-ей Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2012), ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, СПб, 9 - 11 октября 2012;
- XXVII-XXIX Региональные научно-технические конференции “Актуальные проблемы электроэнергетики”, НГТУ, Н.Новгород, 2008-2012.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 15 работ, включая 4 статьи в периодических журналах, рекомендованных ВАК, 2 патента на полезные модели, свидетельство на ПО и монографию.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 150 страниц основного текста, 83 рисунка, список литературы включает 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе рассмотрены основные принципы и особенности построения систем автономного электроснабжения с альтернативными АИЭ. Рассмотрены преимущества малой энергетики с НВИЭ: малая капиталоемкость, быстрота сооружения и ввода в эксплуатацию, максимальная приближенность к потребителю, использование местных энергоресурсов, нерентабельных для дальней транспортировки, возможность быстрого внедрения инновационных

технологий. На рис. 1 показаны масштабы целесообразного внедрения АИЭ на территории РФ с использованием НВИЭ в комбинированных СЭС.



Рис. 1. Зонирование территории РФ по преимущественному использованию АИЭ и ТИЭ

Проанализированы перспективы капитальных вложений для генерации электроэнергии АИЭ, результаты которых свидетельствуют в пользу широкого внедрения НВИЭ (снижение себестоимости по сравнению с ТИЭ к 2030 г. в 2-3 раза). Пока же энергоёмкость ТЭК РФ в 4 раза выше, чем в США, в 3,6 раза – чем в Японии и в 2,5 раза – чем в Германии.

Представлены статистические данные по надежности работы локальных СЭС, из которых следует, что наибольшие нарушения в их работе составляют: нарушения внешнего электроснабжения (39%) и выход из строя энергооборудования (26%). Поэтому для надежного и устойчивого генерирования электроэнергии с использованием ВЭУ необходимо энергоэффективное оборудование, обеспечивающее высокий КПД преобразования ветрового потока до уровня 0,593 в условиях воздействия возмущений технологического и климатического характера.

Применение идеологии интеллектуальных электроэнергетических систем с активно-адаптивной сетью позволяет системно осуществить комплекс мероприятий по повышению конкурентоспособности ВЭУ и ВДЭУ для нужд автономных СЭС удаленных потребителей. Это позволяет реализовать научно-обоснованные подходы к проектированию АГК с использованием программно-аппаратных средств и методик получения электроэнергии с высокими выходными показателями.

При этом в энергоэффективных ВЭУ реализуются все основные ценности: доступность, надежность, экономичность, эффективность, экологичность и безопасность. Представлены положительные примеры использования комбинированных АГК в газовой промышленности и в агропромышленном комплексе для потребителей мощностей 20-40 кВт.

Во второй главе выполнен анализ работы каждой составляющей локальной энергосистемы «ВЭУ-СЭС-потребитель», получены математические модели их работы, удобные для дальнейшего анализа и синтеза.

Показано, что исходя из стохастического характера амплитудно-частотных характеристик ветрового потока при законе распределения Вейбулла-Гудрича скоростей ветра (рис. 2), на объемы и качество выработки электроэнергии ВЭУ влияет обоснованный выбор параметров синхронного генератора (СГ) ($P_{уст}$, ω_0) и работа ветротурбины в оптимальных точках соответствующих диапазонов скоростей ветра.

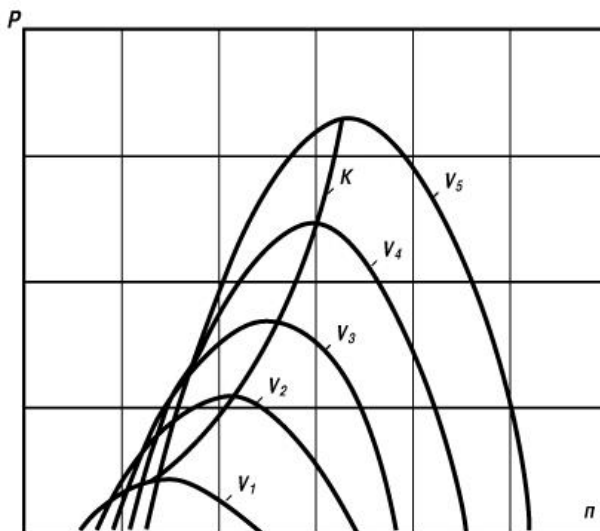


Рис. 2. Мощностные характеристики ветротурбин: P – мощность выходная, о.е.; n – частота вращения вала, 1000 об/мин; V_1 - V_5 – линейные скорости ветров, K – линия максимального съема мощности потока

Так в условиях 115 метеостанций РФ расчет основных энергетических характеристик ветра (среднегодовой скорости ветра V_0 , удельной валовой мощности $N_{уд}$, коэффициента вариации C_v) показал, что диапазон их вариаций достаточно широк и составляет: $V_0 = 1,39 \div 7,48$ м/с; $N_{уд} = 0,01 \div 0,565$ кВт/м². При этом ВЭУ с переменной частотой вращения ветроколеса имеют потенциальную возможность преобразовывать энергию ветра в электрическую с большим коэффициентом использования энергии ветра даже при низких скоростях.

