

На правах рукописи



Буяльский Владимир Иосифович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ НА БАЗЕ ОЦЕНКИ
СКОРОСТИ ВЕТРА И МОЩНОСТИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Специальность 05.13.06

Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (в машиностроении и приборостроении)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2018

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» Институт ядерной энергии и промышленности

**Научный
руководитель**

Шайтор Николай Михайлович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» Институт ядерной энергии и промышленности

**Официальные
оппоненты**

Хасанов Зимфир Махмутович,
д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Сальников Алексей Федорович,
д.т.н., профессор, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Ведущая
организация**

ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" г. Москва

Защита состоится «18» апреля 2019 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, 5 корпус ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» <http://istu.ru>

Автореферат разослан «__» февраля 2019 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Сяктерев Виктор Никонович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная технология производства электроэнергии путём использования энергии ветра имеет ряд проблем, которые негативным образом влияют на повышение эффективности преобразования энергии. Широко используемые методы управления ветроэнергетической установкой (ВЭУ) в условиях быстро изменяющихся ветровых и электрических нагрузок не обеспечивают должной стабильности частоты вращения ротора ветротурбины, что отрицательно влияет на надёжность и продолжительность безаварийной работы ветроэлектрических агрегатов, экономию производимой электроэнергии при собственном потреблении, а также на эффективность использования энергии ветра. Решение этих проблем возможно лишь при наличии эффективного автоматизированного управления ВЭУ.

В настоящее время управление ВЭУ выполняется на основе критерия по поддержанию номинального значения угловой скорости ветроколеса за счет изменения угла положения лопастей. Управляющий сигнал зависит от отклонения фактической угловой скорости ротора от номинальной, которое получается в результате изменения скорости ветра или мощности потребляемой электроэнергии, как внешних возмущающих воздействий. Вместе с тем, принятие решений по управлению осуществляется на основе информации об уже сформировавшемся рассогласовании фактической и установленной угловой скорости ротора. Такой подход не обеспечивает оперативности выработки управляющих воздействий, направленных на поддержку номинального значения угловой скорости в условиях переменных метеорологических и электроэнергетических условий, что негативно отражается на показателях надежности составляющих частей современных ВЭУ, и на энергоэффективности технологического процесса.

Существующий метод подготовки информации для реализации управления указывает на необходимость его модификации путем обеспечения своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям, за счет упреждения характеристик метеорологических и электроэнергетических условий, а также учета динамических свойств системы, что позволит уменьшить время переходного процесса регулирования угловой скорости ветроколеса.

Научная задача диссертационной работы состоит в разработке принципов, структуры и системы автоматизированного управления ветроэлектрической установкой, на базе оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии, которые обеспечивают повышение стабильности частоты вращения ротора ветроколеса, уменьшают динамические нагрузки на основные элементы конструкции в процессе эксплуатации, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ВЭУ.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы управления ветроэлектрической установкой отражены в работах отечественных ученых:

Кацурина А.А., Серебрякова А.В., Крюкова А.В., Весенина А.Б., Еникеева Т.У., Медведева М.Ю., Веселова Г.Е., и в работах зарубежных авторов Тихевича О.О., Гайдайчук В.И., Легошина Д.В.

Необходимые законы и параметры управления нестационарными режимами работы ВЭУ для уменьшения аэродинамических и электромеханических нагрузок на силовые элементы конструкции в процессе эксплуатации, рассмотрены в работах Васько В.П., Коханевича В.П. и др.

Исследования Козина В.С., Кудлик М.Б. и др. направлены на изучение повышения аэродинамической эффективности работы ВЭУ.

В нашей стране исследованиями систем автоматического управления ВЭУ занимался Уфимский государственный авиационный технический университет (г. Уфа). За рубежом работы в данной области проводятся рядом фирм США (Kenetech wind power), Германии (Nordex), в научном учреждении Украины (ПКТБ «Конкорд»).

На основании приведенного анализа можно считать, что основными проблемами управления ВЭУ являются проблемы эффективного управления работы ветроагрегата.

Область исследования. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: 2. Автоматизация контроля и испытаний; 3. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП); 4. Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация; 10. Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП.

Объектом исследования является процесс автоматизированного управления ВЭУ.

Предметом исследования являются принципы и структуры построения эффективной системы управления процессом поддержки номинального значения угловой скорости ротора ветроколеса.

Цель работы. Разработка принципов, структуры и системы автоматизированного управления ВЭУ на базе оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии, которые обеспечивают повышение стабильности частоты вращения ротора ветроколеса, уменьшают динамические нагрузки на основные элементы конструкции в процессе эксплуатации, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ВЭУ.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1. Уточнение математической зависимости угловой скорости ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти.

2. Разработка метода оценки времени включения двигателя привода угла поворота лопасти, в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии на последующем отрезке времени, с учетом инерционности системы и постоянной времени переходного процесса.

3. Разработка метода оценки угловой скорости ветроколеса и угла положения лопасти, в том числе:

- разработка и исследование алгоритма принятия управляющих решений со стороны предложенного и существующего основных методов управления;

- анализ и моделирование влияния запаздывания регулирования угловой скорости ветроколеса, в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии;

- разработка структурной схемы автоматизированной системы управления ветроэнергетической установкой, в соответствии с методом, обуславливающим своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям, позволяющего минимизировать время переходного процесса регулирования угловой скорости ветроколеса;

- разработка алгоритмов функционирования подсистем моделирования угловой скорости ветроколеса на последующем отрезке времени, определение требуемого значения угла положения лопасти, оценка времени включения двигателя привода угла поворота лопасти, интеллектуальная поддержка принятия решений по управлению.

Научная новизна

1. Усовершенствована математическая модель процесса производства электроэнергии ВЭУ, отличающаяся тем, что метеопараметр, определяющий характер зависимости угловой скорости ротора ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти выбирается с возможностью заблаговременного определения изменения частоты вращения ветроколеса, что способствует учету динамических свойств системы для повышения оперативности принятия управляющих решений при переменных характеристиках метеорологических условий. При этом введение коэффициента в предложенной формуле обеспечивает понижение кубической степени метеопараметра до единицы, что дает возможность получить линейную зависимость скорости вращения ротора в соответствии с изменением внешней среды.

