

На правах рукописи

ИСЛОМОВ Ильёсходжа Икромходжаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ
С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Чебоксары – 2019

Работа выполнена на кафедре автоматики и управления в технических системах федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Афанасьев Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Копылов Сергей Игоревич**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук, лаборатория сверхпроводниковых устройств и преобразовательной техники, заведующий лабораторией;

Макаров Валерий Геннадьевич
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра Электропривода и электротехники, заведующий кафедрой.

Ведущая организация: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».**

Защита состоится «17» мая 2019 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус №3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «15» февраля 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ветроустановки (ВЭУ) являются одним из быстроразвивающихся направлений возобновляемых источников энергии. Ветроэнергетическая отрасль ряда стран в последние десятилетия успешно конкурирует с традиционными электрическими станциями. Учитывая тенденцию роста потребления электроэнергии во всем мире и вероятность истощения невозобновляемых энергоресурсов, в ближайшем будущем ветроэнергетическая отрасль получит существенное развитие в сфере электрификации жилых массивов, частных производственных предприятий, насосных станций, телекоммуникационных оборудований и других автономных электрических систем и комплексов.

Основными характеристиками ВЭУ являются сравнительная тихоходность ветроколеса (ВК), непостоянство скорости вращения валов, относительно низкий коэффициент использования энергии ветра, зависящий от площади ВК. Таким образом, для рационального использования энергии ветра необходимо применить различные конструктивные исполнения ВЭУ с традиционными редукторами и без редукторных агрегатов со стабилизируемыми силовыми полупроводниковыми устройствами для стабилизации выходных параметров электрических величин с целью надёжного электроснабжения различных потребителей.

Процесс производства электроэнергии в ВЭУ требует механических, электромеханических и электронных систем автоматического регулирования для обеспечения требуемого качества электроэнергии.

Конструкция современных ВЭУ состоит из электромеханических частей, которые взаимодействуют между собой инерционными силами, что ставит задачу о системе регулирования и комплексных расчётов всех звеньев с учётом возмущений при генерировании электроэнергии.

Степень разработанности темы. Изучению основных теорий и закономерностей работы ВЭУ, регулирования и стабилизации выходных электрических параметров ВЭУ посвящены работы многих известных учёных, таких как Н.Е. Жуковский, Ю. Прандтль, А. Бетц. Исследованием различных путей повышения качества генерирования электроэнергии в ВЭУ 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. Основные функции оптимального управления ВЭУ с учетом совершенствования конструктивных частей и алгоритмов автоматизированного управления исследовали А.А. Афанасьев, Ю.Г. Шакарян, В.З. Манусов, С. Н. Удалов и другие. Из зарубежных ученых, которые занимались стабилизацией параметров ВЭУ с применением полупроводниковых электронных аппаратов, это Н. Bindner, А. Rebsdorf, W. Byberg, R. Hoffmann, O. Carlson, J. Nylander, H. Beyer и др.

Анализ научных работ, перечисленных выше учёных, конструкторов, инженеров, показал, что в системе генерирования ВЭУ не до конца изучен оптимальный выбор основного оборудования, не предложена универсальная схема генерирования электроэнергии для всех типов электроприёмников, не

предложены варианты максимального использования энергии ветра в момент резкого увеличения его скорости сверх допустимого значения. В работах также нет чётких предложений стабилизации параметров ВЭУ с помощью механического трансмиссионного редуктора.

Исследование ВЭУ с магнитным редуктором (МР) является актуальным направлением исследований в целях повышения энергетических характеристик ВЭУ, снижения затрат на генерирование электроэнергии и надёжной стабилизации выходных электрических параметров ветрогенератора (ВГ), которое имеет научное и практическое значение в области электротехнических комплексов и систем автоматического управления.

Цель диссертационной работы – исследование схем генерирования энергии ВЭУ и на его основе разработка схемы генерирования ВЭУ с МР в целях стабилизации выходных электрических параметров ветрогенератора (ВГ) и синхронизации в единую сеть; определить потенциал ветроэнергетических ресурсов на территории Республики Таджикистан для выработки дополнительной мощности за счёт ВЭУ с МР; разработать схему и алгоритм автоматизированного управления ВЭУ с МР с учётом максимального использования ветровых ресурсов.

Решение следующих задач для достижения сформулированной выше цели:

1. Выполнить статистический анализ среднегодового потенциала ветроэнергетических ресурсов на территории Республики Таджикистан для выработки дополнительной мощности в сеть.

2. Провести анализ схем ВЭУ и разработать на их основе структурную схему ВЭУ с регулируемым магнитным редуктором (МР) для синхронизации ВЭУ с единой сетью.

3. Разработать технологическую, математическую и имитационную модели ВЭУ с регулируемым МР. Провести исследование МР в ВЭУ для повышения угловой скорости вала ВГ в целях стабилизации выходного напряжения и частоты ВГ путём регулирования угловой скорости магнитного поля статора МР.

4. Выполнить анализ переходных процессов в МР при изменении скорости ветроколеса.

5. Разработать схему и алгоритм автоматического управления ВЭУ с МР с учётом рационального использования ветровых ресурсов.

6. Определить экономическую эффективность использования ВЭУ с МР.

Объектом исследования является ветроустановка с магнитным редуктором.

Предмет исследования – стабилизация и повышение угловой скорости выходного вала ветрогенератора ВЭУ с МР путём изменения угловой скорости магнитного поля статора, а также анализ режимов переходных процессов МР при стабилизации скорости вращения выходного вала МР, который жестко соединен с ротором ВГ.

