Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

Ибрагим Ахмед Амер Ибрагим

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ СЕТИ

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Соломин Евгений Викторович

Официальные оппоненты:

Велькин Владимир Иванович,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии;

Амерханов Роберт Александрович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, профессор кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии;

Ачитаев Андрей Александрович,
кандидат технических наук,
Саяно-Шушенский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», Республика Хакасия, пгт. Черемушки, и.о. заведующего кафедрой гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей.

Защита диссертации состоится «26» мая 2022 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3481.
Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

И.о. ученого секретаря диссертационного совета

Сесекин Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. За последние несколько десятилетий ветроэнергетика в ряде стран выделилась в отдельные сегменты энергетической отрасли, успешно конкурирующие с традиционной энергетикой. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является повышение эффективного использования энергии ветра за счет улучшения аэродинамических и электродинамических характеристик ветроэлектрических (ветроэнергетических) установок (ВЭУ).

Основной характеристикой, определяющей работоспособность ветроэнергетической установки является коэффициент мощности (C_p) - отношение фактической механической мощности, вырабатываемой ветроустановкой, к общей мощности ветрового потока, ограниченной ометаемой площадью при определенной скорости ветра.

Проведение исследований на реальных ветроэнергоустановках является чрезвычайно трудновыполнимым и дорогостоящим мероприятием. Однако, как показывает практика, проведение исследований на виртуальных компьютерных моделях значительно облегчает выполнение задач и минимизирует затраты на эксперименты.

Степень разработанности темы исследования. Исследования многих известных ученых посвящены улучшению эксплуатационных характеристик ветроэнергетических конструкций. Н.Е. Жуковский, Ю. Прандтль и А. Бетц создали теоретические основы, объясняющие основные принципы и закономерности работы ВЭУ. Вопросы повышения эффективности ВЭУ разрабатывались такими ведущими учеными, как Н.В. Красовский, Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев, В.Н. Андриянов, П.П. Безруких, В.В. Елистратов, О.С. Попель, В.М. Лятхер, Е.В. Соломин и другие. Задачи совершенствования методов и алгоритмов управления инициировали Ю.В. Шишкин, Ю.Г. Шакарян, В.З. Манусов, С.Н. Удалов, А.С. Мартьянов, а также зарубежные ученые Х. Биндер, А. Ребсдорф, В. Байберг, Р. Гофман, О. Карлсон, Дж. Хайландер, Х. Бейер. Таким образом, синтез и исследование алгоритмов управления мощностью ВЭУ являются актуальными научными проблемами, решение которых имеет научное и практическое значение.

Цель диссертации – разработка алгоритма поддержания максимального коэффициента использования энергии ветра (коэффициента мощности) C_p во всех, в том числе аварийных режимах работы (провалах напряжения) горизонтально-осевой ветроэнергетической (ветроэлектрической) установки (ГОВЭУ), а также разработка моделей контроллера преобразователя на стороне ротора (ПСР), контроллера преобразователя на стороне сети (ПСС) и виртуального контроллера (ВК) с подтверждением результатов работы и

созданием виртуального MPPT-контроллера в Среде Matlab/Simulink на основе математического моделирования.

Исходя из цели исследования, сформулированы и решены следующие **задачи:**

1. Разработка функциональной компьютерной модели горизонтально-осевой ветроэнергетической установки (ГОВЭУ) и системы управления, состоящей из преобразователя на стороне ротора (ПСР), преобразователя на стороне сети (ПСС) и виртуального контроллера (ВК) с возможностью задания алгоритмов управления для изучения характеристик ГОВЭУ в соответствии с исследуемыми алгоритмами управления с использованием платформы Matlab/Simulink.

2. Построение математической модели симметричного замыкания роторной цепи шунтом (crowbar) в программном пакете Matlab/Simulink для ускорения процесса восстановления ГОВЭУ в исходное устойчивое состояние после воздействия глубоких провалов напряжения.

3. Разработка метода определения производительности ГОВЭУ и создание нового алгоритма поиска (Maximum Power Point Tracking, MPPT) максимально возможного значения коэффициента использования энергии ветра (коэффициента мощности) C_p ветроэлектрической установкой в условиях переменной скорости ветра.

Научная новизна:

1. Разработаны и построены новые компьютерные модели преобразователя на стороне ротора (ПСР), преобразователя на стороне сети (ПСС), ветроэнергетической установки, генератора двойного питания (ГДП), схемы защиты шунтом (crowbar), PID (ПИД)-регулятора и контроллера MPPT с помощью пакета MATLAB/SIMULINK.

2. Улучшены характеристики ветроэнергетической установки MITSUBISHI MWT-92 в части повышения эффективности и максимизации выходной мощности независимо от изменения скорости ветра за счет внедрения концепции виртуального контроллера MPPT (с использованием MATLAB/SIMULINK), увеличивающего коэффициент мощности C_p на 8%.

3. Улучшен принцип защиты электрической схемы ветроэнергетической установки путем введения активной схемы защиты шунтом (crowbar), которая защищает генератор и ПСР от провалов напряжения за счет оптимизации сопротивления шунта для ускорения и плавного восстановления системы до исходного устойчивого состояния без отключения ветроэнергетической установки от сети.

4. Предложенная имитационная модель и алгоритм MPPT протестированы на модели ветроэнергетической установки NORDEX

N80/2500 для верификации построенных моделей и доказательства эффективной работы модели на всех типах ГОВЭУ.

Теоретическая значимость работы:

1. Впервые имитационная модель включает отдельный модуль виртуального контроллера, настраиваемого языком верхнего уровня для гибких условий работы ветроустановки.

2. Разработан новый алгоритм устойчивого управления ветроэнергоустановкой в условиях провалов напряжения сети с учетом меняющихся характеристик ветра.

3. Предложены схема и алгоритм работы устройства защиты генератора ГОВЭУ с шунтированием обмотки ротора для безопасного вывода ветроэнергоустановки из аварийного в нормальный режим.

Практическая значимость работы:

1. Проведен комплекс виртуальных исследований функционирования ветроэлектрической установки в условиях динамических изменений характеристик электрооборудования и скорости ветра, нацеленных на выявление оптимальных параметров электрических компонентов ГОВЭУ.

2. Проведен синтез алгоритмов управления ПСР и ПСС, обеспечивающих безопасное восстановление ГОВЭУ до устойчивого состояния после глубоких провалов напряжения.

