На правах рукописи

Соломин Евгений Викторович

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Барнаул 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) на кафедре «Электротехника и возобновляемые источники энергии»

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Кирпичникова Ирина Михайловна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Федянин Виктор Яковлевич
(ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»)

доктор технических наук, профессор
Тайсаева Валентина Табановна
(ФГОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова»)

доктор технических наук, профессор
Худоногов Анатолий Михайлович
(ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения»)

Ведущее предприятие – ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «17» декабря 2012 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. Тел/факс (3852)36-71-29, 36-78-64, htpp://www.altstu.ru, e-mail: elnis@inbox.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Автореферат разослан «12» ноября 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор Л.В. Куликова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Работа посвящена созданию методологических основ проектирования надежного и экономичного энерго- и электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, разработке новых ветроэнергетических установок для сельскохозяйственного производства и быта населения.

С древнейших времен человек использовал энергию ветра для помола зерна, перекачивания воды и других работ, заменяющих мускульную силу. Задачей ветроэнергетики на современном этапе является обеспечение энергией удаленных потребителей. Именно вопрос энергоснабжения разрозненных сельскохозяйственных потребителей наиболее актуально стоит в большинстве регионов России, территории которых имеют природные ресурсы, возможность развития инфраструктуры и создания производства. Необходимость неоправданно больших капиталовложений в строительство линий электропередач в условиях сложного рельефа местности и совокупности с малой потребляемой мощностью объекта (в среднем до 50-100 кВт) подтверждает актуальность поиска альтернативных методов решения задачи электрификации.

В период мирового кризиса энергетика села все чаще сталкивается с глобальной зависимостью от топливно-энергетических ресурсов и их дефицитом, а также с неизменным ростом цен на топливо, что сказывается на стоимости производства. При этом в отрасли преобладает высокая энергоемкость, ощущается сильный дефицит инженеров-энергетиков, а также существуют проблемы с надежностью электроснабжения отдельных территорий и хозяйств. Все это происходит на фоне высокого процента износа электрооборудования. С другой стороны в России имеются все необходимые ресурсные, технические, энергетические и экономические условия для широкомасштабного эффективного использования ветроэнергетических установок, в том числе для сельскохозяйственных районов.

Внедрение альтернативной энергетики на основе возобновляемых источников энергии может создавать надежные, редко обслуживаемые локальные системы энергоснабжения на территории агропромышленного комплекса (АПК). При этом одним из доступных, удобных и выгодных вариантов является ветроэнергетика. Ветроэнергетические установки (ВЭУ) могут располагаться в местах, не предназначенных для посевов, но расположенных рядом с объектами потребления (горные массивы, холмы, поймы рек, болота, земли с низким геотермальным потенциалом и т.д.). Их также можно размещать и на территории пастбищ, полей, ферм и других объектов сельского хозяйства, в отличие от фотоэлектрических преобразователей, биогазовых заводов, геотермальных станций. ВЭУ меньше подвержены вандализму, занимают малые территории в связи с наличием на поверхности земли только одного элемента – мачты. При этом именно автономные ВЭУ могут ускорить развитие села благодаря своей мобильности и возможности размещения в труднодоступных местах. В связи с вышесказанным внедрение автономных ветроэнергетических установок в сельской местности может обеспечить полным или частичным энергоснабжением небольшие поселки, жилые объекты, фермы, офисные помещения или малые цеха с целью развития инфраструктуры на удаленных территориях страны.

В настоящее время разработка ВЭУ, перспективных для АПК РФ, основана в целом на ряде инженерных подходов к проектированию отдельных компонентов, что свидетельствует об отсутствии научно обоснованной методологии разработки конструкции ВЭУ как единого целого. Оптимизация параметров установок затруднена в связи с наличием возмущений, вызванных взаимовлиянием компонентов друг на друга. Решение этой проблемы может заключаться в создании оптимальных технологичных конструкций на основе внедрения методологии разработки с системным научным подходом и применением совокупности методов, а также принятия научно обоснованных технических, технологических и экономических решений. Методология позволяет структурировать и логически организовывать методы и средства оптимального проектирования ВЭУ. Такой подход имеет важное хозяйственное значение, а внедрение обоснованных решений вносит значительный вклад в развитие экономики страны и агропромышленного комплекса, повышение энергонезависимости сельского хозяйства.

Исследования, приведенные в диссертационной работе, пять раз поддержаны грантами Минобрнауки РФ, г. Москва (2009–2012 гг.), грантами РФФИ (2011-2012 гг.), пять раз – грантами Администрации г. Челябинска (2009–2011 гг.), а также средствами инвестиционных, инновационных и венчурных проектов в области ветроэнергетики.

Автор благодарит коллектив ООО «ГРЦ-Вертикаль» за помощь и содействие в проведении исследований, организации производства и испытаний.

Цель работы: создание и реализация методологических основ разработки новых высокоэффективных вертикально–осевых ветроэнергетических установок для энергоснабжения объектов АПК.

Задачи исследований:

– обосновать необходимость методологического подхода к разработке и созданию вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ) для АПК;

– оптимизировать разработанную конструкцию ВО ВЭУ с целью получения максимальной выработки энергии;

– разработать технологические процессы изготовления компонентов ВО ВЭУ в условиях АПК РФ, разработать методику вибробалансировки ротора ВЭУ;

– провести экспериментальные исследования новых ВЭУ в фермерских хозяйствах с измерением шума и вибраций на объектах животноводства и птицеводства;

– провести технико-экономическую оценку внедрения разработок в АПК;

– обосновать экономические и социальные перспективы массового использования малых автономных ветроэнергетических установок в АПК РФ;

– создать и внедрить семейство автономных ВЭУ для удаленных объектов АПК.

Объект исследования: вертикально-осевые ветроэнергетические установки с вновь разработанным модифицированным ротором Дарье, предназначенным для длительной работы в полевых условиях.

Предмет исследования: конструктивные и эксплуатационные параметры вертикально-осевой ветроэнергоустановки и ее компонентов с учетом закономерностей их функционирования и наличия возмущающих факторов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ физики, аэромеханики и электротехники, удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований с результатами экспериментов и опытом эксплуатации.

Научная новизна: разработаны методологические основы создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок для АПК. Научно обоснован системный подход при проектировании и оптимизации ВО ВЭУ с применением совокупности методов. Разработаны математические и физические модели ВО ВЭУ с целью оптимизации их параметров и режимов использования. Установлены закономерности влияния внешних и внутренних силовых воздействий, приводящих к возникновению шума и вибраций, разработана методика снижения уровня вибраций на основе оптимизации параметров ВЭУ в период разработки. Введено эффективное аэродинамическое регулирование частоты вращения ротора ВЭУ. Оптимизированы параметры генерирующей системы. Реализован алгоритм регулирования мощности ВЭУ.

Практическая ценность и реализация результатов исследований.

Разработан и внедрен в производство ряд технологических процессов изготовления комплектующих ВЭУ с привязкой к конкретным объектам сельскохозяйственной отрасли, разработана и реализована методика предэксплуатационной статической и динамической балансировки роторов вертикально-осевых ВЭУ с целью снижения шума и вибраций.

Созданы модификации ветроэнергетических установок мощностью от 0,1 до 30 кВт. В опытной и коммерческой эксплуатации находятся ВО ВЭУ с 3, 4 и 6-лопастными роторами, предназначенные для работы в широком диапазоне скоростей ветра от 2 м/с до 45 м/с. Положительные результаты работы ВЭУ получены на 10-ти ветроустановках мощностью 3 кВт, в том числе в КФХ «Марково-1», ЗАО СХП "Краснокаменское" (Архангельская область), пос. Яденино (Ямало-Ненецкий Автономный Округ), каждая из которых выдает 200-500 кВт-ч электроэнергии ежемесячно.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (г. Челябинск), ФГАОУ ВПО «УрФУ» (г. Екатеринбург), ЧГАА (г. Челябинск), разработках ГНУ ВИЭСХ РАСХН и т.д.

Рекомендации, сформулированные на основе научных положений, результатов и выводов, а также разработанные технологические процессы и методики используются рядом предприятий – производителей комплектующих (ООО «ГРЦ-Вертикаль», ООО «Промэнерго», НИИ «Уралмет» и др.).

На базе ООО «ГРЦ-Вертикаль» (г. Челябинск) создано производство ВЭУ мощностью 0,1; 1; 3; 5 кВт, созданы образцы 10 и 30 кВт. За 2009–2012 гг. реализовано свыше 30 коммерческих установок, показывающих прогнозируемые результаты. Ряд комплектующих производится крестьянским фермерским хозяйством «Марково-1» (Челябинская область, Троицкий район, с. Суналы).

Рекомендации и проекты изменений ряда ГОСТ и стандартов организаций по ветроэнергетике переданы в ЗАО «НПЦ Малой Энергетики», г. Москва.

Положения, выносимые на защиту.

– Методология разработки и создания ВО ВЭУ на основе поэтапной итерационной оптимизации параметров компонентов и анализа кластерных математических моделей.

– Система аэродинамического и электронного регулирования мощности ВЭУ.

– Технологические процессы изготовления лопастей и генератора ВО ВЭУ, методика вибробалансировки.

– Семейство ВО ВЭУ с модифицированными роторами «Дарье».

– Технико-экономическая оценка результатов исследований, обоснование экономических и социальных перспектив внедрения ВО ВЭУ в АПК РФ.

Апробация работы: результаты работы были доложены, рассмотрены и одобрены на 17 научно-практических конференциях регионального, российского и международного уровня, в том числе: на совещании в Министерстве Энергетики РФ о внедрении ВЭУ с водородными накопителями в ряде регионов Российской Федерации, 2009 г.; научной сессии Академии электротехнических наук РФ по проблемам «Нетрадиционные и возобновляемые источники электроэнергии», г. Москва, 2010 г.; Международной энергетической конференции «Технологическая основа формирования новой энергетики России» в Московской школе управления Сколково, г. Москва, 2010 г.; ежегодных (2007–2012 гг.) научных конференциях Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, Семинарах ГНУ ВИЭСХ РАСХН в 2011-2012 гг. и др.

Разработки получили положительную оценку на ряде НТС различного уровня, включая областной и федеральный (Минсельхоз РФ (2007 г.), Минэнерго РФ (2008 г.), Минобразования РФ (2009, 2010, 2011 гг.), Минсельхоз Челябинской области (2005, 2010, 2011 гг.), 5 международных совещаниях.

Личный вклад: выносимые на защиту результаты получены соискателем лично. В опубликованных совместных работах и патентах постановка и исследование задач осуществлялись совместными усилиями соавторов при непосредственном активном участии и по личной инициативе соискателя.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 57 научных работ в центральных, региональных и международных журналах, в том числе 31, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Выпущено 2 монографии. Издано учебное пособие. По теме исследований на 13 разработок получены патенты и 1 ноу-хау.

Разработки награждены 2 дипломами конкурсов разработчиков РФ, 4 дипломами лучших проектов РФ, золотой медалью региональной выставки «Агро-2009».

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложена на 412 страницах машинописного текста, содержит 98 страницы приложений, 135 рисунков, 21 таблиц, список используемой литературы из 239 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, отмечена научная новизна и практическая ценность работы для агропромышленного комплекса РФ, приведены результаты внедрения.

В главе 1 «Состояние вопроса и задачи исследования» описан ряд технических особенностей основных конструкций ветроэнергетических установок (ВЭУ), предназначенных для энергоснабжения сельских потребителей, проведен анализ преимуществ и недостатков вертикально- и горизонтально-осевых ветроэнергетических установок, предназначенных для использования в АПК РФ, дан обзор ряда факторов, характеризующих ВЭУ, приведены пути повышения качества конструкции и снижения влияния на окружающую среду. Указаны критерии оптимизации. Сформулированы цели и задачи исследования.

Еще 100 лет назад в крестьянских хозяйствах России насчитывалось около 250 тыс. ветряных мельниц, которые ежегодно перемалывали половину урожая (около 33 млн. т, или 2 млрд. пудов зерна). Разработка Н.Е.Жуковским теории быстроходного ветродвигателя и научных основ создания высокопроизводительных ВЭУ в начале XX века положила начало появлению множества конструкций ВЭУ различных типов мощностью до 100 квт для механизации и электрификации процессов сельскохозяйственного производства и других целей. Мировой уровень разработок в этой области был поддержан советскими учёными Н.В. Красовским, Г.Х. Сабининым, Е.М. Фатеевым, что позволило в послевоенный период выпустить более 40 тыс. ветродвигателей ТВ-8, ТВ-5, Д-12, ВЭ-2, которые с большой эффективностью применялись в колхозах и совхозах.

Крупный вклад в развитие ВЭУ и ВЭУ для АПК был сделан известными Российскими учеными в XX–XXI вв. (В.Н. Андриянов, П.П. Безруких, Д.Н. Быстрицкий, В.Р. Вашкевич, В.П. Ветчинкин, В.И. Виссарионов, Я.Б. Данилевич, Г.И. Денисенко, В.В. Елистратов, Е.И. Куклин, М.В. Кузнецов, В.А. Минин, Г.Х. В.В. Харитонов, Ю.Г. Шакарян и др.), что позволяет утверждать, что проблема ускорения электрификации сельского хозяйства на основе внедрения ВЭУ может быть с успехом решена в России, причем в настоящее время.

Спектр современных ВЭУ представлен в основном вертикально- и горизонтально-осевыми традиционными конструкциями роторов и многообразием систем управления и регулирования. Из них наиболее высокоэффективными являются установки, использующие подъемную силу крыла. В отличие от горизонтально-осевых (ГО) ВЭУ, работа вертикально-осевых конструкций (ВО ВЭУ) типа Дарье не зависит от направления ветра и поэтому удельная выработка энергии аналогичных по мощности конструкций у ВО ВЭУ в 2–2,5 раза больше. Кроме того, ВО ВЭУ не являются генераторами инфразвука и шума, однако больше подвержены вибрациям. При снижении вибраций до требуемого уровня малые ВО ВЭУ могут являться идеальным источником энергоснабжения для животноводческих и птицеводческих объектов АПК.