Область исследования – математическая и имитационная модели ВЭУ с МР, на основе построения систем автоматического управления для рационального использования энергии ветра и качественной выработки электроэнергии в системе генерирования ВЭУ.

Научная новизна:

1. Разработанная схема генерирования электроэнергии на ветроустановке с регулируемым магнитным редуктором обеспечивает стабилизацию скорости вращения ветрогенератора с использованием двухконтурной системы с новым алгоритмом автоматического управления, состоящей из внутреннего контура регулирования тока статора МР и внешнего контура регулирования скорости вращения ветрогенератора.

2. Разработанная схема автоматической рекуперации мощности от статора магнитного редуктора обеспечивает максимальное использование энергии ветра.

3. Разработанная методика расчёта схемы генерирования электроэнергии на ветроустановке с МР включает в себя расчёт основных характеристик магнитного редуктора с плавно изменяющимся коэффициентом редукции для стабилизации скорости вращения ветрогенератора с применением преобразователя частоты, подключённого к обмотке статора магнитного редуктора.

4. Особенностью технико-экономического расчёта ветроустановки с магнитным редуктором является расчёт среднегодовой скорости ветра в Республике Таджикистан, его статистический анализ с определением доверительного интервала и определение срока окупаемости ветроустановки с магнитным редуктором при выработке электроэнергии.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные схемы генерирования электроэнергии на базе ветроустановки с магнитным редуктором и методика их расчёта дополняют общую теорию управления ветроустановками.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные схемы и методика их расчёта позволяют разрабатывать ветроустановку с улучшенными технико-экономическими показателями и облегчают её расчёт при проектировании.

Способы управления, математическое моделирование, а также имитационная модель ВЭУ с МР применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров на кафедре электроснабжения и автоматики Худжандского политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Методология и методы исследования. Методы исследования основаны на теории автоматического управления, теории электромеханики и динамических систем, теории планирования и статистики случайных величин, теории вероятности случайных составляющих скорости ветра, а также на решении нелинейных дифференциальных уравнений переходных процессов в электромеханических комплексах.

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались математический и статистический анализы, оптимизация параметров систем управления, разработана функциональная схема генерирования электроэнергии ВЭУ с МР, применены программные средства вычисления и моделирования, такие как Matlab Simulink, Maple, Mathcad, MultiSim, Microsoft Excel. На основе аналитического расчёта и алгоритма автоматической работы ВЭУ с МР разработана программа автоматического определения угловых характеристик и моментов МР на платформе

программы Visual Basic.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Схема генерирования электроэнергии на ветроустановке с магнитным редуктором, обеспечивающим плавное регулирование коэффициента редукции и автоматическую рекуперации мощности.

2. Схема рекуперации избыточной мощности от статора магнитного редуктора при увеличенной скорости вращения ветроколеса.

3. Методика расчета схемы генерирования электроэнергии ветроустановки с магнитным редуктором и замкнутой системы управления, а также методика компьютерного моделирования системы

4. Расчёт экономической эффективности использования ветроустановки с магнитным редуктором.

Достоверность результатов работы. Способы управления, математическое моделирование, а также имитационная модель ВЭУ с МР применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов на кафедре электроснабжения и автоматики Худжандского политехнического института Таджикского технического университета имени акад. М.С. Осими.

Предложенная модель генерирования электроэнергии в ВЭУ с МР внедрена в перспективный план ОАХК «Барки Точик» о реализации ВЭУ на территории Согдийской области Республики Таджикистан с целью обеспечения электроэнергией горных селений Согдийской области.

Личный вклад автора. Приведённые в диссертационной работе расчёты, разработанные математические и имитационные модели, функциональные схемы и системы управления ВЭУ с МР, а также методы расчёта ветроресурсов для рационального выбора основного оборудования ВЭУ с МР выполнены лично соискателем. Разработка и конструкционный расчёт МР выполнены совместно с соавторами.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждены на X Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов (г. Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2012 г.), на научно-практической конференции «Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов» (г. Уфа, УГНТУ, 2014 г.), на научно-технической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электромеханики – достижения и перспективы» (г. Хабаровск, ДВГУПС, 19-20 ноября 2015 г.), на XII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» (г. Алматы, Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева, 2017 г.), на XII Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (г. Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2017 г.), на I Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». (г. Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2017 г.), на XIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и

молодых учёных «Электромехатроника и управление» (г. Иваново, ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2018 г.), на XIV Республиканской конференции молодых специалистов «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика». (г. Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2018 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в девятнадцати научных изданиях. Из них: семь работ опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, десять работ – в материалах научно-технических и научно-практических конференций, две работы – в сборниках научных трудов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, включающего 115 источников (из них 19 – авторские). Работа изложена на 194 страницах, содержит 131 рисунок, 3 таблицы и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении изложено краткое обоснование актуальности выбранной темы, цель и содержание поставленных задач, научная новизна, практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту и апробация работы.

Первая глава посвящена обзору способов получения электроэнергии от возобновляемых источников энергии, а именно с помощью ветроустановки (ВЭУ), и анализу состояния и перспектив развития ветроэнергетики, основных схем генерирования электроэнергии ВЭУ. Рассмотрена классификация генераторов ВЭУ с основным силовым оборудованием.

На рисунке 1 приведена структурная схема основных частей современной ВЭУ.

