

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

На правах рукописи



Сироткин Евгений Анатольевич

**СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Соломин Евгений Викторович

Официальные оппоненты: **Николаев Владимир Геннадьевич**,
доктор технических наук,
Автономная некоммерческая организация
«Научно-информационный центр
«Атмограф», г. Москва, директор;

Велькин Владимир Иванович,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург,
профессор кафедры атомных станций и
возобновляемых источников энергии;

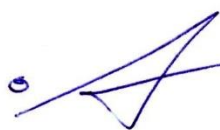
Матвеев Андрей Валентинович,
кандидат технических наук, доцент,
ООО «Омский завод инновационных
технологий «Энергомаш», г. Омск,
региональный представитель по Уральскому
федеральному округу.

Защита диссертации состоится 09 апреля 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 05.03.04 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=1068>

Автореферат разослан «__» марта 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ветроэнергетика – динамично развивающаяся отрасль энергетической промышленности во многих ведущих странах мира. На территории России ветроэнергетические установки (ВЭУ) наиболее востребованы и экономически целесообразны для электроснабжения отдаленных децентрализованных объектов. Преимущественно такие объекты расположены на северных и дальневосточных территориях страны и имеют характер стратегически важных объектов (оборонительные и навигационные объекты, станции ресурсодобывающих компаний и т.п.). Однако повышенные ветровые нагрузки указанных регионов и отсутствие возможности контроля за работой ветроэнергетических установок со стороны человека создают высокие риски их эксплуатации. Наиболее распространенными аварийными случаями при эксплуатации ветроэнергетических установок являются: разрушение лопастей из-за превышения частоты вращения ротора, перегрев обмоток генератора, разрушение конструкции из-за повышенных вибрационных колебаний. Как правило, для предотвращения перечисленных негативных факторов в ветроэнергетических установках используются системы торможения. Существующие способы торможения ветроэнергетических установок делятся на два типа: торможение с использованием электрического генератора и механическое торможение ветроколеса. Первый способ торможения является менее пригодным для торможения ветроэнергетических установок при скорости ветра выше 11 м/с, т.к. электрические генераторы ветроагрегатов конструктивно рассчитаны на номинальный режим работы при 11–12 м/с. При более высоких скоростях ветра возникает риск перегрева обмоток генератора. Второй способ торможения является более предпочтительным, т.к. механические элементы систем торможения способны выдерживать большие динамические и температурные нагрузки. Кроме того, согласно ГОСТ Р 51991-2002, все ветроэнергетические установки, номинальная мощность которых выше 4 кВт, должны иметь как минимум две независимые системы торможения – рабочую и аварийную, т.е. механическая система торможения может использоваться в качестве дополнительной к системе торможения электрическим генератором.

На данный момент отсутствуют надежные механические системы торможения, которые обеспечивали бы безопасную и стабильную эксплуатацию ветроэнергетических установок при повышенных скоростях ветра (более 11 м/с). Это подтверждают статистические данные по авариям на ветроэнергетических установках – на каждой пятой эксплуатируемой установке в мире происходит аварийная ситуация с последующим полным выходом ее из строя. Таким образом, обеспечение безопасности эксплуатации ветроэнергетических установок является актуальной темой, чему посвящена данная работа.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области совершенствования конструкций ветроэнергетических установок занимались следующие российские ученые: Н.Е. Жуковский, Д.С. Стребков, В.П. Ветчинкин, П.П. Безруких, В.В. Елистратов, О.С. Попель, В.М. Ляхтер, Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев, В.Н. Андриянов, В.И. Велькин, В.Г. Николаев, Н.В. Красовский, А.Ф. Дьяков, Э.М. Перминов, Ю.Г. Шакарян, В.Р. Вашкевич, Д.Н. Быстрицкий, Я.Б. Данилевич, Г.И. Денисенко, В.А. Минин, Е.И. Куклин, М.В. Кузнецов, В.И. Виссарионов, В.В. Харитонов, Я.И. Шефтер и другие.

Цель работы – повышение безопасности эксплуатации ветроэнергетической установки путем интеграции в ее состав системы аварийного торможения и исследование эффективности работы интегрированной системы аварийного торможения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ статистических данных по авариям ветроэнергетических установок. Определить виды аварий, их причины и оценить последствия аварийных случаев.

2. Выявить и проанализировать существующие способы аварийного торможения ветроэнергетических установок. Сформулировать требования к системам аварийного торможения ветроэнергетических установок.

3. Разработать математическую модель и алгоритм управления системы аварийного торможения ветроэнергетических установок. На их основе создать универсальную компьютерную модель для исследования влияния системы аварийного торможения на процесс эксплуатации ветроэнергетической установки.

4. Разработать конструкцию системы аварийного торможения ветроэнергетической установки. Провести компьютерное моделирование работы спроектированной системы аварийного торможения.

5. Провести экспериментальное исследование для проверки адекватности созданной универсальной компьютерной модели системы аварийного торможения ветроэнергетической установки.

Объект исследования – ветроэнергетическая установка.

Предмет исследования – влияние работы системы аварийного торможения на безопасность эксплуатации ветроэнергетической установки.

Научная новизна работы:

1. Впервые приведены статистические данные аварий на ветроэнергетических установках по всему миру.

2. Приведено математическое описание процессов, влияющих на принятие решения о необходимости торможения ветроэнергетической установки.

3. Получены результаты компьютерного моделирования работы системы аварийного торможения ветроэнергетической установки. Получены результаты экспериментального исследования работы системы торможения

ветроэнергетической установки, подтверждающие корректность созданной компьютерной модели.

Теоретическая значимость:

1. Приведены общемировые статистические данные по авариям на ветроэнергетических установках.

2. Приведено математическое описание процессов, влияющих на принятие решения о необходимости торможения ветроэнергетической установки.

Практическая значимость:

1. Разработана конструкция системы аварийного торможения для вертикально-осевой ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт (ВЭУ-3).

2. Разработана универсальная компьютерная модель, предназначенная для исследования влияния системы аварийного торможения на процесс работы ветроэнергетической установки.

3. Разработана программа управления для контроллера системы аварийного торможения ВЭУ-3.

4. Результаты диссертации получили внедрение на предприятиях: ООО НПП «Учтех-ПРОФИ», ООО НИИ «Уралмет» и ООО «Инпромавтоматика». Кроме того, результаты работы используются в образовательном процессе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Исследования и разработки по теме диссертации были поддержаны:

- стипендией Президента РФ молодым ученым и аспирантам (;
- стипендией Законодательного собрания Челябинской области;
- грантом в рамках программы «УМНИК».

Методология и методы исследований. При выполнении работы использовались методы математического моделирования для теоретического описания системы аварийного торможения ВЭУ. При расчете редуктора использовалась методика проектирования передач зацеплением с применением ЭВМ, предложенная Устиновским Е.П. Для реализации компьютерной модели системы аварийного торможения ВЭУ применялась среда MATLAB Simulink, а для проектирования конструкции системы торможения использовался программный комплекс САПР SolidWorks.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерная модель системы аварийного торможения ветроэнергетической установки.

2. Результаты компьютерного моделирования работы системы аварийного торможения ветроэнергетической установки.

3. Результаты экспериментального исследования, подтверждающие адекватность математической и компьютерных моделей системой аварийного торможения ветроэнергетической установки.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируется на использовании известных положений механики, аэродинамики, электромеханики, теории автоматического управления,

методов моделирования с применением ЭВМ и подтверждается результатами экспериментального исследования.

Апробация работы. Основные результаты работ и исследований по теме диссертации были представлены на следующих конференциях:

1. Первый международный форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности – REENFOR» (РАН, Москва, 2013 г.);

2. XLII научно-практическая конференция с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2013 г.);

3. IX Всероссийская научная молодежная школа с международным участием «Возобновляемые источники энергии» (МГУ им. Ломоносова, Москва, 2014 г.);

4. IX Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (КГЭУ, Казань, 2014 г.);

5. Краснодарский весенний форум «Энергоэффективность и инновации» (Сочи, 2014 г.);

6. Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (УрФУ, Екатеринбург, 2014 г.);

7. 1st International Conference on Industrial Engineering (ЮУрГУ, Челябинск, 2015 г.);

8. Innovational Energy Engineering conference (ПНИПУ, Пермь, 2015 г.);

9. XI International IEEE Scientific and Technical Conference (ОмГТУ, Омск, 2017 г.);

10. International Ural Conference on Green Energy (ЮУрГУ, Челябинск, 2018 г.);

11. Международная научно-практическая конференция «электротехнические комплексы и системы» (УГАТУ, Уфа, 2018 г.);

12. Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2019» (ДвФУ, Владивосток, 2019 г.).