2. Впервые разработан метод оценки времени включения двигателя привода угла поворота лопасти, в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии на последующем интервале времени, с учетом инерционности системы и постоянной времени разворота лопастей, что позволяет обеспечить своевременную установку лопастей на необходимый угол для повышения стабильности частоты вращения ротора ветроколеса.

3. Усовершенствован метод автоматизированного управления процессом производства электроэнергии ветроэнергетической установкой путем формирования угловой скорости ротора ветроколеса и угла положения лопасти на основе упреждения изменений скорости ветра и величины потребляемой электроэнергии на малые промежутки времени

(среднеквадратическая ошибка математического ожидания метеопараметра не превышает 4%).

4. Организация интервала, в течение которого осуществляется осреднение измеренных значений, производится с помощью учета хронологии характера изменения внешней среды, чтобы минимизировать время контроля выходных управляемых параметров, который реализуется согласно критерию формирования доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного методов принятия управляющих решений, что дает возможность повысить стабильность частоты вращения ротора ветротурбины за счет уменьшения продолжительности переходного процесса в среднем в два раза.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Получила дальнейшее развитие математическая модель ВЭУ, основанная на принципах согласованного энергоэффективного адаптивного управления, на базе оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии, для обеспечения повышения показателей надежности составляющих частей современных ВЭУ, в условиях неполной информации о принятии управляющих воздействий.

2. Разработаны методы, алгоритмы и программы адаптивного энергоэффективного управления ветроэлектрическим агрегатом на базе оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии.

3. Получена структурная схема автоматизированной системы управления ветроэнергетической установкой, реализующая разработанные методы.

4. Разработана система управления ВЭУ на базе оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии.

5. Результаты работы использованы для дальнейшего проектирования и освоения алгоритмического обеспечения систем автоматического управления, для повышения стабильности угловой скорости ветроколеса, на Сакской ВЭУ в Крыму.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта, систематизация существующих подходов и методов оптимизации управления ветроэнергетической установкой по критерию поддержания номинального значения угловой скорости ветроколеса, для аргументации актуальности, цели и задач исследования. Для установления зависимости угловой скорости ротора ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти использованы фундаментальные положения теории аэродинамики. При разработке системы и алгоритмов автоматического управления использован классический метод Simulink-модели пакета Matlab для анализа влияния запаздывания регулирования угловой скорости ветроколеса. Для реализации алгоритма эффективного управления в виде программного обеспечения использованы компьютерные информационные и программные технологии.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая зависимость угловой скорости ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти, которая обеспечивает понижение кубической степени метеопараметра до единицы, что дает возможность

получить линейную зависимость скорости вращения ротора ветротурбины в соответствии с изменением внешней среды.

2. Метод оценки параметра времени включения двигателя привода угла поворота лопасти в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии на последующем интервале времени, с учетом инерционности системы и постоянной времени переходного процесса, который позволяет в среднем в 15 раз уменьшить количество включений двигателя разворота лопастей.

3. Метод оценки угловой скорости ветроколеса и угла положения лопасти с целью заблаговременного определения изменения частоты вращения ветроколеса, что способствует повышению оперативности принятия управляющих решений при переменных характеристиках метеорологических и электроэнергетических условий.

4. Критерий по формированию согласованного доступа к двигателю привода поворота со стороны предложенного и существующего основных методов принятия управляющих решений с целью минимизации времени контроля выходных управляемых параметров.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов исследования подтверждается тем, что в работе используются апробированные фундаментальные положения теории аэродинамики и автоматического управления. Это гарантировало не только устойчивость системы управления, но и возможность отслеживать зоны допустимого и критического запаздывания регулирования угловой скорости ротора. Достоверность полученных результатов подтверждается так же удовлетворительным совпадением аналитических результатов предложенной зависимости угловой скорости ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти с такто-техническими данными ветроагрегатов.

По результатам проведенных исследований опубликовано 23 печатных работы, в том числе: публикации в зарубежных журналах – 7; в журналах из перечня ВАК – 3; в материалах конференций и других изданий – 13.

Основные положения диссертации докладывались на международных конференциях: «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (Севастополь, 2007, 2009, 2012, 2013); «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (Севастополь, 2009, 2010, 2011); «Реализация федеральных целевых программ» (Севастополь, 2015); «Проблемы и перспективы инновационного развития экономики» (Алушта, 2018); «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018» (Севастополь, 2018); научном семинаре в Институте ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета в 2018 г.

Тематика работы отвечает «Энергетической стратегии России на период до 2035 г.» и направлена на решение задач из Распоряжений Правительства РФ №1-р от 08.01.2009 «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020

г.», №1830-р «Об утверждении плана мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в России» от 01.12.2009.

Работа отвечает Постановлению Совета министров Республики Крым от 09.04.2015 N 186 (ред. от 19.01.2016) «Об утверждении Государственной программы «Развитие топливно-энергетического комплекса Республики Крым на 2015 – 2017 годы».

Личный вклад автора. Модели, алгоритмы и программное обеспечение, эксперименты, проведенные на имитационных моделях, анализ и интерпретация результатов экспериментов, представленные в диссертации, получены автором лично.

Выбор приоритетов, направлений, методов исследования, формирование структуры и содержания работы выполнены автором лично.