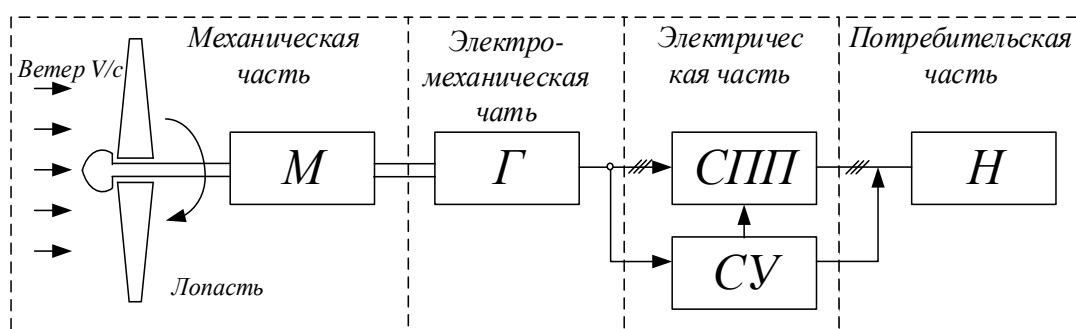


Рисунок 1 – Структурная схема основных частей ВЭУ

Далее в главе рассмотрены основные схемы генерирования электроэнергии ВЭУ с аккумулярованием и с потреблением постоянного тока, схема генерирования электрической энергии ВЭУ для работы насосной скважины и аккумуляции воды для водоснабжения. Рассмотрены схемы генерирования электрической энергии ВЭУ на основе выпрямительных и инверторных мостов с использованием синхронного или асинхронного генераторов, машин постоянного тока, а также схемы генерирования электрической энергии ВЭУ совместно с фотоэлектрической установкой.

Также в работе приведена классификация электрооборудования ВЭУ по типу применяемых электрических машин в качестве ветрогенераторов (Рисунок 2).

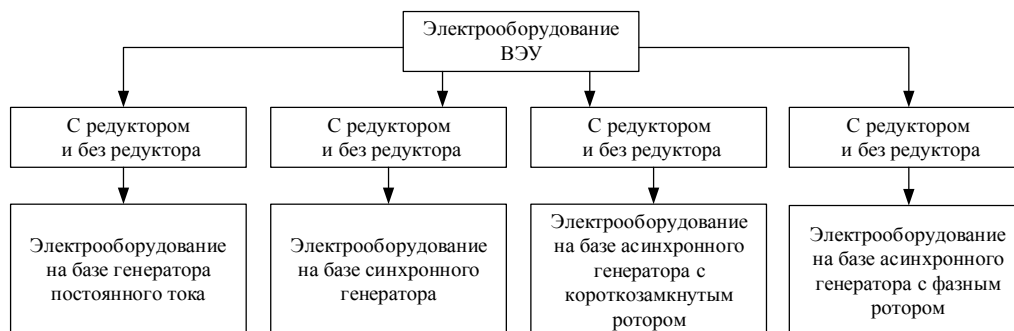


Рисунок 2 – Классификация ВЭУ по типу применяемой электрической машины

Анализ рассмотренных схем генерирования ВЭУ показал, что все схемы разработаны с учётом потребительских свойств и нет универсальных схем генерирования, позволяющих применять во всех объектах электроснабжения независимо от рода тока и напряжения. Кроме того, схемы генерирования ВЭУ являются достаточно сложными и их основные элементы взаимодействуют между собой.

Для оптимального генерирования энергии ветра необходимо рассмотреть и смоделировать комплекс технических средств с учётом определения мощности потока ветра, являющейся случайной величиной.

Во второй главе определены среднегодовая скорость ветра (Рисунок 3) на территории Республики Таджикистан, рассчитана среднегодовая выработка электроэнергии ВЭУ, и на основе выявления доверительного интервала скорости ветра в течении месяца, определено количество электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ с горизонтальной осью вращения.

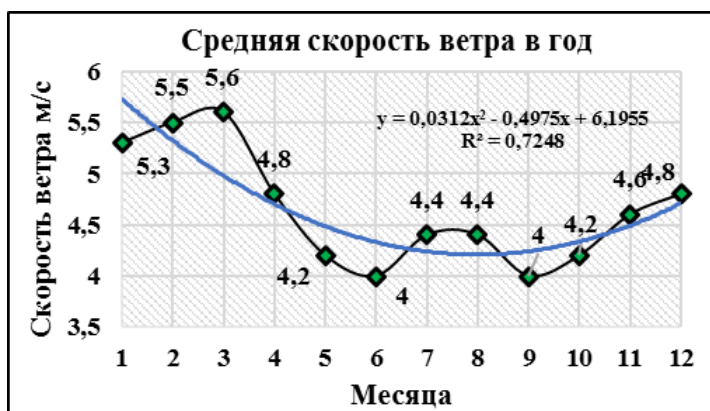


Рисунок 3 – Годовая средняя скорость ветра в г. Худжанде Республики Таджикистан

Построены математическая и имитационная модели схемы генерирования ВЭУ с тиристорным регулятором напряжения и ВЭУ с механическим планетарным редуктором с плавно изменяющейся редукцией для стабилизации электрических параметров ветрогенератора.

Расчёты количества вырабатываемой электроэнергии в ВЭУ показали, что на территории Республики Таджикистан

экономически целесообразно строить ВЭУ. Расчёт выработки мощности выполнен с учётом высоты установки ВЭУ над уровнем земли и на основе статистических методов для оптимального выбора основного оборудования ВЭУ.

Для определения количества вырабатываемой электроэнергии учтены

ветровой поток на место установки ВЭУ, различные потери (потери на вращение ветроколеса и механические потери на валах) (Рисунок 4). Определены при всех значениях градации скорости ветра мощности ветрового потока и их зависимости от высоты установки над уровнем земли на территории Республики Таджикистан.