Публикации. По теме работы опубликовано 16 работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, из них 7 статей индексируется наукометрическими базами Scopus и Web of Science, получено 3 патента РФ на полезные модели и 1 свидетельство на программу ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 141 странице машинописного текста, содержит 29 страниц приложений, 65 рисунков, 9 таблиц, список используемой литературы из 133 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, определены методы исследования, научная новизна и практическая значимость. Представлены основные положения, выносимые на защиту. Обозначены объект и предмет исследования. А также представлены сведения об апробации результатов и публикациях по теме исследования.

В первой главе рассмотрена история развития и актуальность ветроэнергетики в настоящий момент, особенности эксплуатации ветроэнергетических установок при повышенных ветровых нагрузках и существующие системы торможения ВЭУ. Приведены статистические данные по авариям на ветроэнергетических установках. По проанализированным данным с 1989 по 2018 годы всего произошло 797822 аварийных случая при эксплуатации ВЭУ (рисунок 1). В 2018 году было зафиксировано наибольшее количество аварийных ситуаций – 69834. Однако следует отметить, что с 2011 года количество аварийных ситуаций имеет незначительную тенденцию роста.

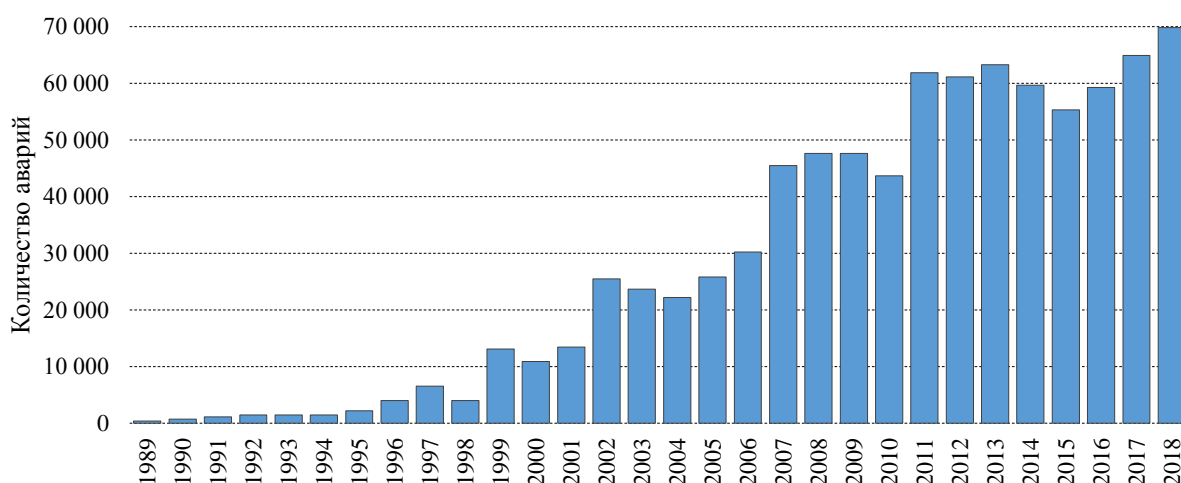


Рисунок 1 – Количество аварийных случаев на ветроэнергетических установках с 1989 по 2018 гг.

Для снижения аварийности ветроэнергетических установок их оснащают системами аварийного торможения. Однако, учитывая высокое количество аварийных случаев на ветроэнергетических установках, было сделано заключение, что существующие системы торможения недостаточно надежны и эффективны. Из анализа статистических данных по авариям на ветроэнергетических установках следует, что наиболее важными характеристиками, по которым необходимо отслеживать техническое состояние объекта – это частота вращения ротора и температура генератора, а также вибрационные колебания конструкции. Важным требованием для системы торможения ВЭУ является полная автономность от основной системы управления. Также система торможения должна содержать механические элементы, способные выдерживать повышенные нагрузки.

Вторая глава посвящена теоретическому описанию системы аварийного торможения ветроэнергетической установки, разработке ее математической модели, алгоритма управления и универсальной компьютерной модели.

На основе требований к системам аварийного торможения, сформулированным в первой главе, было решено использовать механическую систему торможения с электрическим приводом. На рисунке 2 представлена структурная схема такой системы.

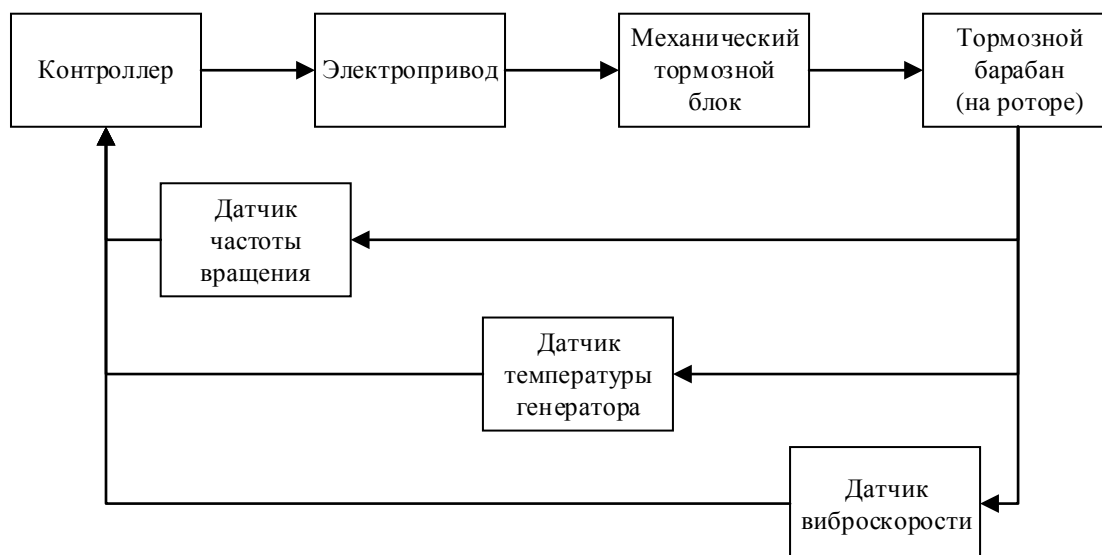


Рисунок 2 – Структурная схема системы аварийного торможения ВЭУ.

Для создания достаточного тормозного момента для торможения ВЭУ при скорости ветра выше 11 м/с, необходимо помимо электродвигателя использовать редуктор. Это объясняется тем, что габаритные размеры электродвигателей ограничены габаритными размерами корпусных элементов ветроэнергетических установок. И при скорости ветра выше 11 м/с крутящий момент на роторе ВЭУ будет превышать возможные крутящие моменты существующих электродвигателей, которые возможно разместить внутри корпусных деталей ветроагрегата. Применение редуктора позволит увеличить крутящий момент, создаваемый электродвигателем.

Для удержания ветроколеса в заторможенном состоянии можно применить активацию электродвигателя в режиме удержания вала, либо использовать в механическом блоке самозаклинивающиеся элементы. Для энергобезопасности ветроэнергетического комплекса предпочтительным является второй вариант, т.к. в этом случае отсутствуют затраты на питание электродвигателя во время простоя ВЭУ в заторможенном состоянии.

Была разработана математическая модель, описывающая процессы, которые влияют на принятие решения о необходимости активации системы торможения ветроэнергетической установки системы аварийного торможения. Модель представлена следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{эм} - M_{торм.} \\ M_{эм} = I \cdot k_{ген.} \\ M_a = C_P(Z) \frac{\rho \cdot S_{ротора} \cdot V^3}{2 \cdot \omega} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} M_{ред.} = M_{пр.} \cdot \eta_{ред.} \\ F_{к} = M_{ред.} \cdot k_{мех.} \\ M_{торм.} = F_{к} \cdot R_{бар.} \cdot \mu \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_{тр.} = Cm(T_{колодок} - T_{окр.}) \\ Q_{тр.} = A_{тр.} = F_{тр.} \cdot l \\ dQ = I^2 R_{провод.} dt \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial}{\partial S} \cdot Q = \alpha \cdot \Delta T \\ l = \omega R_{бар.} \cdot t_a \\ t_a = \frac{J_{ротора} \cdot n}{M_{торм.}} \end{array} \right.$$

С использованием математической модели системы аварийного торможения ВЭУ была разработана ее универсальная компьютерная модель в программном комплексе MATLAB Simulink (рисунок 3), для которой был разработан алгоритм управления (рисунок 4). Данная компьютерная модель является универсальной для всех типов ветроэнергетических установок. Она позволяет исследовать влияние различных параметров системы аварийного торможения на процесс эксплуатации ВЭУ. Использование разработанной компьютерной модели дает возможность на этапе проектирования системы аварийного торможения ВЭУ оптимизировать ее параметры, а также оценить эффективность ее работы.

