

На правах рукописи



БЕРГ Олег Игоревич

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ**

Специальности:

**05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВПО «УГАТУ») на кафедре информационно-измерительной техники

Научные
руководители:

доктор технических наук, профессор
Ураксеев Марат Абдуллович

кандидат технических наук, доцент
Прищепов Сергей Константинович

Официальные
оппоненты:

Трофимов Алексей Анатольевич
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный
университет», профессор кафедры
информационно-измерительной техники

Кирпичникова Ирина Михайловна
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет» (НИУ),
заведующий кафедрой электротехники
и возобновляемых источников энергии

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
аэрокосмический университет имени
академика С. П. Королева» (НИУ), г. Самара

Защита диссертации состоится «18» июня 2015 г. в «10» часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 на базе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «12» мая 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



А. В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Добыча традиционных ископаемых невозобновляемых источников энергии, таких как нефть, газ, каменный уголь, с каждым годом становится все дороже. Отказ от использования атомной энергии многими государствами обусловлен неэкологичностью ее производства и технологии утилизации отработанного топлива, обширной областью заражения в случае аварии.

Развитие «альтернативной», экологически чистой, природосохраняющей энергетики все чаще становится одной из главных тем международных саммитов и форумов. В России государственная политика в сфере использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) предусматривает рост доли таких источников в энергобалансе страны с 1 % в 2009 г. до 4,5 % к 2020 г.

Актуальной задачей также является обеспечение электроэнергией удаленных и труднодоступных местностей, что стимулирует повышение технико-эксплуатационных характеристик автономных ВИЭ для мобильного перемещения и простоты сборки-разборки в полевых условиях. На территории Российской Федерации наиболее энергозависимы регионы материковой зоны. Уральский регион, как характерный пример материковой зоны, выбран для расчета и размещения автономных комплексов ВИЭ. Он характеризуется малыми значениями ($2,5 \div 4$ м/с) средних скоростей и спонтанной направленностью ветровых потоков, переменной мощностью солнечной энергии в течение года (различная длительность светового дня, преобладание пасмурной погоды), экстремальными условиями эксплуатации ВИЭ ($-40 \div 50^\circ\text{C}$). В данных условиях существующие ВИЭ, как преобразователи различных природных и промышленных воздействий (ветро-; гидро-; гелио- и т.д.), не соответствуют в полной мере современным требованиям по непрерывности отдачи энергии, стабильности характеристик, устойчивости к изменению параметров окружающей среды, универсальности и надежности.

В диссертационной работе обоснованы преимущества ветроэлектрических установок (ВЭУ) с приводом от вертикально-осевого (ВО) ветродвигателя (ВД) по сравнению с горизонтально-осевым (ГО). Установлена необходимость постоянного управления и контроля комплекса ВИЭ. Информационно-измерительные системы (ИИС) обеспечивают указанные функции. Важнейшими элементами таких ИИС являются преобразователи угловых и линейных перемещений. Они используются как для обеспечения функционирования многоканальных комплексов ВИЭ, так и на этапе проектирования и улучшения характеристик функциональных блоков, в частности ВД.

В результате проведенного сравнительного анализа различных измерительных преобразователей перемещений (ПП) научно обоснована перспективность создания преобразователей с магнитными шкалами и метками (МШ и М) на основе магнитооптического эффекта Фарадея, обладающих следующими преимуществами: цифровая форма выходного сигнала; бесконтактный метод преобразования; универсальность – измерение

как угловых, так и линейных перемещений; малые габариты и вес; широкий температурный диапазон, адаптированный под условия эксплуатации комплекса ВИЭ.

Таким образом, актуальными являются следующие направления исследований:

1. Разработка принципов построения многоканальных ВИЭ на основе ВЭУ, способных генерировать электроэнергию в течение всего календарного года независимо от погодных условий и времени суток, а также оптимизация режимов их работы благодаря эффективной системе управления.

2. Разработка элементов управления ВИЭ в виде первичных цифровых магнитооптических преобразователей перемещений и улучшение их технико-эксплуатационных показателей.

Научные исследования позволят преодолеть технологические, экономические и экологические проблемы создания и функционирования комплексов ВИЭ.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам исследования, расчета и конструирования элементов управления ВИЭ – первичных ПП (специальность 05.13.05) посвящены научные работы отечественных и зарубежных исследователей: Ж. Аша, Л. Ф. Куликовского, М. А. Михайлова, В. В. Коротаева, В. Л. Конюха, Y. Kaburagi, К. Obara, Н. Sohlstrom и других. Но несмотря на обширные исследования, в них нет систематизации технических решений по построению магнитооптических ПП с МШ и М, нет специальной математической модели, недостаточно внимания уделено исследованию характеристик применительно к многоканальным комплексам ВИЭ (цифровой бесконтактный метод считывания, способность преобразования как линейных, так и угловых перемещений, устойчивость работы в загрязненных средах в рабочем температурном диапазоне $-40\div 50^{\circ}\text{C}$).

Вопросам исследования, расчета и конструирования комплексов электроснабжения на возобновляемых источниках энергии (специальность 05.09.03) посвящены научные работы отечественных и зарубежных исследователей: Н. Е. Жуковского, А. Е. Асарина, К. К. Туркина, В. Т. Федотова, Б. В. Лукутина, Я. И. Шефтера, В. П. Харитонова, В. А. Дзензерского, Е. М. Фатеева, Н. Alvin, R. P. Makund и других. Но несмотря на богатый фактический материал, в них нет анализа технико-эксплуатационных характеристик ВИЭ в условиях ветровых потоков малой интенсивности ($1,5 \leq V \leq 3,5$ м/с) и спонтанной направленности (большинство географических зон РФ); нет специальной методики проектирования ВО ВД; недостаточно внимания уделено анализу системной совместимости компонентов комплекса.

Цель и задачи работы

Целью диссертации является разработка принципов построения и совершенствование элементов системы управления многоканальных автономных комплексов электроснабжения на возобновляемых источниках энергии с применением ветроэлектрических установок для обеспечения непрерывности генерирования электроэнергии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Произведен анализ технико-эксплуатационных характеристик ВИЭ в условиях материковых зон на предмет непрерывности генерации электроэнергии для разработки обобщенных структурной и функциональной схем многоканального комплекса ВИЭ с применением ветроэлектрических установок, как основы вариантов автономных комплексов электроснабжения.