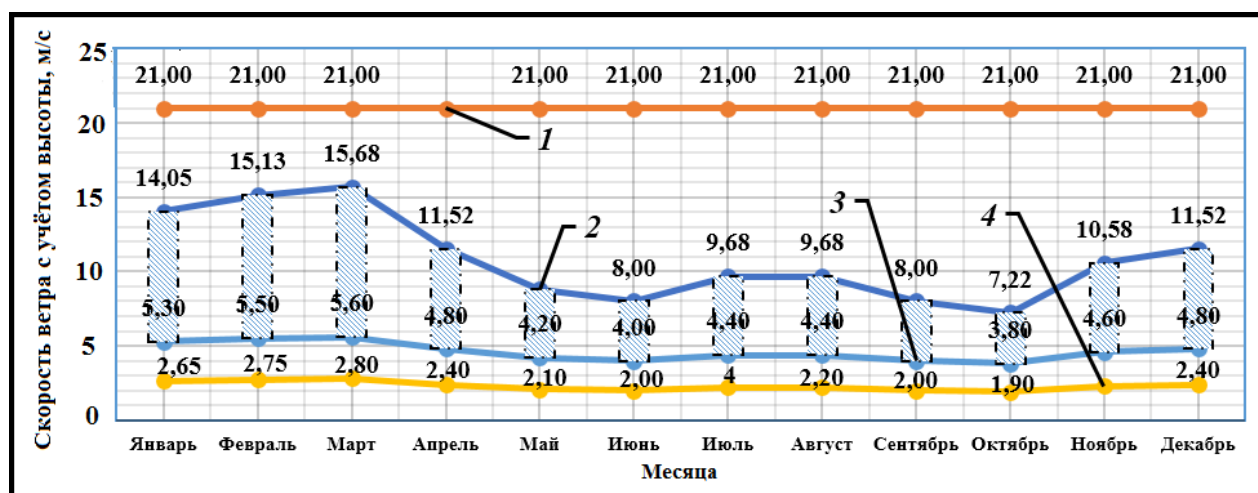


Рисунок 4 – График отношения мощности ветрового потока к мощности на выходе ветрогенератора: 1 – Высота установки ВЭУ; 2 – Средняя скорость ветра с учётом высоты установки ВЭУ; 3 – Средняя скорость ветра над уровнем земли; 4 – показатель увеличение скорости ветра

Хотя ветер является переменной величиной ВК должно работать в оптимальном режиме. Правильный выбор основного оборудования ВЭУ значительно влияет на технико-экономические показатели, уменьшает срок окупаемости, стабилизирует энергетические характеристики ветрогенератора и повышает число часов выработки электроэнергии ВЭУ.

Энергетическая характеристика ВЭУ состоит их нескольких переменных составляющих:

$$W_{ВЭУ} = \int_0^T f[V, \Omega_{BK}, \Omega_{ред}, \eta_{ВЭУ}, \Omega_{ВГ}, M_{ВГ}, P_{ВГ}] dt \quad (1)$$

$$W_{ВЭУ}^{cp} = \int_0^T f[V_{cp}, \Omega_{BK}^{cp}, \Omega_{ред}^{cp}, \eta_{ВЭУ}^{cp}, \Omega_{ВГ}^{cp}, M_{ВГ}^{cp}, P_{ВГ}^{cp}] dt \quad (2)$$

$$W_{ВЭУ}^{cp.кв} = \int_0^T f[V_{cp.кв}, \Omega_{BK}^{cp.кв}, \Omega_{ред}^{cp.кв}, \eta_{ВЭУ}^{cp.кв}, \Omega_{ВГ}^{cp.кв}, M_{ВГ}^{cp.кв}, P_{ВГ}^{cp.кв}] dt \quad (3)$$

Результаты статистического расчёта изменения скорости ветра в течение месяца показало, что целесообразен выбор основного оборудования ВЭУ по значениям математического ожидания и доверительного интервала скорости ветра в целях уменьшения простоя ВЭУ. Следовательно, математическое ожидание скорости ветра заполняет относительно большой объём площади изменяющегося графика случайных величин скорости ветра (Рисунок 5). Это обстоятельство дает возможность максимально использовать энергию ветра и оптимизировать капиталовложения на строительство ВЭУ.

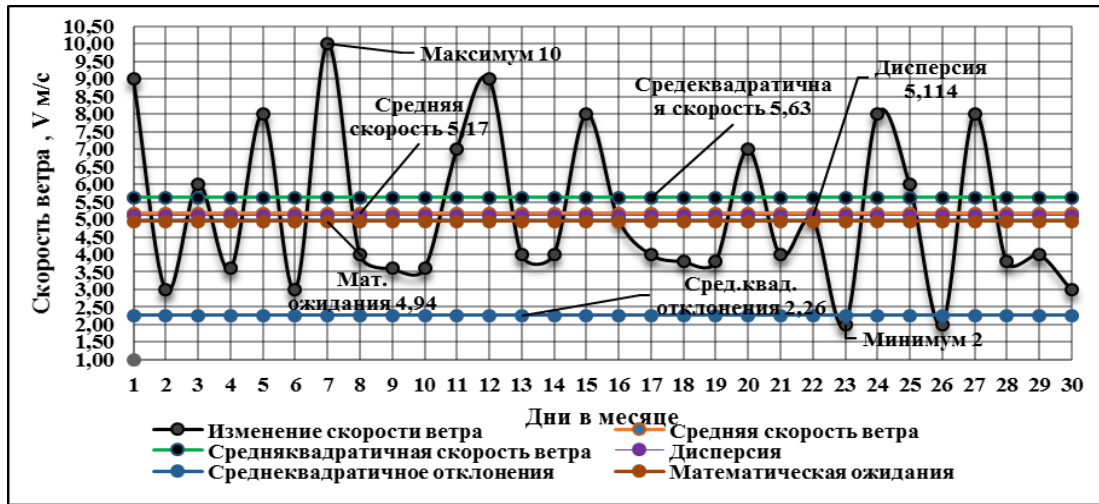


Рисунок 5 – Результаты расчёта статического метода определения случайных величин градации скорости ветра на территории Республики Таджикистана

