

На правах рукописи



**Мартьянов Андрей Сергеевич**

**Исследование алгоритмов управления  
и разработка контроллера ветроэнергетической  
установки с вертикальной осью вращения**

Специальность 05.09.03 — «Электротехнические  
комплексы и системы»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск — 2016

Работа выполнена на кафедре электротехники и возобновляемых источников энергии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

- Научный руководитель: **Соломин Евгений Викторович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).
- Официальные оппоненты: **Зюзов Анатолий Михайлович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург.  
**Зубова Наталья Владиславовна**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры систем электроснабжения предприятий ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), г. Новосибирск.
- Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск.

Защита состоится «08» апреля 2016 г., в 10:00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) и на официальном сайте ЮУрГУ:

<http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/martyanov-andrey-sergeevich>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351) 267-91-72, e-mail: [grigorevma@susu.ac.ru](mailto:grigorevma@susu.ac.ru).

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.298.05, д.т.н., доцент

Григорьев  
Максим Анатольевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Ветроэнергетика за последние несколько десятилетий выделилась в ряде стран в отдельные отрасли энергетических хозяйств, успешно конкурирующих с традиционной энергетикой. Основное внимание уделяется ветроэнергетическим установкам (ВЭУ) средней и большой мощности в составе сетей распределения и передачи электроэнергии. Однако в настоящее время мировой рынок малых ВЭУ также динамично развивается за счет массовых потребителей, к которым относятся объекты малоэтажного строительства, фермерские хозяйства, рыболовные артели и охотничьи угодья, системы удаленного мониторинга, дорожные осветительные системы, телекоммуникационное оборудование и другие автономные потребители электрической энергии. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является эффективное использование ветрового потенциала, которая заключается не только в улучшении аэродинамических характеристик ВЭУ, но и в увеличении производительности ВЭУ в целом.

Основной характеристикой, от которой зависит производительность ветроэнергетической установки, является коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) – отношение механической мощности ветроколеса к полной мощности набегающего потока ветра, проходящего через ометаемую площадь ветроколеса ВЭУ. Таким образом, повышение КИЭВ во всех режимах эксплуатации ВЭУ путем совершенствования различных способов управления мощностью является актуальным, и этому вопросу посвящена предлагаемая работа.

**Степень проработанности вопроса.** Повышению производительности конструкций ВЭУ посвящено множество исследований известных ученых. Н.Е. Жуковский, Ю. Прандтль и А. Бетц создали теоретические основы, объясняющие основные принципы и закономерности работы ВЭУ. Предел Жуковского-Бетца обосновывает максимально возможный коэффициент использования энергии ветра в ВЭУ, что представляет собой цель разработчиков ветроэнергетических систем. Исследованиями различных путей достижения этой цели занимались Н.В. Красовский, Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев, В.Н. Андриянов, П.П. Безруких, В.В. Елистратов, О.С. Попель, В.М. Лятхер и другие. Задачей увеличения производительности ВЭУ за счет совершенствования способов и алгоритмов управления занимались Ю.Г. Шакарян, В.З. Манусов, С.Н. Удалов, из зарубежных ученых следует выделить работы ученых Н. Bindner, A. Rebsdorf, W. Byberg, R. Hoffmann, O. Carlson, J. Nylander, H. Weuer, которыми исследованы различные способы управления. Таким образом, синтез и исследование алгоритмов управления мощностью ВЭУ являются актуальным направлением научной проблемы повышения производительности и снижения затрат на генерирование энергии, решение которой имеет научное и практическое значение.

**Объект исследования** — электротехнический комплекс на основе ветроэнергетической установки, состоящий из ветродвигателя, электрического генератора, накопителя электрической энергии и контроллера ветроэнергетической установки, использующийся в качестве изолированной системы электроснабжения.

**Предмет исследования** — влияние способов и алгоритмов управления ветроэнергетической установкой, работающей в условиях переменной скорости ветра, на ее производительность.

**Цель диссертационной работы** — разработка алгоритма управления и контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения с подтверждением результатов теоретических исследований натурными экспериментами.

Основываясь на цели исследования, сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать имитационную компьютерную модель ВЭУ с возможностью задания произвольных алгоритмов управления для исследования производительности ВЭУ в зависимости от различных способов управления и проверить ее адекватность численными экспериментами.

2. С помощью численных экспериментов над разработанной моделью ВЭУ исследовать производительность ВЭУ при применении различных способов и алгоритмов управления ветроэнергетической установкой. На основе результатов численных экспериментов разработать алгоритм управления мощностью ветроэнергетической установки, обеспечивающий высокую производительность ВЭУ при работе в широком диапазоне скоростей ветра.

3. Для проведения натуральных экспериментов разработать методику определения КИЭВ ветроэнергетической установки в условиях переменной скорости ветра.

4. Разработать и испытать контроллер ветроэнергетической установки с возможностью задания алгоритма управления мощностью ВЭУ на языке высокого уровня. Сравнить результаты натуральных испытаний контроллера ветроэнергетической установки с результатами модельных экспериментов.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использованы математический аппарат теории автоматического управления, методы математического моделирования, программный пакет MATLAB/Simulink, а также языки программирования высокого уровня C++ и Object Pascal.

**Научные положения, выносимые на защиту и их научная новизна:**

1. Предложена имитационная компьютерная модель ветроэнергетической установки, отличающаяся наличием модуля управляющего контроллера изменяемой конфигурации, задаваемой на языке высокого уровня, и предназначенная для исследования особенностей алгоритмов и способов управления ВЭУ при различных внешних воздействиях.

2. Предложена методика определения производительности ветроэнергетических установок, отличающаяся применением редуцированного наблюдателя и обеспечивающая определение КИЭВ при непрерывно изменяющейся скорости ветра.