2. Произведен анализ и сопоставительная оценка бесконтактных преобразователей перемещений с целью выбора оптимального средства измерения для информационно-измерительных систем ВИЭ. На основе анализа разработаны функциональная схема и математическая модель цифрового магнитооптического преобразователя перемещений с магнитными шкалами и метками для анализа и синтеза данного средства измерений.

3. Разработана методика проектирования вертикально-осевого ветродвигателя для обеспечения генерации ветроэлектрической установки при малых скоростях ветра и спонтанной направленности ветровых потоков, позволяющая графоаналитическим методом произвести анализ и оптимизацию конструкции ротора ветродвигателя.

4. Реализованы на уровне компьютерного и физического моделирования разработанные элементы комплекса ВИЭ на основе ветроэлектрических установок; проведены лабораторные и натурные исследования макета оптимизированной конструкции ротора ветродвигателя каркасного типа; произведен анализ системной совместимости компонентов комплекса.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы методы математического моделирования с применением положений теории магнитооптики, аэродинамики, теории электромагнитного поля. Для исследования математической модели были использованы числовые методы компьютерного анализа. В экспериментальных исследованиях использованы методы математической статистики при обработке результатов измерений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Принципы построения многоканальных электротехнических комплексов ВИЭ на основе ВЭУ.

2. Результаты разработки функциональной схемы и математической модели цифрового магнитооптического ПП с МШ и М для ИИС ВИЭ.

3. Результаты разработки методики проектирования ВО ВД как приводов ВЭУ при малых скоростях и спонтанной направленности ветровых потоков.

4. Результаты проектирования и стендовых испытаний элементов ВЭУ.

Степень достоверности результатов работы. Изложенные в работе положения теоретически обоснованы, принятые допущения корректны. Достоверность положений подтверждена согласованностью результатов расчета с результатами эксперимента, а также полученными патентами, материалами публикаций в рецензируемых изданиях, практическим применением на производственных предприятиях.

Научная новизна работы

1. Определена совокупность позитивных признаков многоканальных комплексов ВИЭ на основе ВЭУ: системная совместимость;

транспортабельность; непрерывность генерации электроэнергии на протяжении месяца, квартала, года. Разработаны принципы построения многоканальных комплексов ВИЭ на основе ВЭУ с малыми ($1,5 \leq V \leq 3,5$ м/с) скоростями и спонтанной направленностью ветровых потоков.

2. Определены системные методы и технические средства эффективного управления комплексом ВИЭ на основе ВЭУ, в частности, в виде цифровых ПП с МШ и М для измерения линейных и угловых перемещений.

3. Разработана математическая модель магнитооптических ПП с МШ и М для ИИС ВИЭ с целью анализа и проектирования ПП данного типа.

4. Разработана методика проектирования ВО ВД как приводов ВЭУ при малых скоростях и спонтанной направленности ветровых потоков.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1, 2 области исследований паспорта специальности 05.13.05 и пунктам 1, 3 области исследований паспорта специальности 05.09.03.

1. Определены функциональные элементы и связи, составляющие основу многоканальных комплексов ВИЭ, в частности – необходимость применения магнитооптических цифровых первичных преобразователей перемещений в ИИС комплекса ВИЭ. Обоснована совокупность технических требований, определяющая области применения цифровых магнитооптических ПП с МШ и М (устойчивость работы в загрязненных средах в температурном диапазоне $-40 \div 50^\circ\text{C}$; стабильность метрологических характеристик).

2. Разработаны функциональная схема, математическая модель цифрового магнитооптического преобразователя угловых и линейных перемещений. На разработанный ПП с МШ и М получен патент РФ на ПМ №132538.

3. Разработана методика проектирования ВО ВД как привода ВЭУ, позволяющая графоаналитическим методом производить анализ качества и оптимизацию ротора для обеспечения генерации ВЭУ при малых ($1,5 \leq V \leq 3,5$ м/с) скоростях спонтанной направленности ветра.

4. В рамках разработанной методики по п. 3 создан стенд для определения и оптимизации характеристик ВО ВД.

5. Создано программное обеспечение, защищенное свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010614249, примененное для анализа конфигурации лопастей, как составляющая часть методики по п. 3.

6. Разработан принцип построения ротора ВД каркасного типа с повышенным соотношением прочность/масса конструкции. Каркасная конструкция также обеспечивает мобильность ветроэлектрической установки (простота сборки и демонтажа) и ее транспортабельность (упаковка элементов ВЭУ в контейнерах из лопастей ВД).

7. На основе разработанной методики проектирования и испытаний макетных образцов ротора создан прототип мобильного ВД каркасного типа, защищенный патентом РФ на ПМ № 126378.

Основные результаты работы использованы в следующих организациях:

1. Исследование характеристик ВД и электронных преобразователей на основе МШ и М на предприятии ООО «ЭнергоСнабСервис» (г. Уфа).

2. Техническая реализация принципов системной совместимости компонентов генерирования и накопления энергии в ВЭУ на предприятии ОАО «Башнефтегеофизика» (г. Уфа).

3. Информационно-патентный поиск по теме «Разработка мобильной электростанции на основе ветрогенераторной установки» на предприятии ООО НПФ «Экситон-Автоматика» (г. Уфа).

Апробация работы. Основные положения и результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на: IV Международной научно-практической конференции «Альтернативные источники энергии для больших городов» (г. Москва, 2010 г.); VIII Международной научно-практической конференции «Становление современной науки – 2012» (г. Прага, Чехия, 2012 г.); Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2012 г.); IV Международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (г. Брянск, 2012 г.); Всероссийской конференции «Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергоснабжения» (г. Уфа, 2010 г.). В 2013 г. материалы диссертации были включены в проект «Современные ВИЭ для г. Уфы» – приз конкурса «Перспектива 2013», (Администрация ГО г. Уфа) и использованы в законопроекте «О передаче в сети энергосбытовых компаний электроэнергии, произведенной генерирующими объектами на основе ВИЭ» – приз конкурса «Законотворец Республики Башкортостан» (МОП при Государственном собрании – Курултае РБ) в номинации «Развитие топливно-энергетического комплекса».

Публикации по теме диссертации

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 19 научных печатных работах, из них 4 статьи – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК, 2 патента РФ на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 189 страницах, и 21 приложения, содержит рисунки и таблицы в количестве 97 шт. Список литературы включает 139 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и основные задачи исследования, приводятся выносимые на защиту положения, апробация, структура работы и краткое содержание работы по главам.