Для проверки правильности выбора электрооборудования ВЭУ, исходя из условий статистической обработки случайных величин, анализировался наибольший период градации скорости ветра. Для полного и надёжного анализа скорости ветра с целью уменьшения вероятности ошибок статистических расчётов сравнивались скорости ветра из нескольких источников: государственные метеослужбы, интернет источники Google, GisMeteo, Yandex, Yahoo и др.

Доверительный интервал для дисперсии и среднее квадратичное отклонение случайных величин скорости ветра определяются по формуле:

$$V_{дог}^2 = V_k^2 = V_{n-1}^2 = \frac{(n-1)s_x^2}{\sigma_x^2} \quad (4)$$

где $k=(n-1)$ – степень свободы нормального распределения случайной величины скорости ветра, которая на единицу меньше числа измеримой или фактической величины.

При выборе основного оборудования ВЭУ с учётом статистических методов и доверительного интервала максимально используются мощности потока ветра и при этом уменьшается время простоя ВЭУ.

$$\Omega_{BK} = V_{дог}(t) \Rightarrow \max \quad (5)$$

$$P_{BK} = P_{дог}(t) \Rightarrow \max \quad (6)$$

$$T_{прстой} = T_{дог}(t) \Rightarrow \min \quad (7)$$

где $V_{дог}$ – доверительная скорость ветра, м/с

$P_{дог}$ – доверительная мощность скорости ветра, кВт;

$T_{дог}$ – доверительная время простоя ВЭУ.

Далее рассмотрены схемы генерирования электроэнергии с выпрямительно-инверторным преобразователем. Эта схема (Рисунок 6) содержит три основных элемента: выпрямитель, аккумулятор, инвертор и один управляющий контроллер.

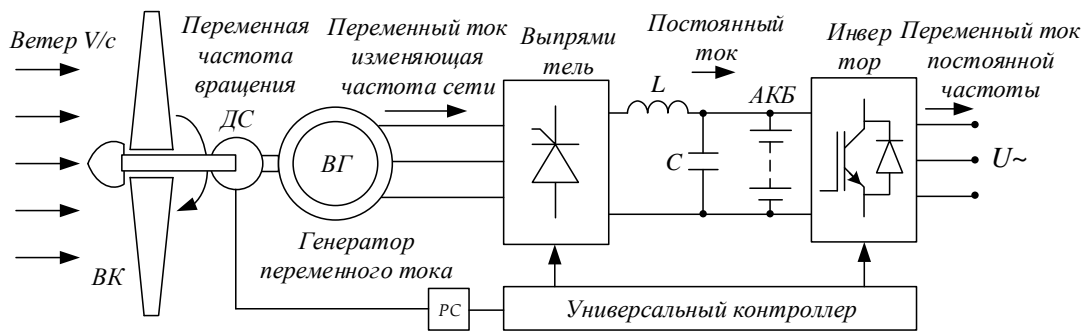


Рисунок 6 – Схема генерирования электроэнергии ВЭУ с выпрямительно-инверторным преобразователем

Выпрямитель на основе диодов преобразует переменный ток электрического генератора ВЭУ в постоянный для зарядки аккумуляторной батареи (АКБ). Между выпрямителем и АКБ установлены LC элементы для фильтрации выходного постоянного напряжения выпрямителя. После преобразования переменного напряжения ВГ выпрямителем, инвертор на основе транзисторных элементов преобразовывает постоянное напряжение в переменное напряжение стандартной частоты. В данной схеме сигнал датчика скорости (ДС) ветроколеса и подаётся на регулятор скорости (РС) для формирования сигнала на блок управления (БУ) выпрямителя и инвертора. Важным промежуточным узлом системы преобразования из постоянного тока в переменный ток является LC-фильтр.

Анализ данной схемы генерирования показал, что при резком увеличении скорости ветра необходимо искусственно замедлить скорость вращения ВК. Кроме того, для накопления избыточной энергии в таких схемах потребуются большие аккумуляторные батареи, что приводит к удорожанию стоимости всей системы генерирования. Как известно, редукторы в системе электрических комплексов и электроприводов используются для изменения угловой скорости и для уменьшения потребляемой мощности двигателей. В системе ВЭУ механический планетарный редуктор (МПР) повышает угловую скорость генератора ВЭУ. Кроме того, МПР по принципу автоматических коробок передач у автомобилей одновременно используется для стабилизации скорости вращения выходного вала путём изменения коэффициента редукции (Рисунок 7).