Для получения режимов максимальной энергоэффективности работы ВЭУ в локальных СЭС в условиях случайного характера ветрового потока и потребления необходимо автоматически обеспечивать работу ВЭУ в оптимальных областях средствами электромеханической части АИЭ.

Наибольшее влияние на процесс выработки электроэнергии ВЭУ оказывают значения стохастических параметров, имеющих метеорологическую (климатическую) и технологическую природу:

- величина линейной скорости ветра V , м/с;
- плотность воздуха в ветровом потоке ρ , кг/м³, зависящая от текущих значений атмосферного давления p_a , МПа, и температуры T_b , °К, воздуха в соответствии с уравнением Клапейрона;
- энергопотребление $W_{потр}$, кВт·ч, включая электрическую и тепловую мощности у потребителей (параметр G_m).

Задание управляющего воздействия на ПЧ или мультипликатор должно изменяться по аналитическим регрессионным алгоритмам вида:

$$U_3 = f(V, p_a, T_e, G_m). \quad (1)$$

Для реализации функции (1) необходимо использовать базу метеоданных для региона предполагаемого размещения ВЭУ и статистически обработать их методами планирования эксперимента. Искомые многопараметрические зависимости получены в виде нелинейных и линеаризованных регрессионных моделей с использованием матричных способов наименьших квадратов.

Математические модели алгоритма управления ПЧ-СГ ВЭУ для работы в оптимальной области получены на основе информации о параметрах работы или экспериментальных данных прототипа. Для этого в (1) найдены параметры “ a_j ” линеаризованной четырехфакторной модели вида

$$U_3 = a_1V + a_2p_a + a_3T_e + a_4G_m + \zeta, \quad (2)$$

где ζ – матрица помех (неучтенных факторов).

В результате расчетов по модели (2) для ВЭУ типа «Бриз-5000», расположенных на побережье Ладожского озера, получено 4-факторное уравнение линеаризованной регрессии:

$$U_3 = 12,214 * V + 0,219 * p_a + 0,92 * T_e - 0,022 * G_m + 9,602, \quad (3)$$

которое является искомым алгоритмом инвариантного задания и управления электромеханической системой ВЭУ. Как видно из выражения (3) наибольшее влияние имеют факторы V (12,214) и T_e (0,92). Поэтому в упрощенных системах можно ограничиться вычислением только данных параметров ветра.

Аналогично найдены линеаризованные регрессионные уравнения для двухфакторной модели, учитывающей влияние только скорости ветра и температуры окружающего воздуха T_e по сухому термометру:

$$U_{32} = 3,899 * V + 0,384 * T_e + 30,988. \quad (4)$$

Ковариационный анализ полученных зависимостей (3) и (4) показал, что данные регрессионные алгоритмы в полной мере отслеживают текущие входные возмущения и корректируют максимум выработки электроэнергии ВЭУ.

Автоматическая стабилизация выходного напряжения ВЭУ обеспечивается в системе инвариантного регулирования СГ-ПЧ (рис. 3), которая содержит следующие блоки:

- датчики измерения внешних возмущающих воздействий;
- блок расчета оптимальной скорости вала СГ;
- ПИ-регулятор напряжения на выходе ВЭУ;
- система генерирования ПЧ-СГ с законом управления $U/f^2 = \text{const}$,
- датчик выходного напряжения,
- механическая часть ВЭУ.