В **первой главе** проведен сравнительный анализ существующих ВИЭ на различных физических явлениях. Подробно рассмотрены каждый из возобновляемых источников энергии (водные, ветровые, солнечные, геотермальные, биогенераторные) и установки, работающие на их основе.

Для континентальных областей (Уральский регион, г. Уфа) в летние периоды выявлено снижение активности энергии ветра при максимальных

значениях энергий воды и солнца. В зимние же периоды зависимость обратная – при минимуме солнечной и водной энергий, пиковых значений достигает ветровая энергия. Исходя из периодичности генерирования электроэнергии различными природными источниками, комплекс ВИЭ целесообразно строить по многоканальному принципу.

Потенциальные возможности применения энергии ветра практически не ограничены в большинстве природных зон. В связи с этим, энергия ветра рассматривается в данной диссертационной работе как наиболее перспективная. В зависимости от ориентации плоскости вращения лопастей к направлению ветрового потока различают вертикально-осевые и горизонтально-осевые ВД (рисунок 1).



а



б

Рисунок 1 – Типы ветродвигателей ВЭУ:
а – горизонтально-осевой; б – вертикально-осевой

К настоящему моменту ГО ВД с гигантскими пропеллерами (ГП) из 2÷4 лопастей (рисунок 1, а) являются наиболее распространенными конструкциями ВЭУ и декларируются фирмами-производителями как безальтернативные. Однако, недостатки ВЭУ с ГП препятствуют их применению в материковых зонах: огромные размеры (высота: 100 м; диаметр пропеллера: 150 м); неработоспособность при направлениях ветра отличных от фронтального; неработоспособность при малых скоростях ветра: начало вращательного движения при 4÷5 м/с; проблемы системной совместимости в многоканальных комплексах ВИЭ; ВЭУ с ГП – источники акустических шумов и электромагнитных помех.

ВО ВД (рисунок 1, б) по сравнению с ГО ВД имеют следующие преимущества: (1) генерация электроэнергии вне зависимости от розы ветров; (2) генерация электроэнергии при малых 1,5÷7 м/с скоростях ветра; (3) повышение эффективности ВД методом оптимизации формы лопастей: на величине момента трогания $M_{тр}$. (сопротивления моменту вращения $M_{вр}$) усложнение конструкции лопастей ВО ВД не отражается (возникающие векторы эксцентриситетов ортогональны плоскости действия $M_{тр}$).

Сравнительный анализ ВИЭ показал, что в отличие от ВЭУ водные, солнечные и другие энергетические установки рассматривать как основу многоканальных комплексов материковой зоны не целесообразно. Обосновано применение ВЭУ в качестве базового и наиболее перспективного типа ВИЭ.

Установлена необходимость использования ИИС для обеспечения эффективного преобразования энергии каждого ВИЭ. Многоканальные комплексы ВИЭ (рисунок 2) составляют основу систем распределенной энергетики. В них используются адаптированные к условиям материковых зон источники и значимость ИИС, как центрального органа измерения и управления многократно возрастает.

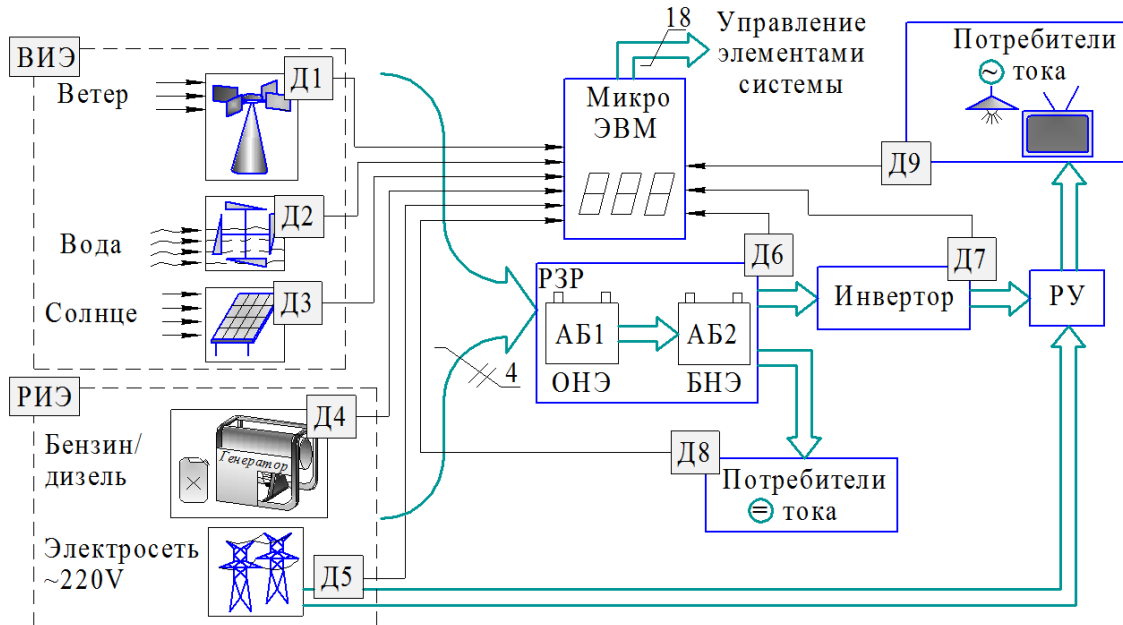


Рисунок 2 – Функциональная схема многоканального комплекса ВИЭ:

Д1÷Д3 – датчики контроля параметров ВИЭ; РИЭ – резервные источники электроснабжения; Д4, Д5 – датчики контроля параметров РИЭ; АБ – аккумуляторная батарея; PZR – реле заряда разряда АБ; ОНЭ, БНЭ – оперативный и базовый накопители энергии;

Д6 – датчик заряда АБ; Д7 – датчик качества сигнала 220В 50Гц; Д8, Д9 – датчики тока потребителя постоянного и переменного токов; РУ – распределительное устройство

Установлена главенствующая роль ПП в ИИС многоканальных комплексов ВИЭ. Они используются как на этапе функционирования комплекса, входя в состав каждого ВИЭ, так и на этапе проектирования и оптимизации характеристик функциональных блоков (устройство измерения момента вращения ВД). В соответствии с режимами эксплуатации и особенностями многоканального комплекса ВИЭ, к ПП предъявляются следующие технические требования: (1) бесконтактный метод считывания информации; (2) цифровая форма выходного сигнала; (3) универсальный тип преобразователя: измерение угловых и линейных перемещений с разрешающей способностью не менее, м: $1 \cdot 10^{-4}$; (4) рабочий температурный диапазон, °С: $-40 \div 50$; (5) устойчивость работы в загрязненных средах.