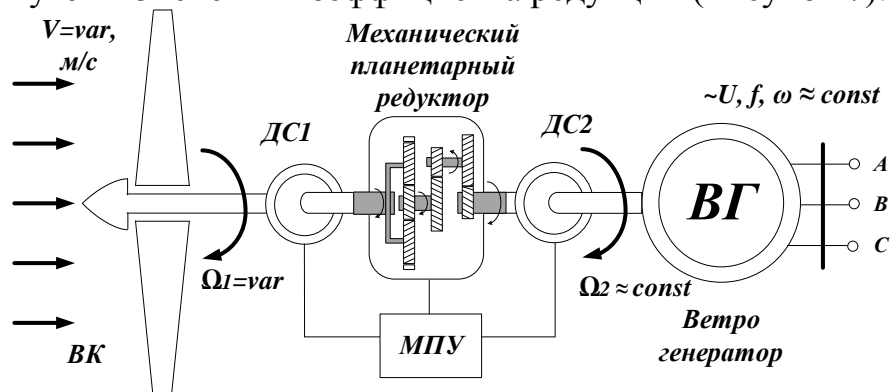


Рисунок 7 – Исследуемая имитационная схема ВЭУ с механическим планетарным редуктором

Далее в работе рассчитаны и смоделированы передаточное отношение МПР с

коэффициентом передачи $i \leq 9$, и коэффициент полезного действия $h=0,96...0,98$ в программе Matlab. Особенность моделируемого МПР заключается в применении нескольких сателлитов и шестерён, расположенных с равными угловыми шагами. Учитывая конструкцию МПР и количество шестерней на втором звене, принимаем количество шестерён равно 4

Общее передаточное отношение одноступенчатого МПР:

$$U_{ред}^{1-c} = \frac{n_{вх}^1}{n_{вых}^2} = \frac{\omega_{вх}}{\omega_{вых}} \quad (8)$$

Где $n_{вх}$, $n_{вых}$, $\omega_{вх}$, $\omega_{вых}$ – частота вращения и угловая скорость входного и выходного валов одноступенчатого МПР:

Общее передаточное отношение для двухступенчатого МПР:

$$U_{общ,плн,ред}^{2-c} = U_1 \cdot U_2 \quad (9)$$

где U_1 , U_2 – передаточное число первой и второй ступени МПР.

Амплитуда виброскорости ПМР с учётом частоты вибрации определяем по формуле:

$$V(t) = \frac{dS(t)}{dt} = S_0 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f(t)) = V_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f(t)), \quad (10)$$

где $V(t)$ и $V_0 = 2\pi f S_0$ – соответственно текущее значение и амплитуда виброскорости, мм/с;

S_0 – амплитуда виброперемещения.

Как видно из переходных процессов моделирования МПР угловая скорость выходного вала при изменении коэффициента редукции путём переключения от одной шестерни к другой из-за виброколебаний происходит скачок скорости (Рисунок 8, кривая в). Такой скачок и вибрация скорости влияют на угловую скорость ротора ВГ. На выходных зажимах статора ветрогенератора резко изменяются напряжение и частота (Рисунок 9), что приводит к повреждению высокочувствительных электронных и осветительных приборов, которые подключены к ветрогенератору в качестве электроприёмников.

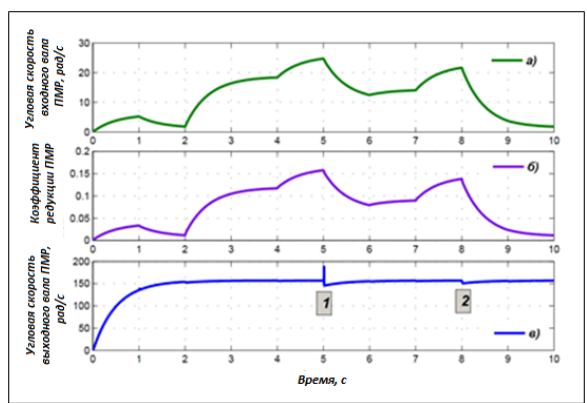


Рисунок 8 – Угловая скорость выходного вала механического планетарного редуктора при плавном переключении коэффициента редукции

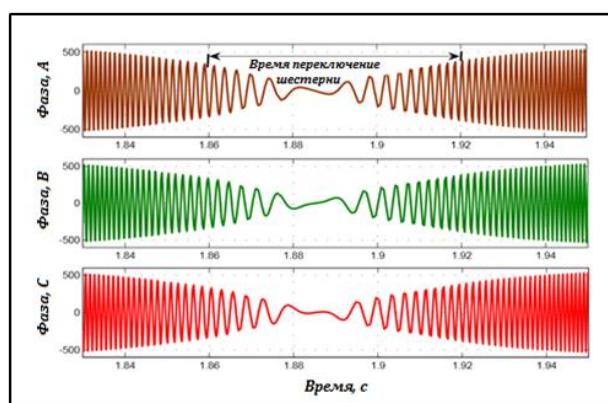


Рисунок 9 – Осциллограмма напряжения на зажимах ветрогенератора при стабилизации и трансмиссии угловой скорости ВК с механическим планетарным редуктором

Применение ПМР для повышения угловой скорости ветрогенератора нецелесообразно из-за непостоянства скорости выходного вала. При изменении скорости ветра и при переходе от одной шестерни к другой ПМР повышаются люфты и ухудшается сцепление зубцов, а при резком переключении возникают виброскорости. Другим недостатком ПМР является ограниченный диапазон регулирования выходного вала в пределах скоростей 4 или 5 вращающихся шестерён.

В третьей главе изложены теоретические и конструктивные характеристики магнитного редуктора для стабилизации скорости вращения генератора (Рисунок 10). Первый (наружный, тихоходный) ротор 2, называемый модулятором, жёстко связан с ветроколесом. Он имеет переменную угловую скорость вращения Ω_1 в зависимости от скорости ветра и содержит шихтованные ферромагнитные призматические стержни с числом z .