3. Доказана эффективность управления функционированием ветроэлектрической установки на основе разработанных алгоритмов в условиях переменной скорости ветра и провалов напряжения. Алгоритмы могут быть в дальнейшем использованы производителями ветроэлектрических установок. Запланировано внедрение соответствующего программного обеспечения в системы управления ветроэлектрическими установками ФГУП Республики Крым «Крымские Генерирующие Системы».

4. Результаты диссертации, материалы научных и теоретических исследований, изложенных в диссертационной работе, используются в образовательном процессе в учебной дисциплине ДВ.1.05.02 Комплексное использование ветроэлектростанций в рамках магистерской программы 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использованы методы математического моделирования в программном комплексе MATLAB/Simulink, а также язык программирования высокого уровня C++.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая имитационная компьютерная модель ветроэлектрической установки, характеризующаяся наличием модуля гибкого виртуального контроллера, описанного на языке высокого уровня, и предназначенная для

исследования характеристик ветроэлектрической установки в зависимости от применяемых алгоритмов управления.

2. Способ определения производительности ветроэлектрической установки и новый динамический алгоритм поиска максимального значения коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ или коэффициента мощности C_{p_max}), следовательно, повышение общей эффективности и оптимального значения коэффициента крутящего момента C_{t_opt} в условиях переменной скорости ветра в широком диапазоне.

3. Алгоритм управления отбором мощности ветроэлектрической установки, предназначенный для защиты элементов ГОВЭУ от недопустимых выбросов токов и напряжений во время провалов напряжения, и новая схема устройства защиты генератора ГОВЭУ с шунтированием обмотки ротора для быстрого и безопасного восстановления электротехнического комплекса до устойчивого состояния после глубоких провалов напряжения.

Обоснованность и степень достоверности научных положений, выводов и результатов базируется на основе использования известных положений механики, аэродинамики, электромеханики, электродинамики, теории автоматического управления и методов компьютерного моделирования. Достоверность результатов определяется корректностью применения математического аппарата, обоснованностью методов моделирования, использующих известные, многократно подтвердившие свою достоверность программы, а также детально описанными методиками симуляции, позволяющие воспроизвести проведенные исследования другими учеными. Кроме этого, достоверность подтверждается соответствием теоретических положений результатам моделирования.

Апробация работы. Основные результаты исследования были представлены и обсуждены на следующих мероприятиях:

1. Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" (International Conference on Industrial Engineering, ICIE), Сочи, РФ, 25-29 марта 2019 г.

2. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019), Sochi, Russia, 25-29 March 2019.

3. Международная научно-техническая конференция "Автоматизация" (International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019), Sochi, Сочи, РФ, 8-14 сентября 2019 г.

4. Международная научно-техническая конференция "Электротехнические комплексы и системы" (International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018), 23-25 сентября 2018 г.

5. Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям (International

multidisciplinary conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon 2018), Владивосток, РФ, 3-4 October 2018.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 9 статей в международных рецензируемых журналах, входящих в базы цитирования Scopus, Web of Science; получено 1 свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Автор определил направление исследования, сформулировал цель и задачи исследования, проанализировал достижения в области научных исследований. На основе проведенного анализа были выбраны методы и средства проведения исследования, разработаны математические модели, используемые в исследовании. Разработка модели системы управления и все исследования проводились непосредственно автором.

Объем и Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Общий объем диссертации составляет 205 страниц текста с 104 рисунками, 12 таблицами и 4 приложениями. Список литературы содержит 129 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дается краткое описание работы, показывающее актуальность и степень разработанности темы исследования. Указаны объект и предмет исследования, цель диссертации, задачи и методы исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, а также научная и практическая значимость работы.

В первой главе приведен исторический обзор развития ветроэнергетики, очерчены основные направления развития, выявлены ключевые вопросы и проблемы, возникающие при проектировании и эксплуатации ветроэнергетических установок (ВЭУ). Необходимость регулирования мощности ВЭУ, подключенной к сети, обусловлена различной производительностью ветроустановки при изменении многочисленных внешних возмущений, основным из которых являются динамично изменяющаяся скорость ветра и возможные провалы напряжения сети. Целью оптимизации производительности ВЭУ является повышение переменного коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ) или коэффициент мощности ветроэлектрической установки C_p, который представляет собой отношение механической мощности на валу генератора к аэродинамической мощности потока ветра через ометаемую площадь ротора, с учетом частоты

его вращения. Частота вращения ротора может регулироваться как изменением электрической нагрузки, так и аэродинамическим питч-контролем (изменением угла установки лопастей ВЭУ).

Во второй главе описан метод и алгоритмы управления работой асинхронного генератора с двойным питанием (ГДП) при глубоких провалах напряжения статора, с описанием разработанной функциональной математической модели горизонтально-осевой ветроэлектрической установки (ГОВЭУ), предназначенной для исследования работоспособности ВЭУ с использованием различных методов и алгоритмов регулирования мощности. На рисунке 1 показана кривая зависимости механической мощности ротора ВЭУ от изменения скорости ветра от (0 до 15 м/с).

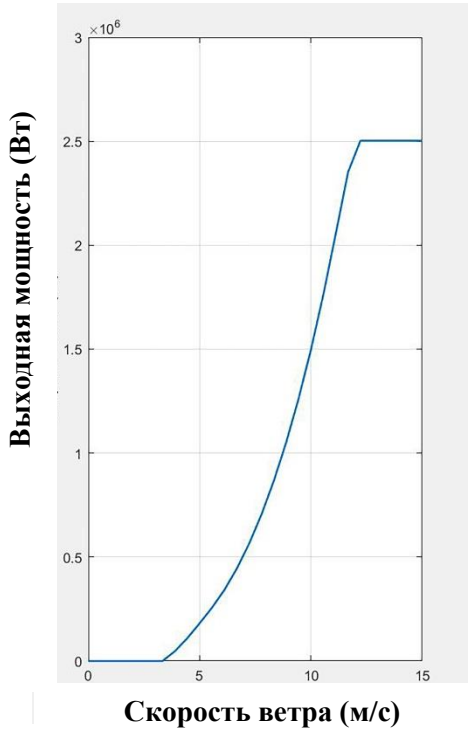


Рисунок 1. Кривая зависимости генерируемой мощности ветроротора от изменения скорости ветра.