В перечисленных работах соискателем лично получены следующие результаты:

- в работе [1,19] разработан критерий согласованного доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного методов принятия управляющих решений по управлению;
- в работе [2,23] предложено оптимальное управление ветроэнергетической установкой на основе критерия по поддержанию номинального значения угловой скорости ветроколеса за счет своевременной установки угла положения лопастей в соответствии с оценкой изменений метеорологических и электроэнергетических условий.
- в работе [4,15] рассмотрены вопросы повышения эффективности управления ветротурбиной, разработана математическая зависимость угловой скорости ветроколеса от скорости ветра и угла поворота лопасти;
- в работе [5,11,12] разработан метод оценки времени включения двигателя привода угла питча лопасти в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии на последующем отрезке времени с учетом инерционности системы и постоянной времени переходного процесса;
- в работе [3,6,16] предложен метод повышения эффективности управления ветроустановкой на основе минимизации времени переходного процесса;
- в работе [7,13,18] разработана система линейных дифференциальных уравнений для автоматического регулирования с учетом влияния скорости ветра и времени запаздывания по регулированию;
- в работе [8,17] обоснован выбор математической модели оценки скорости ветра и величины потребляемой электроэнергии. Предложен интервал времени оценки внешних возмущающих воздействий;
- в работе [9,10,21] проведено исследование на пригодность предложенной математической модели угловой скорости ветроколеса для ветроагрегатов с горизонтальной осью вращения;
- в работе [11,12] предложена методика для своевременного изменения положения лопастей на основе оценки времени включения двигателя привода угла питча лопасти;

– в работе [14,20,22] разработаны принципы и система автоматизированного управления ветроустановкой на базе оценки ветра и мощности потребляемой электроэнергии.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения шести глав и заключения, списка литературы и приложений. Изложена, на 208 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок, 11 таблиц, приложение содержит 42 страницы. Библиографический список включает 94 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель, объект, предмет и методы исследования, определены задачи, подлежащие решению. Обозначена научная новизна и практические результаты, выносимые на защиту. Приведены апробации результатов исследований

В первой главе исследованы и проанализированы пути повышения эффективности автоматизированного управления ВЭУ с позиций повышения стабильности угловой скорости ротора ветроколеса с целью обеспечения надёжности и продолжительности безаварийного функционирования ветроэлектрических агрегатов, экономии производимой электроэнергии при собственном потреблении, эффективности использования энергии ветра, и обоснованы основные пути решения поставленных задач.

Для корректности предложенного метода в качестве примера исследована автоматизированная организационно-техническая система управления ветроэнергетической установкой USW56–100 фирмы «KENETECH WIND POWER», проведен анализ существующего подхода по управлению исследуемой ветротурбины и других имеющихся подходов к проблеме повышения эффективности функционирования ветроэнергетических установок. Анализ систем управления угловым положением лопастей ВЭУ USW56–100 свидетельствует о том, что в основе управления лежит принцип измерения скорости ветра по одному из двух вариантов:

– сравнения частоты вращения лопастей и вмонтированного кварцованного генератора базовой частоты с дальнейшей передачей команды выполняющим органам (электрическим или гидравлическим) на изменение угла положения лопастей, пропорционально измеренному разногласию частот. При такой схеме, рабочим органом, который измеряет скорость ветра, является ротор ветротурбины;

– управление угловым положением лопастей производится на основе измерителя скорости ветра, то есть, при каждом минимальном изменении скорости ветра ставится в соответствие минимальное изменение угла положения лопасти (минимум функционалу управления). При такой схеме, рабочим органом, который измеряет скорость ветра, является анемометр.

Представленные методы по подготовке информации для реализации управления указывают на необходимость модификации и разработки более

эффективного управления, способствующего минимизации времени переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветроколеса и уменьшения динамических нагрузок на основные элементы конструкции в процессе эксплуатации.

Указывается, что в отрасли теории и практики построения систем автоматического управления ветроэлектрической установкой для уменьшения аэродинамических и электромеханических нагрузок на силовые элементы конструкции в процессе эксплуатации накоплен существенный положительный опыт. Вопрос автоматизации и оптимизации таких процессов отображен в работах В.П. Васько, В.С. Козина, О.О. Тихевича, Д.В. Легошина, А.В. Серебрякова, Т.У. Еникеева, М.Б. Кудлика, В. В. Гайдачука, Л.В. Гловача, Н.Г. Поповича, Н.Н. Бондаренко и др.

На основе аналитического обзора работ по вопросам автоматизированного управления ветроэнергетической установкой сделан вывод о том, что большинство из них реализовано на основе применения классических подходов управления, где принятие решений по управлению осуществляется на основе информации об уже сформировавшемся рассогласовании фактической и установленной угловой скорости ротора. Вместе с тем известно, что такие системы не всегда могут обеспечить необходимое качество управления, особенно в условиях нестационарности, инерционности, запаздывания, случайных возмущений.

Обосновано, что разработка более эффективного управления путем обеспечения своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям за счет упреждения характеристик метеорологических и электроэнергетических условий, а также учета динамических свойств системы, позволяет уменьшить время переходного процесса регулирования угловой скорости ветроколеса. По результатам изучения и анализа вопросов повышения эффективности автоматизированного управления ветроэнергетической установкой сформулированы задачи исследования и рассмотрены новые методы управления.

Во второй главе осуществлен подход по разработке математической зависимости угловой скорости ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти. Для решения задачи были использованы такие параметры, как уравнение связи ширины лопасти и коэффициента подъемной силы с деформацией потока:

$$1) \quad i b C_y = 8\pi \frac{e}{(1+e)(1-e)^2 (Z_u + \mu) \sqrt{1+Z_u^2}},$$

где e – коэффициент торможения; Z – коэффициент быстроходности; C_p – коэффициент использования энергии ветра; C_y – коэффициент подъемной силы; Z_u – относительное число модулей; μ – обратное качество крыла; b – ширина лопасти; i – количество лопастей;

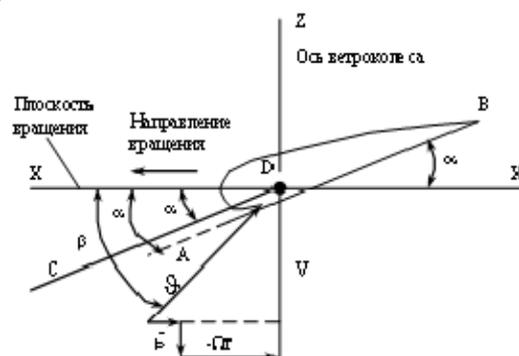


Рисунок. 1. План скоростей воздушного потока

2) план скоростей воздушного потока (рисунок 1), на котором приняты следующие обозначения: V – скорость ветра; \mathcal{Q} – относительная скорость ветра; β – угол между плоскостью вращения ветроколеса и направлением воздушного потока.