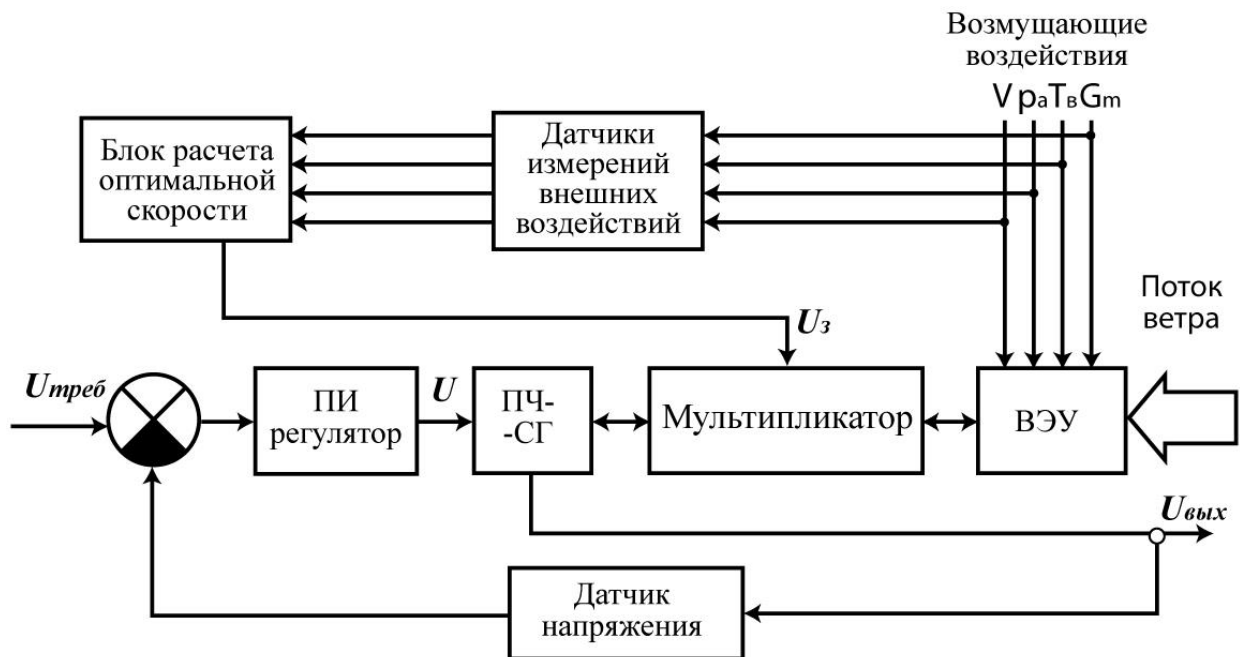


Рис. 3. Структура комбинированной САР локальной ВЭУ: $U_{\text{трреб}}$ - задающий сигнал напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ Р; U_3 - задающее управляющее воздействие по оптимизации характеристик ветрового потока; U - управляющее воздействие с законом регулирования U/f^2 , $U_{\text{вых}}$ - выходное напряжение ВЭУ

Основным недостатком данной схемы является необходимость установки ступенчато регулируемого мультипликатора, который автоматически подстраивает частоту вращения СГ под сьем максимальной мощности в соответствии с характеристиками рис. 2. Поэтому при наличии возможности стабилизации выходного напряжения средствами автоматической разгрузки потребителей, балластной нагрузки или внутреннего контура стабилизации СГ, можно применять структуру с контуром регулирования выходного тока (рис. 4). На данные структуры ВЭУ получен ряд патентов на полезные модели.

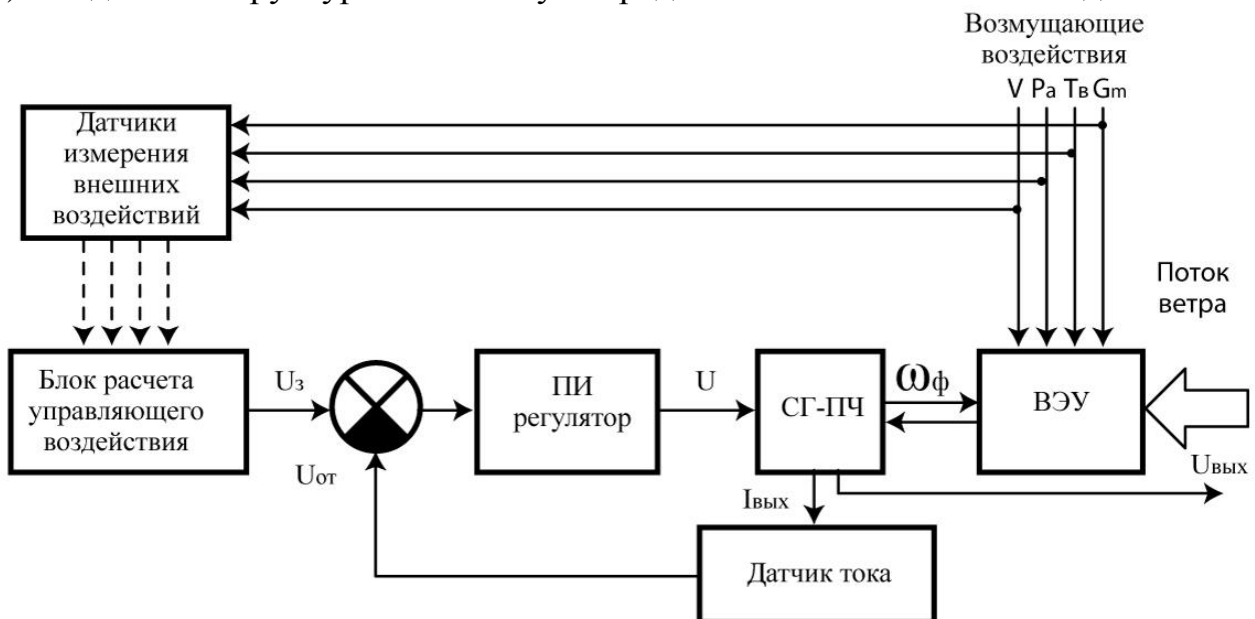


Рис. 4. Структура комбинированной САР локальной ВЭУ: $U_{\text{от}}$ - сигнал обратной связи по выходному току $I_{\text{вых}}$ (мощности), $\omega_{\text{ф}}$ - скорость вала ВК; $U_{\text{вых}}$ - выходное напряжение ВЭУ

В третьей главе представлена методика разработки и синтеза алгоритмов мониторинга ВЭУ средствами системы оперативной диагностики технического состояния оборудования агрегатов в режиме “on-line”.