3. Предложен алгоритм управления ветроэнергетической установкой, отличающийся использованием редуцированного наблюдателя для определения аэродинамического момента ветроколеса и предназначенный для максимизации генерируемой мощности ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов** базируется на использовании известных положений механики, аэродинамики, электромеханики, теории автоматизированного управления, методов моделирования с применением ЭВМ, и подтверждается результатами экспериментальных исследований опытных образцов.

**Практическая значимость** диссертационной работы:

– представлены результаты исследований влияния способов управления мощностью ВЭУ на производительность, полученные модельными экспериментами и продемонстрировавшие особенности работы каждого способа;

– разработана программа для дистанционного мониторинга и регистрации информации о производительности ветроэнергетической установки, обеспечивающая передачу данных на удаленный сервер для последующей обработки;

– разработан контроллер ветроэнергетической установки, обеспечивающий эффективное использование ветрового потенциала при работе в широком диапазоне скоростей ветра, который успешно прошел испытания и используется в Центре Коллективного Пользования ЮУрГУ «Ветроэнергетический комплекс»;

– результаты диссертационной работы используются в образовательном процессе ФГБОУ ВПО «Южно–Уральский государственный университет» (НИУ) (г. Челябинск), ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (г. Екатеринбург), Государственном университете Северной Калифорнии (г. Беркли, США), в исследованиях Национальной Лаборатории Лоуренс Беркли (США) через МНТЦ (РФ), Соглашение 2568р (LBNL-T2-0203 (2003 – 2006) и через АФГИР (РФ), Соглашение RUE-2-010620-СН-06 (2006 – 2009). На основе предложенных схем, алгоритмов управления и программного обеспечения разработана и внедрена система управления ветроэнергетической установкой, которая успешно прошла полевые испытания на предприятиях ООО «Промэнерго», г. Челябинск; ООО «Краст», г. Челябинск; фермерское хозяйство «Марково-1», Троицкий район Челябинской области; «Ташьян Тауэрс», Фресно, США 2011 г.; «Грин Вэйв», Акита, Япония, 2013 г.

Исследования и разработки были поддержаны грантами Министерства образования и науки РФ ГК 02.516.11.6188 (2009 – 2010 гг.),

ГК 02.516.11.6186 (2010 – 2011 гг.), соглашениями 14.V37.21.1226 и 14.516.12.0007 (2012 – 2013 гг.), грантами РФФИ (2011 – 2013 гг.), грантами МНТЦ (соглашение RUE-2-010620-CH-06 2009 – 2012 гг.), гос. субсидиями RFMEFI57714X0069 (2014–2015 гг.) и RFMEFI57714X0154 (2014–2015 гг.).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях кафедры электротехники и возобновляемых источников энергии ЮУрГУ в 2009 – 2015 гг.; на научно-технических конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ в 2009 – 2015 гг.; на научно-технических советах ООО «ГРЦ-Вертикаль» и ООО «Промэнерго»; на международном совещании Фонда им. Г.Бёлля и круглом столе «Возобновляемая энергетика: Время перемен. Возможности для региона», г. Екатеринбург, 2013 г.; на VIII международном симпозиуме «Фундаментальные и прикладные проблемы науки», с. Непряхино, Челябинская область, 2013 г.; во время стажировки в Университете Калифорнии, г. Фресно (США), 2011 г.; во время стажировки в Лаппеенрантском технологическом университете (Финляндия), 2012 г.; на международной конференции «Грин Вэйв», Акита (Япония), 2013 г.

**Соответствие паспорту специальности.** Исследования, приведенные в диссертационной работе, полностью соответствуют формуле и пунктам 1, 3 и 4 области исследования, приведенным в паспорте специальности 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы».

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 2 патента РФ на полезную модель, 1 патент на изобретение, 1 ноу-хау.

**Личный вклад автора** состоит в формулировании и доказательстве научных положений, создании компьютерных моделей и проведении численных экспериментов, непосредственном участии в разработке и испытаниях опытных и экспериментальных образцов. В опубликованных совместных работах постановка и исследование задач осуществлялись совместными усилиями соавторов при непосредственном активном участии соискателя.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации **174** страницы текста с **82** рисунками и **3** таблицами. Список литературы содержит **144** наименования.

## Краткое содержание диссертации

**Во введении** приведена краткая характеристика работы, показаны актуальность и степень разработанности темы исследования. Обозначены объект и предмет исследования, цель диссертационной работы, задачи и методы исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе** проведен исторический обзор развития ветроэнергетики, обозначены основные направления развития, определены ключевые вопросы и задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации ветроэнергетических установок.

Необходимость регулирования мощности в ветроэнергетической установке можно объяснить рабочими характеристиками ВЭУ, представляющими собой зависимость выходной мощности ВЭУ от частоты вращения для ряда постоянных скоростей вращения. На рисунке 1 показана типичная зависимость механической мощности ветроколеса, где видно, что для каждой скорости ветра существует определенная частота вращения, на которой мощность ветроколеса максимальна.

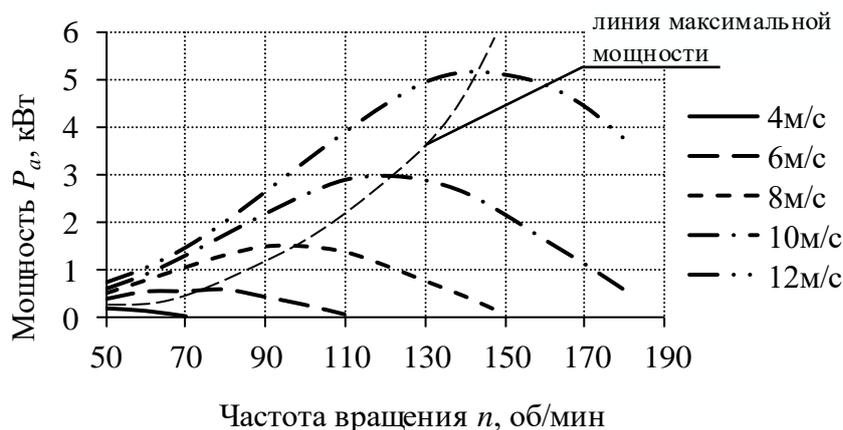


Рис. 1 — Зависимость генерируемой мощности от частоты вращения ветроколеса для разных скоростей ветра

Наибольшее распространение среди ВЭУ малой мощности получили следующие способы управления мощностью ветроэнергетической установки:

1. Работа при постоянной частоте вращения ветроколеса.
2. Работа при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса переключением обмоток генератора либо изменением передаточного отношения механической трансмиссии.