В результате получена математическая модель исследуемой ветроустановки, характеризующая зависимость угловой скорости ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти:

$$\Omega = 119 \frac{Ze}{rib(1-e^2)} \frac{V}{\alpha}, \quad (1)$$

где r – радиус ветроколеса, Z – коэффициент быстроходности, e – коэффициент торможения, b – ширина лопасти, i – количество лопастей.

В третьей главе разработана математическая модель оценки времени включения привода питча, в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии с учетом постоянной времени переходного процесса и инерционности системы:

$$T_{вкл.} = t_{i+1} + \left(\left(\ln \left(K_1 - K_2 \frac{V_{t_{i+1}}}{V_{t_i}} \right) + \ln \left(K_1 - K_2 \frac{P_{t_i}}{P_{t_{i+1}}} \right) \right) K_3 J - t_{пост.вр.} \right), \quad (2)$$

$$\text{где: } K_1 = \frac{0,0067i_p e}{0,0067i_p e - 1 \times 10^{-5} rib(1-e^2) \Omega_n}; \quad K_2 = \frac{1 \times 10^{-5} rib(1-e^2) \Omega_n}{0,0067i_p e - 1 \times 10^{-5} rib(1-e^2) \Omega_n};$$

$$K_3 = \frac{1 \times 10^{-5} r^3 i^2 b^2 (1-e^2) \Omega_n}{i_p e}.$$

В выражении (2) приняты следующие обозначения: $T_{вкл.}$ – расчетное время включения двигателя привода питча; t_{i+1} – последующий отрезок времени оценки скорости ветра; V_{i+1} – предполагаемое значение скорости ветра; V_{t_i} – текущее значение скорости ветра; P_{t_i} – текущее значение потребляемой мощности; $P_{t_{i+1}}$ – предполагаемое значение потребляемой мощности; J – приведенный момент инерции; $t_{пост.вр.}$ – время разворота лопастей; K_1, K_2, K_3 – расчетные коэффициенты, характеризующие параметры ветротурбины; Ω_n – задающее значение угловой скорости ветроколеса; i_p – передаточное число редуктора; r – длина лопасти; b – ширина лопасти; e – коэффициент торможения.

В связи с тем, что система обладает большой инерционностью, определение параметра времени $T_{вкл.}$ является ключевым моментом повышения эффективности функционирования ветроэнергетической установки. На отрезке времени t_{i+1} известные предполагаемые значения скорости ветра V_{i+1} и потребляемой мощности $P_{t_{i+1}}$ еще не дают полноту информации о данных параметрах, так как приведенный момент инерции J и время разворота лопастей $t_{пост.вр.}$ также влияют на угловую скорость ветроколеса Ω .

В таблице 2 представлены результаты тестирования формулы (2) при различных вариантах ΔV и ΔP .

Таблица 2 – Результаты тестирования.

№ п/п	t_{i+1} , с	V_{i+1} , м/с	ΔV , м/с	P_{i+1} , кВт	ΔP , кВт	$T_{вкл.}$, с	$T_{без-оц.}$, с	$t_{зап.}$, с
1	0	8	$\Delta V=0$	110	$\Delta P=0$	0	0	0
2	20	10	$\Delta V>0$	110	$\Delta P=0$	11	20	9
3	40	10	$\Delta V=0$	90	$\Delta P<0$	32	40	8
4	60	12	$\Delta V>0$	77	$\Delta P<0$	47	60	13
5	80	14	$\Delta V>0$	80	$\Delta P>0$	75	80	5
6	100	12	$\Delta V<0$	75	$\Delta P<0$	102	100	-1
7	120	10	$\Delta V<0$	75	$\Delta P=0$	125	120	-4
8	140	10	$\Delta V=0$	93	$\Delta P>0$	146	140	-5
9	160	9	$\Delta V<0$	110	$\Delta P>0$	168	160	-7

По полученным результатам для различных комбинаций изменения скорости ветра ΔV и потребляемой мощности ΔP можно сделать следующие выводы:

1) максимальное запаздывание наблюдается в случае, когда скорость ветра изменяется в большую сторону, а мощность потребляемой энергии изменяется в сторону уменьшения (строка 4 таблицы 2). Рассматриваемый фактор характеризуется такой комбинацией изменения внешних возмущающих воздействий, когда приведенный момент инерции, выступающий в роли тормозного усилия, возникает при одновременном изменении скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии;

2) запаздывание, не влияющее на переходный процесс, наблюдается только в том случае, когда скорость ветра изменяется в меньшую сторону, а потребляемая мощность изменяется в сторону увеличения или остается постоянной; либо при изменении мощности потребляемой электроэнергии в большую сторону, вне зависимости от скорости ветра (строки 7, 8, 9 таблицы 2). Это связано с тем, что при таких комбинациях присутствует только приведенный момент инерции, характеризующийся как движущее усилие.

В четвертой главе проведен анализ влияния запаздывания включения двигателя привода питча на время переходного процесса, в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии.

Для решения задачи использовалась Simulink-модель, разработана на основе системы дифференциальных уравнений для автоматического регулирования с запаздыванием:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Omega}{\partial t} - 0,00008 \Delta \Omega = 0,000001 \Delta V - 0,0000002 \Delta \alpha - 0,00000005 \Delta P, \\ \Delta \alpha_{t_{i+1}-T_{вкл.V.P.}} = 123,233(\Delta \Omega) + 11,988 \int_t (\Delta \Omega) dt - 3,864 \frac{\partial}{\partial t} (\Delta \Omega) J. \end{cases} \quad (3)$$

На рисунке 2 представлен график регулирования угловой скорости ветроколеса с нулевым запаздыванием, на рисунке 3 – график регулирования с запаздыванием: $t_{зан} = 13с$.