Для этого получена модель диагностирования электромеханической части ВЭУ в виде

$$s=f(x,z,t,F^*,F,L^*,L), \quad (5)$$

где $s \in S$, $x \in X$, $z \in Z$, $t \in T$, $F^*(t,x,s)=P^*$, $F(t,x,s)=P$ - операторы переходов, отражающие изменения состояния системы под воздействием внешних и внутренних возмущений; $L^*(t,x,s)=y^*$, $L(t,x,s)=y$ - операторы выходов, описывающие формирование выходного сигнала под действием внутренних и внешних возмущений. Индекс (*) принадлежит операторам, учитывающим действие внутренних возмущений.

В результате синтеза получен алгоритм диагностирования ВЭУ в виде графа (рис. 5), обеспечивающий глубину мониторинга от 21 до 27 элементов.

Разработан и запатентован алгоритм лингвистического прогнозирования состояния ВЭУ на базе нечеткой логики, использующий данные интеллектуальных датчиков параметров установки (рис. 6). Данные интеллектуальные датчики обеспечивают реализацию в системе мониторинга принципа экспертной системы.

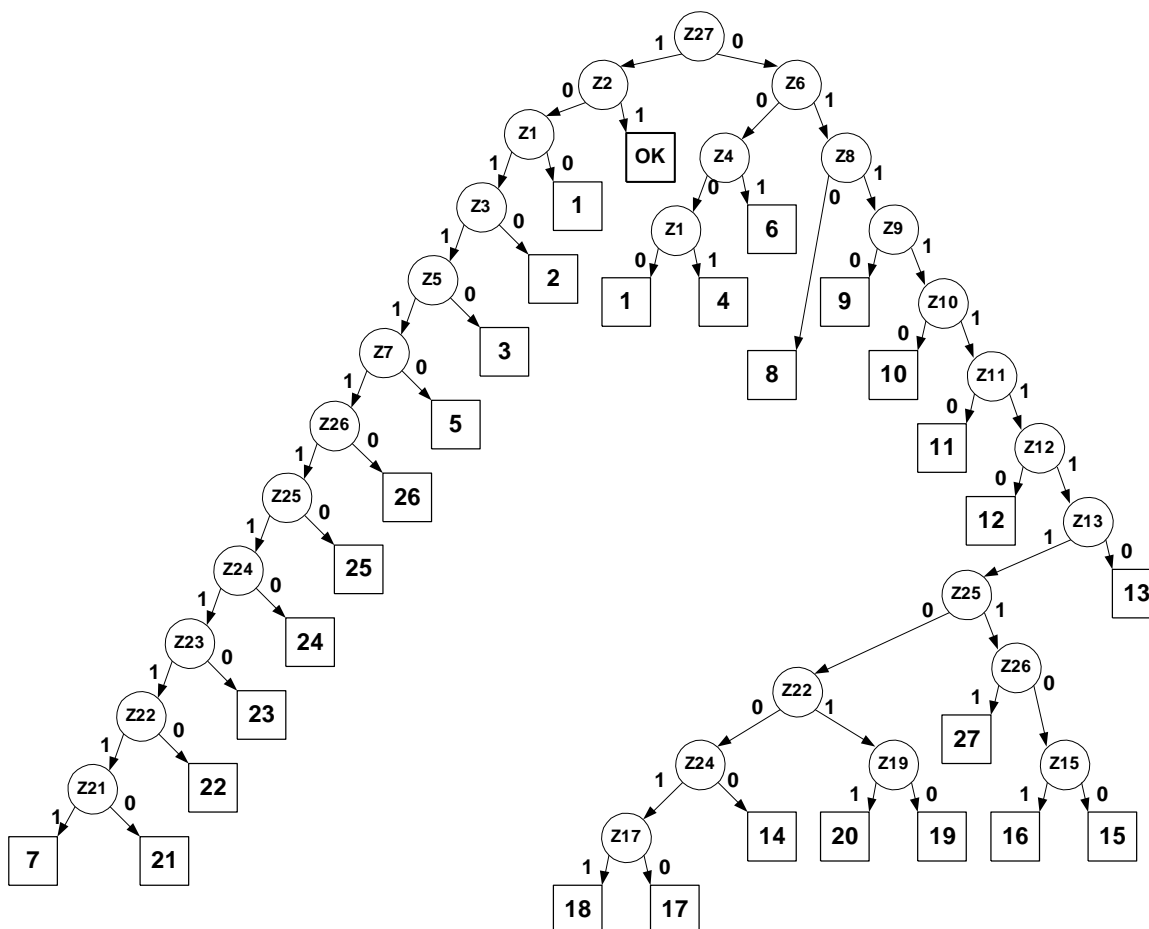


Рис. 5. Алгоритм диагностирования электромеханической части ВЭУ

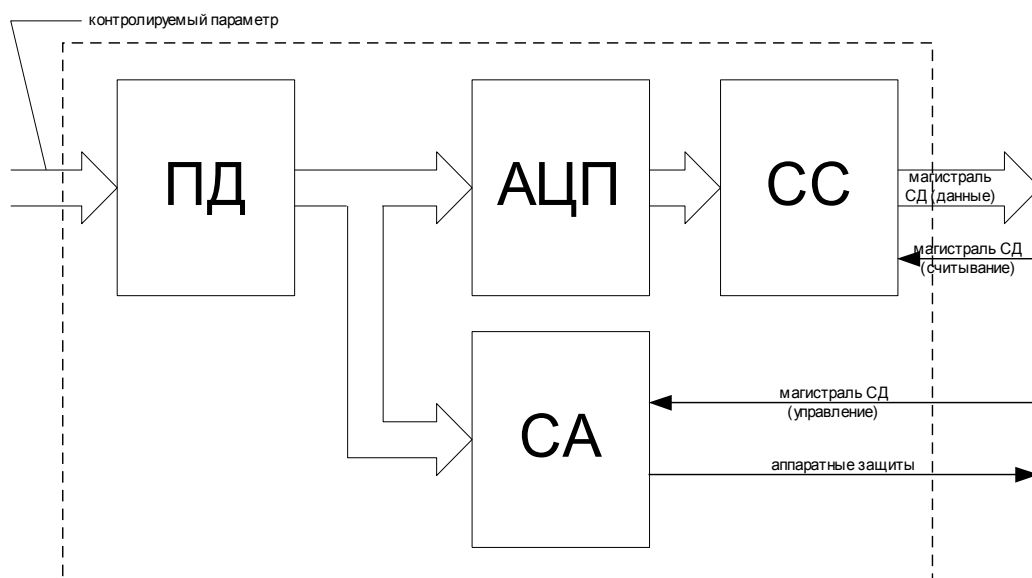


Рис. 6. Интеллектуальный датчик диагностирования и прогнозирования состояния ВЭУ: ПД – первичный датчик (измеритель параметров), СС – схема сопряжения с магистралью данных, СА – схема анализа и защиты первичной информации