3. Работа при переменной частоте вращения ветроколеса с изменением установочного угла лопастей ветроколеса или изменением геометрических размеров ветроколеса.

4. Работа при переменной частоте вращения ветроколеса с использованием электрического преобразователя с регулятором мощности.

Анализируя эти способы управления мощностью ВЭУ было определено, что наиболее простым и распространенным способом управления является работа при постоянной частоте вращения ветроколеса. В то же время ветроэнергетические установки, работающие при таком управлении, не могут обеспечить эффективное функционирование в широком диапазоне скоростей ветра. Наиболее эффективным способом в таких условиях является работа при переменной частоте вращения ветроколеса по заданному алгоритму, при котором с изменением скорости ветра происходит изменение частоты вращения ветроколеса, обеспечивая работу ветроколеса с наибольшей производительностью. Для синтеза такого алгоритма эффективного управления мощностью ВЭУ было принято решение о разработке компьютерной модели ветроэнергетической установки, реализующей различные способы управления.

**Во второй главе** приводится описание разработанной математической модели ветроэнергетической установки, предназначенной для исследования производительности ВЭУ при использовании различных способов и алгоритмов регулирования мощности. Модель ветроэнергетической установки разработана с заранее заданным КИЭВ ветроколеса и контроллером ВЭУ с возможностью задания алгоритма управления программным путем, функциональная схема модели приведена на рисунке 2, где  $V$  — скорость ветра;  $M$  — крутящий момент ветроколеса,  $\omega$  — угловая скорость ветроколеса;  $u_g$  — напряжение на выходе генератора;  $i_g$  — ток на выходе генератора;  $u_b$  — напряжение аккумуляторной батареи;  $i_b$  — ток аккумуляторной батареи.

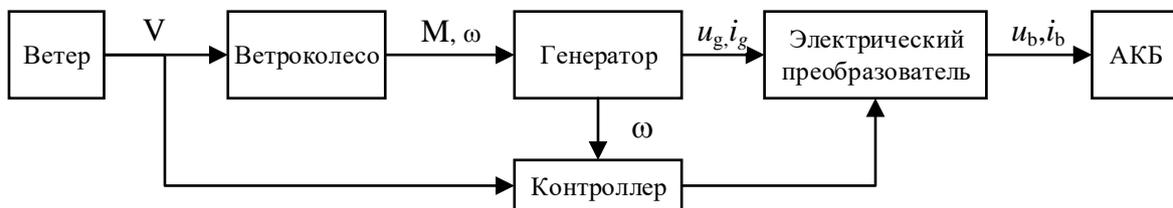


Рис. 2 — Функциональная схема имитационной модели ветроэнергетической установки

Модель ветроколеса представлена следующими уравнениями. Основное дифференциальное уравнение, описывающее динамику вращательного движения:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{эм} - M_c, \quad (1)$$

где  $J$  — момент инерции системы;  $\omega$  — угловая скорость;  $M_a$  — аэродинамический момент ветроколеса;  $M_{эм}$  — электромагнитный момент генератора;  $M_c$  — момент сопротивления потерь, учитывающий трение и другие потери. Аэродинамический момент ротора равен

$$M_a = C_P(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \omega}, \quad (2)$$

где  $C_P(Z)$  — КИЭВ (зависит от быстроходности  $Z$ );  $\rho$  — плотность воздуха;  $V$  — скорость ветра;  $S$  — ометаемая площадь;  $\omega$  — угловая скорость ветроколеса. Зависимость  $C_P$  от быстроходности  $Z$  задается функцией

$$C_P(Z) = \left( \frac{c_1}{Z} - c_2 \right) \cdot e^{-\frac{c_3}{Z}} + c_4, \quad (3)$$

где  $c_1 \dots c_4$  — коэффициенты, подбираемые для заданной конструкции ветроколеса по известной аэродинамической характеристике; быстроходность  $Z$  определяется как  $Z = \frac{\omega \cdot r}{V}$ , где  $r$  — радиус ветроколеса. Типичная зависимость  $C_P(Z)$  показана на рисунке 2(а), а зависимость мощности ветроколеса  $P_a$  от частоты вращения  $n$  для разных скоростей ветра приведена на рисунке 2(б).

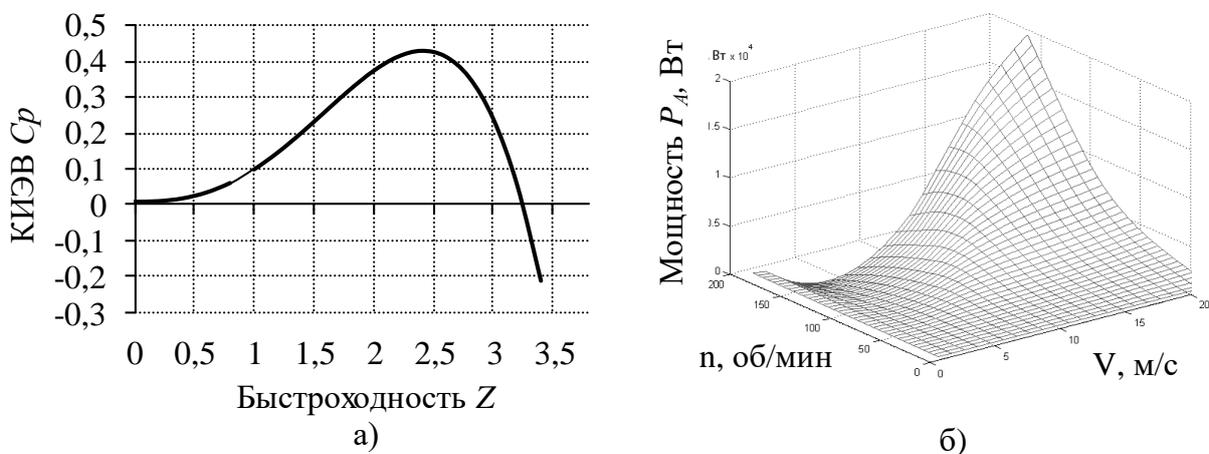


Рис. 3 — Зависимости  $C_P(Z)$ (а) и  $P_a(n, V)$ (б)