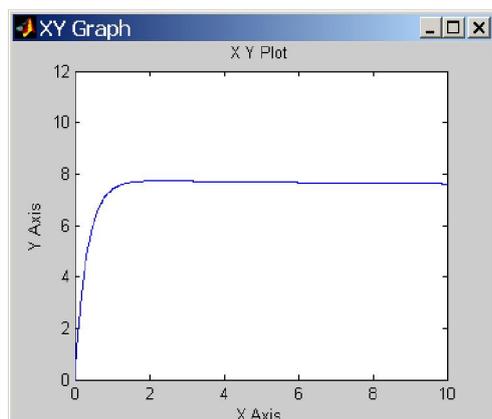


Рисунок 2 – График регулирования угловой скорости ветроколеса без запаздывания

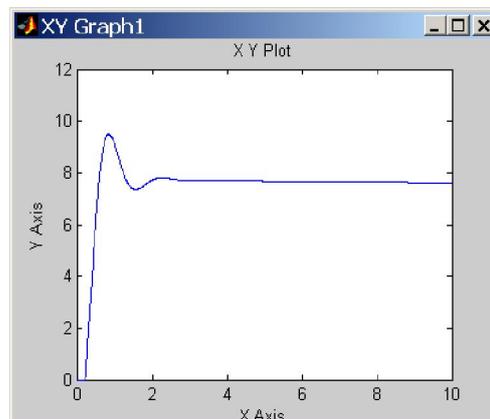


Рисунок 3 – График регулирования угловой скорости ветроколеса с запаздыванием 13с.

В **пятой главе** предложена подсистема оценки изменения угловой скорости ветроколеса и угла положения лопасти. Оценка скорости ветра в автоматизированной системе управления ветроэнергетической установкой является необходимым элементом для разработки математической модели, оценки изменения угловой скорости ветроколеса.

Для решения рассматриваемой задачи в диссертационной работе использован метод оценки случайных метеорологических процессов, который реализует подход к их анализу посредством разложения в ряд полинома Чебышева. Осуществляемое разложение случайных метеорологических процессов в ряд по полиномам Чебышева аппроксимирует кривую процесса с большей точностью, формируя ее таким образом, чтобы обеспечивать минимальные отклонения от исходного процесса на всем интервале измерений. Разложение случайного процесса в ряд по полиномам записано следующим образом:

$$Y(\tau) = A_0\psi_0(\tau) + A_1\psi_1(\tau) + \dots + A_i\psi_i(\tau) + \dots, \quad (4)$$

где через A_i обозначены коэффициенты разложения, определяемые на основе измеренных значений скорости ветра и известных значений полиномов в этих точках, ψ_i – полиномы, представляющие собой параболы i -го порядка.

Вычисление коэффициентов A_i ряда выполняется по формуле:

$$A_i = \frac{\sum_{m=1}^n Y(\tau_m)\psi_i(\tau_m)}{\sum_{m=1}^n \psi_i^2(\tau_m)}. \quad (5)$$

Здесь индексом m обозначен номер временного отсчета, когда проводилось измерение значения случайного метеорологического процесса, определяемого в (4) через $Y(\tau_m)$, i – индекс члена ряда разложения.

Полиномы Чебышева различных порядков выражены в соответствии с формулами:

$$\psi_0 = 1; \psi_1 = \tau - \frac{n+1}{2}; \psi_2 = \psi_1^2 - \frac{n^2-1}{12},$$

Выражение для расчета полиномов любого порядка имеет вид:

$$\psi_{k+1} = \psi_1 \psi_k - \frac{k^2(n^2 - k^2)}{4(4k^2 - 1)} \psi_{k-1}, \quad (6)$$

где n – число точек, в которых задано значение случайного процесса, τ – номер точки, принимающий значение $1, 2, \dots, n$.

Среднее квадратичное отклонение ошибки аппроксимации определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n [Y_i(\tau) - Y_n(\tau)]^2}{n-1}}, \quad (7)$$

где $Y_n(\tau) = \sum_{m=1}^n A_k \psi_k(\tau)$ – сумма первых p членов ряда; $Y_i(\tau)$ – замеры метеопараметра; n – количество замеров.

Мощность потребляемой электроэнергии, как и скорость ветра, является случайной величиной, следовательно, предложенный метод оценки метеоусловий может быть использован и для нагрузки.

Выполнено описание математической модели оценки угловой скорости ветроколеса и угла положения лопасти:

1) изменение угловой скорости ветроколеса на последующем интервале времени:

$$\Omega_{t_{i+1}} = 119 \frac{Ze}{rib(1-e^2)} \frac{V_{t_{i+1}}}{\alpha_{t_i}} + \frac{\Omega_{\Gamma.t_i}}{i_p} \left(\frac{P_{t_i}}{P_{t_{i+1}}} - 1 \right), \quad (8)$$

где $\Omega_{\Gamma.t_i}$ – угловая скорость ротора генератора; i_p – передаточное число редуктора.

2) изменение угла положения лопасти на том же отрезке времени:

$$\alpha_{t_{i+1}} = 119 \frac{Zi_p e}{rib(1-e^2)} \frac{V_{t_{i+1}}}{\Omega_{\Gamma.n.}} + \alpha_{t_i} \left(\frac{P_{t_i}}{P_{t_{i+1}}} - 1 \right). \quad (9)$$

Получен критерий по формированию согласованного доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и существующего основных методов принятия управляющих решений. Данным критерием является изменение угловой скорости ветротурбины в большую или в меньшую сторону с учетом заданной погрешности на упреждающем интервале времени. Таким образом, при изменении угловой скорости в большую сторону с ошибкой, превышающей допустимую, управляющие решения принимаются со стороны предложенного метода управления с учетом динамических свойств системы, обусловленных проявлением приведенного момента инерции, выступающего в роли тормозного усилия который препятствует возвращению угловой скорости к ее номинальному

значению, и временем разворота лопастей. В случае, когда угловая скорость уменьшилась или увеличилась с ошибкой, не превышающей допустимую, управляющие решения принимаются со стороны существующего основного метода управления. Для ветроагрегатов типа: USW56–100; ТГ–750; ТГ–1000; ТГ–2500, допустимая ошибка скорости вращения ветроколеса составляет: 2%.