В диссертационной работе проведен сравнительный анализ характеристик бесконтактных ПП различных классов. В результате ПП с МШ и М на магнитооптическом эффекте Фарадея определен как соответствующий всем пунктам предъявляемых технических требований для систем измерения и контроля ВИЭ.

Результатом проведенных анализов явилось формулирование цели и задач исследования.

Во **второй** главе представлены разработанная автором математическая модель и оценка технических характеристик магнитооптического ПП с МШ и М. Преобразователь перемещений (рисунок 3) состоит из двух основных элементов: чувствительной магнитооптической головки и подвижного носителя с МШ и М (1), который перемещается вдоль направления x .

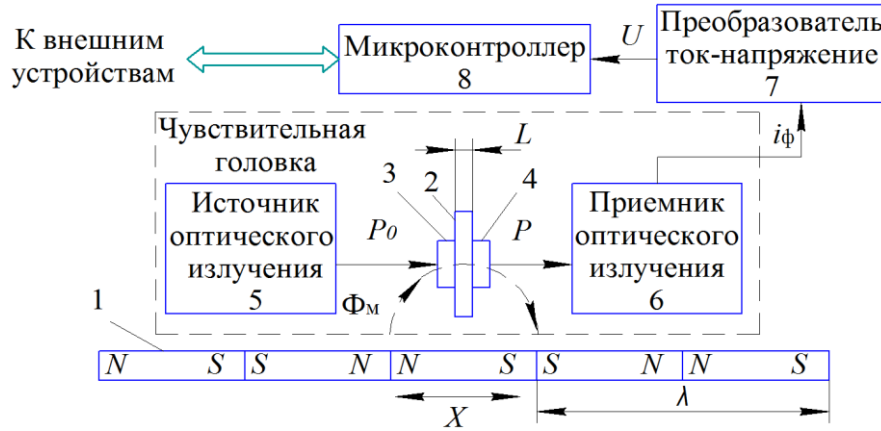


Рисунок 3 – Функциональная схема ПП с МШ и М:

1 – подвижный носитель МШ и М; 2 – ФГП; 3 – поляризатор; 4 – анализатор

При воздействии поля магнитной метки плоскость поляризации линейно поляризованного света в феррит-гранатовой пленке (ФГП) поворачивается, мощность P_0 луча лазерного диода преобразуется в мощность P фотодиода

$$P = cP_0 e^{-bL} \{ \cos^2[\alpha + 2\Theta_F L \cos(\Theta)] + p \}, \quad (1)$$

где α – угол между осями поляризатора и анализатора; b – коэффициент поглощения материала; p – коэффициент затухания светового потока; c – учитывает потери на излучение в системе; Θ_F – удельное фарадеевское вращение ФГП; L – активная длина взаимодействия, равная толщине ФГП; Θ – угол между направлением намагниченности и направлением распространения света.

В приемнике оптического излучения 6 происходит преобразование светового луча мощности P в фототок

$$i_\phi = S \cdot P, \quad (2)$$

где S – спектральная чувствительность фотодиода.

Для определения зависимости $\cos(\Theta)$ от значений напряженности поля магнитной метки H , рассмотрены плотности энергий взаимодействия ФГП и поля магнитной метки. В соответствии с формулами (1) и (2) установлена зависимость, определяющая значение фототока чувствительной головки

$$i_\phi = S \cdot cP_0 e^{-bL} \left\{ \cos^2 \left[\alpha + 2\Theta_F L \frac{H_x \mu_0 M_s}{2K_{\text{одн.}} - \mu_0 M_s^2} \right] + p \right\}, \quad (3)$$

где H_x – составляющая вектора напряженности поля магнитной метки, перпендикулярная плоскости ФГП; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; M_s – намагниченность насыщения ФГП; $K_{\text{одн.}}$ – константа одноосной анизотропии ФГП.

В разработанном ПП подвижным носителем МШ и М являются традиционные координатные ленты с синусоидальным распределением намагниченности.

Проекция вектора напряженности магнитного поля ленты, перпендикулярная ФГП, описывается обобщенной формулой

$$H_x = -6,28M_m e^{-\frac{6,28y}{\lambda}} \left(e^{\frac{3,14D}{\lambda}} - e^{-\frac{3,14D}{\lambda}} \right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right), \quad (4)$$

где M_m – намагниченность на поверхности носителя; λ – длина волны записи синусоидального сигнала ($\lambda/2$ – длина магнитной метки); D – толщина подвижного носителя; y – расстояние от поверхности МШ и М до центра ФГП.

Значения фототока для периодического сигнала и единичной магнитной метки полярности NS в соответствии с формулами (3), (4) составляют

$$i_\phi = S \cdot c P_0 e^{-bL} \left\{ \cos^2 \left[\alpha + -12,56M_m \mu_0 M_s \Theta_F L \dots \frac{e^{-\frac{6,28y}{\lambda}} \left(e^{\frac{3,14D}{\lambda}} - e^{-\frac{3,14D}{\lambda}} \right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}{2K_{\text{одн.}} - \mu_0 M_s^2} \right] + p \right\}. \quad (5)$$

Численными методами произведено моделирование процесса перемагничивания ФГП и оценка влияния параметров функциональных блоков ПП с МШ и М на динамический диапазон, чувствительность (рисунок 4) и нелинейность функции фототока i_ϕ по формуле (5). Установлены граничные значения параметров. Указаны значения, обеспечивающие динамический диапазон $0,36 \div 4,68$ мА, чувствительность $4,06$ кА/м и нелинейность не более $4,5\%$ в диапазоне $1,2 \div 2,9$ мм (для $\lambda/2 = 2$ мм). Производимая в структуре преобразователя цифровая обработка информационного сигнала повышает разрешающую способность до 10^{-4} м.

Достигнута универсальность магнитной головки – неизменность типа и строения при измерении угловых и линейных перемещений МШ и М. Приведен способ определения направления перемещения синусно-косинусным методом.