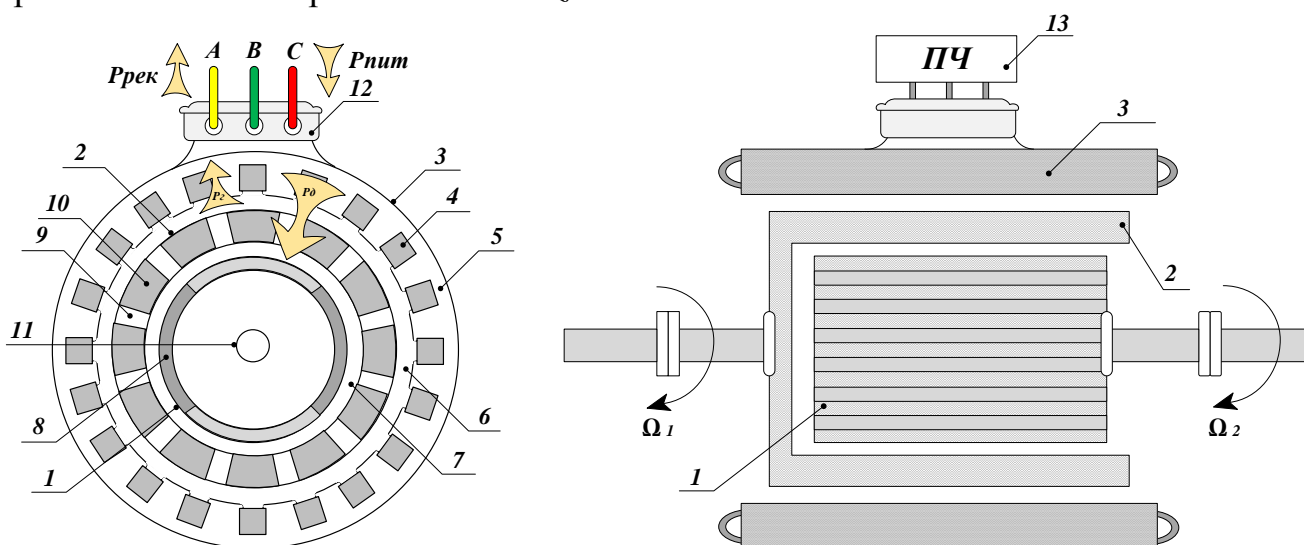


Рисунок 10 – Схема магнитного редуктора: 1 – быстроходный ротор; 2 – тихоходный ротор; 3 – статор; 4 – обмотка статора; 5 – магнитопровод статора; 6 – воздушный зазор между статором и тихоходным ротором; 7 – воздушный зазор между роторами; 8 – постоянные магниты быстроходного ротора; 9 – немагнитная сталь тихоходного ротора; 10 – шихтованные ферромагнитные стержни тихоходного ротора; 11 – вал быстроходного ротора; 12 – выходные концы обмотки статора; 13 – статический преобразователь частоты

Магнитное поле статора с числом пар полюсов p_1 , поступающее на одну сторону модулятора, на другой его стороне будет иметь основную гармонику с небольшим числом пар полюсов, равным разности $(z-p_1)$. Это малополярное магнитное поле взаимодействует с магнитами внутреннего ротора, имеющего то же самое число пар полюсов.

Второй (внутренний, быстроходный) магнитоэлектрический ротор 1 с числом $2(z-p_1)$ разнополярных магнитов вращается с угловой скоростью Ω_2 .

Трехфазная обмотка статора, подключена к сети переменного тока через статический преобразователь частоты для регулирования частоты ω тока статора. В результате магнитное поле статора будет перемещаться в пространстве с угловой скоростью $\Omega = \pm\omega/p_1$ (знак минус реализуется преобразователем частоты

при смене следования фаз).

Скорости вращения роторов и выходная частота статического преобразователя частоты находим из базового дифференциального уравнения управляемого магнитного редуктор:

$$\frac{d\varphi_c}{dt} \Omega_2 = \frac{z}{z-p_1} \Omega_1 + \frac{\omega}{z-p_1} \quad (11)$$

Согласно формуле (11) уменьшается (изменяется) первая составляющая правой части уравнения, увеличивается (изменяется) вторая составляющая, а скорость вращения быстроходного вала Ω_2 остается на заданном уровне.

Электромагнитные моменты M_1 тихоходного и M_2 быстроходного валов определяем из выражения:

$$M_1 = 3\delta_1 k_{\delta 1} p_1 \frac{E_\delta E_0}{\omega x_a} \Lambda'_0 \sin \theta_1, \quad (12)$$

$$M_2 = 3 \frac{D_2}{D_1} p_2 k_{\delta 2} \delta_2 \frac{E_\delta E_0}{\omega x_a} \Lambda'_0 \sin \theta_2, \quad (13)$$

где E_0, E_δ – ЭДС и результирующее напряжение трёхфазной обмотки статора; $\delta_1, k_{\delta 1}, p_2, k_{\delta 2}, \delta_2, D_1, D_2, \theta_1, \theta_2$ – размеры и коэффициенты воздушных зазоров, числа пар полюсов, наружные диаметры, углы нагрузки соответственно тихоходного и быстроходного валов; Λ'_0 – постоянная составляющая сквозной удельной магнитной проводимости двух воздушных зазоров; x_a – индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки статора.