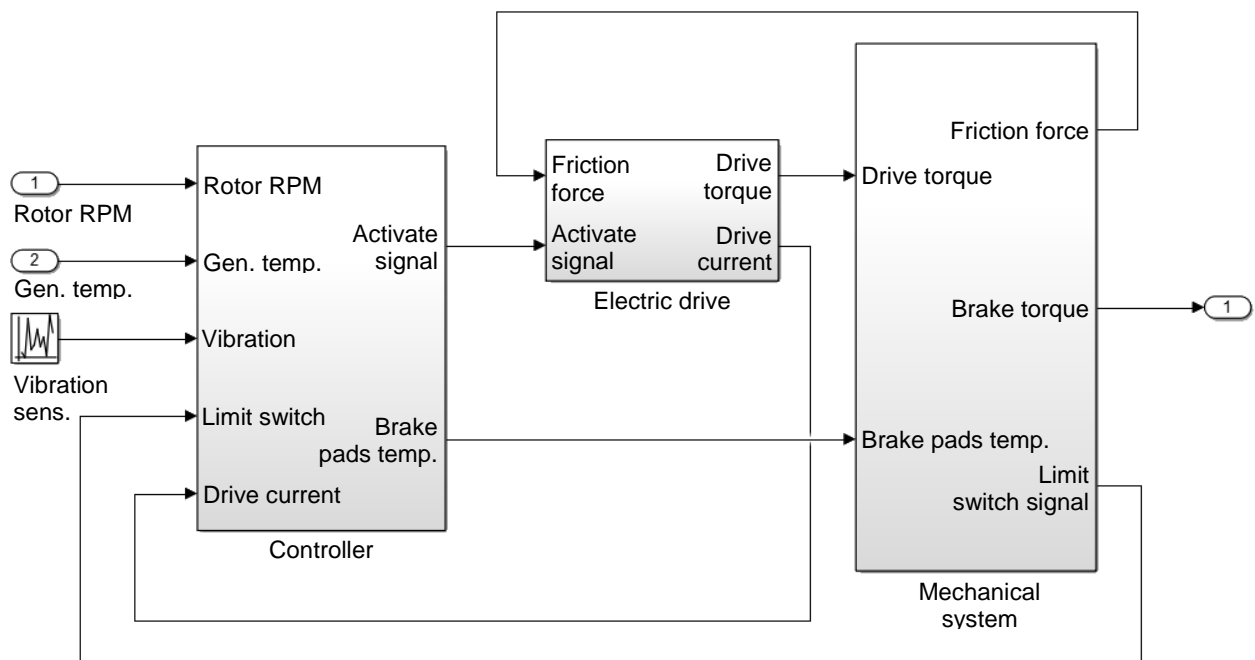


Рисунок 3 – Блок-схема универсальной компьютерной модели системы аварийного торможения ВЭУ в MATLAB Simulink.

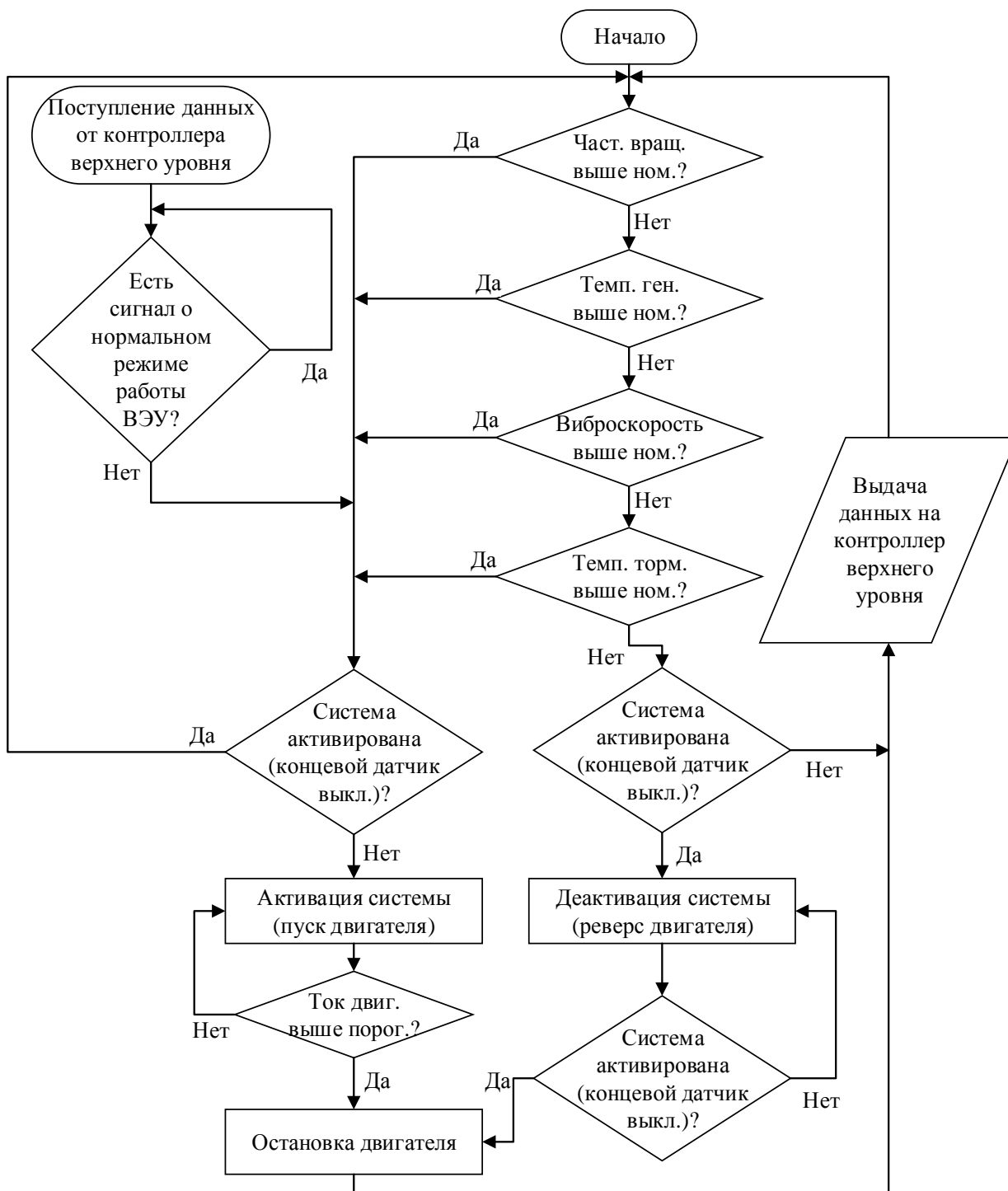


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма работы системы аварийного торможения ВЭУ.

Третья глава посвящена разработке конструкции системы аварийного торможения ветроэнергетической установки, проведению компьютерного моделирования ее работы и проведению эксперимента, подтверждающего корректность компьютерной модели.

Конструкция исполнительного механизма аварийной системы торможения была разработана для вертикально-осевой ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт – «ВЭУ-3», представленной на рисунке 5.

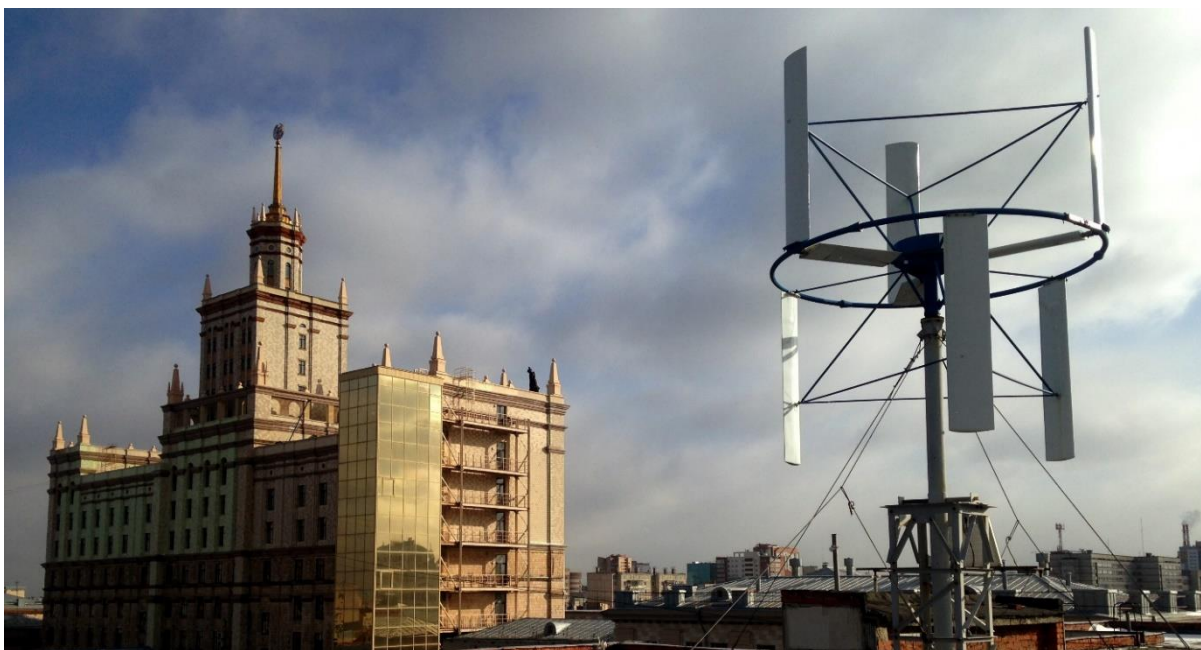


Рисунок 5 – Экспериментальная вертикально-осевая ветроэнергетическая установка мощностью 3 кВт «ВЭУ-3».