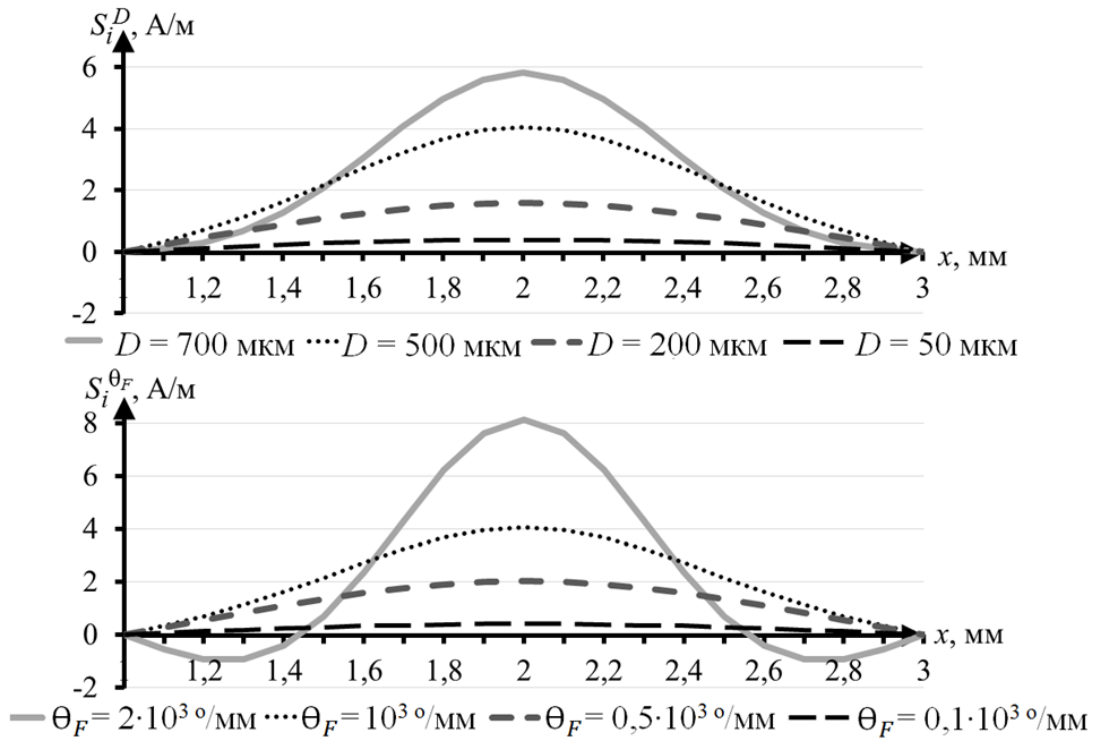


Рисунок 4 – Влияние толщины магнитной шкалы и удельного фарадеевского вращения Θ_F ФГП на чувствительность S функции i_ϕ при $\lambda/2 = 2$ мм

Аналитическим методом произведена оценка технических характеристик основных функциональных блоков магнитооптического ПП с МШ и М: чувствительной магнитооптической головки и подвижного носителя МШ и М. Применение световодов с герметичным соединением элементов чувствительной головки ПП с МШ и М, позволяет исключить появление конденсата между элементами прохождения светового луча. Световоды также позволяют удалить элементы ПП с наименьшим температурным диапазоном из зоны влияния окружающей среды.

Определен ряд аналогов элементов измерительной системы разработанного ПП с МШ и М. Технические характеристики аналогов соответствуют результатам численного анализа математической модели, полученной в диссертации. Указанное обстоятельство доказывает реализуемость магнитооптического ПП с МШ и М. Сравнительный анализ существующих магниторезистивных головок ПП с МШ и М с магнитооптическими устанавливает сопоставимость их технических характеристик. При этом, магнитооптические головки обладают лучшими эксплуатационными характеристиками: устойчивостью работы в загрязненных средах; расширенным рабочим температурным диапазоном ($-40 \div 50^\circ\text{C}$).

В **третьей главе** представлена разработанная методика проектирования вертикально-осевого ветродвигателя, а также ее стендовая и натурная проверки. ВД преобразует энергию ветрового потока в механическую энергию вращения вала генератора ВЭУ, то есть является его приводом. Процесс вращения ротора ВО ВД для каждого угла α поворота лопасти (рисунок 5) описывается следующим соотношением

$$K \frac{d^2\alpha}{d\tau^2} = \sum_{i=1}^{n_\alpha} \frac{1}{2} R_i C_x^{(i)} S_i \rho (V - U \cos(\alpha_i))^2 - \dots \\ \dots - \sum_{j=1}^{k_\alpha} \frac{1}{2} R_j C_x^{(j)} S_j \rho (V - U \cos(\alpha_j))^2 - M_T, \quad (6)$$

где K – момент механической инерции ротора относительно оси вращения (ОВ); C_x – аэродинамический коэффициент сопротивления лопасти потоку; p – динамическое давление на лопасть; R – плечо вектора силы давления p соответствующей лопасти ротора ВД; V – скорость воздушного потока; U – линейная скорость ротора; S_i – площадь сечения лопасти, ортогональная ламинарному ветровому потоку Φ ; n – количество лопастей; M_T – моменты сил трения в верхней и нижней опорах ОВ, а также сил торможения нагрузкой электрогенератора; τ – промежуток времени; α_i, α_j – углы поворотов лопастей относительно начального $\alpha = 0^\circ$ положения.

Эффективность ВД оценивается по значению коэффициента использования энергии ветра ξ , равного отношению энергии ветрового потока, воспринятой и преобразованной лопастями ВД в механическую $E_{ВД}$, к полной энергии ветрового потока E , воздействующего на ротор

$$\xi = \frac{E_{ВД}}{E}. \quad (7)$$

В зависимости от конфигурации ротора, моменты лопастей могут иметь как положительное (создающие вращательное движение, $M_{ВР}$), так и отрицательное (направленное против вращения ротора) направления.

Моменты лопастей, противодействующие направлению вращения, а также M_T образуют момент трогания $M_{ТР}$, приводящий к торможению вращения ВД.

Таким образом, для повышения ξ критериями оптимизации ВД являются: (1) обеспечение $M_{ВР} > M_{ТР}$ при любых углах α (рисунок 5) поворота ротора относительно направления ветрового потока Φ ; (2) обеспечение $M_{ВР} > M_{ТР}$ при малых скоростях ветра $V \geq 1,5$ м/с; (3) снижение M_T ; (4) обеспечение равномерности преобразования ветрового потока в скорость вращения ВД; (5) обеспечение оптимального соотношения прочности и массы конструкции.