В настоящее время в среде фермерских хозяйств растет интерес к малым ВЭУ в связи с рядом причин (стремление потребителей к автономному энергоснабжению, доступность и простота монтажа, обслуживания, ремонта). Наблюдается тенденция приближения ВЭУ к объектам жилья и животноводства (стремление установить ВЭУ на кровле фермы или дома). Эффективное использование ВЭУ достигается в совокупности с эксплуатацией энергосберегающего

оборудования и ряда сельскохозяйственных производств (разведение рыбы в заморных водоемах с использованием аэраторов, перекачка воды с целью создания искусственных водоемов, теплоснабжение ферм, организация быта сотрудников хозяйств в непосредственной близости к производству и многое другое).

Объемы внедрения ВЭУ в АПК практически не ограничены, поскольку электрификация поднимает жизнь сельского жителя на другой уровень. Потенциальный рынок ВЭУ в системе АПК РФ может составить до 2 ГВт установленной мощности на сегодняшний день. Использование ВЭУ может не только снизить нагрузки на существующие сети, но и полностью исключить энергопитание от центральных сетей. Технико-географических ограничений на внедрение ВЭУ в сельскохозяйственной отрасли РФ не выявлено, Малые ВЭУ работают эффективно практически на всей территории РФ, однако наибольшая эффективность будет достигнута при размещении ВЭУ в соответствии с ветроэнергетическим кадастром (лучшим вариантом до сих пор считаются сборник «Энергетические ресурсы СССР» и атласы «Энергетические ресурсы ветра» и «Атлас энергетических ресурсов СССР». Экономическими ограничениями являются стоимость оборудования и, следовательно, стоимость получаемого киловатт-часа, которая зависит еще и от срока эксплуатации. В связи с этим создание надежных, долговечных высокоэффективных ветроэнергоустановок является основой расширения электрификации села. Расчеты ценообразования различных вариантов показывают, что сегодня стоимость небольших ВЭУ, пригодных для эксплуатации обособленными крестьянскими фермерскими хозяйствами (КФХ), сравнима со стоимостью подключения ЛЭП, уже не говоря о самом строительстве линий электропередач (ЛЭП) до КФХ. Поэтому уже в ближайшее время ВЭУ составят серьезную конкуренцию магистральным линиям электропередач.

Однако для надежного энергообеспечения сельскохозяйственных объектов от ВЭУ необходимо использовать оборудование и технологии, созданные на основе научных подходов. Одним из таких подходов является разработка единой методологии проектирования и создания надежных, экологически чистых ВЭУ, учитывающих все особенности сельскохозяйственного производства. Это является крупной научной проблемой, имеющей стратегическое хозяйственное значение.

В данной диссертационной работе вертикально-осевая конструкция была выбрана для изучения, разработки и оптимизации в связи с рядом факторов: независимость работы ВЭУ от направления ветра, высокий коэффициент использования энергии ветра (до 0,43), самостоятельный старт ВЭУ на малых (до 2 м/с) скоростях ветра, выработка энергии со скорости ветра 3 м/с, возможность аэродинамического регулирования частоты вращения, низкий уровень шума и вибраций, отсутствие мультипликатора, простота изготовления компонентов, низкая экономически выгодная для АПК себестоимость от 60 руб. за 1 Вт мощности.

Критериями оптимизации являлись технические условия (оптимальные характеристики и параметры ВЭУ, технологичность компонентов, низкий уровень автоколебаний и взаимовлияния модулей ВЭУ, самостоятельный старт при ма-

лых ветрах, ограничение частоты вращения ротора) и экономические параметры (низкая себестоимость изделия, монтажа, пусконаладки и обслуживания).

В главе 2 «Методологические основы разработки ВО ВЭУ» дано описание системного методологического подхода к разработке ВО ВЭУ для аграрной отрасли на основе последовательно–поэтапной (итерационной) покомпонентной оптимизации конструкции с помощью применения последовательности ряда методов (рис. 1), исследования трехмерных и функциональных моделей ВЭУ. Вычислены возмущающие воздействия, исследовано их влияние на ВЭУ, обоснован выбор конструкций компонентов, описано аэродинамическое регулирование и оптимальное электронное регулирование мощности ВЭУ. Особое внимание уделено оптимизации эксплуатационных характеристик с целью снижения вибрационного и шумового воздействия для размещения ВЭУ в непосредственной близости к объектам животноводства и птицеводства, а также непосредственно на зданиях и объектах АПК с соответствующим снижением установочных и эксплуатационных расходов.

Методология разработки является основополагающим принципом и способом организации теоретической и практической деятельности при создании изделия, и является верхним уровнем с точки зрения проектирования ВЭУ. В соответствии с этим методы, применяемые в методологии, являются вторым, более низким уровнем. На нижнем уровне находится непосредственно интегрированное и покомпонентное проектирование, включающее ряд конструкторских задач.

Методология разработки и создания ВО ВЭУ включает ряд теоретических и экспериментальных методов, применяемых на разных этапах проектирования по итерационной (последовательно-поэтапной) схеме с оптимизацией каждого компонента и конструкции в целом, когда по завершении каждого этапа и ряда итераций проводится сравнение расчетных и опытных характеристик с проверкой на удовлетворительность по соответствующим критериям (рис. 1).

Процесс исследования на основе эксперимента является чрезвычайно дорогостоящим. С учетом мощного развития компьютерной техники и основанных на ней математических аппаратов, одним из быстрых и менее дорогостоящих путей изучения параметров ветроэнергетических установок является компьютерное моделирование и всесторонний анализ физико-математических моделей.

Согласно исследованиям, представленным в Главе 1, ВО ВЭУ является одним из наиболее эффективных и удобных источников энергоснабжения для сельскохозяйственной отрасли. В соответствии с этим к ней сформулированы следующие требования:

– требования к конструктивным параметрам должны соответствовать всем применимым ГОСТ и СНиП для ВЭУ и электроустановок, но должны быть усилены в части экологии, а именно снижения вибраций, шума, электромагнитных колебаний;

– требования к технологическим процессам должны удовлетворять возможностям организации производства комплектующих в условиях села;

– требования к себестоимости ВЭУ должны формироваться на основе стоимости кВт-часа электроэнергии и срока эксплуатации оборудования с целью снижения себестоимости сельхозпродукции.

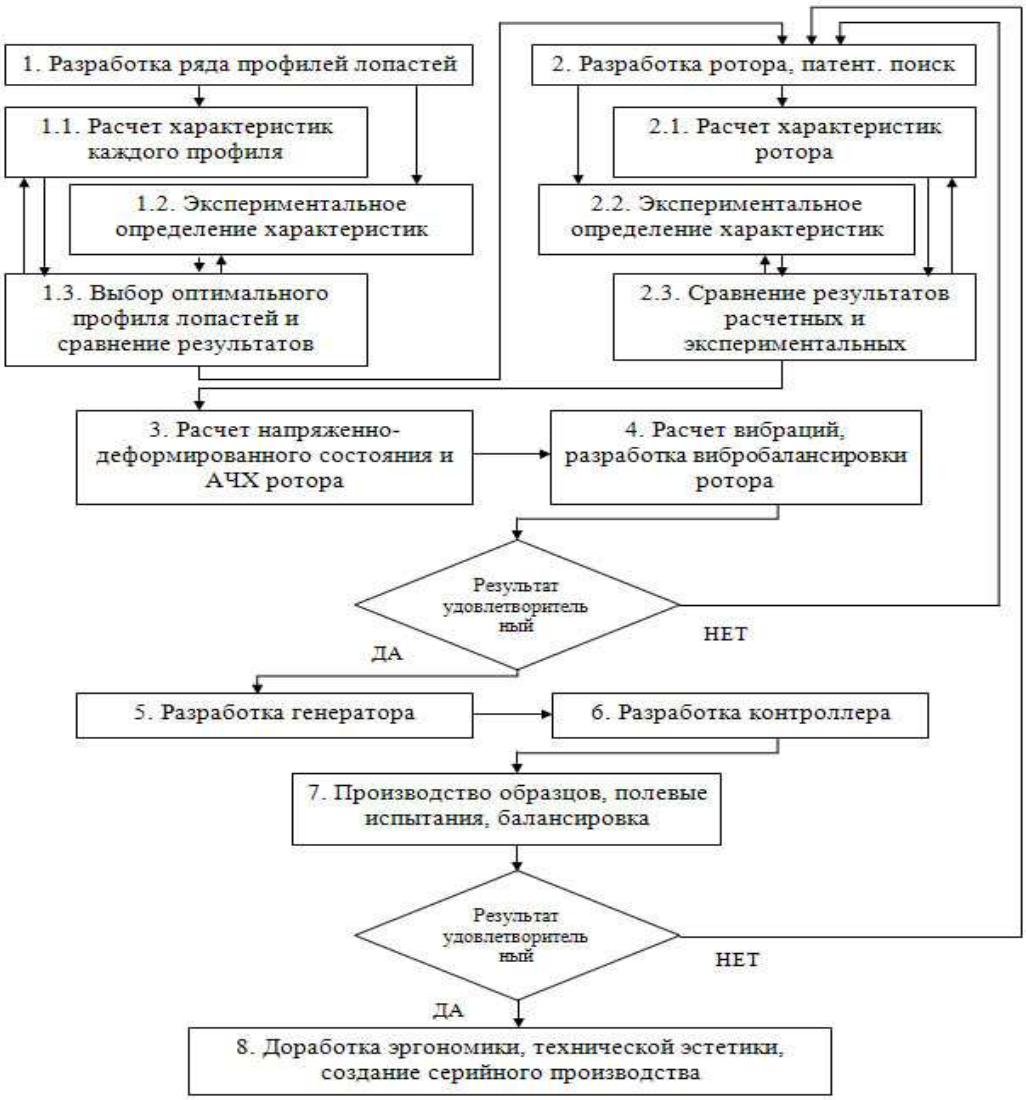


Рис. 1. Структурная схема методологии разработки и создания ВО ВЭУ

1. Разработка и оптимизация профиля лопасти включает патентный поиск, теоретические и экспериментальные исследования различных профилей лопастей, анализ результатов и выбор наиболее эффективного профиля для конкретной конструкции. При этом оптимизация профиля неразрывно связана с оптимизацией ротора. Вычислению подлежит множество коэффициентов подъемной силы Cy и силы сопротивления Cx при различных углах атаки профиля к набегающему потоку. Критерий оптимальности профиля – обеспечение максимума интегрированной кинетической энергии, передаваемой профилю потоком силовыми импульсами при отсутствии автоколебаний.

Основные методы расчета характеристик профиля:

1.1. Метод построения поляры профиля на основе данных измерений тензометрических датчиков в аэродинамической трубе с соответствующими пересчетами и масштабированием (зависимость Cy от Cx) является трудоемким, т.к.

требует большого количества экспериментов с продувкой профиля в аэродинамической трубе, определением коэффициентов для каждого угла атаки и построением поляры. Метод является точным, но дорогостоящим.

1.2. Метод численного моделирования (аналитический расчет) аэродинамической характеристики (АДХ) с учетом индуктивных скоростей основан на инженерных методиках и широко используется разработчиками. Однако этот метод лишь частично учитывает вихреобразование и не является точным.

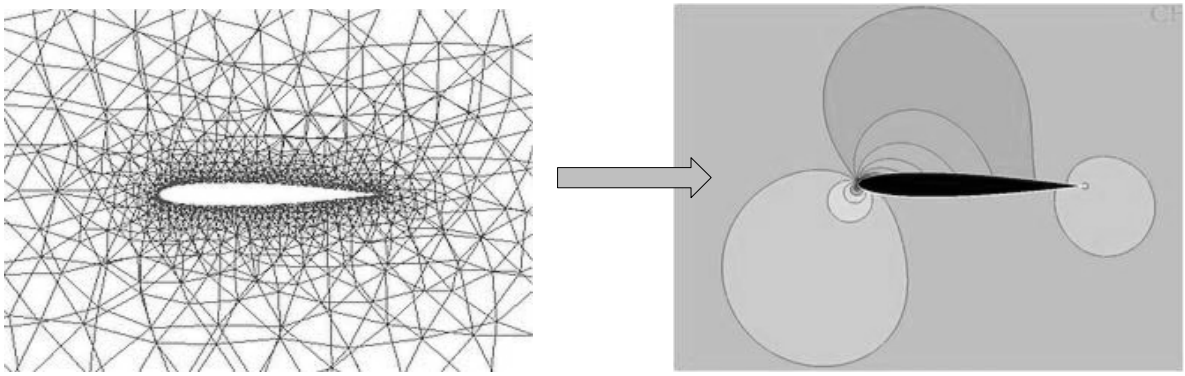
1.3. Метод определения АДХ с помощью моделирования профиля в среде набегающего потока (Ansys CFX, DesignSpace, ICEM CFD, Компас-3D V8 Plus и др.) с изменением угла атаки и последующим аналитическим определением коэффициентов Cx и Cy в расчетных программах является перспективным методом благодаря ускоренной компьютерной обработке данных. В нем всегда присутствует ряд граничных условий и допущений (ламинарность потока, жесткость профиля, сочетание полного давления на входе и скорости или расхода на выходе и т.д.). Представление результатов является наглядным в виде распределения поля давлений и вычисляемых аналитически графиков коэффициентов. Этот метод получил преобладание над остальными подходами в связи с возможностью программной оптимизации профиля. Расчет профиля лопасти ВЭУ производится в CFX программе и основан на конечно-объемном методе (МКО) решения уравнений гидродинамики (уравнение неразрывности, уравнение сохранения энергии и уравнение количества движения). Задача может ставиться в двухмерной и трехмерной постановке. При моделировании используется модель вязкого газа с осреднением турбулентных характеристик (осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса несжимаемой жидкости):

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \; ; \quad \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial (v_j v_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(u + u_t)\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right], \qquad (1)$$

где $x_{i,j}$, i,j=1,2 – декартовы координаты (x,y) частицы; t – время; v_i – декартовы составляющие вектора средней скорости потока (v,u); P – давление; ρ – плотность; u и u_t – молекулярный и турбулентный коэффициенты кинематической вязкости. Параметры потока и свойства профиля задаются программно.