Предлагаемый математический подход синтеза средств диагностирования ВЭУ позволяет не только легко комбинировать любые специфичные алгоритмы диагностики конкретных узлов ВЭУ и объединять их в один общий алгоритм, но и интегрировать в одной системе свойства регулирования, диагностирования, прогнозирования и экспертной системы, что соответствует основным современным требованиям.

Для выполнения функций диагностики с элементами прогнозирования в реальном масштабе времени длительность всего цикла системы мониторинга должна быть не более половины периода несущей ШИМ, т.е. 0,05 мс в случае значения несущей частоты 5 кГц, что соблюдается в разработанной ЭМС ВЭУ.

В четвертой главе рассмотрены вопросы практической реализации ВЭУ в составе комбинированных АГК локальных СЭС.

Разработаны и апробированы на стендах варианты 2-х и 3-х лучевых (рис. 7) структур комбинированных ВЭУ с выделенным каналом ТИЭ в нагрузку.

По результатам анализа предложенных структур и синтеза блоков преобразования энергии предложена модель экспериментальной электроэнергетической установки, общий вид которой показан на рис. 8.

В качестве ветрогенератора применена специализированная синхронная машина СГ 254-33УХЛ2 мощностью 1 кВт с возбуждением от высококоэрцитивных магнитов. В качестве имитатора ветроколеса применяется ЧРП (АД серии АИР100L6У3, мощностью 2,2 кВт и ПЧ 6SE6420-2UD25-5CA0 фирмы Siemens Micromaster 420 $P_n = 5,5$ кВт), обеспечивающий вращение вала генератора в диапазоне частот вращения, соответствующем карте ветров региона.