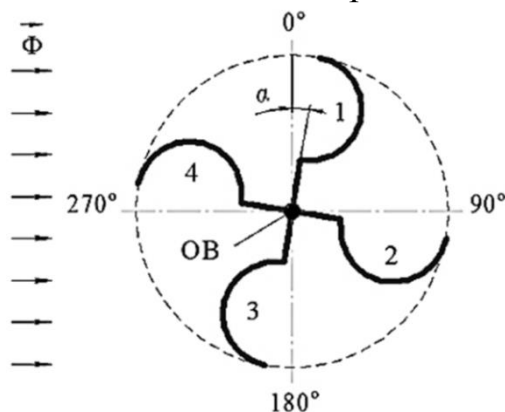
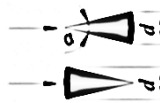


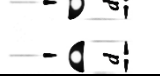
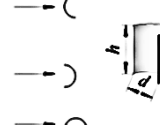


Рисунок 5 – Вертикально-осевой ВД типа ротоанемометр

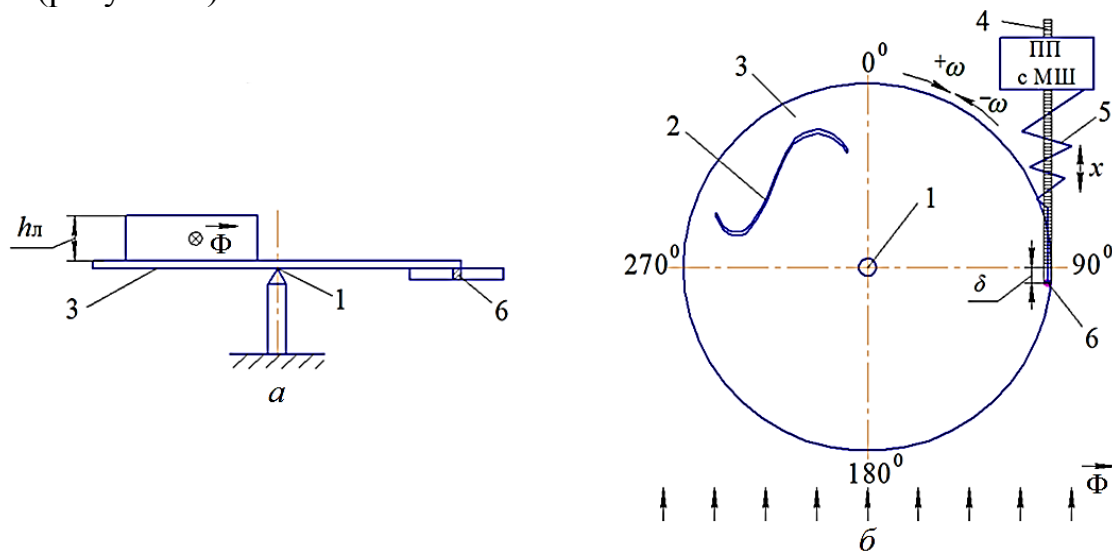
Снижение M_T обеспечивалось выполнением опор ВД различного типа: нижняя опора типа «подпятник», верхняя – «радиальный подшипник». В этом случае проекция эксцентричной массы P ВД на ВО уравновешена, маятниковая система находится в безразличном состоянии, влияние P на формирование M_T сводится к минимуму.

В плане решения задач диссертации разработан графоаналитический метод исследования и оптимизации ротора ВД. В соответствии с п. 1 метода в качестве базовой конструкции ротора ВД выбрана конструкция устройства для измерения скорости ветровых потоков типа ротоанемометр, обладающая наибольшим ξ . Далее по пп. 2÷4 графоаналитического метода, в соответствии с параметрами прототипа, были произведены: выбор числа лопастей и проект профиля лопасти ротора. Для автоматизации процесса исследования ротора по пп. 2, 4 графоаналитического метода разработано прикладное программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612416), позволяющее определять координаты точек горизонтальных сечений, а также наиболее близкий тип и значения коэффициентов аппроксимирующих функций профиля проектируемой лопасти. В соответствии с п. 5 метода создан макет ротора ВД с заданными геометрическими параметрами основных форм лопастей и конструктивными коэффициентами C_x (таблица 1). Для макета ротора, по п. 7 и п. 8 графоаналитического метода, определялись статические (парусность ВД, момент вращения $M_{ВР}$) и динамические (скорость вращения $\omega_{ВД}$; момент на валу M) характеристики. На основании полученных характеристик производилась оптимизация формы лопастей ротора в соответствии с п. 9 методики и дальнейший анализ вновь выстроенной конфигурации.

Таблица 1 – Значения C_x для основных форм лопастей ротора ВО ВД

№ п/п	Наименование тела	Форма тела и направление потока	Поверхность давления S	Отношение сторон поверхности	C_x
1	Конус без днища		$\pi d^2/4$	$\alpha = 30^\circ$	0,35
				$\alpha = 60^\circ$	0,5
2	Конус с закругленной вершиной без днища		$\pi d^2/4$	$\alpha = 30^\circ$	0,22
				—	1,4
3	Прямоугольная пластина		$a \cdot b$	a/b	1,1
				∞	1,83
4	Полусфера		$\pi d^2/4$	—	1,4
				—	0,4
5	Полуцилиндр		$h \cdot d$	$h/d = 2$	0,6
				$h/d = 14$	0,8
				$h/d = 2$	1,4
				—	0,4

Для определения момента вращения $M_{ВР}$ – основного показателя эффективности преобразования энергии ветра (согласно методике проектирования ВД), к платформе ротора прикреплен динамометр малых усилий (рисунок 6).

Рисунок 6 – Устройство для определения $M_{ВР}$ лопасти в статическом режиме:

a – вид сбоку, b – вид сверху;

1 – ось вращения; 2 – исследуемый профиль лопасти; 3 – плоскость крепления лопастей;

4 – МШ и М; 5 – пружина

Исследуемая конфигурация лопастей, размещенная на роторе, под действием ламинарного ветрового потока Φ создает $M_{ВР}$ относительно ОВ. Под действием $M_{ВР}$ платформа поворачивается на малый угол в направлении ω . В зависимости от направления вращения ω^+ или ω^- (по часовой стрелке или против), пружина динамометра растягивается (сжимается) на малое значение δ , фиксируемое ПП с МШ и М. Скорость ветра измеряется

аттестованным анемометром. Таким образом, измеряется $M_{ВР}$ в статическом состоянии ротора при различных углах α_k атаки потоком Φ ВД (рисунок 5).