Расчетные значения переменных вычисляются для дискретных углов атаки с поворотом профиля к моделируемому набегающему потоку (рис. 2). Скорость потока задается в диапазоне V·Z м/с (где V – скорость ветра, Z – быстроходность – отношение линейной скорости профиля к скорости потока).

При оптимизационных расчетах шаг угла атаки (например в 1^0) задается в диапазоне $\alpha = 0^0 \ldots 360^0$. Для симметричных профилей можно принять $\alpha = 0^0 \ldots 180^0$.



а) б)

Рис. 2. Профиль лопасти с наложенной сеткой (а) и обтекание в Ansys CFX (б)

Итерации первого порядка позволяют рассчитывать давления, экспортировать данные и вычислять АДХ, итерации второго порядка изменяют угол атаки, итерации третьего порядка позволяют менять условные координаты профиля с целью оптимизации, которая производится с учетом граничных условий 0,5>c/b>0,1 и 0,5>x_c/b>0,1 по критерию (2).

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{360^\circ} Cyi = MAX \\ \sum_{i=0}^{360^\circ} Cxi = MIN \end{cases} \qquad (2)$$

Численные расчеты итераций первого порядка проводятся следующим образом. Воздействие воздушной среды на движущееся в ней крыло приводит к появлению на его поверхности непрерывно распределенных сил от давления и касательных напряжений. С учетом этого любую аэродинамическую силу и момент можно представить в виде суммы двух составляющих, одна из которых зависит от распределения давления, а другая – от касательных напряжений. Для каждого угла атаки получаются численные значения: F_R – продольная составляющая аэродинамической силы (АДС), действующей на профиль, F_N – нормальная составляющая АДС, действующей на профиль, M_R – момент от продольной составляющей АДС относительно носка профиля; M_N – момент от нормальной составляющей АДС относительно носка профиля; M_Σ– суммарный момент от АДС относительно носка профиля равный $M_\Sigma = M_N + M_R$. Кроме этого строятся диаграммы распределения коэффициента давления по поверхности профиля, описывающие характер обтекания. Аэродинамические коэффициенты продольной и нормальной сил, аэродинамического момента определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} C_R &= \frac{F_R}{q_\infty S}; \\ C_N &= \frac{F_N}{q_\infty S}. \end{aligned}\right\}, \quad m_z = \frac{M_\Sigma}{q_\infty S b}, \; q_\infty = \frac{\rho V_\infty^2}{2}. \qquad (3)$$

где S – характерная площадь профиля (м^2), q_∞ – скоростной напор (Па), ρ – плотность потока (кг/м^3).

По найденным аэродинамическим коэффициентам в связанной системе координат определяются соответствующие коэффициенты в поточных координатах по формулам:

$$\left.\begin{aligned} C_{yp} &= C_{Np}\cos\alpha - C_{Rp}\sin\alpha; \\ C_{xp} &= C_{Np}\sin\alpha + C_{Rp}\cos\alpha. \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Составляющая C_{xf} коэффициента лобового сопротивления от трения определяется по формуле:

$$C_{xf} = 2(C_{xf})_{M=0}\eta_{\bar{\Delta}}, \qquad (5)$$

где $2(C_{xf})_{M=0}$ – удвоенный коэффициент трения плоской пластины единичного размаха с шириной равной хорде профиля и с таким же как у профиля положением точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный. $(C_{xf})_{M=0}$ можно определить в зависимости от числа Рейнольдса; $\eta_{\bar{\Delta}}$ – некоторый поправочный коэффициент учитывающий влияние на сопротивление относительной толщины профиля $\bar{\Delta}$ и положения точки перехода (для тонких профилей с $\bar{\Delta} = 0{,}02...0{,}12$ $\eta_{\bar{\Delta}} = 1$, при полностью турбулентном пограничном слое $\eta_{\bar{\Delta}} = 1 + 2{,}77\bar{\Delta}$).

Критическое число Рейнольдса $\mathrm{Re}_{кр} = 3\cdot 10^5$.

$$\left.\begin{aligned} (C_{xf})_{M=0} &= \frac{1{,}29}{\sqrt{\mathrm{Re}_\infty}}, \text{при } \mathrm{Re}_\infty < \mathrm{Re}_{кр} \\ (C_{xf})_{M=0} &= \frac{0{,}075}{\sqrt[5]{\mathrm{Re}_\infty}}, \text{при } \mathrm{Re}_\infty > \mathrm{Re}_{кр} \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Коэффициенты аэродинамических сил и моментов:

$$\begin{cases} C_x = C_{xp} + C_{xf}, \\ C_y = C_{yp} + C_{yf}, \\ m_z = m_{zp} + m_{zf}. \end{cases} \qquad (7)$$

где C_{xp}, C_{yp}, m_{zp} – соответственно коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы и продольного момента; C_{xf}, C_{yf}, m_{zf} – аналогичные коэффициенты сил и момента, вызванных трением.

По полученным значениям C_x, C_y и m_z определяется суммарная аэродинамическая сила, качество профиля и коэффициент центра давления:

$$K = \frac{C_y}{C_x}, \qquad \bar{x}_{ц.д.} = \frac{-m_z}{C_y}, \; C_F = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}, \qquad (8)$$

Моделирование в пакете Ansys можно заменить физическим экспериментом с измерением F_R и F_N с помощью итерационного обдувания дренированного профиля и регистрации отклонения динамометров и/или манометров, подключенных к дренажным отверстиям, воспринимающим давление. В этом случае закрепленный на стержне профиль может обдуваться стационарным потоком и под

действием набегающего потока проворачиваться, воздействуя на динамометры и манометры. Их показания являются источником для вычисления указанных сил.

На основе оптимизации с применением ряда методов для разработки ротора был получен симметричный профиль ГРЦВ1832 с относительной толщиной c/b=0,18 (18%) и с x_c/b=0,32 (32%). Согласно патенту №2347104 (2006 г.) хвостовая кромка симметричного профиля скруглена для исключения срыва потока.

2. Разработка и оптимизация ротора ВО ВЭУ основана на последовательности ряда методов и включает в себя патентный поиск, трехмерное компьютерное моделирование компонентов ротора, функциональное математическое моделирование ротора, исследование взаимовлияния компонентов ВЭУ, оптимизацию параметров ротора на основе итерационного метода, разработку агрегатов аэродинамического регулирования и т.д. Критерии оптимальности – самостоятельный старт ротора во всем диапазоне быстроходности, ограничение максимальной частоты вращения, достижение максимального коэффициента мощности Ср (коэффициента использования энергии ветра, КИЭВ), снижение влияния концевых эффектов на лопастях, эргономика, техническая эстетика. Патентный поиск проведен в Российских и зарубежных базах данных согласно ГОСТ Р 15.011-96. На конструкцию ротора получен патент на изобретение № 2347104 (2006 г.). Конструкция ротора выбрана двухъярусной 6-лопастной на основе патентных исследований и опыта разработчиков. Второй ярус введен для улучшения конструкции ротора и дополнительного увеличения мощности без наличия отдельной мачты с соответствующей экономией. Необходимо отметить, что в настоящее время автор ведет разработку новых перспективных для АПК многоярусных конструкций на основе патента №2443902 (2010 г.).

Исследуемая ВЭУ представлена рядом основных модулей (рис. 3) и является интегрированной системой превращения кинетической энергии набегающего потока ветра в электрическую энергию за счет непосредственной передачи момента вращения ротора на вал генератора (мультипликатор отсутствует).

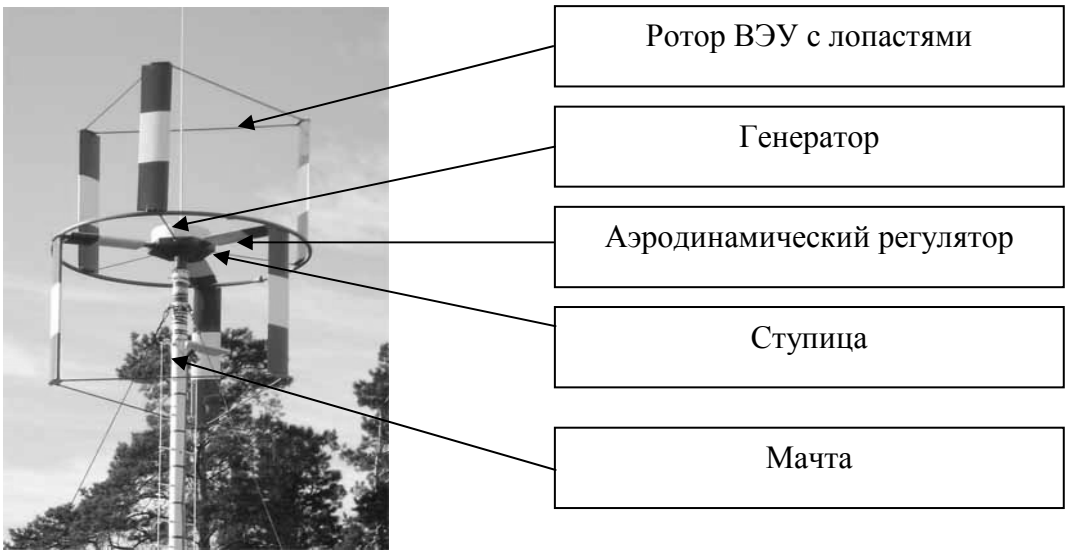


Рис. 3. Конструкция ветроэнергетической установки ВЭУ-3 (3 кВт)

Мощность 3 кВт взята для исследований не случайно. Во-первых, такая ВЭУ будет вырабатывать 200-500 кВт-ч в месяц в условиях АПК средней полосы РФ, что достаточно для энергообеспечения небольшой семьи из 3 человек и/или небольшой фермы. Во вторых, это минимально возможная мощность эффективного ротора Н-Дарье в условиях континентального климата, поскольку конструкция с меньшими габаритами будет малоэффективной, т.к. будет работать в докритических числах Рейнольдса. Анализ литературы показывает, что при коэффициенте быстроходности $Z < 2$ срыв потока с лопастей ротора Дарье проявляется при вращении на большей части окружной траектории лопасти. Увеличение быстроходности снижает эффект срыва потока, однако повышает порог скорости ветра для самостоятельного старта. Тогда с учетом графика идеального Дарье граничные условия для Z: $6 \geq Z \geq 2$. В зонах умеренных ветров ВЭУ должна начинать работу максимум с 4 м/с. Ротор получает 100% энергии с периметра. Расчет производится для радиуса R, который вычисляется из соотношения $1{,}5 \cdot R > L > 5b$, где L – длина лопасти. Такие данные взяты из соображений прочности компонентов и минимизации влияния индуктивного сопротивления. Оптимальная быстроходность исследуемого ветроколеса при наибольшем коэффициенте мощности Ср согласно изученной литературе составляет $Z=4 \cdot \pi/m \approx 2$, где m – количество лопастей (6 в исследуемом варианте). При скорости ветра 4 м/с окружная скорость лопастей v=8 м/с. Ветер взаимодействует с лопастями с окружной скоростью. Для устойчивой работы ВЭУ необходимо число Рейнольдса $Re \geq 250000$ (гарантированный устойчивый режим, $Re_{кр}$ критическое составляет 200000). Тогда хорда лопасти должна быть $b=Re/(68500 \cdot v)=0{,}45$ м. Длина лопасти L должна удовлетворять условию $L/b>5$ во избежание срыва потока (влияния концевых эффектов). Тогда минимальная величина L=2,25 м. Минимальный радиус R получается 1,5 м. Тогда соотношение хорды b к диаметру D составит 15%, что совпадает с соотношениями ГО ВЭУ (5–15% по среднему диаметру лопасти). Основные параметры ВЭУ:

D = 3,0 м – диаметр ротора; $2L_{лоп} = H = 4{,}5$ м – высота ротора; $S = D \cdot H = 13{,}5$ м^2 – ометаемая площадь ветроколеса; b = 0,45 м – длина хорды симметричного профиля лопасти; m = 6 – количество вертикальных лопастей, 2 яруса. Согласно исследованиям Лаборатории Sandia (США) оптимальный установочный угол лопасти для условия Ср=max находится в пределах $2\ldots4^0$. Данный параметр используется только при математическом моделировании, на практике же точность этого параметра составляет $1\text{-}2^0$.

На основе параметров ротора создан и испытан ряд физических моделей ротора 1:100. Все модели показали удовлетворительные результаты в части самостоятельного старта, низкого шума и отсутствия дисбаланса.

Основные методы расчета аэродинамических характеристик ротора:

2.1. Инженерные, эмпирические методики (импульсные и вихревые модели). Инженерные методики основаны на простейших газодинамических соотношениях типа уравнения Бернулли и на экспериментальных данных. Импульсные модели обеспечивают удовлетворительное предсказание установившейся осредненной мощности турбины, а вихревые модели считаются более точными при

расчете нестационарных нагрузок, действующих на лопасти. Однако эмпирические методики, как правило, ограничены кругом экспериментальных данных, на которых они основаны, поэтому являются не всегда точными.

2.2. Метод на основе моделирования невязкого газа (метод дискретных вихрей, уравнения потенциала и Эйлера). Уравнения позволяют получать распределение давления по несущим поверхностям, создавая конструкции соответствующих ветроагрегатов. Основное преимущество подходов – низкая себестоимость расчетов, доступность для инженерной практики. Недостатком является отсутствие учета влияния вязких эффектов и недостаточно точный расчет вихревых структур и нестационарных эффектов.

Два первых метода являются сегодня основой проектирования аэродинамических конструкций в ветроэнергетике.

2.3. Метод на основе моделирования вязкого газа с осреднением турбулентных характеристик (осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (1), замыкаемые алгебраическими или дифференциальными моделями турбулентности. Расчеты на основе этого метода сегодня широко внедряются в промышленную практику. В то же время в научном мире сложилось мнение о том, что проектные работы необходимо проводить именно на таком уровне математического моделирования газодинамических течений, поэтому этот метод и был положен в основу проведенных исследований. В вычислениях может использоваться программное обеспечение Ansys CFX, DesignSpace, ICEM CFD, Компас-3D V8 Plus и другие пакеты программ газо- и гидродинамических расчетов.