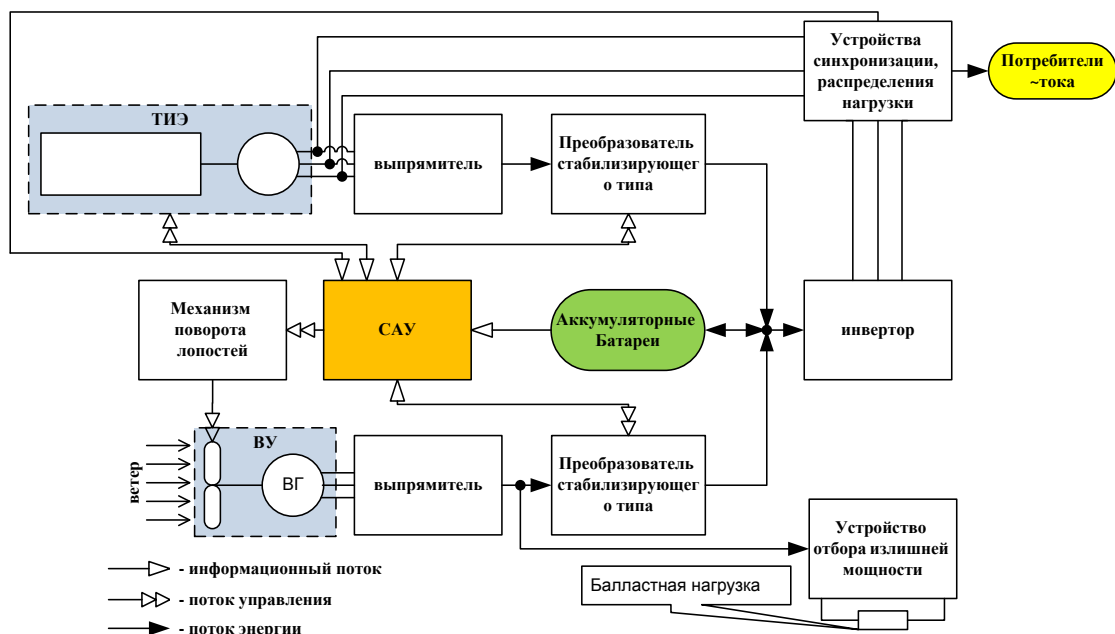


Рис. 7. Структурная схема комбинированной ВЭУ

Накопителем электроэнергии является блок аккумуляторных батарей С100 с номинальной емкостью 26А·ч., обеспечивающий стабильную работу системы. Разработанная экспериментальная модель позволяет стабилизировать выходное напряжение постоянного тока на уровне 55 В при изменении выпрямленного напряжения статорных обмоток ветрогенератора в диапазоне от 15 до 100 В.

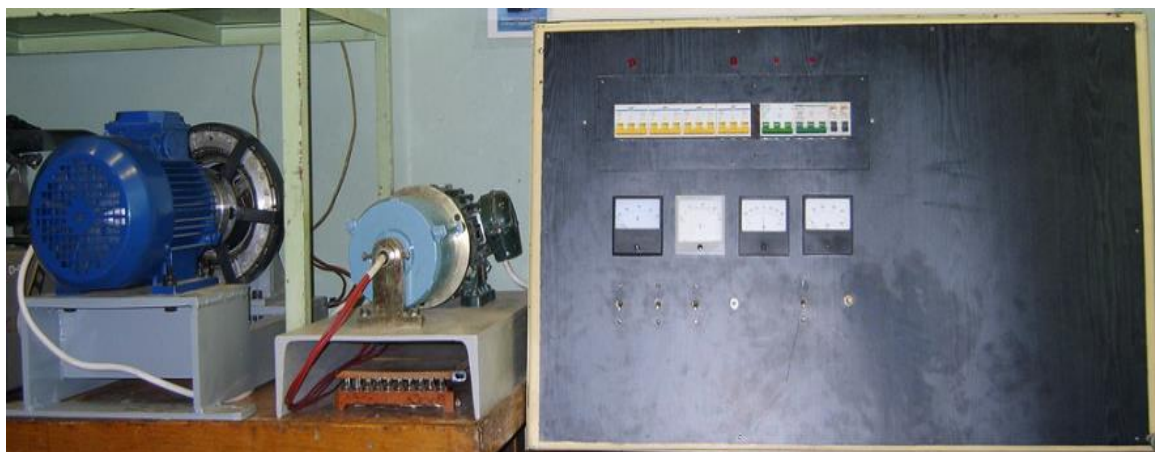


Рис. 8. Общая компоновка экспериментального стенда по изучению функционирования ВЭУ

В результате лабораторных исследований на действующем макете ВЭУ получены экспериментальные результаты в 7 наиболее распространенных режимах работы (рис. 9). Они подтвердили адекватность разработанных инвариантных алгоритмов регулирования и мониторинга состояния ВЭУ.