Модель ветроэнергетической установки была разработана с максимальным значением C_p с внесением модуля виртуального контроллера для получения возможности программной настройки алгоритма управления. Функциональная схема модели приведена на Рисунке 2, где:

V_v – Скорость ветра; T– Крутящий момент ротора ВЭУ;

ω– Угловая скорость ротора ВЭУ; u_g– Выходное напряжение генератора ВЭУ; i_g – Выходной ток генератора ВЭУ.

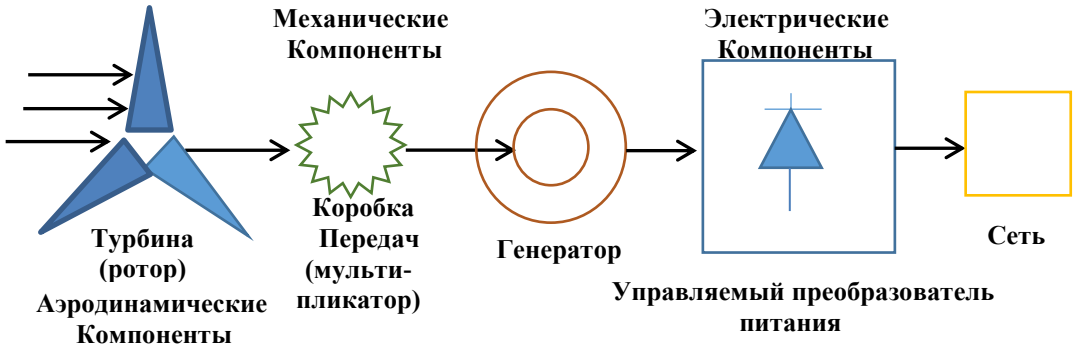


Рисунок 2. Функциональная схема модели ветроэнергетической установки.

Математическая модель ротора представлена в виде основного дифференциального уравнения, описывающего динамику вращательного движения:

$$J\frac{d\Omega_t}{dt} = T_t - T_{em} - T_r \qquad (1)$$

где: J – Момент инерции системы; Ω_t – Угловая скорость; T_t – Аэродинамический момент ветроколеса; T_{em} – Электромагнитный момент генератора; T_r – Момент сопротивления, учитывающий трение и другие потери. Аэродинамический момент ротора:

$$T_t = C_p(\lambda)\frac{\rho \cdot A \cdot V_v^3}{2 \cdot \Omega_t}, \qquad (2)$$

где: $C_p(\lambda)$ – Коэффициент использования энергии ветра КИЭВ (коэффициент мощности ВЭУ), зависит от быстроходности (λ); ρ – Плотность воздуха; V_v – Скорость ветрового потока; A – Ометаемая площадь; Ω_t – Угловая скорость ротора ВЭУ. Аэродинамическая мощность: ($P_t=\Omega_t.T_t$)

$$P_t = C_p(\lambda)\frac{\rho \cdot A \cdot V_v^3}{2}, \qquad (3)$$

Зависимость C_p от быстроходности λ выражается функцией:

$$C_p(\lambda) = \left(\frac{c_1}{\lambda} - c_2\right) \cdot e^{-\frac{c_3}{\lambda}} + c_4 \qquad (4)$$

где: $c_1 \ldots c_4$ – Коэффициенты, подбираемые для заданной конструкции ротора на основе известных аэродинамических характеристик.

Виртуальный контроллер ветроэлектрической установки (ПИД) предназначен для выполнения следующих функций:

1. Регулирование тока генератора в условиях постоянно меняющейся скорости ветра для обеспечения максимальной мощности ВЭУ;

2. Ограничение тока заряда аккумулятора (при наличии);

3. Обеспечение условий безопасной эксплуатации оборудования ветроэлектрической установки в штатном и аварийном режимах.

Исследование ВЭУ переменной скорости вращения с ГДП. Преобразователь напряжения переменного тока в постоянный и затем в переменный AC-DC-AC состоит из двух частей: преобразователя на стороне ротора (ПСР) и преобразователя на стороне сети (ПСС). ПСР и ПСС – источники напряжения. Контакты AC-DC-AC преобразователя соединены с одной стороны с контактами ротора, а с другой – с трехфазной сетью. Источник постоянного напряжения, который представлен в модели конденсатором, соединен с DC контактами преобразователя. ПСС и статор подключены к трехфазной сети через трансформатор, преобразующий низкое напряжение в высокое. Механическая энергия, вырабатываемая ветроустановкой, преобразуется в электрическую энергию ГДП и передается в трехфазную сеть через статор и преобразователи.

Система управления ГДП состоит из трех модулей:

1. ПСР-преобразователь, управляющий реактивной и активной мощностью статора.

2. ПСС-преобразователь, поддерживающий фиксированное напряжение на звене постоянного тока V_{bus} и может использоваться для ввода дополнительной реактивной мощности в сеть.

3. Регулятор скорости, который управляет электрической мощностью преобразователя путем изменения питч-угла лопастей (питч-контроля).

Работа ГДП при сильных провалах напряжения статора. Когда происходит глубокое падение (провал) напряжения статора, системе требуется шунтирование обмотки ротора для защиты от превышения токов и напряжений в связи с потерей управления во время провала. В ветроэлектрических установках на основе ГДП защитное устройство с шунтированием ротора (ЗУШР) или «crowbar» подключается на стороне ротора. ЗУШР защищает преобразователь ротора при возникновении провалов напряжения в сети. При срабатывании защиты ток протекает в цепи ЗУШР, а не через ПСР. Как показано на Рисунке 3, ЗУШР состоит из выпрямительного моста, сопротивления и управляемого транзисторного ключа.

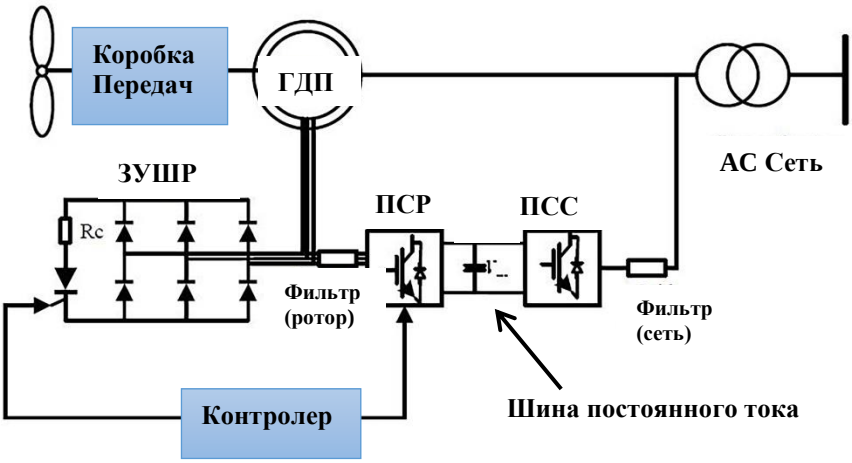


Рисунок 3. Схема преобразования энергии ветроэнергетической установки с защитой шунтом.