С учетом принятых габаритных соотношений длина лопастей многократно превышает хорду, поэтому можно пренебречь концевыми эффектами, воспользовавшись гипотезой о плоскопараллельной структуре течений. Тогда задача обтекания ротора допускает двумерную постановку в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротора, что значительно облегчает расчеты.

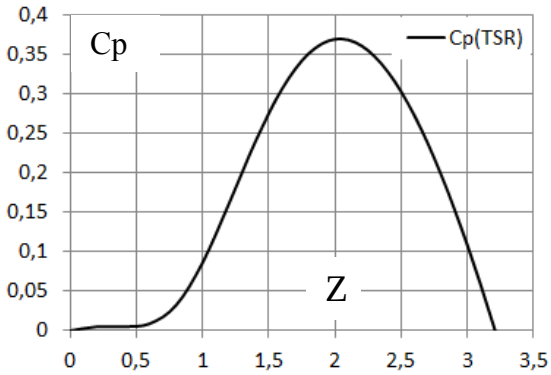


Рис. 4. График Cp от Z

В результате вычислений получена главная характеристика ротора – зависимость Cp от быстроходности Z (рис. 4), где Cp – коэффициент мощности или коэффициент использования энергии ветра. Малые модули Z по сравнению с идеальным Дарье (до 6 модулей) при высоком Cp являются большим преимуществом, поскольку нагрузки на ротор, подшипники и другие его компоненты снижены, уровень вибраций и шума низкий, что положительно сказывается на характеристиках ВЭУ при эксплуатации на объектах АПК. В расчетах также могут учитываться нестационарные явления (динамический срыв потока, образование сложной системы вихрей, повышение уровня турбулентности в затененной области, взаимодействие вихрей различных размеров, скоростей движения и интенсивности с твердыми поверхностями ротора ВО ВЭУ). При этом различие данных не превышает 5%.

2.4. Метод на основе моделирования вязкого газа с учетом нестационарных турбулентных характеристик является исследовательским уровнем в вычислительной гидродинамике и учитывает поведение крупных вихрей в пограничном слое. Он является дорогостоящим даже для индустриально развитых стран, и его внедрение в промышленность прогнозируется на вторую половину XXI века.

На основе вычисленных параметров ротора и для проверки компоновки и сопряжения модулей и узлов создана конструкторская документация (КД) в SolidWorks и AutoCAD, разработанная в соответствии с ЕСКД, проведены поверочные статические и динамические расчеты конструкции с учетом внешних возмущающих воздействий, взаимовлияния компонентов друг на друга и на окружающую среду с использованием возможностей программного пакета SolidWorks. Также может быть использован Compas, Pro-E и т.д.

С учетом эволюционирующей КД после оптимизации параметров созданы гибкие кластерные (модульные) математические функциональные модели компонентов ВЭУ с использованием пакетов VisSim, MatLab.

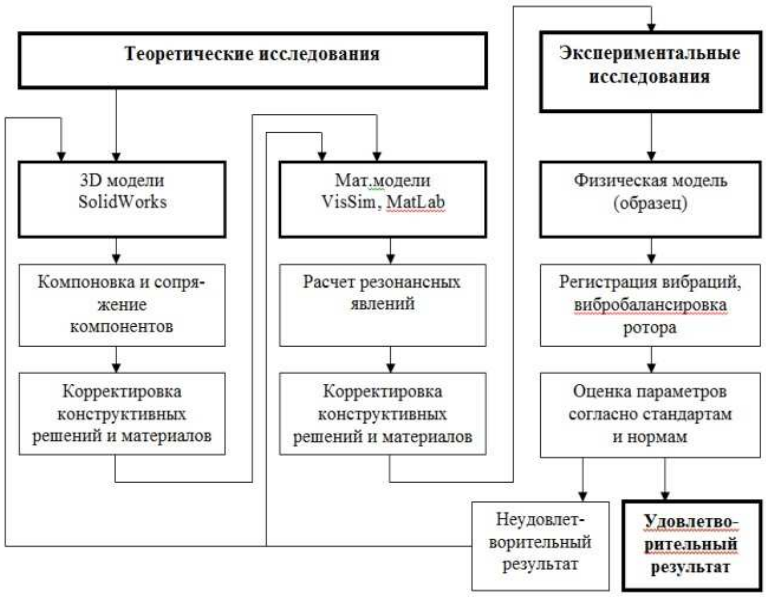


Рис. 5. Итерационная оптимизация параметров компонентов ВЭУ

Поэтапная оптимизация конструкций механических компонентов ВЭУ на основе метода итераций (повторяемых поэтапных прогонов) двух последовательных математических моделей, трехмерной и функциональной, является менее затратным способом улучшения изделия по сравнению с экспериментом. Процесс оптимизации параметров конструкции ротора распадается на ряд задач, заключающихся в последовательном исследовании свойств его компонентов (рис. 5). Критериями оптимизации являются минимальная масса компонентов и минимальная стоимость используемых материалов с сохранением прочности.

Разработка и анализ конструкции компонентов ротора проводятся с учетом требований по безопасности и устойчивости к внешним воздействиям с рядом ограничений (устойчивость давления потока, однородность материалов и т.д.).

Характеристики внешних воздействий на конструкцию ВЭУ определяются с учетом технических условий безопасности ветроустановок (Международный стандарт IEC 61400, Требования Ллойда, стандарты РФ) для рабочей скорости ветра 45 м/с при усредненных континентальных условиях окружающей среды. Моделирование потока ветра проводится в VisSim, MatLab и других пакетах.

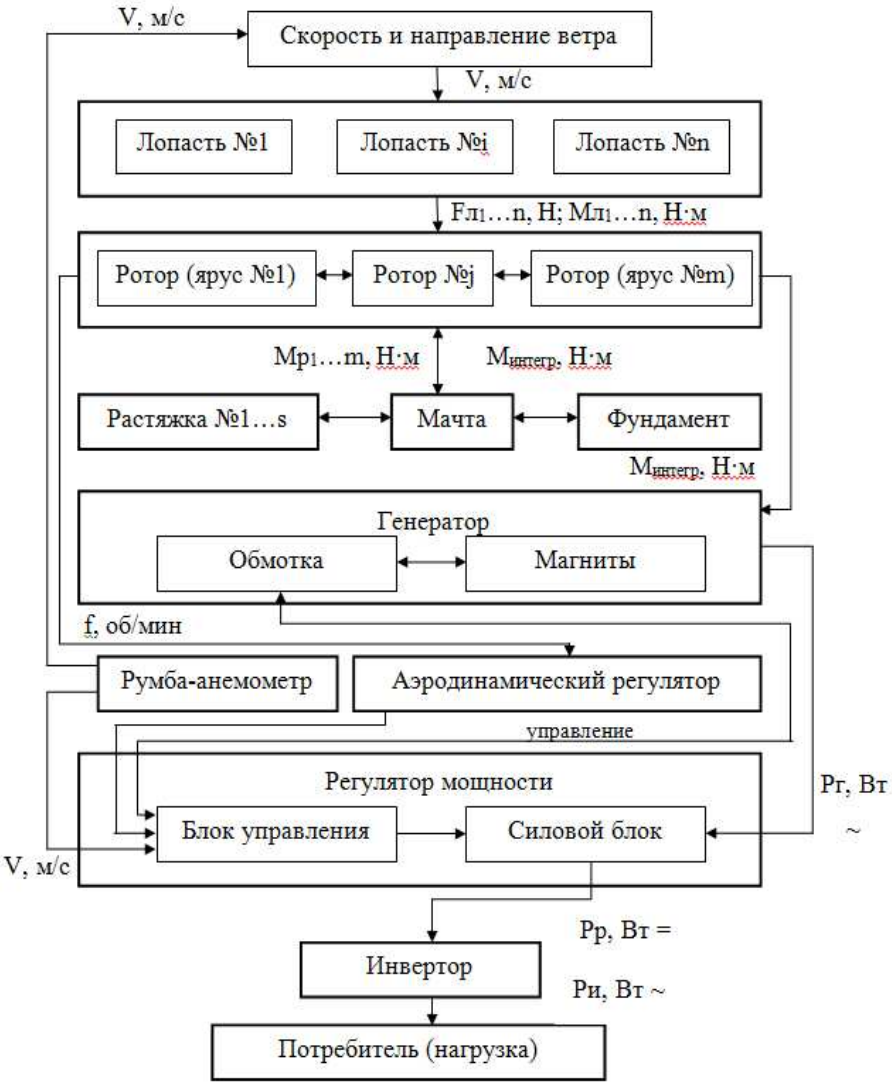


Рис. 6. Кластерная структура математической модели ВО ВЭУ

На основе кластерной математической функциональной модели, построенной в визуальном симуляторе функций, проводится системный анализ воздействия возмущающих аэродинамических и центробежных сил и моментов на конструкцию ротора ВЭУ, выявляются возможные резонансы, определяются численные значения виброперемещений и воздействия на фундамент, затем проводится оптимизация конструкции за счет регулирования жесткости и формы компонентов, при необходимости с повторением предыдущих этапов-итераций (рис. 1 и 6) с целью смещения резонансных явлений в безопасные частоты. Кластеры математической модели являются универсальными легко заменяемыми модулями, состоящими из блоков. Основными факторами, вызывающими вибрации ВЭУ, передающиеся на фундамент, являются аэродинамические силы и моменты, действующие на ротор, а также периодические инерционные силы и моменты. В модели формульные зависимости представляются в виде структурных схем.

Моделирование силового воздействия ВЭУ на фундамент проведено на различных частотах вращения ротора при имитации воздействии ветра от 4 до 16 м/с. В процессе моделирования предполагалось, что ротор ВЭУ на выбеге проходит все возможные частоты вращения под аэродинамической нагрузкой.

Поведение ротора определяется системой дифференциальных уравнений сил и моментов с учетом силового воздействия, перемещения, трения, упругости:

$$M\cdot\ddot{x} + R\cdot\dot{x} + K\cdot x = F;\ J\cdot\ddot{\omega} + D\cdot\dot{\omega} + B\cdot\omega = M \qquad (9)$$

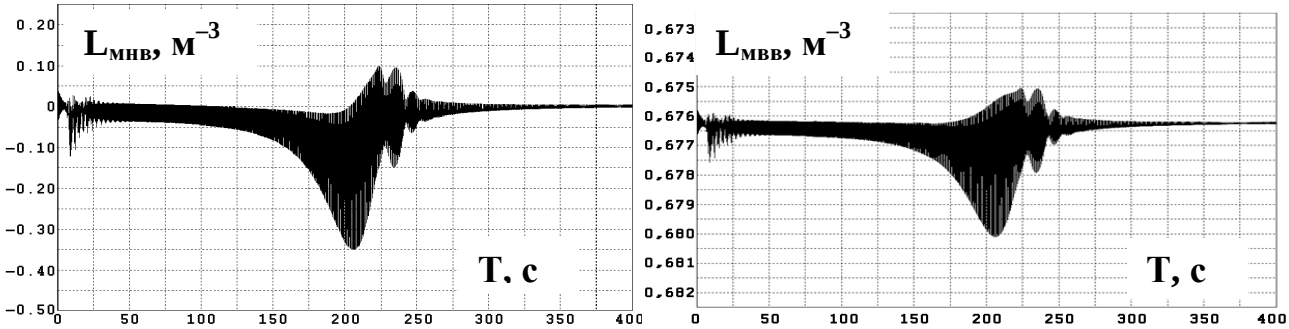
где M, R, K, J, D, B – матрицы коэффициентов и F, M – сил, моментов.

Ввод данных в программу осуществляется поблочно, с включением обратных связей и выводом графиков. Пульсационная составляющая скорости ветра считается случайным квазистационарным процессом. Горизонтальные и вертикальные силы, действующие на фундамент мачты, можно оценить по формулам:

$$Fy^{\Phi}_{Гор} = Fy_{Гор} \cdot C_1 + M_x \cdot C_2; \quad Fx^{\Phi}_{Гор} = Fx_{Гор} \cdot C_1 + M_y \cdot C_2; \quad F^{\Phi}_{Z} = F_z \quad , \qquad (10)$$

где $F_{x\ гор}$, $F_{y\ гор}$ – составляющие горизонтальных сил, действующих на вершину мачты со стороны ротора, F_z – сумма вертикальных сил, действующих на вершину мачты со стороны растяжек, M_x, M_y – составляющие аэродинамического изгибающего момента, действующего на мачту со стороны ротора ветроколеса. Для принятых исходных данных по конструкции ВЭУ величины вычисленных коэффициентов C_1 и C_2 составляют: $C_1 = 0{,}1$; $C_2 = 0{,}12$.

Определение виброперемещений компонентов ротора и мачты наглядно демонстрируется графиками колебательных процессов, рис. 7. На основании исследований функциональной модели ВЭУ получены зависимости колебаний сил и моментов, частотные спектры и величина виброперемещений компонентов. Анализ спектра силовых воздействий проведен способом разложения действующих негармонических колебаний сил, моментов и виброперемещений в ряд Фурье с получением соответствующих спектров частот. На основании спектрального анализа сделаны выводы, на каких частотах вращения ротора ВЭУ ожидается резонанс, получена его амплитуда и преобладающие частоты, составлены таблицы резонансов.



а) б)

Рис. 7. Вертикальное смещение (мм) $L_{мнв}$ нижней (а) и $L_{мвв}$ верхней (б) точек мачты в местах крепления к фундаменту и ступице в зависимости от времени (с)

В процессе исследования модели и итерационной оптимизации компонентов ротора ВЭУ путем изменением их свойств, с дальнейшей корректировкой конструкторской документации, создана таблица ожидаемых резонансов (табл. 1). Из анализа полученных данных следует, что резонанс колебаний элементов ВЭУ может вызываться как дисбалансом массы ротора, так и действием переменных аэродинамических сил. Резонансная частота может быть изменена за счет вариаций жесткости компонентов, то есть изменения частот собственных колебаний. Исследование таблицы показывает, что основные резонансы могут возникнуть на частотах 1 и 21 Гц. Частоту 1 Гц (60 об/мин) ротор проходит за считанные секунды, поэтому ее в целом можно считать несущественной.