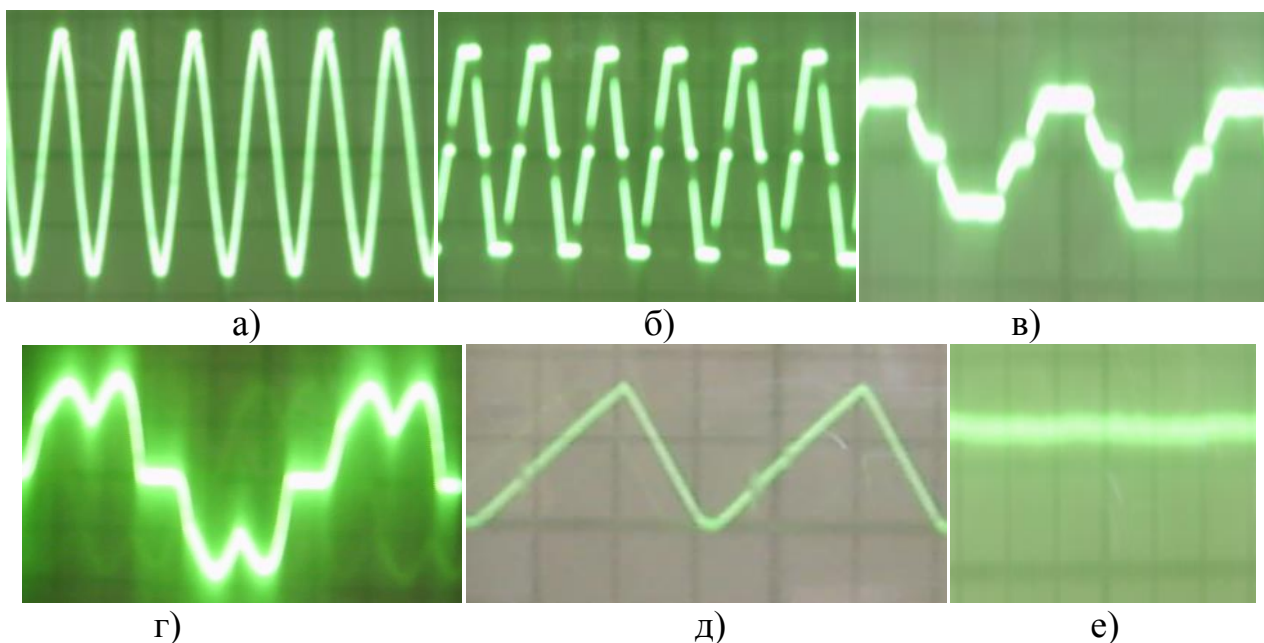


Рис. 9. Осциллограммы электромагнитных процессов ВЭУ: мгновенные значения линейного U_s СГ без нагрузки (а), с нагрузкой (б) при $f=100$ и 33 Гц (в), и токов статора I_s СГ (г), дросселя (д) и нагрузки (е)

Технико-экономическое сопоставление существующих вариантов централизованных СЭС, АИЭ на базе передвижных ДЭУ и АГК на базе новых ВЭУ показал экономическую эффективность последних. Расчеты показали, что при удалении автономного пункта от СЭС более чем на 2 км экономически выгодно использовать автономную СЭС на базе ВЭУ при этом себестоимости электроэнергии в 2,5 раза дешевле.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В результате проведенных в диссертации исследовательских и проектных работ по разработке и внедрению автономных систем электроснабжения с использованием энергоэффективных ВЭУ с самодиагностикой решена актуальная задача исследования и разработки электротехнических генераторных систем на базе ветроэнергетических установок, обеспечивающих энергоэффективность, оперативный мониторинг и стабилизацию параметров напряжения для автономного электроснабжения и отличающихся комплексным подходом к решению задач автоматизации. Материалы диссертации позволяют сформулировать следующие теоретические результаты и практические рекомендации:

1. Анализ состояния СЭС показал, что в настоящее время надежное и энергоэффективное энергоснабжение автономных объектов на территории РФ является актуальной проблемой. Около $\frac{2}{3}$ РФ с населением 20 млн. человек не обеспечивается центральными СЭС и имеют высокие тарифы на топливо и электроэнергию до 100 руб./кВт·ч. Энергоемкость ТЭК РФ в 4 раза выше, чем в

США, в 3,6 раза – чем в Японии и в 2,5 раза – чем в Германии. В результате анализа технологических режимов работы автономных СЭС и структур ВЭУ выработаны технические требования к комбинированным АГК для энергоэффективного электроснабжения удаленных потребителей.

2. Исследования структуры автономной СЭС с ВЭУ на базе СГ-ПЧ, показали ее преимущества по сравнению с традиционными. Анализ энергопотребления автономных объектов выявил, что большая часть энергии расходуется на нужды отопления, что позволяет упростить конструкцию ВЭУ и повысить экономичность работы АГК. В целом суммарная мощность ВЭУ в мире составила в 2011г. 194 ГВт с выработкой более 430 ТВт·ч и КПД до 0,593.

3. Установлено, что работа ВЭУ с СГ-ПЧ на оптимальных режимах обеспечивается новыми законами управления с увеличением выработки электроэнергии до 15-30%. Поэтому ВЭУ представлена как объект теории планирования эксперимента с инвариантной САУ, обеспечивающей высокие показателями качества электроэнергии. Разработаны модели элементов АГК, включая ВЭУ, СГ-ПЧ и СЭС в виде уравнений линейных регрессий вида $U_{34} = 12,214*V+0,219*p_a+0,92*T_6-0,022*G_m+9,602$ и $U_{32} = 3,899*V+0,384*T_6+30,988$, отслеживающие возмущения и корректирующие максимум выработки энергии.

4. Теоретически обоснован синтез инвариантных САУ с ПИ-регулятором напряжения или тока с коррекцией по возмущению, на структуры которых получены патенты РФ. Анализ структуры и задач САУ ВЭУ для СЭС показал, что проведенный структурно-параметрический синтез оптимизированной системы управления ВЭУ с программным заданием параметров обеспечивает потребителей электрической и тепловой энергией при максимальном использовании мощности ВЭУ и энергосбережении традиционного топлива.