Электромагнитный момент генератора  $M_{эл}$  определяется уравнениями, описывающими работу электрической машины. Для имитационного моделирования алгоритмов управления мощностью ВЭУ использована модель синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Исходя из схемы замещения, напряжение фазной обмотки генератора:

$$u = e - r \cdot i - L \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

где  $e$  — электродвижущая сила (ЭДС),  $r$  — активное сопротивление фазной обмотки,  $i$  — ток в фазной обмотке,  $L$  — индуктивность фазной обмотки. Для уменьшения влияния параметров электрической машины на результаты исследования алгоритмов управления ВЭУ было принято, что  $r$  и  $L$  равны нулю, а ЭДС в обмотках генератора задается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} e_A = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t), \\ e_B = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}), \\ e_C = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}). \end{cases} \quad (5)$$

В системе уравнений приняты следующие обозначения:  $e_A, e_B, e_C$  — ЭДС соответствующих обмоток генератора;  $k$  — коэффициент конструкции генератора;  $2p$  — число пар полюсов;  $\omega$  — угловая скорость ротора генератора;  $t$  — время.

В качестве нагрузки генератора ВЭУ предположено использование активного выпрямителя напряжения, что позволяет считать, что фазные обмотки генератора нагружены активными сопротивлениями. Тогда ток в обмотке генератора синусоидален и синфазен напряжению в соответствующей обмотке, а электромагнитный момент генератора  $M_{эм} = 3 \cdot k \cdot I_{\Phi}$ , где  $I_{\Phi}$  — амплитудное значение фазного тока генератора.

Контроллер ветроэнергетической установки предназначен для выполнения следующие функций:

- регулирование тока генератора в условиях постоянно изменяющейся скорости ветра для обеспечения режима максимальной мощности ВЭУ;
- ограничение тока заряда аккумуляторной батареи;
- обеспечение условий безопасной работы оборудования ветроэнергетической установки в рабочих и аварийных режимах.

Компьютерная модель контроллера ВЭУ была реализована с помощью блока «S-Function» MATLAB/Simulink, позволяющего задавать алгоритм работы блока на языке высокого уровня. Применение такого подхода позволило создать универсальную модель изменяемой конфигурации с возможностью переноса программного кода на микропроцессорную систему управления прототипа, существенно сократив время разработки и отладки программного обеспечения опытного образца.

**Третья глава** посвящена разработке методики определения производительности ВЭУ при непрерывно изменяющейся скорости ветра и алгоритма управления ветроэнергетической установкой с вертикальной осью вращения.

Для реализации алгоритма управления мощностью ВЭУ необходима методика определения производительности ВЭУ в процессе работы. Основной мерой производительности ВЭУ является КИЭВ. Прямое измерение КИЭВ в процессе работы ВЭУ не подходит, т.к. предполагает использование данных, измеренных в установившемся режиме работы, поэтому было принято решение о разработке методики определения производительности ВЭУ в реальных условиях эксплуатации, когда скорость ветра непрерывно меняется в широких пределах за достаточно короткий промежуток времени. В работе рассмотрены два способа определения КИЭВ с помощью статистической обработки измеренных мгновенных значений скорости ветра и генерируемой электрической мощности. Первый способ — нахождение среднего арифметического мгновенных значений КИЭВ за определенный промежуток времени. Вторым способом предложено осреднение с помощью численного интегрирования с учетом весового коэффициента, где в качестве весового коэффициента выбрана аэродинамическая мощность.

Результаты модельных экспериментов показали, что оценка КИЭВ с помощью интегрирования и осреднения мгновенных значений электрической мощности и скорости ветра приводит к значительной ошибке, величина которой зависит от темпа изменения скорости ветра. Поэтому было выдвинуто предположение, что для получения корректных результатов необходимо определение аэродинамического момента, действующего на ветроколесо.

Предлагаемая методика определения КИЭВ основана на использовании наблюдателя пониженного порядка, иначе называемого редуцированным наблюдателем, для определения аэродинамического момента ветроколеса по электромагнитному моменту генератора с учетом момента инерции ветроколеса. В диссертационной работе приводится синтез такого наблюдателя на основе зависимостей (1) и (2), результат представлен уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{z} = K_H \cdot z - K_H^2 \cdot J \cdot \omega + K_H \cdot M_{ЭМ} \\ \widehat{M}_a = z + K_H \cdot J \cdot \omega \end{cases} \quad (6)$$

где  $z$  — промежуточная переменная;  $K_H$  — коэффициент усиления наблюдателя. Подставив уравнение наблюдателя (6) в уравнение (2), получены зависимости для определения КИЭВ:

$$\begin{cases} \dot{z} = K_H \cdot z - K_H^2 \cdot J \cdot \omega + K_H \cdot M_{ЭМ} \\ \widehat{C}_P = \frac{2 \cdot \omega \cdot (z + K_H \cdot J \cdot \omega)}{\rho \cdot S \cdot V^3}, \end{cases} \quad (7)$$

Модельные эксперименты продемонстрировали, что применение редуцированного наблюдателя аэродинамического момента позволяет определять КИЭВ в процессе работы при непрерывно изменяющейся скорости ветра с точностью до единиц процентов, при этом максимальная ошибка определения не превышает 15% и наблюдается лишь на кратковременных промежутках.