Частота 21 Гц проявляется в форме гармоник малой амплитуды и в целом не оказывает влияния на работу ВЭУ. Эксперименты и опыт эксплуатации ВЭУ подтверждают эти положения. Однако если ВЭУ установлена на инженерном сооружении (здании, мостовой конструкции и т.п.), резонанс на частоте собственных колебаний данного сооружения может привести к нежелательным последствиям. В связи с этим решение проблемы может быть осуществлено с помощью ряда методов (особого регулирования мощности и частоты вращения ВЭУ, применения виброгасителей, проведения расчетов и изменения формы и/или материала мачты).

Таблица 1

Ожидаемые резонансы ВЭУ в диапазоне частот вращения 0–180 об/мин

Номер интервала	Начало малого интервала	Частоты возмущающих сил							Примечание
		Инерционные	Аэродинамические						
	t, c	ν_R	$6\,\nu_R$	$12\,\nu_R$	$18\,\nu_R$	$24\,\nu_R$	$30\,\nu_R$	$36\,\nu_R$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	156	3.525	21.1	42.26	63.40	84.53	105.66	126.8	1-й резонанс узла подшипников
2	242	2.972	17.8	35.66	53.50	71.33	89.16	107.0	простые колебания
3	502	1.767	10.6	21.20	31.80	42.40	53.00	63.6	2-й резонанс узла подшипников
4	783	1.007	6.0	12.84	18.13	24.17	30.21	36.2	1-й резонанс мачты
5	1250	0.396	2.37	4.75	7.12	9.50	11.87	14.2	простые колебания
6	1682	0.167	1.02	2.00	3.01	4.01	5.01	6.01	2-й резонанс мачты
7	1900	0.108	0.65	1.30	1.94	2.59	3.24	3.89	простые колебания
8	2030	0.083	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3-й резонанс мачты
9	2230	0.056	0.34	0.67	1.04	1.34	1.67	2.01	4-й резонанс мачты

Основными методами ограничения максимальной частоты вращения вертикально-осевого ротора являются***:***

- Применение балластной нагрузки. По достижении частоты вращения с максимально допустимой мощностью генератора его обмотки замыкаются на балластное сопротивление, в результате чего происходит торможение ротора. Далее происходит регулирование по заданному алгоритму. Очевидно, что этот метод не эффективен, т.к. ротор по сути дела стопорится на определенной скорости ветра. Из практики известно, что эта скорость обычно составляет 21-25 м/с.

- Электромеханическое торможение. По достижении расчетной частоты вращения система управления подтормаживает ротор с помощью механического тормоза, интегрированного в ступицу. Однако на скорости ветра свыше 30 м/с механический тормоз не является эффективным и ротор приходится стопорить.

- Аэродинамическое торможение. Существуют различные подходы к снижению частоты вращения ротора (поворот и/или наклон лопастей (ротор Масгроува), активация закрылков механизированного крыла (закрылки Горелова), выпуск стабилизаторов (ЦАГИ), поворот инерционных обтекателей на траверсах (пат. №2347104) и т.д.). Суть данных методов сводится к ухудшению аэродина-

мических свойств ротора по достижении определенной частоты вращения за счет изменения положения узлов или модулей ротора в результате действия центробежных сил. Главное преимущество данного метода перед остальными заключается в том, что стопорение ротора не требуется до буревых скоростей (60 м/с), а с учетом стабилизации частоты вращения во всем диапазоне скоростей ветра это приводит к минимизации массо-габаритных характеристик генератора и упрощению электронного регулятора.

Варианты торможения лопастями и обтекателями, как свидетельствует практика, являются дорогостоящими и не надежными. В исследуемой конструкции стабилизацию частоты вращения обеспечивают инерционные выдвижные пластины (патент №112954 от 2011 г.). Многочисленные испытания показали, что пластинчатые регуляторы почти в 2 раза эффективнее, в 5 раз дешевле, чем аэродинамические регуляторы, заключенные в обтекатели аэродинамического профиля, находящиеся на траверсах и в 10 раз дешевле лопастного регулирования.

3. Разработка генератора включает в себя методы и стадии традиционного проектирования электромашины с проведением оптимизационных расчетов.

Выбор типа электромашины остается всегда за разработчиком и производится с точки зрения эффективности, эргономики, технической эстетики.

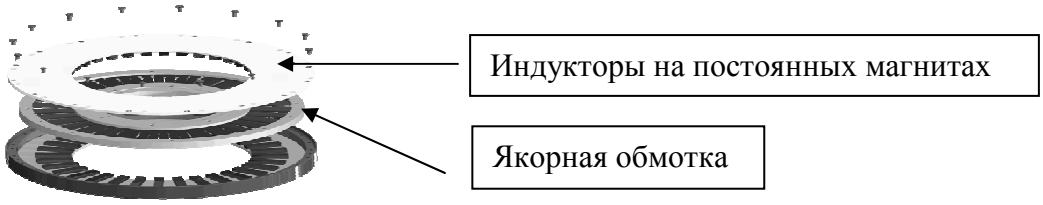


Рис. 8. Генератор с осевым (аксиальным) зазором

В исследуемой ВЭУ генератор представляет собой вентильную электрическую машину переменного тока на постоянных магнитах с осевым (аксиальным) зазором с индуктором на постоянных магнитах и якорной обмоткой (рис. 8). Критериями оптимальности при разработке генератора являются минимальная масса активных частей, минимальный объем активных частей, минимальная масса постоянного магнита, минимальная масса обмотки, минимальная суммарная стоимость постоянных магнитов и обмотки. Прикладная программа оптимального проектирования, реализованная на языке программирования Delphi, положена в основу пакета программ оптимального проектирования генераторов исследуемых ВО ВЭУ. Постоянными (константами) в программе являются выходная мощность, выходное напряжение, частота вращения и т.д. Математическая модель имеет ряд ограничений. Оптимизация осуществляется перебором вариантов по методу Фибоначчи в сочетании с методикой координатного спуска, т.е. оптимальным делением интервалов значений независимых переменных с последующим анализом по критериям оптимальности. После получения оптимальных значений производится поверочный расчет магнитного поля и потока в An-

sys EMAG, а затем вычисляются параметры генератора (C++, Delphi, MatLab, MathCAD, MS Excel).

Метод разработки качественного генератора в общем случае разбивается на две взаимосвязанные задачи: анализ – разработка методики поверочного расчета, при которой полностью известна геометрия и необходимо определить рабочие характеристики; синтез – разработка методики оптимального проектирования, при которой для определенных техническим заданием параметров необходимо рассчитать геометрические параметры. Несмотря на различные конструктивные исполнения, для анализа и синтеза этого типа генератора можно применить единый подход. Для расчета электромагнитной мощности активная часть генератора представляется в виде диска с равномерным токовым слоем, который пронизывается магнитными силовыми линиями. Элементарный участок этого диска создает электромагнитный момент:

$$dM = B_i \cdot A_i \cdot R_i \cdot dR \cdot d\alpha, \qquad (11)$$

где dM – элементарный электромагнитный момент; B_i – магнитная индукция элементарного участка; A_i – линейная токовая нагрузка элементарного участка; R_i – радиус удаления элементарного участка от оси вращения; α – угол поворота.

Средний электромагнитный момент будет представлять собой поверхностный интеграл по площади активного кольца:

$$Msr = \int_0^{2\pi} d\alpha \int_{0,5Dv}^{0,5Dn} Bi \cdot Ai \cdot Ri \cdot dR = 0,5\pi \cdot \left(\frac{Dn+Dv}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{Dn-Dv}{2}\right) \cdot Bsr \cdot Asr \quad , \qquad (12)$$

где B_i – средний электромагнитный момент; D_n – наружный диаметр активной части; D_v – внутренний диаметр активной части; B_{sr} – среднее значение индукции в воздушном зазоре; A_{sr} – среднее значение линейной токовой нагрузки (определяется, как количество ампер–витков на единицу длины на среднем диаметре активной части генератора); dR – радиус удаления элементарного участка от оси вращения.

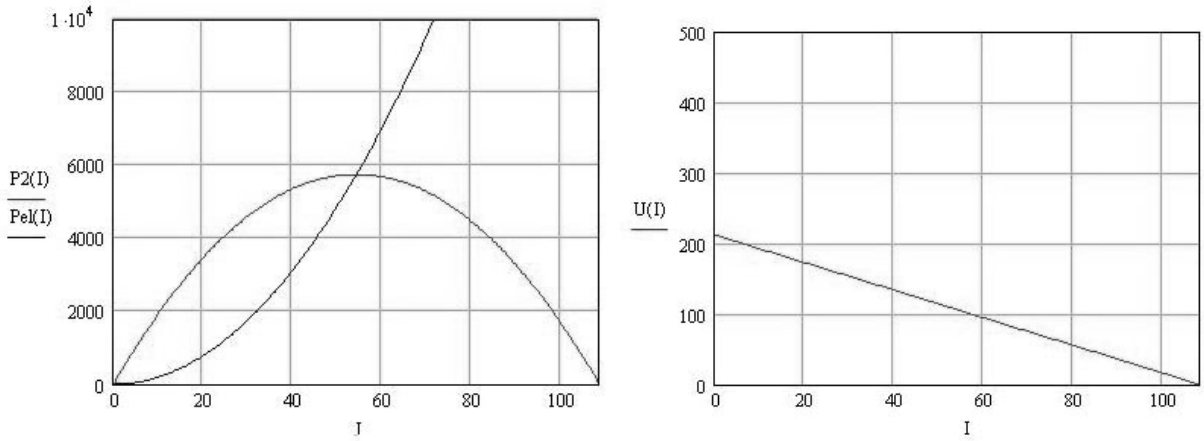
Электромагнитная мощность определяется умножением (25) на угловую частоту вращения машины

$$Pel = \pi^2 \cdot \left(\frac{Dn+Dv}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{Dn-Dv}{2}\right) \cdot Bsr \cdot Asr \cdot \frac{n}{60} \quad , \qquad (13)$$

где n – угловая частота вращения ротора, измеренная в об/мин.

Полученное уравнение представляет собой аналог классического уравнения Арнольда для электромашин цилиндрического типа с радиальным воздушным зазором. Средний диаметр генератора эквивалентен диаметру расточки якоря, а толщина кольца активной длине радиальной машины. Из уравнения Арнольда видно, что точность расчета при анализе зависит от точности определения средней линейной нагрузки и средней индукции. Определение средней линейной нагрузки связано с расчетом активного и индуктивного сопротивления фазы. Расчет активного сопротивления, как правило, не представляет сложности. Для расчета индуктивного сопротивления, а также для определения средней индукции

необходим качественный расчет магнитного поля. Результаты расчетов приведены на рис. 9 и в табл. 2 – 3.



а) б)

Рис. 9. Графики зависимостей выходной мощности P2(I) и электрических потерь в фазах $P_{el}(I)$ от тока I (а) и график выходного напряжения U(I) от тока I (б)

Таблица 2

Габаритная оптимизация (оптимизация по всем размерам)

Наружный диаметр диска (мм)	Внутренний диаметр диска (мм)	Осевая длина (мм)	Число магнитов на диске	Высота магнитов (мм)	Толщина диска (мм)	Толщ. меди (мм)	Число витков в фазе	Число витков в секции	Диаметр провода (мм)	Воздушный зазор (мм)	Сопротивление фазы (Ом	Масса генератора (кг)	Масса магнитов (кг)
440	**250**	**47**	**36**	**10**	**6,0**	**10**	**338**	**18**	**1,5**	**1,0**	**0,97**	**22**	**17,3**

Таблица 3

Номинальная точка:

Номинальный ток (А)	16,66
Номинальное напряжение (В)	180
Номинальная мощность (Вт)	3000
Номинальная частота вращения (об/мин)	180
КПД в номинальной точке	0,847
Плотность тока(А/мм^2)	8,9

Использование данного метода в разработке генератора является перспективным для ВО ВЭУ в связи с введением аэродинамического регулирования.

4. Разработка электронного регулятора мощности ветроэнергетической установки имеет следующие особенности: поддержание максимального Ср регулированием мощности ВЭУ в диапазоне частот вращения ротора от 40 до 160 об/мин с; ограничение частоты вращения ротора на 160 об/мин за счет аэродинамических регуляторов; отсутствие балластной нагрузки.

Регулятор может быть построен на основе современных электронных компонентов: повышающего импульсного преобразователя; понижающего импульсного преобразователя. Задачей разработки и оптимизации является снижение потерь при преобразовании и максимально полное использование энергии ветра.

Для получения максимума мощности при регулировании требуется придерживаться оптимальной быстроходности Z (рис. 4), которая и выступает в качестве исходных данных при разработке алгоритма электронного преобразователя энергии. Критерием оптимальности при разработке алгоритма работы регулятора является максимум выходной мощности на основе регулирования параметров выхода с отслеживанием располагаемой мощности ротора. Регулирование электрической мощности ВЭУ осуществляется с помощью выбора оптимальных рабочих режимов на основе метода, состоящего из следующих параллельно выполняемых действий: измерение внешних параметров (располагаемой мощности, мощности нагрузки, ток заряда аккумуляторной батареи, частота тока и напряжение в фазе генератора и др.); определение выхода параметров за пределы безопасных режимов и отключение генератора с переводом преобразователя в режим защиты; обеспечение заряда аккумулятора в режиме постоянного напряжения с ограничением тока заряда при условии наличия достаточной генерируемой мощности с предотвращением перезаряда и переразряда аккумулятора.

Схема регулятора исследуемой ВЭУ построена на основе программируемого микроконтроллера. Для настройки, диагностики и программирования регулятор имеет интерфейс RS-232. Регулятор построен по схеме понижающего импульсного преобразователя, с несколькими контурами обратной связи.