Определен интервал времени выборки измеренных значений случайного процесса, в основе разработки которого лежит организация эффективной совместной работы предложенного и существующего методов управления ветротурбиной, обусловленной разграничением времени доступа к двигателю привода угла pitch лопасти со стороны рассматриваемых способов выработки управляющих воздействий. Так как контроль выходных, управляемых параметров со стороны предложенного метода управления не производится, а результаты тестирования формулы оценки времени включения двигателя привода угла pitch лопасти показали, что максимальный интервал предупреждения внешних возмущений может составить $\Delta t=13\text{с}$, то в качестве номинального отрезка времени следует принять $\Delta t=10\text{с}$, длительность которого обеспечивает получение устойчивых значений средней скорости ветра, для подготовки системы к внешним возмущениям, и с целью повышения точности оценки обеспечит минимальный промежуток времени предупреждения $\Delta t>0$, нахождения реализации процесса в момент времени $\tau+\Delta t=t_{i+1}$.

Определено число точек для оценки случайного процесса. И согласно предложенному методу оценки число точек, в которых задано значение случайного процесса, составит $n=6$, а расстояние между замерами $\Delta t=10\text{с}$. Скорость ветра имеет различный характер изменения, следовательно, расстояние между замерами $\Delta t=10\text{с}$ может привести к большой дисперсии и, согласно выражению (7), к увеличению ошибки аппроксимации, что негативно влияет на точность оценки. Для решения данной задачи число отсчетов на интервале $\Delta t=10\text{с}$ следует увеличить и принять $n'=10$. Тогда расстояние между замерами τ уменьшится и составит $\tau'=1\text{с}$. Таким образом, для точек, в которых задано значение случайного процесса ($n=6$), суммарное время составит $\Sigma\Delta t=60\text{с}$, а число замеров $\Sigma n'=60\text{с}$.

Так как оценка случайного процесса реализуется программно, то измеренные значения записываются и сохраняются в файле, и могут использоваться для последующих интервалов оценки. Предложенный подход решает задачу минимизации времени контроля выходных, управляемых параметров со стороны основного метода управления, т.е. на начальном этапе такой контроль осуществляется на отрезке времени $\Sigma\Delta t'_1=60\text{с}$, а в последующих интервалах составит $\Delta t'_2=10\text{с}$.

Разработана компьютерная программа, реализующая предложенные алгоритмы, способствующие повысить эффективность функционирования ветроэнергетической установки на основе предлагаемого подхода принятия управляющих решений.

В шестой главе предложена структурная схема автоматизированной системы управления, образующая задающее устройство системы управления ВЭУ, дополнительными элементами которой являются подсистемы: оценки скорости ветра; потребляемой электроэнергии; моделирования угловой скорости ветроколеса и угла положения лопасти; оценки времени включения двигателя привода питча. На основе информации о требуемой и измеренной угловой скорости ветроколеса, угла положения лопасти и времени включения двигателя привода питча на будущем отрезке времени, подсистемой интеллектуальной поддержки принятия решений формируются рекомендации по управлению.

Алгоритм, методики автоматизированного управления угловой скоростью ветроколеса предложенный в работе состоит из следующих шагов:

- сбор в течение заданного промежутка времени информации о характеристиках скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии;
- краткосрочное оценивание скорости ветра и потребляемой электроэнергии на следующий интервал времени на основании замеренных данных за предыдущий период;
- моделирование уровня угловой скорости ветроколеса на основе оценки значения скорости ветра, потребляемой электроэнергии и сравнение с задающим значением угловой скорости ветроколеса в пределах точного регулирования;
- моделирование требуемого значения угла положения лопасти на основе предполагаемого значения скорости ветра и потребляемой электроэнергии;
- оценка времени включения двигателя привода питча в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии, с учетом постоянной времени разворота лопастей и времени инерции системы;
- реализация управляющих воздействий на изменение угловой скорости;
- согласованный доступ к устройству изменения положения лопастей со стороны предложенного и существующего основного методов управления;
- подготовка рекомендаций по управлению угловой скоростью ветроколеса для принятия правильных решений.

Если смоделированная угловая скорость отличается от задающих пределов точного регулирования, то принимается решение по развороту лопастей на требуемый угол в полученное расчетное время, в противном случае принимается решение о работе системы в прежнем режиме, и управляющие воздействия не принимаются.

Обоснована структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления ветроэнергетической установки, непосредственно реализующей предложенный метод, и определено, что основными средствами реализации алгоритма управления угловой скоростью ветроколеса являются следующие подсистемы: оценки скорости ветра и потребляемой мощности; моделирования угловой скорости ветроколеса; определения требуемого значения угла положения лопасти; оценки времени включения двигателя привода питча. Реализация названных основных компонент

автоматизированной системы, выполненная в рамках диссертационной работы, определяет возможность реализации системы.

Приведено описание следующих основных задач, возлагающихся на систему управления:

1. Оперативный сбор и оценка поступающей информации о текущем значении скорости ветра и нагрузки.

2. Краткосрочное оценивание на основании замеренной информации о скорости ветра и нагрузки, условий изменения угловой скорости на будущий период времени.

3. Формирование оперативной оценки об изменении угловой скорости и угла положения лопасти.

4. Определение времени включения двигателя привода питча.

5. На основе подготовленной информации изменения угловой скорости, требуемого значения угла положения лопасти и времени включения двигателя привода питча – реализация функций интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению, направленных на включение устройства изменения положения лопастей на требуемый угол и в установленное время.

6. Организация доступа к устройству разворота лопастей со стороны, предложенного и существующего методов управления.

7. Контроль угловой скорости ротора генератора и выходной мощности электроэнергии, поддержание их на уровне требуемых значений.