Для достижения максимальной производительности ВЭУ требуется поддержание частоты вращения ветроколеса в точке наибольшей производительности при изменяющейся скорости ветра, которое можно обеспечить за счет изменения нагрузки на валу ветроколеса. Нагрузкой ветроколеса в ВЭУ является синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов, в котором электромагнитный момент пропорционален току в обмотке якоря. Таким образом, изменяя ток якорной обмотки, можно регулировать частоту вращения ветроколеса, обеспечивая режим наибольшей производительности. При этом максимальная производительность ветроколеса достигается при определенном значении быстроходности  $Z$  для любой заданной скорости ветра, что позволяет сформулировать закон управления ветроэнергетической установкой через ток генератора  $i_r$ :

$$\begin{cases} i_r = 0 \text{ при } Z(t) < Z_0 \\ i_r = K \cdot \frac{\omega}{V} \text{ при } Z(t) \geq Z_0 \end{cases} \quad (8)$$

где  $Z_0$  – значение оптимальной быстроходности для заданной скорости ветра;  $Z(t)$  – значение текущей быстроходности;  $K$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора. Для такого регулирования системе управления необходимо знать два параметра: угловую скорость ветроколеса  $\omega$  и скорость ветра  $V$ .

Угловая скорость ветроколеса пропорциональна частоте тока в обмотке синхронного генератора и определяется как:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{2p}, \quad (9)$$

где  $f$  – частота тока в обмотке синхронного генератора;  $2p$  – число пар полюсов.

Определение скорости ветра  $V$  обычно требует применение специального измерительного прибора, например, анемометра. При этом такой анемометр должен быть расположен в непосредственной близости от ветроколеса, на той же высоте, и ветроколесо не должно затенять анемометр. Часто такие требования приводят к усложнению и удорожанию конструкции ВЭУ, а так же к увеличению стоимости монтажа и эксплуатации системы электроснабжения на основе ветроэнергетической установки. Для определения скорости ветра без использования специальных приборов предложено использовать разработанный наблюдатель пониженного порядка (6), где, с помощью значения оценки аэродинамического момента  $\widehat{M}_a$ , можно получить оценку скорости ветра из уравнения (2), тогда:

$$\widehat{V} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \omega \cdot \widehat{M}_a}{\rho \cdot S \cdot C_P}}. \quad (10)$$

Для обеспечения необходимого управления по (8) предложена система адаптивного регулирования мощности ветроэнергетической установки, функциональная схема которой приведена на рисунке 4. Система управления содержит два контура: контур регулирования и контур адаптации. Контур регулирования работает согласно (8), где в качестве задающего воздействия  $Z_0$  используется набор значений  $Z_0[i]$ . Для этого набора  $i$  – это номер диапазона, соответствующий скоростям ветра  $V$  от  $(i - 1)$  до  $i$  м/с. Контур адаптации предназначен для определения оптимального значения задаваемой быстроходности  $Z_0[i]$  в зависимости от текущей скорости ветра для регулирования по (8). Адаптация базы знаний  $Z_0[i]$  задающих воздействий осуществляется поиском соответствующего значения  $Z_0[i]$ , при котором наблюдается максимум КИЭВ ВЭУ  $C_P$ , определенный для соответствующего диапазона  $i$  в соответствии с (7).

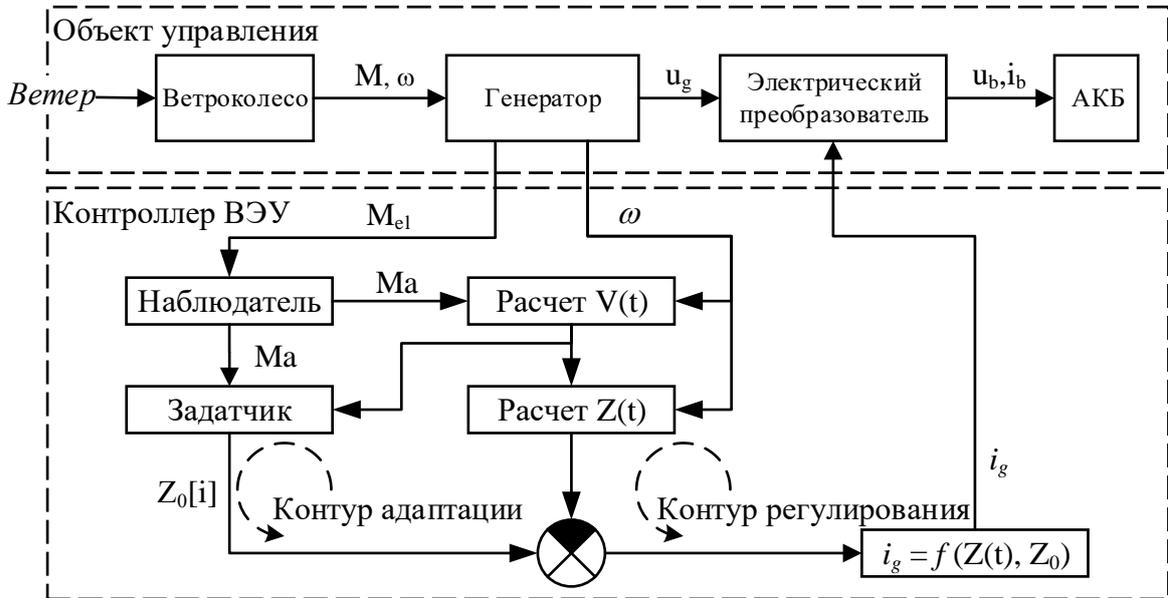


Рис. 4 – Функциональная схема системы адаптивного регулирования мощности ВЭУ

Для реализации системы управления был разработан соответствующий алгоритм управления, блок-схема которого представлена на рисунке 5. Алгоритм содержит процедуры инициализации, основной цикл и два обработчика прерываний, вызываемых по таймеру.