Алгоритм регулирования мощности, отбираемой от генератора ветроэнергетической установки включает следующие повторяющиеся подитерации: 1. Измерение напряжения и тока в цепи нагрузки, расчет мгновенной потребляемой мощности. 2. Измерение частоты тока в фазе генератора и расчет частоты вращения ротора ветроколеса. 3. Определение мощности ротора на основе сравнения частоты вращения ротора с таблицей мощностей ротора. 4. Определение максимально допустимой мощности зарядки аккумуляторной батареи с использованием максимально допустимого тока зарядки батареи и напряжения на ней. 5. Расчет суммарной требуемой мощности для данного момента времени. 6. Сравнение допустимой и требуемой мощностей, определение минимальной из них с регулированием выходной мощности на основе ШИМ-модуляции. 7. С помощью цифровых потенциометров в цепях обратных связей регулятора задание действующей располагаемой мощности на основе предыдущих расчетов.

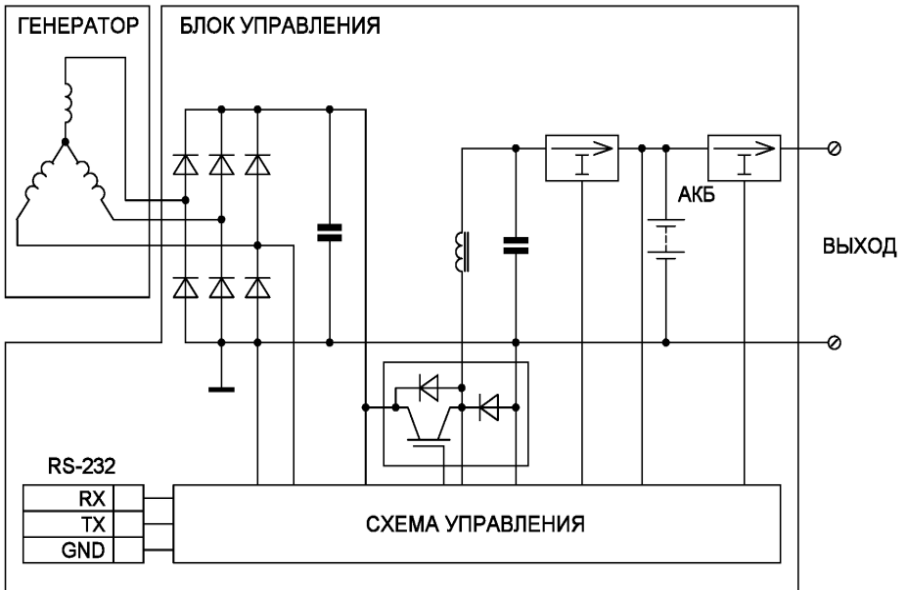


Рис. 10. Схема регулятора ВЭУ

Общая схема ре-

гулятора представлена на рис. 10. Применение данного метода регулирования мощности ВЭУ позволяет значительно повысить уровень удельной выработки энергии ВО ВЭУ в связи с поддержанием максимального Ср во всем диапазоне скоростей ветра до 45 м/с.

В Главе 3 «Методологические основы создания ВО ВЭУ и проведение испытаний» даны описания технологических процессов изготовления лопастей и генератора, приведена методика вибробалансировки ротора. Все технологические процессы разработаны для внедрения в условиях сельскохозяйственной отрасли РФ. В главе также описаны результаты экспериментальной эксплуатации исследуемых ВЭУ, подтверждающие теоретические расчеты, приведены данные исследований шума и вибраций ВЭУ, установленных в фермерских хозяйствах.

С целью повышения надежности и увеличения срока службы лопастей ВЭУ разработан технологический процесс производства изделий на основе композитных материалов. Цель разработки – получение новых недорогих конструкционных материалов, облегчение важнейших узлов ВЭУ, повышение эксплуатационных свойств изделия в условиях воздействия больших температурных амплитуд и высоких механических нагрузок. Основными задачами технологического процесса являются получение заготовок и изделий с использованием объемных материалов, монофазное упрочнение поверхностного слоя, структурирование функционального покрытия, сверхпластичная формовка и диффузия. Одна из ключевых задач – получение ультрамелкозернистой структуры с минимумом шероховатости. Изготовление лопасти происходит в оснастке особым способом намотки стеклоткани на распределенную заготовку за одну формовку, с использованием ряда ноу-хау. Изделие монолитно, готово к сборке в составе ВЭУ и включает в себя лопасть, основание лопасти (крепление к несущему кольцу) и крепление к связующему кольцу или стяжкам. Установочный угол выставляется в оснастке (рис. 11а). Технологический процесс может быть успешно реализован в условиях АПК при обучении неквалифицированного персонала в срок 14 дней.

Прочностные характеристики материала ГРЦВ-ПЭ-300 в среднем на 25% лучше традиционных стеклопластиков. Изделия имеют шестикратный запас по прочности в составе ВЭУ, причем вес и себестоимость снижены в 2 раза, а изделие не содержит металлических частей, т.е. не экранирует радиоволны.

(а)

(б)

Рис. 11. Оснастка для изготовления лопасти (а) и обмотка генератора (б)

Технологический процесс изготовления генератора разработан в части монолитного отверждения якорной обмотки (рис. 11б) и снижения общих вибраций генератора. Процесс заливки использует центрифугу с установленной внутри обмоткой в технологическом кожухе, из центра которого при вращении под действием центробежных сил материал заливки растекается и заполняет пространство внутри кожуха, включая обмотку. Материал заливки изготавливается на основе цементирующего материала или полиэфирных смол. Технологический процесс можно легко адаптировать к действующим производственным предприятиям АПК на основе разработанной оснастки и оборудования.

Методика вибробалансировки ротора разработана для снижения общих вибраций системы «ротор–мачта» и представляет собой трехступенчатую последовательность. На первом этапе балансировки проводится приведение лопастей к одинаковым распределениям массы на предмет формирования комплектов. Затем проводится статическая балансировка с контрольным взвешиванием. На втором этапе проводится цеховая сборка ротора на стенде с достижением перпендикулярности установки лопастей плоскости среднего кольца. На третьем этапе производится подключение генератора ВЭУ к источнику питания, и генератор запускается в режиме двигателя (вторым вариантом может быть использование привода для вращения ротора). Дисбаланс ротора регистрируется с помощью модифицированного виброанализатора К-4102М, изготовленного по техническому заданию автора, после чего проводится векторный расчет уравновешивающих грузов и последующая динамическая весовая балансировка. Полный цикл включает в себя балансировку в плоскостях среднего, верхнего и нижнего колец или стяжек. Методика является уникальной, не имеет аналогов в мире и рассчитана на снижение вибрационных колебаний, являющихся раздражителем для человека и животных. Многочисленные полевые испытания в крестьянско-фермерских хозяйствах АПК в 2008-2012 гг. показали, что животные и птицы не замечают присутствия работающей ВО ВЭУ, в отличие от горизонтально-осевых установок (ГО ВЭУ), генерирующих широкий спектр вибрационных и инфразвуковых колебаний. Высокочастотные вибрации генератора снижаются за счет виброгасителей, расположенных между якорной обмоткой и валом, между фланцами мачты и дополнительных традиционных и разработанных устройств – демпферов растяжек и мачты.

Рис. 12. Семейство вертикально-осевых ВЭУ

По результатам проведенных исследований семейство малых вертикально-осевых ветроэнергетических и ветро-солнечных установок мощностью 0,1 – 30 кВт внедрено в системы энергоснабжения ряда автономных потребителей электроэнергии в структуре агропромышленного комплекса России (рис. 12). В общей сложности полевые испытания прошло 9 различных модификаций ВЭУ. Все установки продемонстрировали Ср (КИЭВ) 0,36…0,43. В 2009-2011 гг. ряд роторов ВЭУ подвергнут длительным полевым испытаниям на полигонах предприятия ООО «ГРЦ-Вертикаль» в Челябинской области. Результаты испытаний всех роторов различаются не более, чем на 15%. Данные выходной мощности ВЭУ-3(6), №03-09-008, полученные с помощью записи на флэш-карту на оконечном выходе электронного регулятора, приведены на рис. 13а в виде экспериментального графика мощности с пересчетом и приведением к аэродинамической мощности с учетом коэффициента мощности Ср, КПД генератора и регулятора. График зависимости коэффициента мощности (коэффициента использования энергии ветра) Ср от быстроходности Z приведен на рис. 13б.

Экспериментальные измерения проведены на скорости ветра от 3 до 16 м/с. До 3 м/с выработка энергии минимальна и не представляет интерес. На скорости ветра 10-11 м/с активируются аэродинамические регуляторы (описаны ниже) и частота вращения стабилизируется на 160 об/мин во всем диапазоне ветров, в результате чего график мощности на рис. 13а со скорости ветра 10-11 м/с приобретает пологость и Ср получается условным.

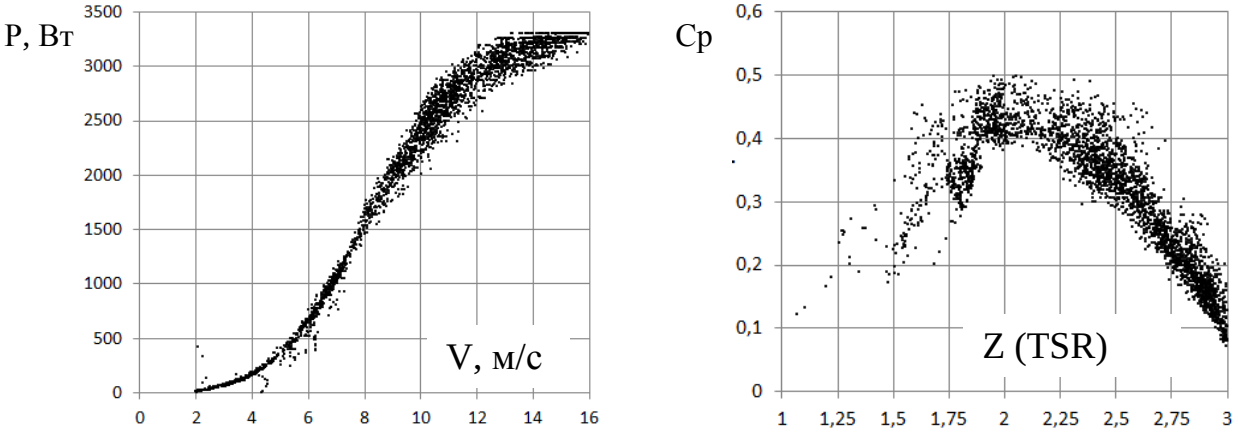


Рис. 13. Экспериментальные графики выходной мощности P от скорости ветра v (а) и коэффициента мощности Ср от быстроходности Z(б)

Мощность ВЭУ нормируется на 11 м/с и составляет 3 кВт с учетом потерь на преобразование. Анализ данных говорит о том, что реальный Ср варьируется в диапазоне 0,18…0,43. Этот факт объясняется особенностью регулирования. На малых скоростях ветра до 5 м/с низкий Ср обусловлен наличием неучтенных при расчетах потерь (трение, аэродинамические потери в местах болтовых соединений, погрешности сборки, люфт и т.д.). На средних скоростях ветра 5-9 м/с Ср максимален, т.к. потери минимальны и отсутствует аэродинамическое регулирование. С ростом частоты вращения растет индуктивное сопротивление и Ср снижается. На скорости ветра выше 10 м/с Ср не предсказуем, так как выходная

мощность искусственно снижается за счет аэродинамического регулирования, и Ср может приобретать очень низкие значения.

Замеры шума и вибраций нескольких образцов ВЭУ-3(6) (3 кВт, 6 лопастей), проведенные в России на расстоянии 10 м от мачты ВЭУ при скоростях ветра 6–12 м/с, во всех случаях показали, что уровень шума окружающего фона выше, чем шум работающей под нагрузкой ВЭУ. Инфразвук и ультразвук отсутствуют. Имеются акты соответствующих организаций.

Измерение вибраций проведено на нескольких ВЭУ по разработанной методике. Результат показывает, что данные несколько различаются, однако в целом удовлетворяют нормам. Пример измерений ВЭУ на скорости ветра 8 м/с при нагрузке 1 кВт (прожектор) приведен на рис. 14. Частота вращения 124 об/мин (или 2,06 Гц). Датчик-акселерометр установлен на нижний сегмент мачты.

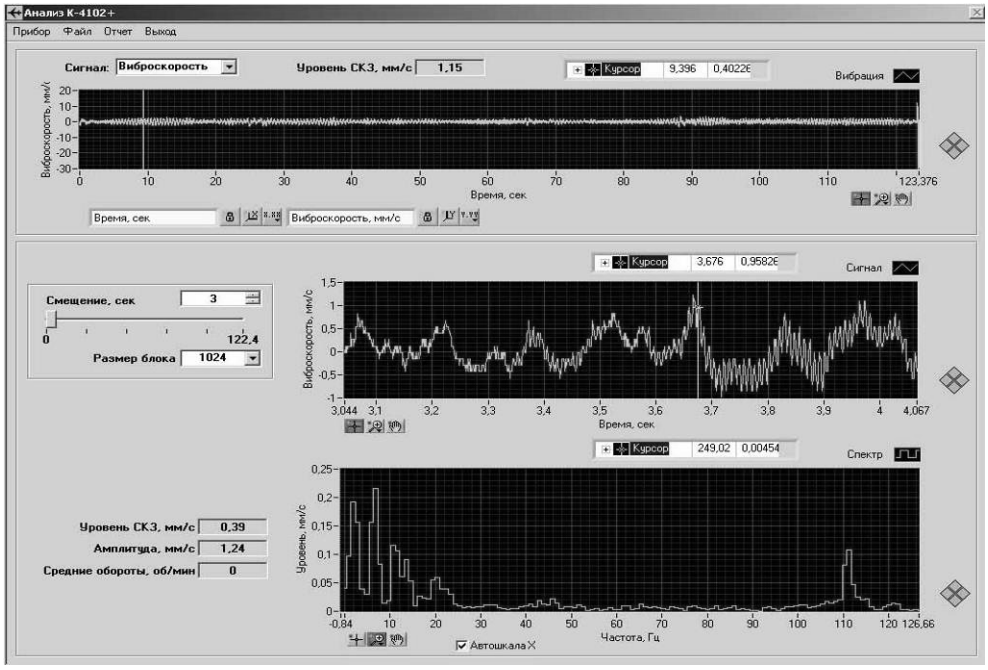


Рис. 14. Результаты измерений вибраций

В спектре присутствуют резонансные частоты 2; 6; 12; 21; 110 Гц. Гармоника с частотой 2 Гц характеризует дисбаланс непосредственно ротора, т.е. частоту вращения ротора; частота 6 Гц – частоты колебаний трех лопастей каждого яруса ВЭУ; 12 Гц – воздействия аэродинамических сил поочередно на 6 лопастей, 21 Гц – частота, близкая к собственной частоте колебаний подшипникового узла. Частота 110 Гц объясняется наличием вибраций генератора. Генератор имеет 36 магнитов на верхнем и столько же на нижнем основании (табл. 3), т.е. количество пар магнитных полюсов p=18, с учетом наличия трехфазной обмотки, т.е. m=3, частота пульсаций момента генератора $N_{ген}$ будет больше частоты вращения ротора $N_{рот}$ (Гц) в ($p \cdot m = 18 \cdot 3 = 54$) раза. Тогда $N_{ген} = N_{рот} \cdot 54 = 2{,}06 \cdot 54 = 111$ Гц. Это значение близко к частоте 110 Гц и говорит о присутствии данной гармоники в связи с наличием нагруженного генератора. Дальнейшее увеличение скорости ветра не влияет на рост вибраций при отсутствии дисбаланса более 0,1 кг.