На лабораторной установке был проведен сравнительный анализ макетных образцов ВД с различными формами и количеством лопастей. Исследования конструкции ротоанемометра (рисунок 7, в) подтвердили характеристики промышленно используемых анемометров в плане высокого значения ξ и соответствия частоты вращения ВД скорости ветра. При этом, выявлена неравномерность соотношения $M_{ВР}/M_{ТР}$ при различных α_k (рисунок 5): $M_{ВР} \leq M_{ТР}$ при $\alpha_k \approx 30^\circ \pm (n \times 90^\circ)$, где $n=0,1...$ Указанный недостаток влияет на равномерность вращения В и на начальный $M_{ВР}$ при малых ветровых потоках.

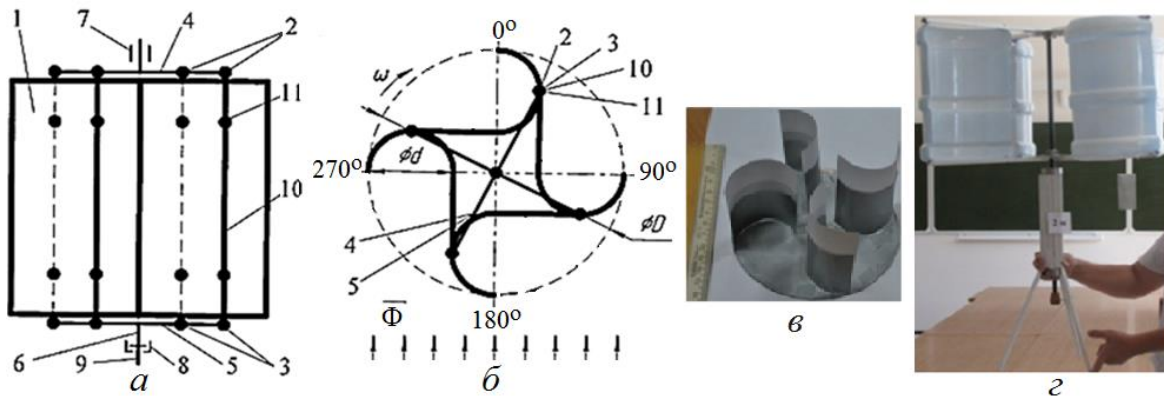


Рисунок 7 – Разработанные роторы ВД:

эскиз оптимизированного ВД каркасного типа: *а* – вид сверху, *б* – вид сбоку;
в – макет ВД ротоанемометр; *г* – прототип ВД каркасного типа мобильного исполнения

Испытания макета каркасной конструкции (рисунок 7, *а*), разработанной в данной диссертации, показали характеристики, сопоставимые с полученными характеристиками ротоанемометра. Вместе с тем достигнуто устранение угловых α_k положений с $M_{ВР} \leq M_{ТР}$. Конструкция также обеспечивает: высокий ξ ротора; простоту сборки и компактность упаковки элементов ВЭУ при перебазировании; оптимальное соотношение прочности и массы конструкции. На конструкцию ВД каркасного типа получен патент РФ № 126378.

На основании технических требований комплекса ВИЭ, выводов методики проектирования и характеристик макетов ВД, создана конструкция мобильного ВД каркасного типа (рисунок 7, *а, б*). Анализ зависимостей параметров вращения ротора ВД макетов конструкции ротоанемометр (рисунок 7, *в*), макетов конструкции каркасного типа и прототипа ротора ВД мобильного исполнения (рисунок 7, *г*) подтверждает сходимость их характеристик. Таким образом, укрупнение размеров ВД не приводит к искажению характеристик исходных макетных образцов.

Четвертая глава посвящена реализации функциональных блоков комплекса ВИЭ. В зависимости от условий эксплуатации и характеристик нагрузки, набор функциональных элементов комплекса (рисунок 2) изменяется. Рассмотрена структурная схема автономного комплекса ВИЭ для электропитания аппаратуры удаленных объектов. Особенность схемы – возможность применения ВИЭ в северных районах с малыми гелио- и водными ресурсами (наличие полярных дня и ночи, короткого летнего периода). Малое

электропотребление аппаратуры в режиме ожидания и высокое – в импульсном режиме обмена информации с базой, позволяют ВЭУ обеспечивать требуемый объем электроэнергии. В соответствии с характеристиками потребителя электроэнергии и условиями Уральского региона, к автономному комплексу ВИЭ сформулированы следующие технические требования:

- 1) характеристики нагрузки: мощность, Вт: 500; напряжение, В: 12; периодичность включения, раз/день: 6; длительность потребления, минут: 30;
- 2) диапазон номинальных скоростей ветрового потока, м/с: 2,5÷3,5;
- 3) обеспечение непрерывности поставки электроэнергии в течение года за счет функционального совмещения ВЭУ и АБ;
- 4) рабочий температурный диапазон: -40÷50°С;
- 5) возможность мобильного перемещения.

Разработаны функциональная схема системы управления и алгоритм работы микроЭВМ для автономного функционирования комплекса. Приведен вариант схемы комплекса с коммерческой реализацией избыточной электроэнергии. Произведен анализ системной совместимости компонентов комплекса. Установлено техническое совершенство разработанной ВЭУ с ВД каркасного типа по сравнению с аналогами. Доказана обоснованность принципов построения многоканальных автономных комплексов ВИЭ на базе ВЭУ для непрерывного генерирования электроэнергии в материковых зонах. Указаны основные аспекты проектирования таких комплексов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложении приведены данные практических исследований, копии патентов на разработанные автором устройства, акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа структур и технико-эксплуатационных характеристик ВИЭ в условиях материковых зон сформированы структурная и функциональная схемы комплексов ВИЭ на основе ВЭУ, многоканальный принцип построения которых обеспечивает непрерывность генерирования электроэнергии.

2. Научно обоснован выбор ПП с МШ и М как оптимального средства измерений линейных и угловых перемещений для ИИС комплекса ВИЭ.