Для обеспечения функционирования при провалах напряжения (Low Voltage Ride Through, LVRT) ВЭУ должна оставаться подключенной к сети, причем ЗУШР должно быть подключено в цепи ГДП. При значительном падении напряжения происходит следующий набор действий:

1. ВЭУ генерирует энергию в определенной рабочей точке.
2. Как только происходит падение напряжения, имеется промежуток времени примерно (0,5–5) миллисекунд, пока система управления ротором не зарегистрирует данное падение. В это время в цепи ПСР индуцируется большой ток, сопровождающийся повышением напряжения шины постоянного тока. За падением напряжения в сети следует:

а) Высокое напряжение в цепи постоянного тока;

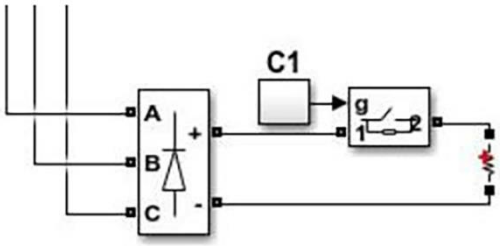
б) Большой ток ротора;

3. Когда падение (провал) напряжения было зарегистрировано, включается ЗУШР, размагничивая ГДП. Ток ротора проходит через шунт.
4. После того, как поток исчез, цепь ЗУШР будет отключена, а преобразователь на стороне ротора активирован.

Моделирование защитного устройства с шунтированием ротора (crowbar). Модель схемы ЗУШР состоит из выпрямительного диодного моста, сопротивления шунта $R_{crowbar}$, и управляющего переключателя. Модель реализована на платформе Matlab/Simulink. Сопротивление шунта $R_{crowbar}$ определено эмпирически и составляет около 0,2 Ом (многократно опробованным в предложенной имитационной модели для получения оптимального значения). Переключатель управляется схемой (C_1), срабатывающей при $I_r > I_{r_limit}$ или $V_{bus} > V_{bus_limit}$. Если предположить, что падение напряжения произошло в момент на 3-ей секунде, то срабатывает

переключатель и активируется цепь защиты шунтом. В момент 3,1 сек переключатель не активен и цепь защиты шунтом деактивирована.

Работа схемы управления (C_2), запускающей трехфазный мост, противоположна описанной выше схеме управления (C_1) и используется для защиты ротора и преобразователя на стороне сети (ПСС). Когда защита шунтом активирована, она должна отключить трехфазный мост и изолировать преобразователь на стороне ротора (ПСР), чтобы защитить его от более высокого тока и напряжения. На Рисунке 4 показана схема защиты модели шунта, а на Рисунке 5 – схема защиты трехфазного моста, управляемого преобразователем на стороне ротора и C_2.



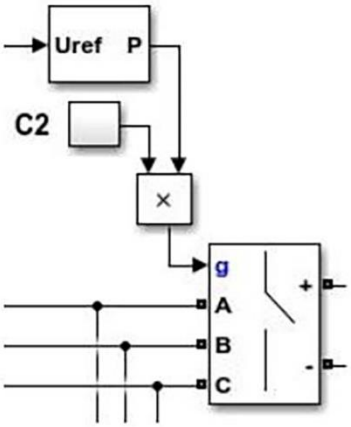


Рисунок 4. Схема моделирования шунта.

Рисунок 5. Моделирование 3-фазного моста,
управляемого преобразователем на стороне ротора и C_2.

Рисунок 6 показывает мощность статора во время провалов напряжения, которые происходят от 3 сек до 3,1 сек и после провалов.

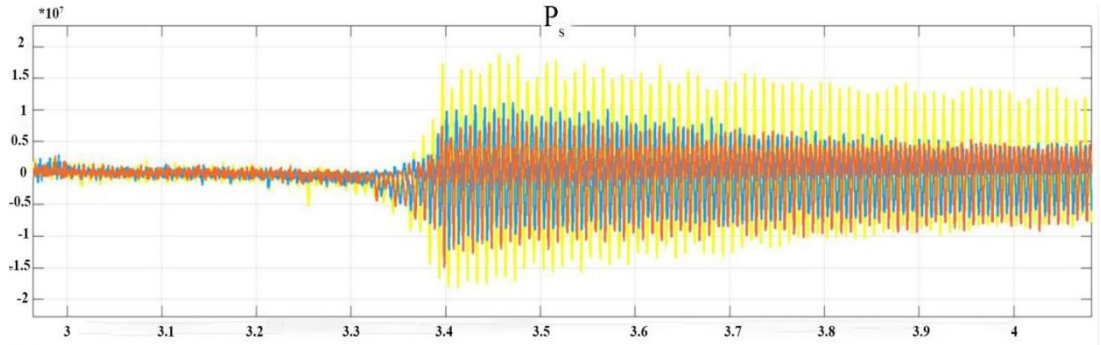


Рисунок 6. Мощность статора во время и после падения (провала) напряжения.

Компьютерная модель контроллера ВЭУ была реализована с использованием блока "S-Function" в Matlab/Simulink, который позволяет задать алгоритм работы блока на языке высокого уровня.

Таким образом, с помощью нового метода и алгоритма управления система восстанавливается до своего нормального устойчивого состояния безопасно и быстро после падения (провала) напряжения. Задача 1 и задача 2 выполнены.

В третьей главе описаны алгоритмы отслеживания максимальной мощности. Она также посвящена разработке методики определения производительности ветроэлектрической установки при непрерывно изменяющейся скорости ветра, а также разработке алгоритма управления ветроэнергоустановкой с горизонтальной осью вращения.