Шум в данном эксперименте не измерялся. На расстоянии 1 метра от основания мачты шум фона перекрывал шум работающей ВЭУ.

Сравнение максимальных значений амплитуды виброскорости (0,25 мм/с или $0{,}025 \cdot 10^{-2}$ м/с на частоте 6 Гц, а также $0{,}019 \cdot 10^{-2}$ м/с на частоте 3 Гц) с табл.

11 ГОСТ 12.1.012-90 («Вибрационная безопасность» Санитарные нормы спектральных показателей вибрационной нагрузки на оператора. Общая вибрация, категория 3, тип "в") дает следующий результат (табл. 4):

Таблица 4

Нормативные значения виброскорости по ГОСТ 12.1.012-90 и эксперимент

Табличные данные ГОСТ 12.1.012–90		Экспериментальные данные	
Среднегеометрические частоты полос, Гц	Виброскорость, м/с, в 1/1 окт.	Частота, Гц	Виброскорость, м/с, в 1/1 окт.
3,15	$0{,}063 \cdot 10^{-2}$	3,0	$0{,}019 \cdot 10^{-2}$
6,3	$0{,}032 \cdot 10^{-2}$	6,0	$0{,}025 \cdot 10^{-2}$

Из таблицы 4 следует, что ВЭУ можно размещать в непосредственной близости к производственным зданиям, или даже на них. Аналогичное сравнение экспериментальных данных с СН 2.2.4/2.1.8.566-96 («Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий», таблица 9 «Допустимые значения вибрации в жилых помещениях, палатах больниц, санаториев») позволяет размещать ВЭУ рядом с жилыми зданиями и непосредственно на них.

В Главе 4 «Технико-экономическая и социальная оценка внедрения ВЭУ в аграрную отрасль» описаны экономически выгодные варианты внедрения ВЭУ в фермерских хозяйствах АПК, даются расчеты окупаемости ВЭУ, описывается потенциальный рынок малых ветроэнергетических установок, приводятся рыночные прогнозы, экологические и социальные перспективы внедрения ВЭУ до 30 кВт в АПК России.

Согласно современным требованиям проведения НИОКР в части коммерциализации вопрос внедрения результатов исследований является в Российской Федерации одним из стратегических. В соответствии с этим проведение анализа рынка разрабатываемых и создаваемых изделий является побуждающей экономической причиной для создания методологии разработки ветроэнергетических установок на основе научных методов и подходов.

а) б) в)

Рис. 15. ВЭУ-3 в КФХ «Марково-1» (с. Суналы, Челябинская обл., Троицкий р-н) (а), ВЭУ-3 в ЗАО СХП "Краснокаменское" (Архангельская область) (б), ВО ВЭУ в пос. Яденино (Ямало-Ненецкий Автономный Округ) (в)

В работе дана технико-экономическая оценка использования ВЭУ мощностью 3 кВт для энергопитания объектов сельского хозяйства (рис. 15), рассмотрено совместное применение электроприборов, благодаря чему эффективность системы «ВЭУ-прибор» возрастает на несколько порядков.

Эффективность использования ВЭУ в качестве источника энергоснабжения может быть представлена на примере расчетов самоокупаемости по сравнению с текущей стоимости электроэнергии в конкретном регионе, исходя из стоимости киловатт-часа и срока эксплуатации ВЭУ. При стоимости ВЭУ 280 тыс. руб. с учетом обслуживания, сроке эксплуатации 20 лет на средней скорости ветра 4,5 м/с (что меньше, если вести расчет по повторяемости или распределению Вейбулла и Рейлея) и выработке 250 кВт-ч/мес. стоимость электроэнергии получается 4,6 руб/кВт-ч. С учетом 50%-ого субсидирования, которое осуществляется Министерствами экономического развития регионов эта цифра снижается вдвое. Однако, например, с использованием аэраторов в заморных водоемах при разведении практически любых пород рыб целесообразность применения ветроустановок еще более возрастает. При капиталовложениях на ВЭУ 280 тыс.руб. срок окупаемости составляет менее 2 месяцев (стоимость закупа мальков (например, форели) 400 тыс.руб. для водоема 25 Га, выход зрелой рыбы через 1 год свыше 3 млн. руб.). В этом случае стоимость электроэнергии автономной ВЭУ трудно поддается комплексной оценке, поскольку эффективность использования является рекордной и зависит от комбинаций электроприборов. Ко всему прочему, при внедрении автономной ВЭУ в крестьянских фермерских хозяйствах уровень быта населения также возрастает, а рост социальных условий и повышение комфорта в целом не поддается аналитической оценке. При этом энергопотребление возрастает незначительно при использовании энергосберегающего оборудования (светодиодных светильников, инфракрасных пленочных электронагревателях, теплоаккумуляторов и т.д.). Практика эксплуатации ВЭУ-3 в течение 4 лет в КФХ Челябинской области в комбинации с рядом энергосберегающего оборудования и электроприборов доказывает правильность выбора направления исследований и экономическую целесообразность внедрения ВЭУ в сельскохозяйственной отрасли.

Расчет потенциального рынка малых ветроэнергетических установок произведен исходя из анализа ряда положений, обосновывающих рост износа генерирующих мощностей и необходимости внедрения малой энергетики на основе возобновляемых источников энергии с максимальным приближением электрических и тепловых генераторов к местам потребления. Исходя их этих положений потенциальный рынок для малой ветроэнергетики со стоимостью оборудования 60 руб. за Вт номинальной мощности ВЭУ прогнозируется следующим образом: 1. Экономически выгодная замена малых дизельных станций агропромышленного комплекса Северных регионов на ВЭУ, по меньшей мере в размере 50%, создаст рынок в объеме 250 тыс. кВт, что эквивалентно нескольким сотням тысяч малых ВЭУ или ориентировочно 250 млрд. руб. 2. При условии планируемой Правительством РФ до 2020 г. замены хотя бы 1% традиционных источников энергии на ветроэнергетику, объем установленной мощности ветроэнергетиче-

ских установок может составить 2,17 млн. кВт. Из них, по опыту внедрения развитых стран, малые ВЭУ до 30 кВт могут составлять по меньшей мере 5% всего парка, или 100 тыс. кВт установленной мощности, что эквивалентно несколько сотням тысяч малых и сверхмалых ВЭУ, т.е. более 100 млрд. руб. При этом на настоящий момент минимум 30% расчетного рынка занимают потребности АПК РФ, что является, вообще говоря, заниженной цифрой исходя из планируемого развития сельскохозяйственной отрасли.

Таким образом, даже не принимая во внимание объем международного рынка, рост спроса на автономные источники электроэнергии, развитие научно–технических решений в ветроэнергетике, снижение себестоимости ВЭУ, тенденции развитых стран в области развития малой энергетики и, наконец, пренебрегая данными прогнозов по растущему энергодефициту, можно смело утверждать, что потенциальный рынок малых ВЭУ в России составляет уже в настоящее время свыше 350 млрд. руб. с долей АПК 200-250 млрд. руб. Решение данной проблемы является перспективной народно-хозяйственной задачей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Решена проблема энергообеспечения сельских удаленных потребителей на основе внедрения вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ) повышенной эффективности. Сформулированы методологические основы разработки и создания принципиально новых конструктивных решений ВО ВЭУ, предназначенных для эксплуатации в условиях животноводческих и птицеводческих объектов АПК Российской Федерации. Методология позволяет структурировать и логически организовать методы и средства оптимального проектирования ВЭУ для АПК РФ.

2. Обоснованы технические и экономические требования к конструктивным и эксплуатационным параметрам ВО ВЭУ, сформулированы граничные условия и критерии оптимизации.

3. На основе системного подхода к анализу трехмерных и кластерных (модульных) функциональных математических моделей выявлены закономерности влияния силовых воздействий, приводящих к возникновению шума и вибраций. Конструкция оптимизирована покомпонентно по ряду критериев с целью получения максимальной выработки энергии. В результате применения последовательности итерационных методов покомпонентной оптимизации максимальный экспериментально полученный коэффициент мощности Ср (КИЭВ) исследуемой ВЭУ-3 составил 0,43 (43%) с сохранением устойчивой работоспособности на скоростях ветра до 45 м/с, с прогнозируемой буревой скоростью 60 м/с. Выходная мощность ВЭУ-3 соответствует расчетным характеристикам и составляет 3 кВт на скорости ветра 11 м/с. Аэродинамическое регулирование частоты вращения ротора и электронное регулирование мощности ВЭУ позволяют поддерживать максимально возможный Ср во всем диапазоне частот вращения с ограничением частоты по верхнему пределу за счет изменения аэродинамических свойств ротора. На настоящий момент конструкция по полученным параметрам

не имеет аналогов в мире и может успешно эксплуатироваться даже в зонах с умеренными ветрами 4-5 м/с.

4. Разработаны технологические процессы изготовления лопастей, генератора, аэродинамического регулятора, ротора ВО ВЭУ. Все технологические процессы адаптированы к условиям АПК РФ. Прочность материала лопастей увеличена на 25%, себестоимость за период разработок снижена в 2 раза. Разработанная методика вибробалансировки позволила впервые в мире снизить вибрации ВЭУ до уровня $0{,}019 \cdot 10^{-2}$ м/с на частоте 3 Гц, что с запасом удовлетворяет требованиям ГОСТ 12.1.012-90 и СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Разработанная методика может быть использована для большинства ВО ВЭУ.

5. Проведенные лабораторные, стендовые и полевые испытания разработанных ВО ВЭУ подтвердили теоретические расчеты мощности, шума и вибраций, а также доказали возможность эксплуатации ВЭУ в сельских условиях. Уровень шума работающей ВЭУ не превышает 58 дБ(А) на расстоянии 10 метров и с запасом удовлетворяет ГОСТ 23337-78 и СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Уровни шума и вибраций позволяют использовать созданные ВЭУ на животноводческих объектах АПК и в непосредственной близости к жилым и офисным помещениям.

6. Теоретические и экспериментальные испытания показали необходимость корректировки действующих стандартов в части разработки и эксплуатации ВО ВЭУ с уточнением требований по вибробезопасности и регулированию.

7. Технико-экономическая оценка эксплуатации ВО ВЭУ проведена для различных вариантов применения и показывает высокую эффективность использования ВЭУ в системе энергоснабжения объектов АПК. Себестоимость электроэнергии оценивается максимум в 4,5 руб/кВт-ч, а при комбинированном использовании ВЭУ с рядом приборов составляет не более 0,01 руб/кВт-ч со сроком окупаемости не более 2 месяцев. Потенциальный рынок малых ВЭУ в Российской Федерации оценен в общую сумму свыше 350 млрд. руб., из которых доля АПК составляет свыше 250 млрд. руб. За счет применения методологии, основанной на методах оптимизации, получена конструкция, которую можно эксплуатировать на урбанизированных и полевых территориях АПК РФ, с одновременным снижением установочных и эксплуатационных расходов соответственно на 25% и 15%. Себестоимость ВЭУ без введения автоматизированного производства составляет 60 руб. за Ватт мощности оборудования.

8. Создано семейство ВО ВЭУ мощностью 0,1; 1; 3; 5; 30 кВт автономного применения в АПК РФ. ВЭУ мощностью 0,1 и 3 кВт внедрены в систему энергоснабжения трех фермерских хозяйств в составе гибридных ветро-солнечных энергоустановок с широким спектром энергосберегающего оборудования (светодиодные световые приборы, лучистые пленочные электронагреватели, теплоаккумуляторы и т.д.).

9. В работе решена крупная научная проблема создания методологических основ разработки и создания новых ветроэнергетических установок для объектов АПК, что имеет важное народно-хозяйственное значение для повышения энергонезависимости и обороноспособности страны.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

А. В изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией:

1. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки «ГРЦ–Вертикаль» / И.М. Кирпичникова, В.П. Кривоспицкий, Е.В. Соломин // Вестник МАНЭБ. Приложение «По Материалам I Международной научно–практической конференции «Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения». – СПб.–Чита, 2008. – Т.13. – №3. – С.129–134.

2. Соломин, Е.В. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2008. – Вып.10. – №26. – С.15–16.

3. Соломин, Е.В. Сопряжение ВЭУ малой мощности с пленочным электронагревателем для обогрева помещений / И.М. Кирпичникова, И.Н. Панасюк, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2009. – Вып.12. – №34. – С.78–81.

4. Соломин, Е.В. Сделано в России! Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения мощностью 1…100 кВт для потребителей электроэнергии / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2009. – №10. – С.74–78.

5. Соломин, Е.В. Виброгасители мачт сверхмалых вертикально–осевых ветроэнергетических установок / И.М.Кирпичникова, Е.В.Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2010. – Вып.13. – № 14(190). – С. 78–81.

6. Соломин, Е.В. Инженерный метод и математическое моделирование в проектировании ветроэнергетических установок / Ю.В. Грахов, О.В. Матвеенко, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2010. – Вып.2. – №9(185). – С. 45–52.