5. Разработка системы оперативной диагностики состояния ВЭУ позволяет обеспечить бесперебойность СЭС автономных потребителей и прогнозирование нештатных ситуаций. Установлено, что основными отказами в работе АГК с ВЭУ являются выход из строя ЭМС – 26% и нарушения в СЭС – 39% всех отказов. При этом 84,4% отказов связаны со статорными обмотками СГ. Разработаны граф-модели и алгоритмы мониторинга ВЭУ глубиной от 21-27 элементов, а также интеллектуальные датчики оперативного мониторинга.

6. Проверка адекватности разработанных структур и алгоритмов работы ВЭУ проведена для 7 режимов на разработанной экспериментальной установке с СГ 254-33УХЛ2-1кВт и ПЧ 6SE6420-2UD25-5CA0. Установка позволяет стабилизировать напряжение на уровне 55 В при изменении напряжения в диапазоне от 15 до 100 В. По результатам анализа рациональной структуры макета и синтеза блоков преобразования энергии предложена аппаратная часть экспериментальной установки и ее принципиальная схема. Техно-экономическое сопоставление существующих вариантов централизованных СЭС, АИЭ на базе передвижных ДЭУ и АГК на базе новых ВЭУ показал экономическую эффективность последних в долговременной перспективе.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. Системы электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности, 2012, №4. – С.36-38.
2. Серебряков А.В. Мониторинг электромеханической части ВЭУ // Главный энергетик, 2013, №2. – С. 32-37.
3. Серебряков А.В., Крюков О.В. О новых возможностях технологий SMART GRID // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2013, №2. – С.47-48.
4. Серебряков А.В., Крюков О.В. Оптимизация управления ВЭУ в условиях стохастических возмущений // Промышленная энергетика, 2013, №5. – С.45-49.

Работы в других изданиях, соответствующих требованиям ВАК

5. Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, Вип. 3(19), 2012. – С.549-552.
6. Серебряков А.В., Крюков О.В. Разработка экспериментальной установки для исследования комбинированной системы автономного электроснабжения // Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, А.В. Серебряков и др. / Н.Новгород, Вектор ТиС, том 3, 2012. (ISBN978-5-93126-158-4) – С.489-513.
7. Серебряков А.В., Васенин А.Б., Крюков О.В. Результаты испытаний электромеханической части ветроэнергетических установок автономных энергоисточников электроснабжения // Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, А.В. Серебряков и др. / Н.Новгород, Вектор ТиС, том 3, 2012. (ISBN978-5-93126-158-4) – С.514-538.

Патенты и свидетельства о регистрации

8. Патент на ПМ №113085, МПК H02J 3/46. Энергетический комплекс / Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. // ОАО «Гипрогазцентр», 2012. – Оpubл. БИ №3, 27.01.2012.
9. Свидетельство о гос. регистрации программы №2012661453. Программа работы интеллектуальной сети с ветроэнергетической установкой и Ормат / Серебряков А.В., Крюков О.В., Степанов С.Е. // Приоритет от 15.06.2012г.
10. Патент на ПМ №127494, МПК G05B 23/02. Устройство лингвистического диагностирования отказов / Серебряков А.В., Крюков О.В. // ОАО «Гипрогазцентр», 2013. – Оpubл. БИ №12, 27.04.2013г.
11. Заявка на патент на ПМ №2011138866, МПК H02J 3/00, 3/46. Автономная электростанция / Серебряков А.В., Крюков О.В. // Приоритет 22.09.2011г.

Работы, опубликованные в других изданиях

12. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Разработка интеллектуальных систем с альтернативными источниками энергии для потребителей магистральных газопроводов // X Международный симпозиум «Интеллектуальные системы

(INTELS'2012)», Вологда, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 25-29 июня 2012. – С. 532-536.

13. Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Активно-адаптивные алгоритмы управления автономными генераторными комплексами // XIV МНТК ICSEE-12, МЭИ, Алушта. 23-29 сентября 2012. – С.216-218.

14. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками// V научная конференция «Управление в технических системах (УТЭОСС-2012)» в рамках 5-ей Мульти-конференции по проблемам управления (МКПУ-2012)/ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор» и ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, СПб, 9-11 октября 2012. – С.467-469.

15. Серебряков А.В., Крюков О.В. Малая энергетика с возобновляемыми источниками – новые технические возможности технологий SMART GRID // XLII МНТК «Федоровские чтения», МЭИ, Москва, 7-9 ноября 2012г. – С.141-143.

16. Крюков О.В., Васенин А.Б., Серебряков А.В., Титов В.Г. Экспериментальный стенд электромеханической части ВЭУ // «МГОУ-XXI-Новые технологии», 2012, №5-6. – С. 20-25.

Личный вклад автора. В работах, написанных в соавторстве, автору диссертации принадлежат: принципы организации архитектуры и аппаратных средств ВЭУ на принципах ИИС [1,3,8,13,15], разработка математических моделей и оптимизация системы автоматического регулирования ВЭУ [5,9,12], методика расчёта и формализации систем диагностики ВЭУ [4,10,14], разработка принципиальных схем, монтаж и исследования на экспериментальном макете ВЭУ [6,7,11,16].

Подписано в печать 26.09.2013. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,29.
Тираж 120 экз. Заказ