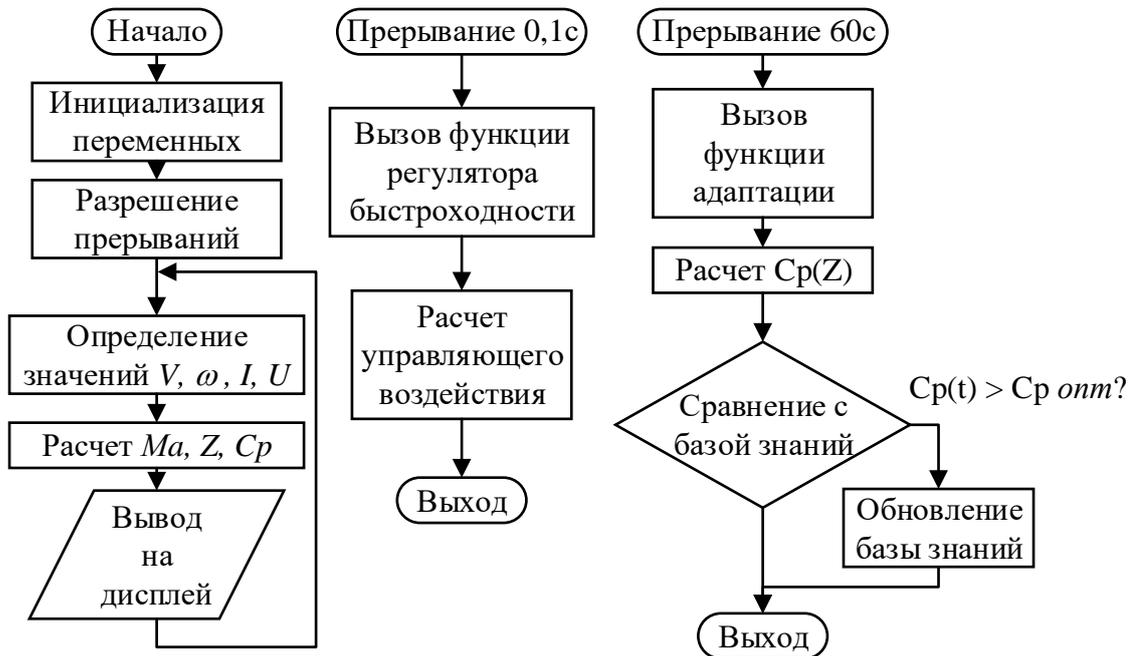


Рис. 5 – Блок-схема алгоритма адаптивного управления

В основном цикле происходит измерение скорости ветра, частоты вращения ветроколеса, а также напряжений и токов в цепи зарядки аккумуляторной батареи для расчета мгновенных значений электрической мощности ВЭУ. Прерывание с периодом 0,1с вызывается по срабатыванию таймера, в обработчике прерывания находится функция регулятора быстроходности  $Z$ ,

который осуществляет расчет и задание требуемого значения тока генератора. Прерывание с периодом 60с вызывается по срабатыванию таймера, в обработке прерывания находится функция адаптации задающего воздействия.

**В четвертой главе** приведено описание конструкции разработанного контроллера ВЭУ, показаны результаты его испытаний.

Для верификации модельных экспериментов натурными испытаниями в процессе работы над диссертацией был разработан, изготовлен и испытан контроллер ветроэнергетической установки. Структурная схема контроллера ВЭУ представлена на рисунке 6.

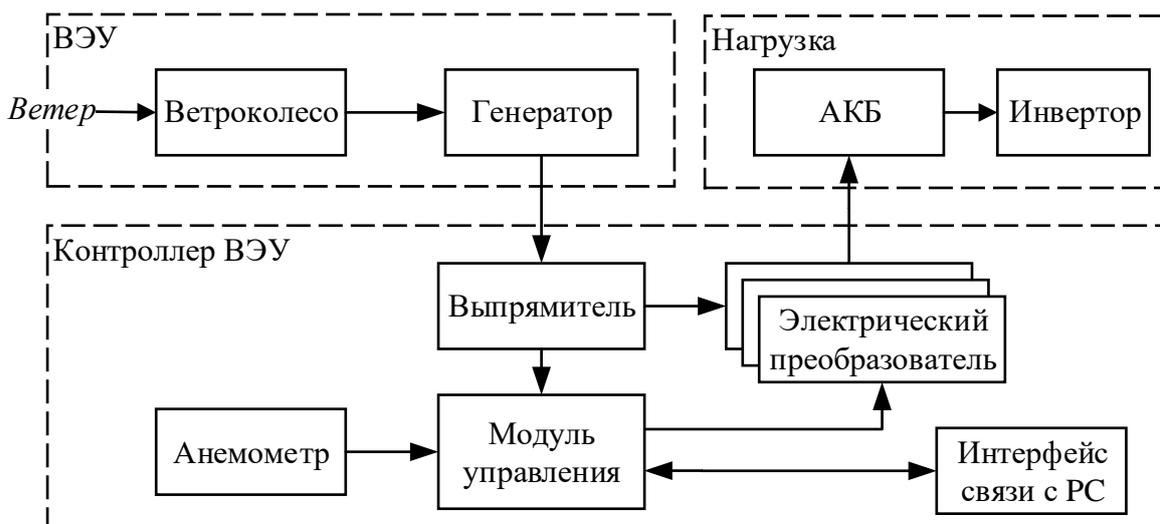


Рис. 6 — Структурная схема контроллера ВЭУ

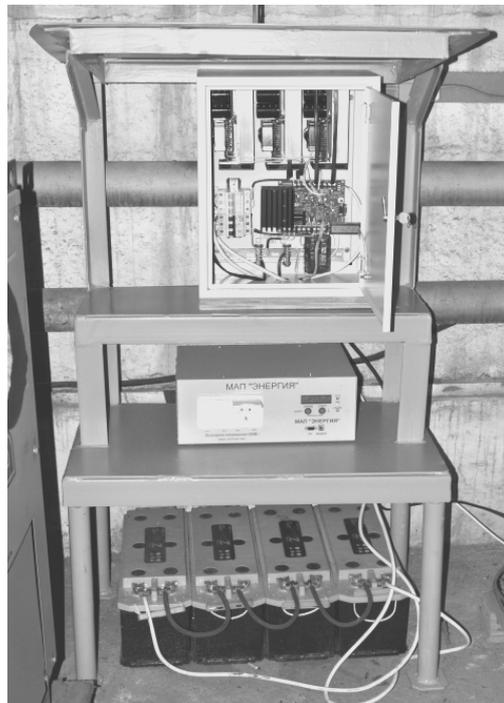
Разработанный контроллер ВЭУ является модульным и содержит:

- трехфазный выпрямитель, предназначенный для преобразования переменного тока синхронного генератора в постоянный;
- три управляемых электрических преобразователя по 1кВт, выполненных по схеме импульсного понижающего преобразователя и работающих параллельно на общую нагрузку;
- модуль управления, реализованный на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F103 с богатым набором периферийных устройств. Для микроконтроллера было разработано соответствующее программное обеспечение, реализующее работу по заданному алгоритму;
- анемометр, предназначенный для проведения измерений скорости ветра при проведении сравнительных испытаний.

Подробное описание схемы электрической контроллера ВЭУ приведено в диссертационной работе, а общий вид ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения и контроллер ВЭУ на испытательной площадке показаны на рисунке 7.



а)



б)

Рис. 7 — Общий вид ветроэнергетической установки (а) и контроллер ВЭУ на испытательной площадке (б)

С помощью разработанного контроллера ВЭУ были проведены экспериментальные исследования работы ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения под управлением разработанного алгоритма. Для проведения испытаний контроллер ВЭУ был размещен в лаборатории Центра Коллективного Пользования ЮУрГУ «Ветроэнергетический комплекс» и подключен к имеющейся ветроэнергетической установке ВЭУ-3 производства ООО «ГРЦ-Вертикаль». Измерения проводились путем регистрации скорости ветра и генерируемой электрической мощности, а так же таких параметров, как частота вращения ветроколеса, напряжение и ток зарядки аккумуляторной батареи. Все измеряемые данные в процессе работы ВЭУ передавались на персональный компьютер, который накапливал полученную информацию для последующего анализа. Для автоматизации процесса проведения испытаний была разработана программа для персонального компьютера, позволяющая получать от контроллера ВЭУ через коммуникационный интерфейс текущие значения измеряемых параметров, сохранять их на жестком диске в файл и автоматически пересылать накопленную информацию через сеть Интернет, а также обеспечивать управление режимами работы контроллера с удаленного рабочего места.

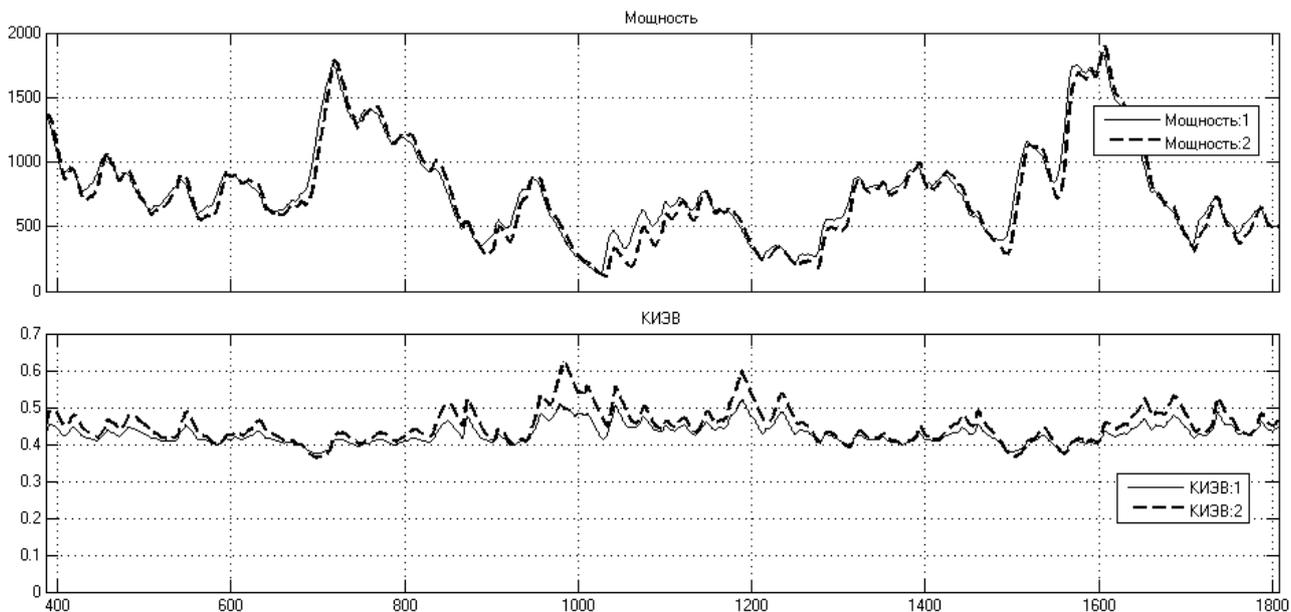


Рис. 8 — Результаты измерений электрической мощности (сверху) и коэффициента использования энергии ветра (снизу)

Результаты испытаний приведены на рисунке 8, где показаны графики электрической мощности (сверху) и коэффициента использования энергии ветра (снизу). Сравнение измеренных значений и результатов модельных экспериментов показывают, что значения, полученные при проведении натуральных экспериментов, достаточно близко повторяют величины, рассчитанные теоретическим путем. Небольшое отличие объясняется тем, что компьютерная модель ветроэнергетической установки не учитывает такие особенности реального изделия, как потери на аэродинамическое сопротивление некоторых элементов конструкции ветроколеса, трение в механических узлах, электрические потери.