Разработаны мероприятия по обеспечению продолжительности надёжного функционирования деталей механизмов ВЭУ, обеспечению стабильности частоты вращения ветроколеса, экономии электроэнергии при собственном потреблении, эффективности использования энергии ветра, за счет уменьшения количества включений, устройства изменения положения лопастей, и определяется таким образом, что неустановившейся режим, представленный на рисунке 3, составляет 60с. А согласно технической документации периодичность включений двигателя составляет 4с. Следовательно, предложенное управление в 15 раз уменьшает количество включений двигателя разворота лопастей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научной работой, в которой решена актуальная научная задача, состоящая в разработке принципов, методов и структуры модернизированной системы автоматизированного управления ВЭУ. Недостатком существующих подходов к управлению ВЭУ является несвоевременность изменения положения лопастей в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии. Такое управление не обеспечивает оперативности выработки управляющих воздействий, направленных на поддержку номинального значения угловой скорости ротора ветроколеса в условиях переменных метеорологических и электроэнергетических условий и негативно отражается на показателях надежности составляющих частей современных ветроустановок, а также на энергоэффективности технологического процесса. Данная задача решена за

счет упреждения характеристик метеорологических и электроэнергетических условий и учета динамических свойств системы, что обеспечивает повышение стабильности частоты вращения ветроколеса, уменьшает динамические нагрузки на основные элементы конструкции и способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ВЭУ.

Основные научные и практические результаты работы можно обобщить в следующих выводах:

1. Установлено, что задачей создания автоматизированной системы управления ветроэнергетической установкой является определение и применение законов и параметров, которые обеспечивают своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям за счет упреждения характеристик внешней среды, которые обеспечивают повышение стабильности частоты вращения ротора ветроколеса, уменьшают динамические нагрузки на основные элементы конструкции в процессе эксплуатации. Такое управление способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ВЭУ в условиях неполной информации о принятии управляющих воздействий, а направлением исследований является решение задачи по созданию модифицированной автоматизированной системы управления ВЭУ и, в соответствии с ней, разработка новой структурной схемы автоматизированной системы управления.

2. Усовершенствована математическая модель процесса производства электроэнергии ВЭУ, отличающаяся тем, что метеопараметр, определяющий характер зависимости угловой скорости ротора ветроколеса от скорости ветра и угла положения лопасти выбирается с возможностью заблаговременного определения изменения частоты вращения ветроколеса, что способствует учету динамических свойств системы для повышения оперативности принятия управляющих решений при переменных характеристиках метеорологических условий. При этом наличие коэффициента в предложенной формуле (8) обеспечивает понижение кубической степени метеопараметра до единицы, что дает возможность получить линейную зависимость скорости вращения ротора в соответствии с изменением скорости ветра, угла положения лопасти и величины потребляемой электроэнергии.

3. Впервые разработан метод оценки времени включения двигателя привода угла pitch лопасти в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии на предполагаемом интервале времени, с учетом инерционности системы и постоянной времени разворота лопастей, что позволяет обеспечить своевременную установку лопастей на необходимый угол для повышения стабильности частоты вращения ротора ветроколеса.

4. Усовершенствован метод автоматизированного управления процессом производства электроэнергии ветроэнергетической установкой путем формирования угловой скорости ротора ветроколеса и угла положения лопасти на основе упреждения изменений скорости ветра и величины потребляемой электроэнергии на малые промежутки времени

(среднеквадратическая ошибка математического ожидания метеопараметра не превышает 4%).

5. Организация интервала, в течение которого осуществляется осреднение измеренных значений, производится с помощью учета хронологии характера изменения внешней среды, с целью минимизации времени контроля выходных управляемых параметров, которое реализуется согласно критерию формирования доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного методов принятия управляющих решений, что дает возможность повысить стабильность частоты вращения ротора ветротурбины за счет уменьшения продолжительности переходного процесса в среднем в два раза.

6. Разработан критерий согласованного доступа к двигателю привода угла питча лопасти со стороны предложенного и основного методов принятия управляющих решений, учитывающий динамические свойства работы ветроэлектрического агрегата для повышения качества управления технологическим процессом. Данным критерием является изменение угловой скорости ветротурбины в большую или в меньшую сторону с учетом заданной погрешности на упреждающем интервале времени.

7. Получила дальнейшее развитие структурная схема автоматизированной системы управления ветроэнергетической установкой, отличием которой от существующих систем является введение в ее состав ряда подсистем: оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии, как внешних возмущающих воздействий; моделирования угловой скорости ротора ветроколеса; определения требуемого значения угла положения лопасти на последующем интервале; оценки параметра времени включения двигателя привода угла питча лопасти, выполняющих функции задающего устройства, осуществляющих подготовку информации для функционирующей подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению.

8. По результатам анализа моделирования регулирования угловой скорости ротора получен вывод о том, что регулирование угловой скорости с запаздыванием $t_{\text{зап.}}=9\text{с}$ и выше ведет к увеличению времени переходного процесса, что вызывает следующие негативные факторы: появление аэродинамических ударов и увеличение нагрузки на ротор, привод питча, лопасть и зубчатую передачу привода; нарушение стабильности частоты вращения ротора ветроколеса; избыточность количества включений двигателя привода питча и отсутствие экономии электроэнергии при собственном потреблении; отсутствие эффективности использования энергии ветра.

9. На основе полученных результатов тестирования математической модели, для повышения стабильности установленного значения угловой скорости ветроколеса, разработан и программно реализован алгоритм функционирования задающего устройства автоматизированной системы управления ветроэнергетической установкой. Алгоритм позволяет по оценочным значениям скорости ветра, мощности потребляемой электроэнергии и значениям изменения угловой скорости ветроколеса определять требуемое значения угла положения лопасти, время включения двигателя привода питча, и осуществлять согласованный доступ к устройству

изменения положения лопастей со стороны предложенного и существующего методов по принятию управляющих решений.

10. Результаты работы использованы для дальнейшего проектирования и освоения алгоритмического обеспечения систем автоматического управления для повышения стабильности угловой скорости ВЭУ на Сакской ветроэлектростанции в Крыму.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Буяльский В.И. Комбинированный метод управления ветротурбиной. / В.И. Буяльский // Энергетик. – 2016. – №4. – С. 18 – 20.