Разработаны функциональная схема (патент РФ на ПМ №132538) и математическая модель цифровых магнитооптических ПП с МШ и М. В отличие от известных, математическая модель устанавливает прямую связь между измеряемым воздействием меток магнитной шкалы и информационным сигналом измерительной магнитооптической головки ПП. Также впервые в модель введена функциональная связь между размерами магнитных меток и конструктивными параметрами измерительной головки.

Результаты анализа математической модели определяют превосходство разработанного цифрового ПП над существующими аналогами с МШ и М по критериям: универсальность – измерение угловых и линейных перемещений

с разрешающей способностью не менее, м: $1 \cdot 10^{-4}$; термоустойчивость ($-40 \div 50^\circ\text{C}$); устойчивость работы в загрязненных средах.

3. Для обеспечения генерации ВЭУ при малых ($1,5 \leq V \leq 3,5$ м/с) скоростях и спонтанной направленности ветра разработана методика проектирования ВО ВД, позволяющая графоаналитическим методом производить анализ и оптимизацию конструкции ротора ВД. В рамках методики создан стенд для определения и оптимизации характеристик ВО ВД. Создана прикладная программа (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2010614249), адаптированная для аналитического представления графических форм лопастей ВД.

На основе методики проектирования и испытаний макетных образцов определен принцип построения ротора ВД каркасного типа с оптимальным соотношением прочности и массы конструкции. Мобильность ветроэлектрической установки (простота сборки и демонтажа), транспортабельность и сохранность (упаковка элементов ВЭУ в контейнерах из лопастей ВД) обеспечивается каркасной структурой ВД, защищенной патентом РФ на ПМ № 126378. Создан прототип мобильного ВД каркасного типа.

4. Реализованы на уровне компьютерного и физического моделирования разработанные элементы комплекса ВИЭ на основе ВЭУ; проведены экспериментальные и натурные исследования оптимизированной конструкции ВД каркасного типа; проведен анализ системной совместимости компонентов комплекса.

По сопоставительному анализу существующих магнитооптических головок и существующих магнитных шкал с результатами компьютерного моделирования ПП с МШ и М доказана адекватность математической модели по F -критерию Фишера. Разработанный ПП с МШ и М имеет разрешающую способность для линейных $\Delta x = 0,1$ мм и угловых $\Delta \varphi = 10$ мин перемещений. Характеристики ПП с МШ и М соответствуют требованиям ИИС для контроля динамических параметров ВИЭ: рабочий температурный диапазон ($-50 \div 60^\circ\text{C}$), быстродействие ПП: 23 мкс; быстродействие чувствительной головки: 0,1 мкс; линейная скорость (max): 4,3 м/с, угловая скорость (max): 122 рад/с.

Состоятельность разработанной методики проектирования ВД ВЭУ подтверждается следующим: (1) обеспечением $M_{\text{ВР}} > M_{\text{ТР}}$ при любых направлениях ветра; (2) обеспечением $M_{\text{ВР}} > M_{\text{ТР}}$ при малых ($1,5 \leq V \leq 3,5$ м/с) скоростях ветра; (3) линейной зависимостью частоты вращения ВД от скорости ветра; (4) получением коэффициента использования энергии ветра $\xi \leq 38$ %, сравнимого с ξ ротоанемометра; (5) получением каркасной конструкции ВД, обеспечивающей: прочность; жесткость; минимум соотношения масса/прочность; простота, технологичность эксплуатации и сборки/демонтажа; мобильность передислокации; (6) не искажением характеристик макетных образцов при укрупнении более чем в 7 раз.

Для материковых зон доказана наибольшая стабильность поставки электроэнергии ВЭУ с ВО ВД и малыми ($1,5 \leq V \leq 3,5$ м/с) рабочими скоростями ветра по сравнению с иными электрогенерирующими ВИЭ. При этом применение автономных комплексов ВИЭ с разнородными источниками

электроэнергии паритетной мощности (ветро- и гелео-) позволяет повысить стабильность поставки электроэнергии на 33 %, сократить размеры рабочих площадок комплексов в 2,5 раза, снизить вес элементов комплексов в 2,2 раза, уменьшить емкость аккумуляторных батарей и длительность работы резервного источника электроэнергии. Указанные выводы подтверждают обоснованность разработанных принципов построения многоканальных автономных комплексов ВИЭ на базе ВЭУ для непрерывного генерирования электроэнергии в материковых зонах.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. **Берг, О. И.** Принципы построения мобильных ветроэлектростанций / О. И. Берг, С. К. Прищепов, И. Р. Зинатуллин // Вестник КГЭУ. – 2010. – №3 (6) С. 38 – 43.

2. **Берг, О. И.** Проектирование экологических систем электроснабжения / О. И. Берг, С. К. Прищепов, И. Р. Зинатуллин // Известия ТПУ. – 2011. №4 (319) С. 64 – 67.

3. **Берг, О. И.** Расчет и исследование статической характеристики преобразователя перемещений с магнитными метками / О. И. Берг, М. А. Ураксеев, И. А. Баженов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – №4, Т.9. С. 93 – 99.

4. **Берг, О. И.** Сопоставительная оценка по характеристикам различных типов преобразователей перемещений / О. И. Берг, М. А. Ураксеев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – №1, Т.10. С. 92 – 100.

Патенты РФ и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010614249. Аппроксимация графических зависимостей аналитическими функциями / Берг О. И., Муфаззалов Д. Ф.; патентообладатели О. И. Берг, Д. Ф. Муфаззалов № 2012141815 заявл. 01.10.2010 г.

6. Пат. 126378 Российская Федерация. МПК F 03 D 3/00. Ротор мобильного ветродвигателя / Берг О. И., Прищепов С. К., Зинатуллин И. Р.; заявители и патентообладатели О. И. Берг, С. К. Прищепов, И. Р. Зинатуллин № 2012141815/06, , опубл. 27.03.2013 Бюл. №9.

7. Пат. 132538 Российская Федерация. МПК G 01 B 7/00. Преобразователь перемещений с магнитными метками / Ураксеев М. А., Берг О. И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО УГАТУ № 2013118780/28 заявл. 23.04.2013. опубл. 23.04.2013 Бюл. №26.

В международных изданиях

8. **Berg, O.** Primary converters in ecological systems of power generation / S. Prishepov, I. Zinatullin, O. Berg // NR 10(78) 2013. – Praha; Nauka I studia, 2013. – p. 27 – 32.

Диссертант



О. И. Берг

БЕРГ Олег Игоревич

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

Специальности:

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 13.04.2015. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.

Тираж 100 экз. Заказ № 237.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12