Для реализации алгоритма регулирования мощности ВЭУ необходим метод определения производительности ветроэнергетической установки в процессе ее работы. Основным показателем производительности ВЭУ является коэффициент мощности (КИЭВ) C_p. Прямое измерение C_p в процессе работы ВЭУ нецелесообразно, поскольку предполагает использование данных, измеренных в установившемся режиме работы, поэтому было решено разработать методику определения производительности ВЭУ в реальных условиях эксплуатации, когда скорость ветра непрерывно изменяется в широком диапазоне за относительно короткий промежуток времени.

Модель ветроэлектрической установки состоит из следующих модулей:

1. Аэродинамическая модель: характеризует отбор мощности от обмотки ротора, определяя механический момент ротора T_t в зависимости от аэродинамических параметров (скорости ветра V_v и угловой скорости ротора Ω_t). Крутящий момент механической турбины T_t, создаваемый ротором, задан уравнением:

$$T_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 V_v^2 C_t \qquad (5)$$

Наиболее приемлемый метод аналитического представления коэффициента мощности C_p осуществлен посредством выражения в математических уравнениях в виде функций быстроходности (λ) и питч-угла (β), быстроходность:

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \qquad (6)$$

где R – длина лопастей (радиус ротора, а ρ – плотность воздуха).

2. **Система питч-управления**: служит для управления поворотом всех лопастей на один и тот же установочный угол, вызывая увеличение или снижение частоты вращения ротора. Такое независимое регулирование дает большую степень свободы для контролера, также приводя к снижению механических напряжений в лопастях. Система управления питч-контролем вычисляет динамический питч-угол как функцию опорного питч-угла β_{ref}.

3. **Механическая модель**: для осуществления имитационного моделирования введена резонансная частотно-массовая модель. Все значения приведены к быстроходному валу (после мультипликатора). Инерция J_t относится к массам со стороны ротора, а J_m относится к электрической машине. Механическая модель вычисляет угловую скорость генератора и ротора (ω_m и Ω_t) как функцию крутящего момента ротора T_{em}.

ГДП и обратные силовые преобразователи преобразуют крутящий момент генератора в ток сетевой линии передачи в зависимости от напряжения сети. Система управления рассчитывает крутящий момент генератора, питч-угол и реактивную мощность в зависимости от скорости ветра и напряжения сети. Основываясь на основных уравнениях математической модели для трехлопастной горизонтальной осевой ветроэнергетической установки ГОВЭУ (уравнения 5 и 6), имитационная модель ВЭУ мощностью 2,4 МВт реализована с помощью платформы Matlab/Simulink. В модели принято передаточное отношение коробки передач N=100, радиус ротора турбины (длина лопастей) R=46 метров и плотность воздуха ρ=1,225 Кг/м^3.

Алгоритм отслеживания максимальной точки мощности. Работа алгоритма заключается в управлении угловой скоростью вращения ротора и состоит в том, чтобы отслеживать максимальное извлечение энергии на текущей скорости ветра. Цель может быть достигнута путем использования динамической природы ВЭУ с переменной скоростью вращения для получения кривой максимальной мощности, рассматривая электромагнитный момент в качестве опорной величины, как показано на Рисунке 7.

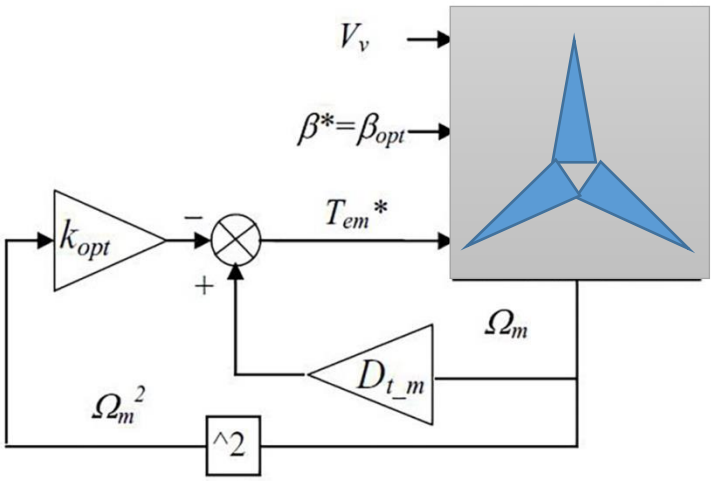


Рисунок 7. Косвенный Регулятор Скорости (КРС).

Если ротор с переменной скоростью работает в точке « *a* » кривой, как показано на Рисунке 8, и скорость ветра возрастает от V_{v1} до V_{v2}, рабочая точка теперь становится « *b* », а аэродинамический момент становится T_{t_b}. Регулятор скорости генерирует электромагнитный момент T_{em}, относящийся к кривой максимальной мощности (точка *c*), которая на самом деле меньше, чем T_{t_b}. Это приводит к увеличению частоты вращения турбины до тех пор, пока она не придет в точку устойчивости « *c* ».

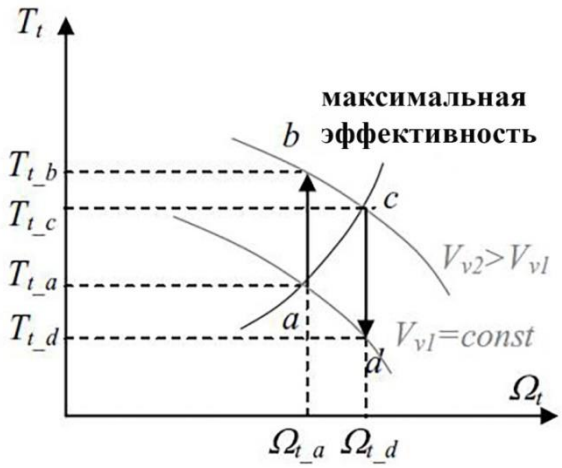


Рисунок 8. Исследование равновесия относительно точки максимальной мощности на кривой крутящег момента.