На основе паспортных и рабочих характеристик ВЭУ-3, были сформулированы следующие требования к системе аварийного торможения:

– тормозной момент должен составлять не менее 1000 Н·м. По паспортным данным штатная система управления способна обеспечить безопасную работу ВЭУ-3 при скорости ветра 13...14 м/с. При этом крутящий момент на роторе ВЭУ-3 при скорости 15 м/с составляет 600 Н·м, момент инерции ротора ВЭУ-3 равен 400 Н·м;

– конструкция тормозной системы должна быть расположена внутри мачты и ступицы для исключения аэродинамического затенения ометаемой площади ветроколеса.

В качестве исполнительного тормозного устройства был выбран трехкулачковый блок. Конструкции трехкулачковых блоков широко применяются в области машиностроения и являются надежными и отработанными механизмами. На рисунке 6 представлена компьютерная модель конструкции трехкулачкового тормозного блока. Принцип его работы заключается в следующем. На нижней поверхности кулачков находятся гребни, которые контактируют (входят в зацепление) со спиральным диском, на котором нарезана архимедова спираль. При вращении спирального диска гребни кулачков движутся по траектории архимедовой спирали, но т.к. кулачки установлены в пазы корпуса, то их движение ограничивается только радиальным перемещением. Каждый кулачок имеет шарнирное соединение с тормозными колодками. Данный шарнир обеспечивает более равномерное прижатие всей поверхности тормозных колодок к стенке тормозного барабана, а также, позволяет осуществлять быструю замену тормозных колодок без необходимости демонтажа и разборки конструкции ВЭУ. На разработанную конструкцию был получен патент на полезную модель № 178619.

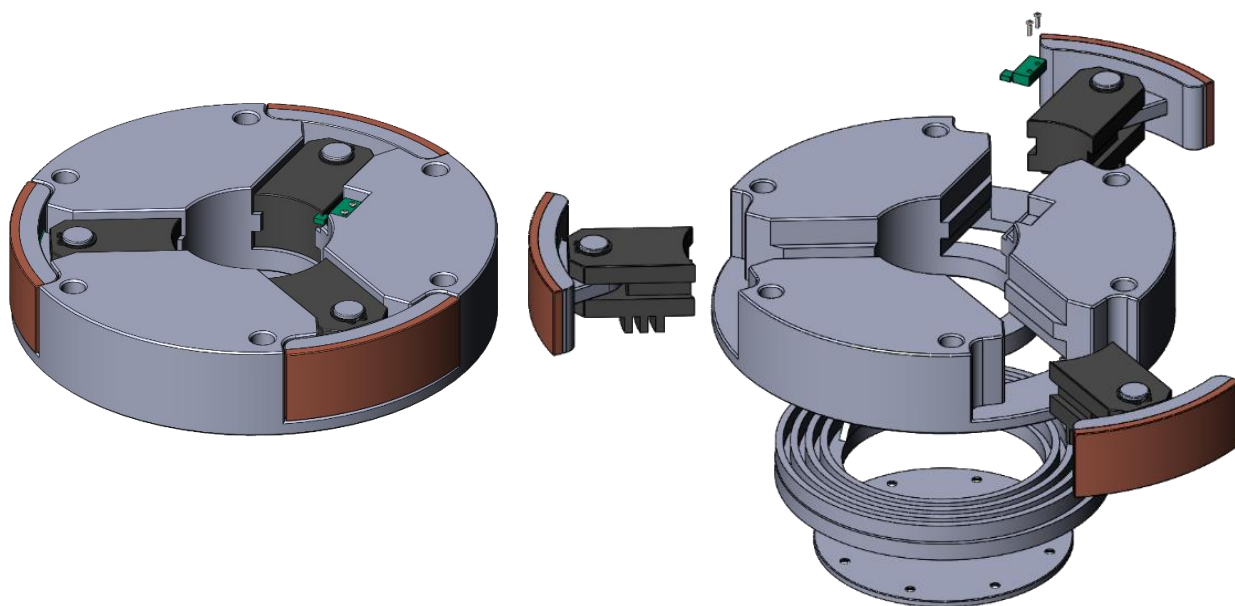


Рисунок 6 – Компьютерная модель конструкции тормозного блока системы аварийного торможения ВЭУ-3 (слева – в собранном виде, справа – в разнесенном).

В трехкулачковом блоке имеется концевой выключатель, с помощью которого возможно определять положение кулачков и своевременно останавливать их движение. Важно отметить, что внешний диаметр трехкулачкового блока и крепежные отверстия совпадают с внешним диаметром и крепежными отверстиями фланца мачты ВЭУ-3, и, кроме того, блок имеет сквозное центральное отверстие для монтажа кабеля генератора.

Далее был выбран электродвигатель НМАВ15А200-10S17bА-С, номинальный крутящий момент которого равен 3,6 Н·м, а номинальная частота вращения – 2000 об/мин. Исходя из полученных характеристик двигателя и требований (по тормозному моменту) к трехкулачковому тормозному блоку, был рассчитан и спроектирован редуктор. В результате было получено, что редуктор содержит четыре ступени планетарного типа и его общее передаточное число составляет 625 (рисунок 7). При этом габариты и конструктивное исполнение редуктора позволяют закрепить на нем электропривод и поместить сборку внутрь мачты ВЭУ-3. Тормозной момент системы торможения составил 1022 Н·м.

Преимуществами разработанной конструкции являются:

- возможность ее размещения внутри мачты, что позволяет избежать затенения полезной ометаемой площади ветроколеса;
- полная автономность от рабочих органов ВЭУ-3;
- возможность торможения при наличии неисправности электрического генератора ветроэнергетической установки (является преимуществом в сравнении с электрическими способами торможения);
- возможность удержания ВЭУ в заторможенном состоянии без затрат электроэнергии;
- обеспечение плавного торможения без причинения ущерба конструкции ветроколеса.

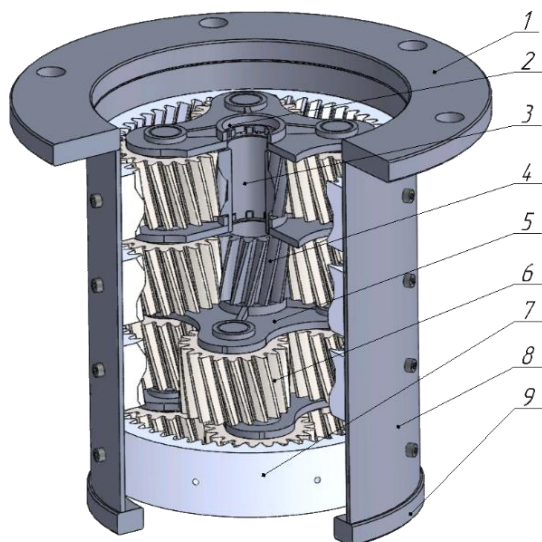


Рисунок 7 – Компьютерная модель редуктора (поступенчатый разрез):

- 1 – фланец для крепления к мачте,
- 2 – пазы зацепления с фланцем спирального диска трехкулачкового блока,
- 3 – сквозное отверстие,
- 4 – малая шестерня (солнце),
- 5 – водило,
- 6 – большая шестерня-планета (сателлит),
- 7 – эпицикл,
- 8 – корпус редуктора,
- 9 – фланцевое крепление для мотора.

Для исследования влияния спроектированной системы аварийного торможения на работу ВЭУ-3 была создана ее компьютерная модель (на основе универсальной компьютерной модели, разработанной во второй главе). Компьютерное моделирование работы спроектированной системы аварийного торможения проводилось как при постоянной скорости ветра, так и при переменной. По результатам моделирования было выявлено, что система способна обеспечить безопасную и стабильную эксплуатацию ВЭУ-3 при установившихся (постоянных) значениях скорости ветра до 25 м/с (рисунок 8).