**В заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы:

1. Разработана имитационная математическая модель ВЭУ с управляющим контроллером изменяемой конфигурации, отличающаяся возможностью задания алгоритмов управления на языке высокого уровня и предназначенная для исследования различных алгоритмов и способов управления ВЭУ при изменении внешних воздействий.

2. Методом компьютерного моделирования исследованы известные способы управления мощностью ветроэнергетической установки. Установлено, что способ управления мощностью путем поддержания заданной быстроходности ветроколеса обеспечивает наибольшую производительность ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра. По результатам исследования имитационной модели ветроэнергетической установки разработан алгоритм адаптивного управления мощностью ВЭУ с использованием наблюдателя пониженного порядка и позволяющий обеспечить управление ВЭУ по быстроходности без использования анемометра.

3. Предложена методика измерения производительности ветроэнергетической установки, отличающаяся использованием наблюдателя пониженного порядка для определения аэродинамического момента ветроколеса, и позволяющая определять коэффициент использования энергии ветра ВЭУ при непрерывно изменяющейся скорости ветра.

4. Разработан и изготовлен контроллер ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, обеспечивающий работу ВЭУ по разработанному алгоритму с высокой производительностью в широком диапазоне скоростей ветра. Контроллер успешно прошел испытания и используется в Центре Коллективного Пользования ЮУрГУ «Ветроэнергетический комплекс». Для автоматизации измерений разработана программа дистанционного мониторинга и регистрации производительности ветроэнергетической установки. Натурные испытания ветроэнергетической установки с контроллером ВЭУ подтвердили соответствие результатов модельных экспериментов и натурных испытаний с точностью до 5%.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией:

1. Мартьянов А. С. 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.
2. Мартьянов, А. С. Система освещения, основанная на ветроэнергетической установке / А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС, 2010. — №1. — С.101–105.
3. Мартьянов А. С. Контроллер заряда ветроэнергетической установки / А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС, 2010. — №1. — С.106–109.
4. Мартьянов А. С. 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.
5. Мартьянов А. С. Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете MATLAB / Н. В. Пронин, А. С. Мартьянов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. — 37(296). С.143–145.
6. Мартьянов А. С. Эффективность автономного электроснабжения фермерского хозяйства / А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — Москва. — 2011. — Вып. 9. С.29–30.

7. Мартьянов А. С. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения / А. Н. Киндряшов, А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС, 2013 — №01/2(118). — С.59–62.
8. Мартьянов А. С. Вертикально-осевые ветровые турбины. Новые аспекты / И. М. Кирпичникова, А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС, 2013 — №01/2(118). — С.55–58.
9. Мартьянов А. С. Моделирование генератора ветроэнергетической установки / И. М. Кирпичникова, А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин // Электротехника. — №10. — 2013. — С.46-50.
10. Мартьянов А. С. Методика инженерного расчета вентиляльных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа, А. С. Мартьянов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2013. — Том 13 №2. С.85–87.
11. Мартьянов А. С. Определение оптимальных габаритных размеров для вентиляльных машин с аксиальным магнитным потоком/ С. А. Ганджа, А. С. Мартьянов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2013. — Том 13 №2. С.88–90.

В патентах, ноу-хау и свидетельствах ФИПС:

12. Патент 87767, Российская Федерация. Амортизатор растяжки ветряной установки / Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С., Соломин Е. В. — № 2008138451/22; заявл. 26.09.08; опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29. — 2с.
13. Патент 110825, Российская Федерация. Комбинированная система теплоснабжения на возобновляемом источнике энергии / Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С., Панасюк И. Н., Пронин Н. В., Соломин Е. В. — № 2011107463; заявл. 25.02.11; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. — 2с.
14. Патент 2472987, Российская Федерация. Виброгаситель мачты ветряной установки / Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С., Соломин Е. В. — № 2008128666/11; заявл. 14.07.2008; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2. — 7с.
15. 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». — 7с.

В международных, российских, межрегиональных изданиях и материалах конференций:

16. Мартьянов А. С. О преобразовании энергии в ветроэнергетических установках малой мощности / Мартьянов А. С., Кирпичникова И. М., // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й научной конференции. Секция технических наук. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009г. — Т. 2 — 304с.
17. 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.
18. Мартьянов А. С. Регулирование мощности в ветроэнергетической установке // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. — Т. 2. с. 206-209.
19. Мартьянов А. С. Управление мощностью ветроэнергетической установки // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й научной конференции. Секция технических наук. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011г. — Т. 3 — 202с.
20. Мартьянов А. С. Система автономного электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии / А. С. Мартьянов // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 10. — Материалы VIII Международного симпозиума. — М.: РАН, 2013г. — 21с.
21. Мартьянов А. С. Итерационный подход в разработке и оптимизации вертикально-осевых ветроэнергетических установок / И. М. Кирпичникова, А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин // В сборнике: Электротехника. Электротехнология. Энергетика. Сборник научных трудов VII международной научной конференции молодых ученых. НГТУ; Новосибирск, 2015г. — с.92–95.

**Личный вклад автора.** В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: [1] – исследование преобразования энергии в ВЭУ (60%); [2] – разработка конструкции системы освещения (25%); [3] – разработка схемы электрической и исследование ее параметров (80%); [4] – разработка схемы управления (40%); [5] – расчет параметров модели (30%); [6] – расчет технико-экономических показателей (40%); [7] – формулирование цели и задачи исследования (20%); [8] – построение компьютерных моделей ВЭУ (25%); [9] – синтез модели (70%); [10, 11] – апробация методик на практических задачах (40%); [16] – исследование прохождения и преобразования энергии в ВЭУ (60%); [17] – расчет схемы электрической (80%); [21] – проведение испытаний ветроэнергоустановки (30%).

**Мартьянов Андрей Сергеевич**

**Исследование алгоритмов управления  
и разработка контроллера ветроэнергетической  
установки с вертикальной осью вращения**

Специальность 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать \_\_.\_\_.2016. Формат 60 × 84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.