7. Соломин, Е.В. Экономические аспекты внедрения ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2010. – Вып.14, 20(196). С.32–36.

8. Соломин, Е.В. Предложение о сотрудничестве при производстве ветроэнергетических установок / Дж.Куль, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.115–125.

9. Соломин, Е.В. Технические особенности и преимущества ветроэнергетических установок / Е.В.Соломин, Р.Л.Холстед // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.36–41.

10. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ–Вертикаль / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.10–15.

11. Соломин, Е.В. Система освещения, основанная на ветроэнергетической установке / А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.101–105.

12. Соломин, Е.В. Преобразование энергии в ветроэнергетических установках / И.М. Кирпичникова, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.93–97.

13. Соломин, Е.В. Контроллер заряда ветроэнергетической установки / А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.106–109.

14. Соломин, Е.В. Отопительная система на базе ВЭУ / Н.В. Пронин, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.110–114.

15. Соломин, Е.В. Сравнительные характеристики вертикально–осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.48–53.

16. Соломин, Е.В. Ветроэнергетическая экономика / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №2. – С.28–30.

17. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ–Вертикаль для экологических курортов / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010 – №2. – С.60–64.

18. Соломин, Е.В. Размещение ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения на ответственных инженерных объектах / Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2010. – Вып. 11, 33(209). С.47–51.

19. Соломин, Е.В. Основы методологии разработки вертикально–осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – №1. – С.18–28.

20. Соломин, Е.В. Система отопления на основе ветроэнергетической установки и теплового аккумулятора / А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – №2. – С.30–33.

21. Solomin, E.V. Development and optimizing of vertical axis wind turbines / E.V. Solomin // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – №1. – С.29–39.

22. Соломин, Е.В. Итерационная оптимизация параметров и режимов работы вертикально–осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2011. – Вып. 15(232). С.73–81.

23. Соломин, Е.В. Разработка математической модели ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт производства ООО «ГРЦ–Вертикаль в пакете Matlab / Н.В. Пронин, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – №5. – С.41–44.

24. Соломин, Е.В. Методы торможения и регулирования частоты ветроэнергетических установок / А.Н. Киндряшев, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – №5. – С.38–40.

25. Соломин, Е.В. Разработка математической модели ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт производства ООО «ГРЦ–Вертикаль в пакете Matlab / Н.В. Пронин, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2011. – Вып. 7, 35(211). С.49–52.

26. Соломин, Е.В. Перспективы использования малых ветроэнергетических установок в агропромышленном комплексе / Е.В. Соломин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Москва. – 2011. – Вып. 7. С.12–15.

27. Соломин, Е.В. Эффективность автономного электроснабжения фермерского хозяйства / А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Москва. – 2011. – Вып. 9. С.29–30.

28. Solomin, E.V. Joint scientific research of Russian and German scientists in renewable energy / E.V. Solomin // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – №10. – С.82–88.

29. Solomin, E.V. Photovoltaic or wind solution / E.V. Solomin // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – №11. – С.38–40.

30. Соломин, Е.В. Масштабируемые гибридные ветро-солнечные установки малой мощности / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2012 – №2(106). – С.49–60.

31. Соломин, Е.В. Экономические аспекты гибридных ветро-солнечных установок малой мощности / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2012 – №2(106). – С.71–77.

Б. В международных, российских, межрегиональных изданиях и материалах конференций

32. Соломин, Е.В. Описание ВЭУ ООО «ГРЦ–Вертикаль» / Е.В. Соломин // Деловой Север. – Екатеринбург, 2008. Вып. 5. – №5. – С.8–9.

33. Соломин, Е.В. Ветроэнергетика для дома и офиса. Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения мощностью 1…100 кВт для дома и промышленности / Ю.В. Грахов, Е.В. Соломин и др. // Материалы V Международной научно–практической конференции «Возобновляемые источники энергии. Ресурсы. Системы энергогенерирования на возобновляемых источниках энергии». – М., 2008. – С.37–39.

34. Соломин, Е.В. Программно–математическая модель ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Ю.В. Грахов, И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин // Материалы V Международной научно–практической конференции «Возобновляемые источники энергии. Ресурсы. Системы энергогенерирования на возобновляемых источниках энергии / М., 2008. – С.41–42.

35. Соломин, Е.В. Вертикально–осевые ветроэнергетические установки: «Сделано в России» / Е.В. Соломин // Материалы Межрегионального совета по науке и технологиям. «Механика и процессы управления» и «Проблемы машиностроения». Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2008. – С.17–19.

36. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки «ГРЦ–Вертикаль» / Е.В. Соломин // Малая энергетика, М.: Изд–во НИИЭС, 2008. – №3(8). – С.57–61.

37. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ–Вертикаль. Перспективы развития // 60–я юбилейная научная конференция, посвященная 65–летию Южно–Уральского государственного университета. Секция "Технические науки". Материалы конференции. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2008. – Т.1. – С.23–26.

38. Соломин, Е.В. Социальные, экономические и правовые аспекты размещения ветроустановок на зданиях и сооружениях / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова // Малая энергетика, М.: Изд–во НИИЭС, 2009. – №1. – С.56–61.

39. Соломин, Е.В. Методика балансировки ротора ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова // Малая энергетика, М.: Изд–во НИИЭС, 2009. – №1. – С.48–52.

40. Соломин, Е.В. Вертикально–осевые установки российской ветроэнергетики / Соломин Е.В. // Материалы Регионального научно–практического семинара «Современное состояние, проблемы и перспективы использования возобновляемых источников энергии» 8–9 октября 2009 г. – Элиста: Изд–во КГУ, 2009. – С.71–75

41. Соломин, Е.В. Размещение ветроэнергетических установок мощностью до 10 кВт на кровле зданий / Е.В.Соломин // Материалы IV Международной научно–практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» 1–3 октября 2009 г. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2009. – С.284–290.

42. Соломин, Е.В. Социальные, экономические и правовые аспекты размещения ветроустановок на зданиях и сооружениях / Е.В.Соломин, И.М.Кирпичникова // Малая энергетика. – М.:НИИЭС, 2009. – №1–2. – С.29–39.

43. Соломин, Е.В. Методика балансировки ротора ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / И.М.Кирпичникова, Е.В.Соломин // «Малая энергетика». – М.:НИИЭС, 2009. – №1–2. – С.39–43.

44. Solomin, E. High Efficient Low Noise Vertical Axis Wind Turbines / E.Solomin // 21st ISTC Korea Workshop “Renewable Energy”. Pusan National University, Korea, 2009. – №1–2. – P.38–44.

45. Соломин, Е.В. Методика вибробалансировки ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения / Кирпичникова И.М., Соломин Е.В. // Энергетическая политика. – М., 2009 – №5. – с.72–78.

46. Соломин, Е.В. Энергосберегающая технология отопления с использованием ветроэнергетических установок / Н.В.Пронин, Е.В.Соломин // Энерго– и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады 16–19 ноября 2009 г., научно–практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых 14–18 декабря 2009 г. Екатеринбург. Екатеринбург: Изд–во УГТУ–УПИ, 2009. С. 492–495.

47. Соломин, Е.В. Гашение вибраций ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Е.В.Соломин // Материалы 61 научно–практической конференции ЮУрГУ, секции технических наук. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2009. – Т.2. – С. 276–280.

48. Соломин, Е.В. Обеспечение вибробезопасности ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения / И.М.Кирпичникова, Е.В.Соломин // Материалы конференции по ВИЭ 9–10 июня 2009 г. Москва. – М.,2009. – С.23–27.

49. Соломин, Е.В. Использование ветроэнергетических установок для обеспечения энергосберегающей системы отопления жилых помещений / И.М.Кирпичникова, Е.В.Соломин, И.Н.Панасюк. Н.В.Пронин // Материалы научно–практического семинара 14–16 апреля 2010 г. Астрахань. – Астрахань: Издат. Дом «Астраханский университет», 2010. – С.65–68.

50. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения / И.М.Кирпичникова, В.П.Кривоспицкий, Е.В.Соломин // Известия Академии Электротехнических наук РФ. – М., 2010. – №2. С.68–72.

51. Соломин, Е.В. Инновационное будущее за регионами / Е.В.Соломин // Debts and financing economic journal. – М., 2010. – №7(44). – С.68–69.

52. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки широкого применения / Е.В.Соломин // Материалы Форума «Изменение климата и экология промышленного города». – Челябинск, 2010. – С.65–66.

53. Соломин, Е.В. Экокультура и фитобиотехнологии улучшения качества жизни на Каспии / И.М.Кирпичникова, Е.В.Соломин, И.Н.Панасюк, Н.В.Пронин // сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи 7–10 декабря 2010 г. Астрахань. – Астрахань: Издат. Дом «Астраханский университет», 2010. – С.25–28.

54. Соломин, Е.В. Контроллер заряда АКБ ветроэнергетической установки / А.С. Мартьянов, Е.В.Соломин // Материалы 62–ой научной конференции секции технических наук. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2010. – Т. 3. – С.123–126.

Индекс цитируемости Соломина Е.В. за 2007 – 2012 гг. по данным РИНЦ по состоянию на 01.09.2012 г. (согласно http://elibrary.ru)

ГОД	2007	2008	2009	2010	2011	2012	ИТОГО
Количество	4	5	8	14	21	38	90

Импакт-факторы: Журнал «Альтернативная энергетика и экология», импакт-фактор РИНЦ 2010 = 0,146. Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика, импакт-фактор РИНЦ 2010 = 0,118

В. В монографиях, брошюрах, учебных пособиях

1. Соломин, Е.В. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие к практическим занятиям / И.М. Кирпичникова, Соломин, Е.В. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ. – 2009. – 50с.

2. Соломин, Е.В. Методология разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок: монография / Соломин, Е.В. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ. – ISBN:978-5-696-04199-5. – 2011. – 256с.

3. Соломин, Е.В. Основы создания ветроэнергетических установок: монография / Соломин, Е.В. – Saarbrücken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. – ISBN:978-3-8473-3504-7. – 2012. – 268с.

Г. В патентах, ноу-хау и свидетельствах ФИПС

1. Пат. 2244996 Российская Федерация, МПК^7 Н 02 К 19/16 1/06. Генератор переменного тока / С.А.Ганджа, Е.В. Соломин и др. – № 2003124088/09; заявл. 31.07.03; опубл. 20.01.2005, Бюл. № 2. – 3с.

2. Пат. 2347104 Российская Федерация, МПК F03D 3/06 (2006.1). Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения / Ю.В.Грахов, Е.В.Соломин и др. – № 2006117014/06; заявл. 12.05.2006; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 12с.

3. Пат. 87767 Российская Федерация, МПК F16F 15/133 (2006.01). Амортизатор растяжки ветряной установки / И.М.Кирпичникова, Е.В.Соломин и др. – № 2008138451/22; заявл. 26.09.2008; опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29. – 3с.

4. Пат. 100851 Российская Федерация, МПК H01L 33/00 (2010.01). Комбинированная ветросолнечная энергетическая установка со светодиодным излучателем для освещения общественных мест / Е.В.Соломин – № 2010137760/28; заявл. 10.09.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36. – 2с.

5. Пат. 101105 Российская Федерация, МПК F03D 9/02 (2006.01). Комбинированная ветросолнечная энергетическая установка со светодиодным излучателем для освещения общественных мест / Е.В.Соломин – № 2010137417/06; заявл. 08.09.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. – 2с.

6. Секрет производства (ноу–хау) «Способ регулирования отбора мощности генератора ветроэнергетической установки» / И.М.Кирпичникова, А.С.Мартьянов, Е.В.Соломин. – Приказ № 60 от 18.02.2011 г. – ГОУ ВПО «Южно–Уральский государственный университет». – 7 с.

7. Пат. 103168 Российская Федерация, МПК F21S9/02 (2006.01). Автономное осветительное устройство / Е.В.Соломин – № 2010138386/07; заявл. 17.09.2010; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9. – 2с.

8. Пат. 108504 Российская Федерация, МПК F03D 3/06 (2006.01). Монолитная лопасть ветроэнергетической установки / Е.В.Соломин – № 2011111177/06; заявл. 24.03.2011; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26. – 2с.

9. Пат. 110825 Российская Федерация, МПК F24H 7/02 (2006.01) H02J 15/00 (2006.01). Комбинированная система теплоснабжения на возобновляемом источнике энергии / Е.В.Соломин – № 2011107463/28; заявл. 25.02.2011; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. – 4с.

10. Пат. 113096 Российская Федерация, МПК H02P 9/00 (2006.01) H02P 9/04 (2006.01). Регулятор-контроллер отбора мощности генератора ветроэнергетической установки / Е.В.Соломин – № 2011113592/07; заявл. 07.24.2011; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. – 4с.

11. Пат. 110424 Российская Федерация, МПК F03D 7/06 (2006.01). Мобильная ветроэнергетическая установка / В.Г.Николаев, Е.В.Соломин – № 2011124836/06; заявл. 17.06.2011; опубл. 20.11.2011, Бюл. № 32. – 3с.

12. Пат. 112954 Российская Федерация, МПК F03D 7/06 (2006.01). Устройство аэродинамического регулирования частоты вращения ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки / В.Г.Николаев, Е.В.Соломин – № 2011124857/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. – 4с.

13. Пат. 112955 Российская Федерация, МПК F03D 11/00 (2006.01). Устройство обогрева лопасти ветроэнергетической установки на основе энергопитания от солнечного модуля / Е.В.Соломин – № 2011133617/06; заявл. 10.08.2011; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. – 3с.

14. Пат. 2443902 Российская Федерация, МПК F03D3/06 (2006.01). Ветроколесо ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Ю.В.Грахов, Е.В.Соломин и др. – № 2010121692/06; заявл. 27.05.2010; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 3. – 3с.

ЦЕНТР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
(ЦНТИ)

Подписано в печать ....09.2012. Формат 60.84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2. Тираж 120 экз. Заказ 392/669.

Отпечатано в типографии ЦНТИ.
454091, г. Челябинск, ул. Труда 157.