На первом графике представлена скорость ветра, на втором – частота вращения ротора ветроэнергетической установки, на третьем – температура генератора, на четвертом – температура тормозных колодок и на пятом – величина тормозного момента, прикладываемого к ротору. При первом торможении значение частоты вращения ротора превысило 200 об/мин, указанное производителем, как предельно допустимое, несмотря на воздействие системы торможения. Однако в реальной ситуации данное значение превышено не будет по двум причинам: скорость ветра имеет плавный характер нарастания; система торможения будет активирована еще на более низких скоростях ветра, следовательно, тормозные колодки уже будут разогреты, что повысит коэффициент их трения и тормозной момент соответственно. При проведении моделирования специально был отключен режим электрической нагрузки на генератор для проверки надежности системы торможения в случае аварии (выхода из строя) электрического генератора. Переменное во времени значение тормозного момента, прикладываемого к ротору, объясняется тем, что изменялась температура тормозных колодок и, как следствие, коэффициент трения, что в свою очередь влияло на величину тормозного момента.

На рисунке 9 представлены результаты компьютерного моделирования работы ВЭУ-3 при переменной скорости ветра. Система обеспечивала безопасную эксплуатацию установки при отдельных порывах ветра до 35 м/с и среднем значении скорости ветра – 21,9 м/с.

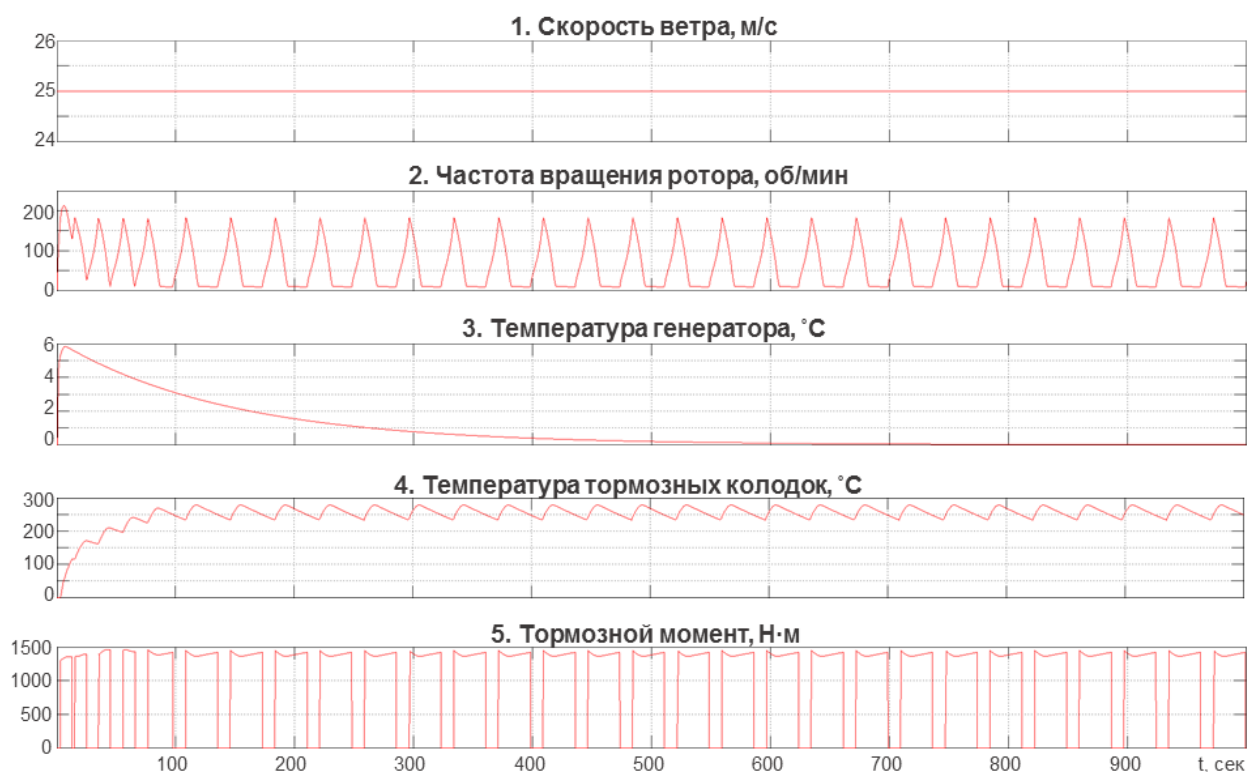


Рисунок 8 – Результаты компьютерного моделирования работы системы аварийного торможения ВЭУ-3 при постоянной скорости ветра 25 м/с (в MATLAB Simulink).

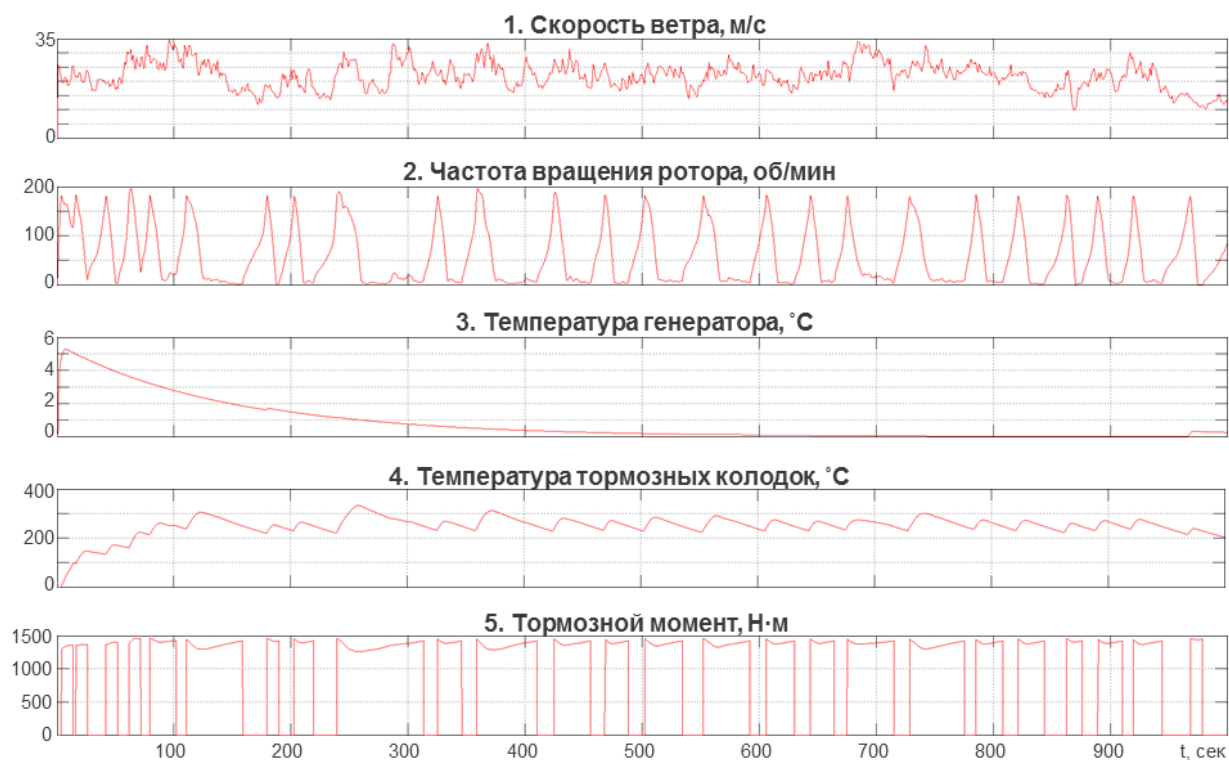


Рисунок 9 – Результаты компьютерного моделирования работы системы торможения ВЭУ-3 при переменной скорости ветра с отдельными порывами до 35 м/с и средним значением 21,9 м/с (в MATLAB Simulink).

Для проверки корректности разработанных математической и компьютерной моделей, алгоритма управления был проведен эксперимент на исследовательском стенде «СГСУ-3000», имитирующем работу системы аварийного торможения ВЭУ-3 (рисунок 10).