Теоретическая максимальная величина C_p определяется пределом Жуковского-Бетца:

$$C_{p_theo_\max} = 0.593 = 59.3\%$$

Коэффициент мощности и коэффициент момента связаны между собой выражением: (C_t – коэффициент момента)

$$C_p(\lambda) = \lambda . C_t(\lambda) \qquad (7)$$

Когда ВЭУ работает в точке максимальной мощности, справедливы выражения:

$$\lambda_{opt} = \frac{R\Omega_t}{V_v} \qquad C_p = C_{p_\max} \quad \text{и} \quad C_t = C_{t_opt}$$

Момент ротора выражается как: $T_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 \frac{R^2\Omega_t^2}{\lambda_{opt}^2}\frac{C_{p_\max}}{\lambda_{opt}}$

Поэтому:

$$T_t = \frac{1}{2}\rho\pi\frac{R^5}{\lambda_{opt}^3}C_{p_\max}\Omega_t^2 = k_{opt_t}\Omega_t^2 \quad (8)$$

где

$$k_{opt_t} = \frac{1}{2}\rho\pi\frac{R^5}{\lambda_{opt}^3}C_{p_\max} \quad (9)$$

(k_{opt_t}) - Константа оптимума. В соответствии с формулой (9), алгоритм управления с отслеживанием максимальной мощности точки (Maximum Power Point Tracking, MPPT) может быть смоделирован, как показано на Рисунке 9.

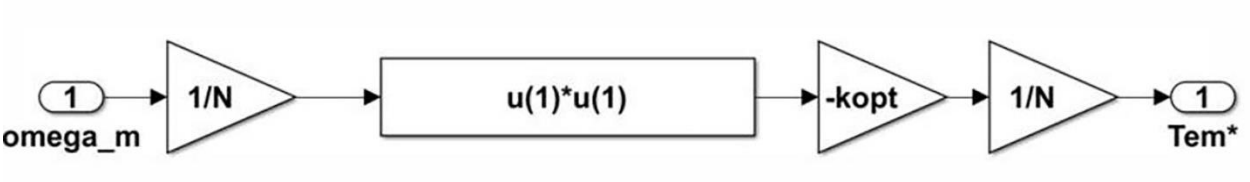


Рисунок 9. Структурная схема модели отслеживания максимальной мощности точки (MPPT).

Используя алгоритм управления максимальной точкой мощности, ВЭУ постоянно находится в режиме поиска точки генерации максимальной мощности, несмотря на характер изменения скорости ветра. Соответственно, коэффициент использования энергии ветра (коэффициент мощности) C_p находится на максимальном уровне вне зависимости от колебаний скорости ветра. Таким образом, в этой главе решена Задача 3.

В четвертой главе описывается конструкция разработанного виртуального контроллера ВЭУ. Контроллер ветроэлектрической установки был разработан с использованием программного пакета Matlab/Simulink.

Разработанный контроллер ВЭУ является модульным и содержит:

1. Виртуальный контроллер отслеживания максимальной мощности (MPPT), смоделированный для получения максимального крутящего момента (мощность), несмотря на изменения скорости ветра.

2. Трехфазный выпрямительный мост, предназначенный для преобразования переменного тока ГДП в постоянный.

3. Контроллер на стороне ротора (ПСР), предназначенный для управления скоростью, током, напряжением шины и углом поворота на стороне ротора.

4. Контроллер на стороне сети (ПСС), предназначенный для управления напряжением шины, активной мощностью, реактивной мощностью и током на стороне сети.

5. Схема защиты шунтом, предназначенная для защиты всей системы от перепадов напряжения и быстрого восстановления до устойчивого состояния.

Трехфазный программируемый источник напряжения разработан для симуляции провала напряжения на 90% от напряжения статора. Такой провал приводит к практически полному отказу системы, с началом восстановления напряжения после 3,5 сек до полного восстановления на 4,17 сек.

Во время падения (провала) напряжения ток полностью обеспечивается активной частью тока статора, с потерей управления крутящим моментом ВЭУ. В связи с этим проведено моделирование для исследования динамического поведения ВЭУ на базе ГДП с использованием схемы защиты шунтом. Моделирование реализовано в среде Matlab/Simulink. В процессе моделирования ГДП подвергается глубокому падению напряжения примерно на 90% от напряжения статора в течение 0,1 сек. Подход на основе векторного управления используется для управления ПСР и ПСС. Предполагается, что скорость ветра составляет (около 8 м/с) в течение всего периода моделирования. В качестве базовых величин берутся номинальное напряжение и мощность ВЭУ. Для обеспечения способности LVRT используется защита шунтом, чтобы предотвратить отключение ГДП от сети при сильном падении напряжения. Система ВЭУ испытывает 90%-ное падение напряжения статора. Таким образом, падение напряжения происходит на 3-ей секунде, как видно в мониторе (scope) анализа неисправностей, в то время как оставшееся напряжение сети составляет всего 10% от нормального. Когда защита шунтом активирована, ток проходит через цепь шунта, как показано на Рисунке 10.

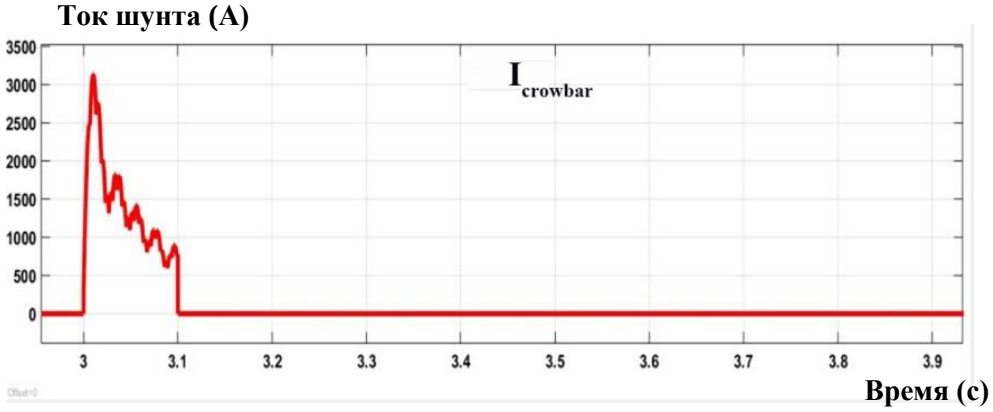


Рисунок 10. Ток через шунт во время провала напряжения.

Изменением величины сопротивления шунта $R_{crowbar}$, ток шунта можно регулировать выше или ниже. На Рисунке 11 показано напряжение статора с защитой шунтом:

1. Падение напряжения начинается на 3-ей сек и продолжается до 3,1 сек.
2. Напряжение статора начинает увеличиваться на 3,5 секунде и продолжается до полного восстановления до 4,17 сек.