2. Буяльский В.И. Оптимальное управление ветроэнергетической установкой. / В.И. Буяльский, Н.М. Шайтор, Б.И. Якимович // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – том 16. – №3. – С. 70 – 77.

3. Буяльский В.И. Методы повышения стабильности скорости вращения ротора ветротурбины. / В.И. Буяльский, Н.М. Шайтор // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – № 4. – С. 166 – 173.

В прочих изданиях

4. Буяльский В.И. Повышение эффективности управления ветроэнергетической установкой / В.И. Буяльский // Вестник СевГТУ сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. трудов – Севастополь, 2008. – Вып. 88. – С 152 –156.

5. Буяльский В.И. Оценка параметра времени включения двигателя привода угла питча лопасти для ветротурбины USW56–100 / В.И. Буяльский // Вісник СевНТУ сер. Механіка, енергетика, екологія: сб. науч. трудов – Севастополь, 2010. – Вып. 106. – С 114 –119.

6. Буяльский В.И. Оптимизация системы автоматического управления ветроэнергетической установкой USW56–100 / В.И. Буяльский // Вісник СевНТУ сер. Оптимізація виробничих процесів: сб. науч. трудов – Севастополь, 2010. – Вып. 12. – С 164 –167.

7. Буяльский В.И. Моделирование системы автоматического с постоянным запаздыванием для ветротурбины USW56–100 / В.И. Буяльский // Вісник СевНТУ Сер. Автоматизація процесів та управління: сб. науч. трудов – Севастополь, 2010. – Вип. 108. – С 153 – 157.

8. Буяльский В.И. Моделирование системы автоматического регулирования с постоянным запаздыванием, с учетом нагрузки / В.И. Буяльский // Вісник СевНТУ Сер. Автоматизація процесів та управління: сб. науч. трудов – Севастополь, 2012. – Вип. 125. – С 42 – 48.

9. Буяльский В.И. Методы повышения эффективности управления ветротурбиной / В.И. Буяльский // Международный электротехнический журнал. Электрик №6 Киев 2013г. – С. 36 – 41.

10. Буяльский В.И. Метод повышения эффективности управления режимом работы ветротурбины / В.И. Буяльский // Энергетик. – 2013. – №9. – С. 34 – 37.

11. Буяльский В.И. Методика своевременного изменения положения лопастей ветротурбины USW56–100 / В.И. Буяльский // Международный электротехнический журнал. Электрик №10 Киев 2013г. – С. 42 – 44.

12. Буяльский В.И. Методика для устранения запаздывания включения устройства разворота лопастей ветротурбины. / В.И. Буяльский // Энергетик. – 2014. – №5. – С. 33 – 35.

13. Буяльский В.И. Компьютерное моделирование регулирования запаздывания угловой скорости ветроколеса. / В.И. Буяльский // Энергетик. – 2014. – №12. – С. 27 – 29.

14. Буяльский В.И. Автоматизированная система управления ветроэнергетической установкой на базе прогнозирования скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии. / В.И. Буяльский // Международный научный журнал Наука и мир №9 (49) Волгоград, 2017 г. – С. 14 – 19.

15. Буяльский В.И. Повышение эффективности управления ветроэнергетической установкой / В.И. Буяльский // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: сборник материалов международной научно-технической. конференции, Севастополь, 2007. – С. 166 – 169.

16. Буяльский В.И. Усовершенствование системы автоматического управления ветроэнергетической установкой USW56–100, применительно к локальной сети / В.И. Буяльский // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник материалов международной научно-технической. конференции, Севастополь, 2009. – С. 252 – 254.

17. Буяльский В.И. Усовершенствование системы автоматического управления ветроэнергетической установкой USW56–100, применительно к локальной сети / В.И. Буяльский // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: сборник материалов международной научно-технической. конференции, Севастополь, 2009. – С. 111 – 115.

18. Буяльский В.И. Моделирование системы автоматического регулирования с постоянным запаздыванием для ветротурбины USW56–100 / В.И. Буяльский // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник материалов международной научно-технической. конференции, Севастополь, 2010. – С. 141 – 144.

19. Буяльский В.И. Разграничение времени доступа к устройству изменения положения лопастей со стороны предложенного и существующего методов управления ветроэнергетической установкой USW56–100 / В.И. Буяльский // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник материалов международной научно-технической. конференции, Севастополь, 2011. – С. 214 – 216.

20. Буяльский В.И. Методика оперативного прогноза скорости ветра и потребляемой мощности для ветротурбины USW56–100 / В.И. Буяльский //

Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: сборник материалов международной научно-технической конференции, Севастополь, 2012. – С. 171 – 176.

21. Буяльский В.И. Исследование на пригодность в использовании предложенной математической модели угловой скорости ветроколеса для ветротурбин с горизонтальной осью вращения / В.И. Буяльский // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: сборник материалов международной научно-технической конференции, Севастополь, 2013. – С. 36 – 41.

22. Буяльский В.И. Система управления ветротурбиной на базе прогнозирования скорости ветра мощности потребляемой электроэнергии / В.И. Буяльский // Сборник материалов научно-технической конференции с представителями сектора исследований и разработок, коммерческого сектора, высшего профессионального образования Крымского федерального округа в рамках участия в 2015 году в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий, заказчиком которых является Минобрнауки России, Севастополь, 2017. С. 35 – 39.

23. Буяльский В.И. Обеспечение продолжительного функционирования деталей механизмов ветроэнергетической установки на основе своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям / В.И. Буяльский, Н.М. Шайтор // Проблемы и перспективы инновационного развития экономики: сборник материалов международной научно-практической конференции, Алушта, 2018. – С. 208 – 214.

В авторской редакции

Подписано в печать 11.01.2018. Усл. печ. Л. 1,40. Заказ № 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Издательства ИжГТУ. 426069, Ижевск,

Студенческая, 7.