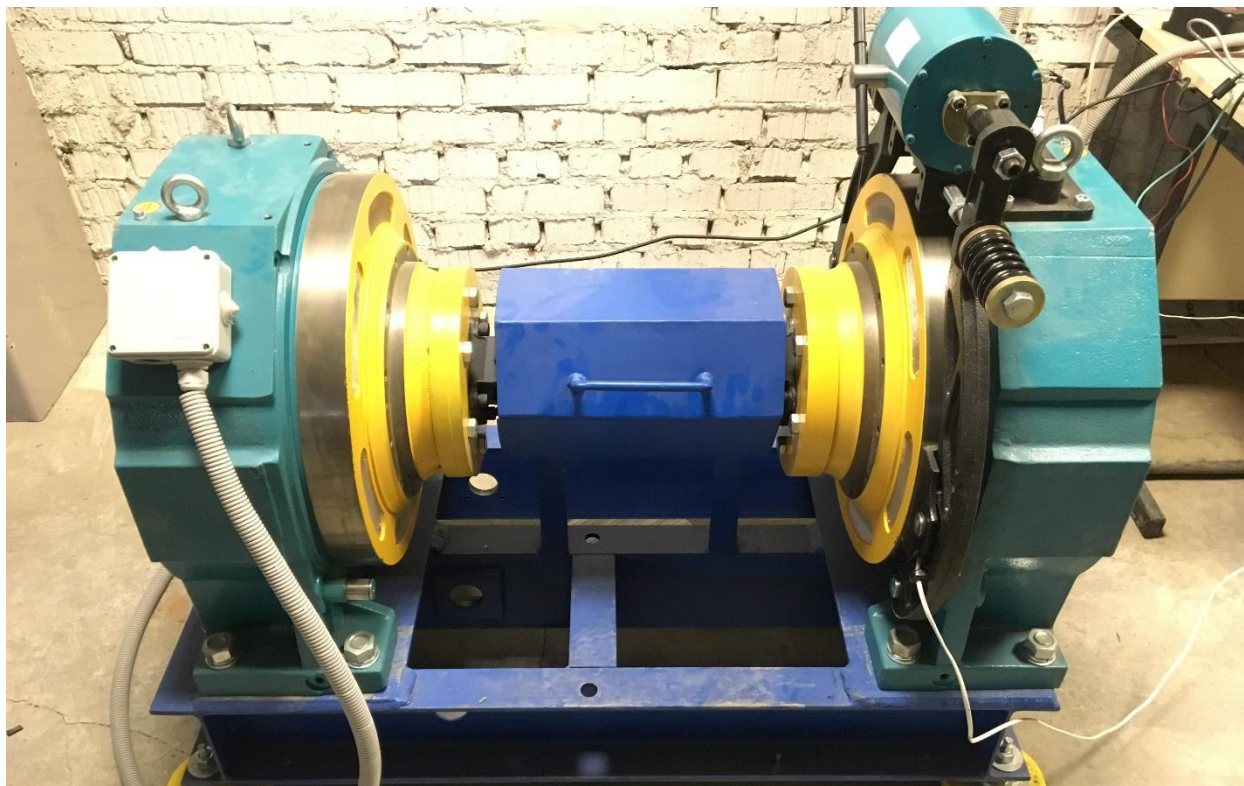


Рисунок 10 – Общий вид стенда исследовательского СГСУ-3000 и вспомогательного оборудования для проведения эксперимента.

На рисунке 11 представлены общая и кинематическая схемы тормозного блока стенда СГСУ-3000. Исследовательский стенд представляет собой тормозной блок, имитирующий систему аварийного торможения ВЭУ, и привод, соединенный с тормозным барабаном с помощью моментной муфты и имитирующий ветровую нагрузку. Тормозной блок содержит тормозной барабан, тормозные колодки и электромагнит, прижимающий тормозные колодки к тормозному барабану. Тормозные колодки закреплены на специальных скобах, которые прижимают их к тормозному барабану за счет воздействия пружин. Принцип работы тормозного блока является инверсивным, т.е. при нормальном режиме работы стенда, электромагнит находится в активированном состоянии (тем самым, разжимая тормозные колодки и позволяя свободно вращаться валу), а при необходимости торможения питание электромагнита отключается (и пружины автоматически прижимают тормозные колодки к тормозному барабану). Также, к стенду были подключены датчик частоты вращения тормозного барабана и датчик температуры тормозных колодок (термопара). На основе показаний с датчиков формировалось управляющее воздействие на электромагнит.

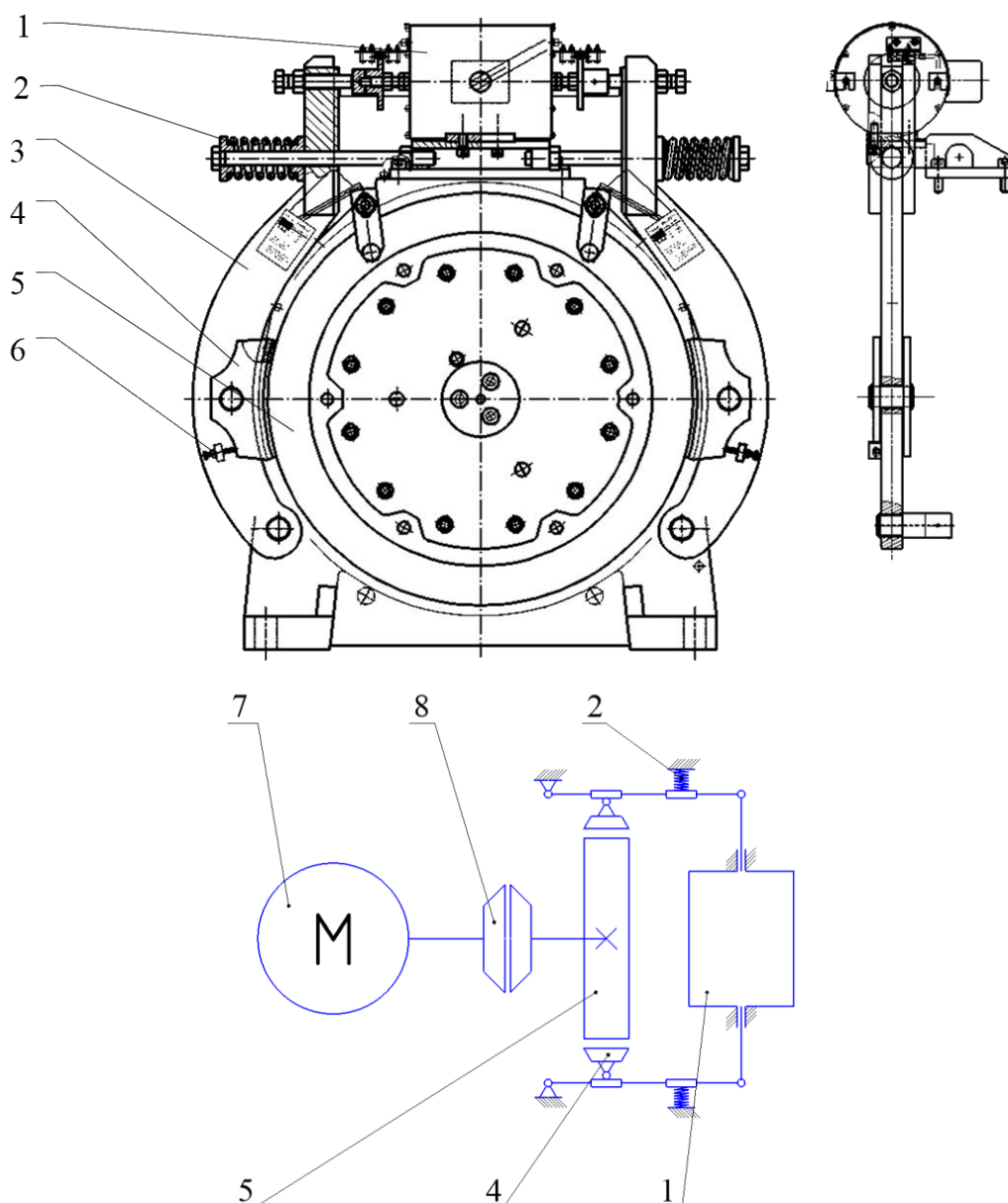


Рисунок 11 – Схема конструкции тормозного блока стенда СГСУ-3000: 1 – электромагнит, 2 – прижимная пружина, 3 – скоба, 4 – тормозная колодка, 5 – тормозной барабан, 6 – термопара.

Алгоритм управления системой аварийного торможения ВЭУ, приведенный во второй главе был адаптирован под конструкцию и параметры исследовательского стенда СГСУ-3000 (рисунок 12). Параметры режима работы стенда задавались в соответствии с эквивалентными параметрами режима работы системы аварийного торможения ВЭУ-3 в компьютерной модели при постоянной скорости ветра 25 м/с.

По результатам испытаний были установлено, что система способна обеспечить удержание измеряемых параметров (частота вращения тормозного барабана, температуру тормозных колодок) в допустимых пределах при частоте вращения и крутящем моменте приводного вала, соответствующих постоянной скорости ветра 25 м/с (рисунок 13).

эксперимента. И на четвертом графике изображено изменение величины напряжения, подаваемого на электромагнит тормозного блока. Как сказано ранее, принцип работы тормозного блока является инверсивным, т.е. при нормальном режиме работы стенда, электромагнит находится в активированном состоянии (тем самым, разжимая тормозные колодки и позволяя свободно вращаться валу), а при необходимости торможения питание электромагнита отключается и пружины автоматически прижимают тормозные колодки к тормозному барабану.