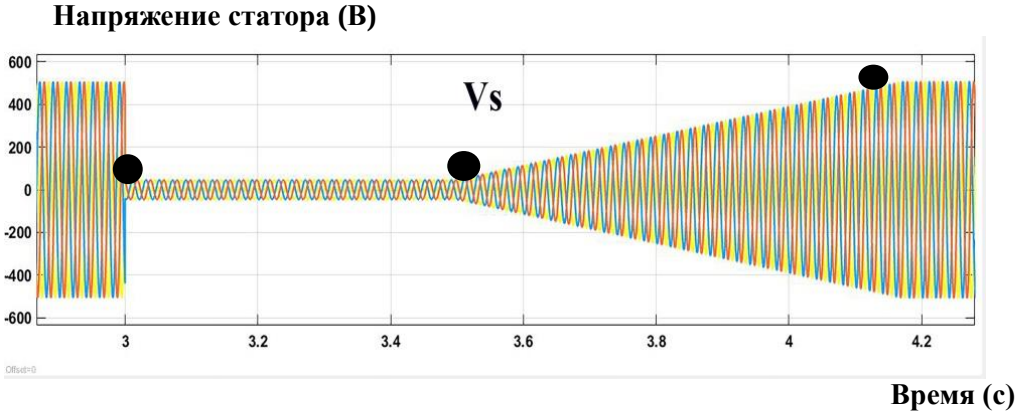


Рисунок 11. Напряжение статора с защитой.

Таким образом, мощность, генерируемая системой преобразования энергии, определяется корректно, следовательно, алгоритм адекватен в части определения максимальной точки мощности системы, где коэффициент мощности C_{p_max} равен 0,44 в максимальной точке мощности. В обычном режиме максимальный коэффициент мощности составляет 0,36 или 36% (нормальный случай без предложенного модифицированного контроллера MPPT). При подключении разработанного контроллера MPPT максимальный коэффициент мощности составляет 44%, следовательно, виртуальный контроллер увеличивает эффективность на 8%. Быстроходность λ турбины была определена равной 7,2 модуля. Кроме того, оптимальный коэффициент крутящего момента C_{t_opt}= 0,061 был определен на уровне 0,061, как показано на Рисунке 12.

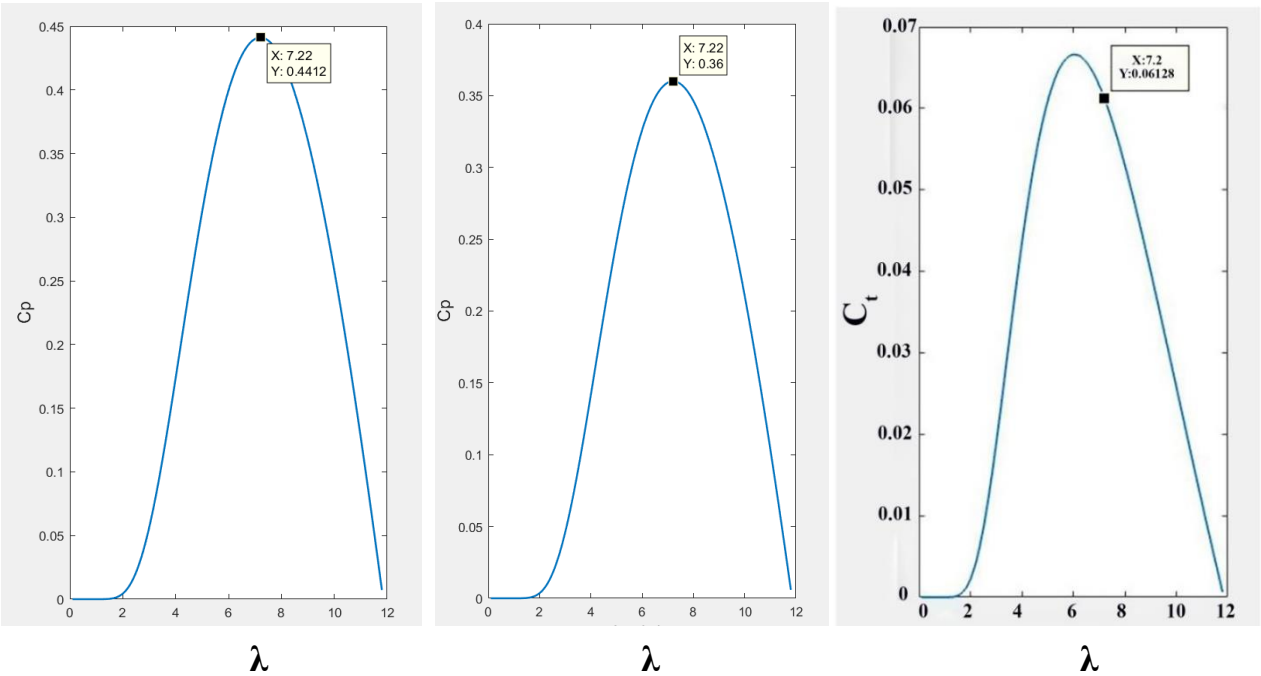


Рисунок 12. Максимальный коэффициент мощности *Cp* с MPPT и максимальный коэффициент мощности Cp без MPPT.

Как видно из рисунков, полученных в программном пакете Matlab/Simulink, все полученные результаты являются приемлемыми и применимы для решения поставленных задач с использованием разработанных алгоритмов, на основе которых действует виртуальный контроллер.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы, сделанные на основе моделирования, теоретических расчетов и виртуальных экспериментов:

1. Впервые в пакете MATLAB/SIMULINK построена комплексная компьютерная функциональная модель электрических компонентов ветроэнергетической (ветроэлектрической) установки на примере MITSUBISHI MWT-92 и системы управления, включающая преобразователь на стороне ротора (ПСР), преобразователь на стороне сети (ПСС), виртуальный контроллер (ВК) отслеживания максимальной точки мощности (MPPT), защитное устройство с шунтированием ротора (ЗУШР) и соответствующие контроллеры генератора двойного питания (ГДП), в том числе контроллер ротора AC-DC-AC. Результаты моделирования

электрической системы подтверждают адекватность компьютерной модели с демонстрацией удовлетворительных результатов.

2. Впервые построена математическая модель симметричного замыкания роторной цепи шунтом (crowbar) в программном пакете Matlab/Simulink. Результат виртуальных экспериментов с глубокими провалами напряжения сети во время штатной работы ВЭУ демонстрирует своевременное отсечение электрической схемы ротора ВЭУ с помощью защитного устройства с шунтированием ротора ЗУШР за 0,1 сек, что позволяет защитить схему от перенапряжений с последующим восстановлением исходного состояния за ≈1,17 сек (3 сек до 4,17 сек).. Разработанный метод определения сопротивления шунта применим для любого типа ГОВЭУ.

3. Впервые для нештатной работы при глубоких провалах напряжения сети в условиях переменной скорости ветра разработан новый метод и алгоритм отслеживания максимальной точки мощности (MPPT) с достижением максимальной производительности. Результатом виртуальных экспериментов явилось увеличение КИЭВ Ср на 8%.

4. Тестирование алгоритма MPPT на компьютерной модели ВЭУ NORDEX N80/2500 явилось валидацией (верификацией) разработанных моделей и методов, показав аналогичный результат повышения Ср на ≈ 8%, что говорит о возможности адаптации алгоритма к любым конструктивам ГОВЭУ.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследованияи и рекомендации:

1. Реализация аппаратного решения шунтовой защиты с последующей коммерциализацией.

2. Исследование возможности применения разработанных алгоритмов к малым ветроэнергетическим установкам в связи с прогнозируемым падением цен на них и экономической привлекательностью, поскольку их удельная стоимость в 10 раз ниже традиционных крупных установок мегаваттного класса.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Kulganatov, A**. Comparison of lifting mechanisms for raising wind wheel in mobile power complex based on renewable energy sources / A. Kulganatov, A. Ibrahim, A. Miroshnichenko // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 5th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2020. –P. 1475-1482 (Scopus). 0,5 п.л./0,3 п.л.

2. **Аблалгбар, О.** Влияние резкого снижения напряжения на асинхронную машину двойного питания в системе генерации

ветроэнергетической установки / О. Аблалгбар, А. Ибрагим, А.А. Ковалев, А.А. Мирошниченко, Е.В. Соломин // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. 2019. – №. 1 (80) . – С. Петербург. – С. 122-131. 0,6 п.л./0,3 п.л.

3. **Abdalgbar, O. J**. Modeling of doubly fed induction generator for vertical axis wind turbine (Моделирование индукционного генератора двойного питания вертикально-осевой ветроэнергетической установки) / O. J. Abdalgbar, A. Ibrahim // BULLETIN of the SUSU series, Power Engineering – 2019. – Vol. 19. – №. 1. – P. 43–49. 0,4 п.л./0,3 п.л.

4. **Ibrahim, A.** Development of mathematical model of doubly fed induction electric machine for wind turbine with improved yaw system / A. Ibrahim, E. Solomin, D. Korobatov // Proceedings – 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – ICIEAM 2019. – Sochi. – 25-29 March 2019. – Article № 8743048 (Scopus). 0,5 п.л./0,3 п.л.

5. **Solomin, E.** Renewable energy potential of Russian Federation / E. Solomin, A. Ibrahim, P. Yunusov // Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. – September 8-14. – 2019. – Sochi, Russia. – 2019. – P. 469-476 (WoS). 0,5 п.л./0,2 п.л.

6. **Gordievsky, E.** Review of idea on development of mobile scalable power–complex based on renewables / E. Gordievsky, A. Ibrahim, A. Miroshnichenko // Proceedings – 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. - Sochi. – 25-29 March 2019. – Article № 8743028 (Scopus). 0,5 п.л./0,3 п.л.

7. **Kovalyov, A.A.** Pressure plate generating electricity on the base of electromagnetic induction principle / A. A. Kovalyov, E.V. Solomin, A. Ibrahim, K. V. Romanov // Proceedings – 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. – Sochi. – 25-29 March 2019. – Article № 8742981 (Scopus). 0,5 п.л./0,2 п.л.

8. **Ibrahim, A.** Control strategy for maximum power point tracking of doubly fed induction motor for wind turbine / A. Ibrahim, E. Solomin, A. Miroshnichenko // 2018 Proceedings – International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018. – Article №. 8544372. – P. 14–19 (Scopus). 0,4 п.л./0,2 п.л.

9. **Miroshnichenko, A.** Research of aerodynamic characteristics of railway train for utilization of related airflow energy / A. Miroshnichenko, E. Solomin, A. Ibrahim // Proceedings – 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018. – Article №. 8544354. – P. 7–13, 2018 (Scopus). 0,4 п.л./0,2 п.л.

10. **Sirotkin, E.** Mathematical Modeling of Wind Turbine Brake System / E. Sirotkin, A. Martyanov, A. Ibrahim // Proceedings – 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018. – 8544362. – P. 51-56 (Scopus). 0,4 п.л./0,2 п.л.

11. **Solomin, E.** Analysis of the cell phone influence on the human body during voice control / E. Solomin, A. Ibrahim, E. Sirotkin // Proceedings – 2018 International Multi–Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – 8602924. – 2018. – Vladivostok, Russian Federation. – 3-4 October (Scopus). 0,5 п.л./0,2 п.л.

12. **Ибрагим, А. А.** Стратегия управления на основе отслеживания точки максимальной мощности асинхронного генератора двойного питания ветроэнергетической установки / А. А. Ибрагим, А.А. Мирошниченко, Е.В. Соломин, Е.М Гордиевский, А.А. Ковалев // Электротехнические системы и комплексы. – 2018.– №. 4(41). – С. 56–62. 0,4 п.л./0,2 п.л.

13. **Ibrahim, A.A.** Impacts of voltage dips in doubly fed induction motor for wind turbine generation systems (Влияние провалов напряжения на асинхронную электрическую машину двойного питания в системе генерации ветроэнергетической установки) / A.A. Ibrahim, E.V. Solomin // BULLETIN of the SUSU series, Power Engineering. – 2018. – Vol. 18. – №. 4. – P. 41–51. 0,7 п.л./0,4 п.л.

Свидетельства о госрегистрации программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №. 2020615625. Программа эмуляции гибридного ветро-водородного энергокомплекса / Алаззави О.Д., Ибрагим А.А., Соломин Е.В., Мирошниченко А.А., Гордиевский Е.М., Кулганатов А.З., Станчаускас В.И.. Заявка №. 2020614599 от 21.05.2020 г.; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27.05.2020 г

Ибрагим Ахмед Амер Ибрагим

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ СЕТИ

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 03.03.2020 г. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 49/107.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.