Всего эксперимент длился 5 минут – этого времени было достаточно для того, чтобы работа тормозного блока начала происходить в установившемся режиме (с близкими по продолжительности временными интервалами простоя в заторможенном состоянии). На 11-ой секунде эксперимента система активировала тормозные колодки, при этом частота вращения ведомого вала снизилась до 104 об/мин, а ведущий вал продолжал разгон до заданной частоты вращения (337 об/мин). Разрыв передачи мощности между ведущим и приводным валами обеспечивался за счет моментной муфты. Данный процесс можно наблюдать на 1 и 2 графиках – во время проскальзывания муфты графики становятся скачкообразными. Это обуславливается особенностями конструкции моментной муфты, которые вызывают биения при передаче крутящего момента. Далее завершился разгон ведущего блока и наблюдалось второе торможение (на 24-ой секунде). После второго торможения скорость ведомого вала упала до 89 об/мин, хотя продолжительность торможения была такая же, как и при первом торможении (10 секунд). Это объясняется тем, что увеличилась температура контактной поверхности тормозных колодок и, как следствие, увеличился коэффициент трения материалов, а также произошла притирка поверхностей (стерлись частицы ржавого налета и других загрязнений). Далее следовало еще два аналогичных 10-ти секундных торможения ведомого вала. А во время процесса пятого торможения на 62-ой секунде температура тормозных колодок превысила 250 °С, в результате чего система торможения продолжала оставаться в активированном состоянии. На 65-ой секунде произошла полная остановка ведомого вала, после чего была автоматически прекращена подача напряжения на приводной блок. На 69-ой секунде температура тормозных колодок опустилась ниже 250 °С и система снова подала напряжение на приводной блок. Во время разгона ведущего и ведомого блоков на 109-ой секунде частота вращения обоих валов превысила 180 об/мин, после чего вновь была активирована система торможения. Во время торможения температура тормозных колодок превысила 250 °С и система со 120 по 127 секунды оставалась в неподвижном состоянии, пока температура тормозных колодок не нормализовалась.

Далее произошло еще 4 аналогичных итерации разгона и торможения с простым в заторможенном состоянии. При этом на 4 последних итерациях отмечалось близкое по длительности время простоя стенда в заторможенном

состоянии, в результате чего был сделан вывод, что работа стенда приобрела установившийся характер и эксперимент был завершен.

Алгоритм работы системы торможения показал свою работоспособность как в процессе компьютерного моделирования, так и в ходе эксперимента. Измеряемые параметры системы не превысили предельных величин. При сравнении графиков на рисунках 8 и 13 наблюдается схожая тенденция нагрева тормозных колодок. Незначительные колебания на графике температуры на рисунке 13 вызваны погрешностью измерений самой термопарой, неравномерностью прогрева тормозных колодок и недостаточно жесткой фиксацией термопары в теле тормозной колодки. Кроме того, отмечается схожесть характеров изменения частоты вращения объектов торможения (ветроколеса и ведомого вала). Превышение температуры нагрева тормозных колодок над температурой нагрева тормозных колодок при компьютерном моделировании на 11,73%. Данное расхождение значений обусловлено тем, что экспериментальное исследование проводилось при температуре окружающей среды на 3 °С выше, чем в компьютерном моделировании. Кроме того, расхождение температурных значений объясняется неидеальностью пропорций геометрических параметров тормозных элементов в компьютерном и экспериментальном исследованиях.

Таким образом, созданные алгоритм управления, математическая и компьютерная модели системы аварийного торможения ВЭУ являются корректными и могут использоваться для расчетов и проектирования систем торможения ветроэнергетических установок с соответствующим масштабированием.

В четвертой главе предложен способ реализации системы аварийного торможения для ВЭУ-3. Проектирование и выбор компонентов осуществлялся для конструкции системы аварийного торможения ВЭУ-3, представленной в 3 главе. Состав электрических компонентов приведен на функциональной схеме системы аварийного торможения ВЭУ-3 (рисунок 14). В состав электронных компонентов системы вошли:

- контроллер Velocio Branch PLC 1486 (рабочее напряжение 5 В);
- датчик частоты вращения вала ветроколеса, основанный на дифференциальном эффекте Холла TLE 4935L;
- датчик температуры генератора DS18B20;
- датчик виброскорости (трехосевой акселерометр) ADXL345;
- датчик тока ACS758xCB;
- концевой выключатель XCMD2110L1;
- преобразователь напряжения (DS 48 В – DS 5 В) NSD15-48D5;
- инвертор (для питания электропривода переменным напряжением 200 В) MEAN WELL TS-1000-248;
- резервный источник питания Delta DT 12008.

Для контроллера была разработана программа управления на языке программирования C++ (на нее было получено свидетельство на программу для ЭВМ №2019615727).

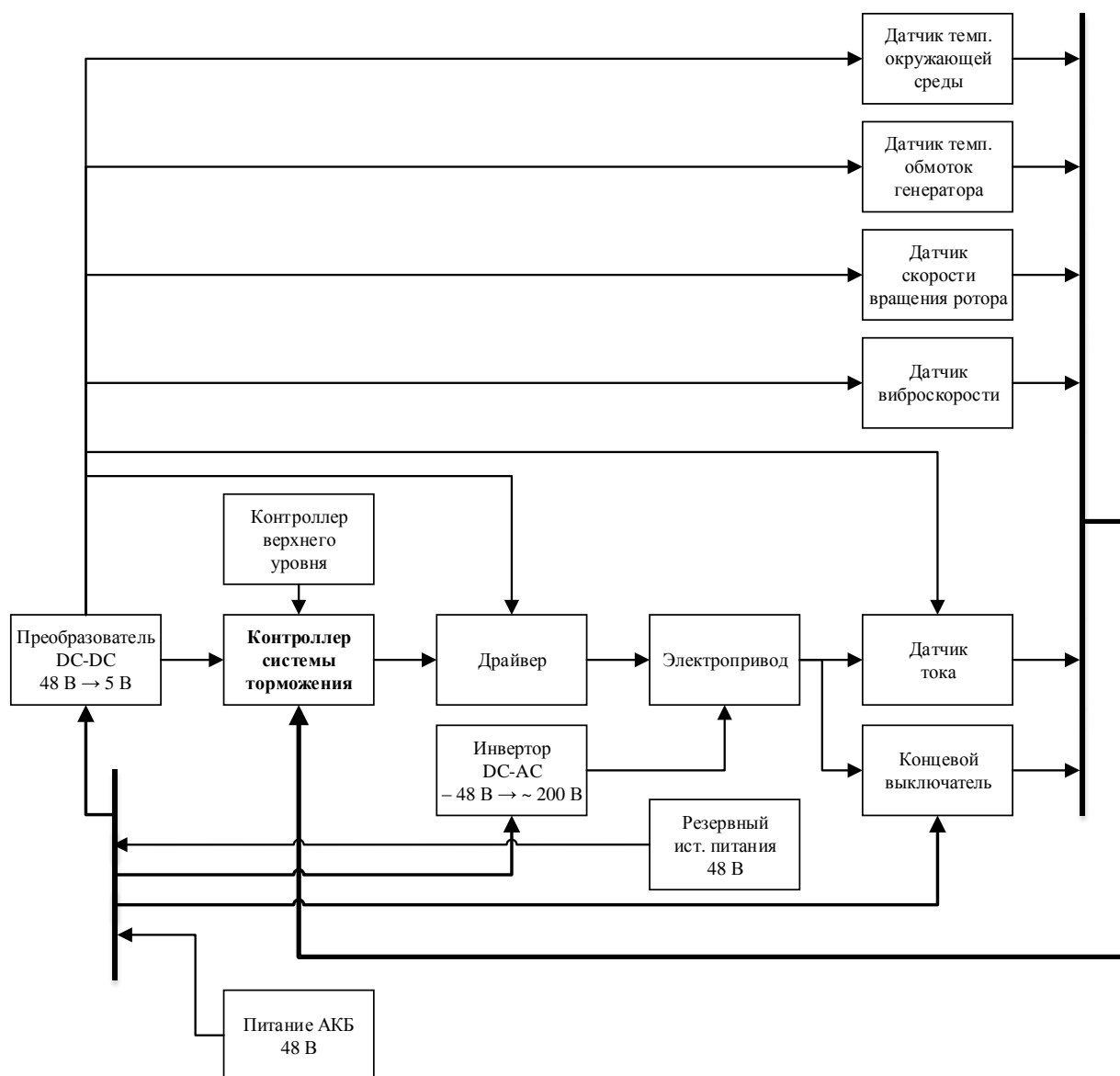


Рисунок 14 – Функциональная схема системы аварийного торможения ВЭУ-3.

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы:

1. Проведен анализ статистических данных аварий ветроэнергетических установок. Определены виды аварий, их причины и последствия.

2. Выявлены и проанализированы существующие способы аварийного торможения ветроэнергетических установок: механическое торможение, торможение с использованием электрического генератора, комбинированное торможение ВЭУ (может одновременно включать в себя аэродинамическое, механическое и электрическое торможение). Сформулированы следующие требования к системам аварийного торможения ветроэнергетических установок: необходимо контролировать частоту вращения ротора, температуру генератора и вибрационные колебания конструкции; система должна быть способна работать независимо от основной системы управления ВЭУ; система должна основываться на механическом способе торможения.

3. Разработана математическая модель, описывающая процессы, которые необходимы для принятия решения о торможения: степень нагрева

тормозных элементов, степень нагрева обмоток генератора, частота вращения ветроколеса. Разработан алгоритм управления системой аварийного торможения ветроэнергетической установки.

4. С использованием математической модели и алгоритма управления была разработана универсальная компьютерная модель системы аварийного торможения ВЭУ в программной среде MATLAB Simulink. Данная модель позволяет исследовать влияние системы аварийного торможения на процесс эксплуатации ветроэнергетической установки, что может быть использовано разработчиками конструкций ветроэнергетических установок для оптимизации изделий на этапе проектирования.

5. Разработана система аварийного торможения для вертикально-осевой ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт (ВЭУ-3). Разработанная система обладает следующими преимуществами перед аналогами: возможность ее размещения внутри мачты ВЭУ, что позволяет избежать затенения полезной ометаемой площади ветроколеса; полная автономность от рабочих органов ВЭУ-3; возможность торможения при наличии неисправности электрического генератора ветроэнергетической установки; возможность удержания ВЭУ в заторможенном состоянии без затрат электроэнергии; обеспечение плавного торможения без причинения ущерба конструкции ветроколеса.

6. Проведено компьютерное моделирование работы созданной системы аварийного торможения ВЭУ-3. По результатам моделирования было определено, что разработанная система аварийного торможения обеспечивала безопасную эксплуатацию ВЭУ-3 при постоянной скорости ветра до 25 м/с и при переменной скорости ветра с отдельными порывами ветра до 35 м/с и средней скорости ветра 21,9 м/с.

7. Проведено исследование на экспериментальном стенде, имитирующем процесс работы ВЭУ-3 и созданной системы аварийного торможения. В ходе эксперимента имитировалась работа ВЭУ-3 при постоянной скорости ветра 25 м/с (как при компьютерном моделировании). Превышение температуры нагрева тормозных колодок при эксперименте над температурой нагрева тормозных колодок при компьютерном моделировании на 11,73%. При этом в ходе эксперимента были обеспечены (в имитационном варианте) безопасные условия эксплуатации ВЭУ-3. Расхождение в температуре нагрева тормозных элементов при компьютерном моделировании и экспериментальном исследовании обусловлено тем, что экспериментальное исследование проводилось при температуре окружающей среды на 3 °С выше, чем в компьютерном моделировании. Кроме того, расхождение температурных значений объясняется неидеальностью пропорций геометрических параметров тормозных элементов в компьютерном и экспериментальном исследованиях.

Таким образом, была достигнута цель по повышению безопасности эксплуатации ветроэнергетической установки путем интеграции в ее состав системы аварийного торможения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Сироткин Е.А. Дублирующая электромеханическая система торможения ветроэнергетической установки / Е.В. Соломин, **Е.А. Сироткин**, Е.С. Бодрова, М.С. Чиненов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 2. С. 55-61. 0,43 п.л./0,39 п.л.

2. Sirotkin E.A. State Observer for Variable Speed Wind Turbine / A. Martyanov, N. Martyanov, **E. Sirotkin** // Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018, 8544344, pp. 97-100, 2018. (индексирована в Scopus). 0,25 п.л./0,10 п.л.

3. 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, pp. 51-56, 2018. (индексирована в Scopus). 0,37 п.л./0,30 п.л.

4. Sirotkin E.A. Backup Mechanical Brake System of the Wind Turbine / **E.A. Sirotkin**, E.V. Solomin, S.A. Gandzha, I.M. Kirpichnikova // Journal of Physics: Conference Series 944(1), 012109, 2018. (индексирована в Scopus и Web of Science). 0,40 п.л./0,30 п.л.

5. Sirotkin E.A. Efficiency analysis of the friction material for the wind turbine braking system / E.V. Solomin, **E.A. Sirotkin**, I.M. Kirpichnikova // Solid State Phenomena 284, p. 1321-1326, 2018. (индексирована в Scopus) 0,34 п.л./0,26 п.л.

6. Сироткин Е.А. Обзор мировой ветроиндустрии за 2000-2016 годы / Е.В. Соломин, **Е.А. Сироткин**, О.В. Серадская, А.О. Троицкий // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 10-12 (222-224). С. 33-44. 0,75 п.л./0,32 п.л.

7. Sirotkin E.A. Wind turbine power plant control / D.V. Korobатов, **E.A. Sirotkin**, A.O. Troickiy, E.V. Solomin, // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2016, 7819031, 2017. (индексирована в Scopus и Web of Science). 0,25 п.л./0,12 п.л.

8. Сироткин Е.А. Эффективные методы регулирования мощности устройств на основе ВИЭ / Д.В. Коробатов, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин, **Е.А. Сироткин** // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 11-12 (199-200). С. 69-78. 0,62 п.л./0,40 п.л.

9. Сироткин Е.А. Вибрационный генератор энергии для системы аварийного торможения ветроэнергетической установки / Д.В. Коробатов, С.В. Козлов, **Е.А. Сироткин** // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 13-14 (201-202). С. 31-37. 0,43 п.л./0,19 п.л.

10. Сироткин Е.А. Классификация систем управления ветроэнергетических установок / Д.В. Коробатов, С.В. Козлов, **Е.А.**

Сироткин, А.О. Троицкий // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 13-14 (201-202). С. 38-45. 0,50 п.л./0,41 п.л.

11. Сироткин Е.А. Историко-экономический анализ ветроэнергетических установок и систем управления / Д.В. Коробатов, С.В. Козлов, **Е.А. Сироткин** // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 15-18. С. 54-66. 0,75 п.л./0,60 п.л.

12. Сироткин Е.А. Регулирование мощности ветроэнергетической установки / Д.В. Коробатов, **Е.А. Сироткин**, А.О. Троицкий // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 15-18. С. 67-74. 0,5 п.л./0,12 п.л.

13. Сироткин Е.А. Электромеханическая система аварийного торможения ветроэнергетической установки / Е.В. Соломин, **Е.А. Сироткин**, С.В. Козлов // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 19-23. 0,31 п.л./0,26 п.л.

14. Sirotkin E.A. Emergency braking system for the wind turbine / **E.A. Sirotkin**, A.S. Martyanov, E.V. Solomin, S.V. Kozlov // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings, 7911451, 2016. (индексирована в Scopus и Web of Science). 0,25 п.л./0,20 п.л.

15. Sirotkin E.A. Adaptive control over the permanent characteristics of a wind turbine / E.V. Solomin, **E.A. Sirotkin**, A.S. Martyanov // Procedia Engineering, 129, pp. 640-646, 2015. (индексирована в Scopus и Web of Science). 0,38 п.л./0,34 п.л.

16. Сироткин Е.А. Регулирование частоты вращения ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки / А.С. Аникин, С.В. Козлов, **Е.А. Сироткин**, Е.Е. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 5 (145). С. 32-36. 0,31 п.л./0,18 п.л.

Патенты и свидетельства на программы ЭВМ:

17. Пат. на полезную модель №142083 РФ. Устройство автоматического торможения ротора горизонтально-осевой ветроэнергетической установки / Е.В. Соломин, И.М. Кирпичникова, **Е.А. Сироткин** и др. Оpubл. 20.06.2014, Бюл. № 2.

18. Пат. на полезную модель №155351 РФ. Адаптивное комбинированное устройство регулирования частоты вращения ротора ветроэнергетической установки / Соломин Е.В., Аникин А.С., **Сироткин Е.А.**, Соломин Е.Е., Сироткин А.А., Козлов С.В. Оpubл. 10.10.2015, Бюл. № 28.

19. Пат. на полезную модель №178619 РФ. Электромеханическое устройство торможения ВЭУ / **Сироткин Е.А.**, Соломин Е.В., Кирпичникова И.М. Оpubл. 13.04.2018, Бюл. № 11.

20. Свидетельство о гос. рег. прог. для ЭВМ №2019615727. Программа расчета оптимальной продолжительности торможения ветроэнергетической установки / **Е.А. Сироткин**, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин. Оpubл. 07.05.2019, Бюл. № 5.

Сироткин Евгений Анатольевич

СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать __.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.