Электромагнитный момент, действующий на статор с трёхфазной обмоткой, находим по классической формуле:

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_1 \Psi_d I_q \quad (14)$$

Далее в работе (Рисунке 11) приведена структурная схема управления ВЭУ с МР с основными формулами и сигналами обратной связи с учётом инерционных сил двух роторов МР.

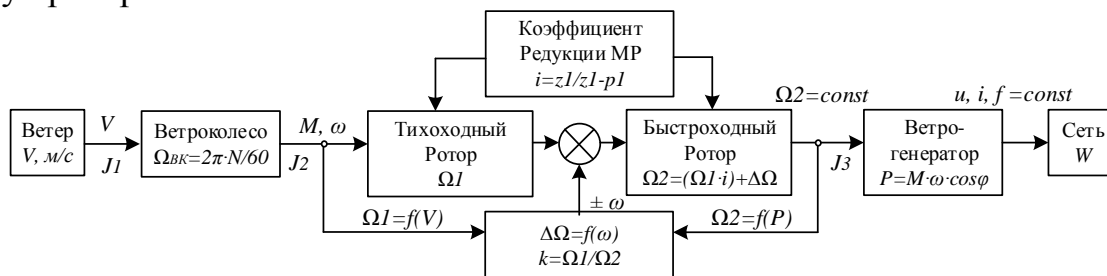


Рисунок 11 – Структурная схема управления и стабилизации выходного вала ВЭУ с МР

Схема генерирования ВЭУ с МР работает следующим образом (Рисунок 12). В установившемся режиме скорость вращения ветроколеса Ω_1 меняется в определённых пределах и зависит от скорости ветра. Требуемая скорость вращения быстроходного вала Ω_2 и вала ветрогенератора задаются задатчиком преобразователя частоты. Выходные параметры генератора поддерживаются на определённом, заданном сигналом задания, уровне и стабилизация магнитного поля статора осуществляется преобразователем частоты.

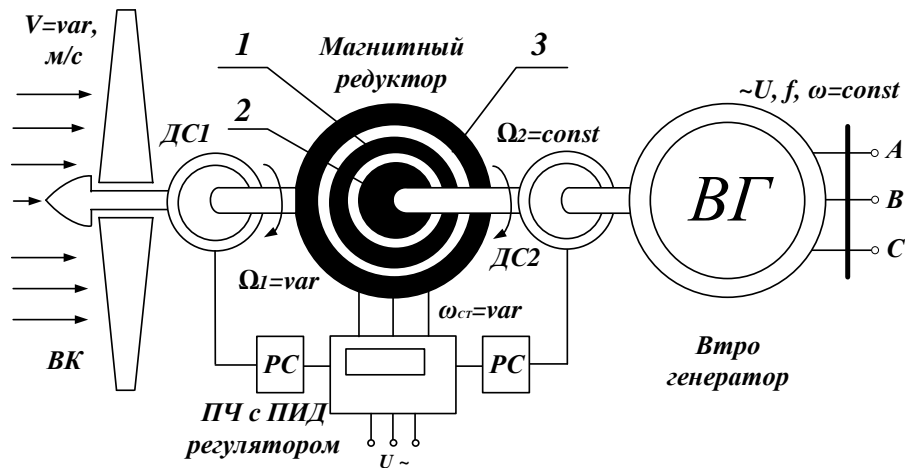


Рисунок 12 – Исследуемая имитационная схема ВЭУ с МР

Если скорость ветра достигает предельного уровня (скорость вращения ветроколеса максимальна, согласно конструкции установки), выходная частота преобразователя ω становится равной нулю.

При уменьшении скорости ветра (и ветроколеса) скорость вращения вала генератора уменьшается, следовательно, уменьшается сигнал с выхода датчика скорости и входной сигнал регулятора. Сумма входных сигналов регулятора увеличивается, следовательно, возрастает выходной сигнал регулятора, который в свою очередь увеличивает выходную частоту ω преобразователя частоты, который подключен к обмоткам статора магнитного редуктора, выходная скорость редуктора устанавливается на прежнем заданном уровне.

Для тока статора будет справедливо дифференциальное уравнение (это уравнение равновесия напряжения обмотки статора)

$$\frac{dI_{m1}}{dt} = \frac{1}{L_c} (U_{m1} \cos \theta_1 - E_{0m} - rI_{m1}) \quad (15)$$

Восстановлению скорости способствует преобразователь частоты и регулятор с его пропорциональным интегральным и дифференциальными функциями, которые корректируют напряжения статора МР. Время регулирования будет зависеть от коэффициента усиления и электромеханических постоянных времени статора МР и регулятора.

ЭДС обмотки статора в переходном процессе определено по формуле:

$$E_\delta = \sqrt{(E_{0m} - I_{m1}r)^2 + \left(L_{aq} \frac{dI_{m1}}{dt} \right)^2} \quad (16)$$

Амплитудное значение ЭДС обмотки статора МР, которое формируется за счёт скорости вращения тихоходного ротора, определено по формуле:

$$E_{0m} = [(z - p_1)\Omega_2 - z\Omega_1]\Psi_d \quad (17)$$

На рисунке 13 и 14 приведены графики стабилизации скорости вращения Ω_2 выходного ротора (выходной ротор жёстко соединен с ротором ветрогенератора) МР и выходной частоты преобразователя ω в зависимости от скорости вращения ветроколеса Ω_1 , которые описывают режим работы и процесс стабилизации выходных параметров напряжения ветрогенератора. При моделировании ВЭУ с

МР с номинальной скоростью входного вала коэффициент мощности МР составляет 0,82 и МР работает в режиме редуктора с коэффициентом редукции $i_{ред}=11,5$. При работе МР в режиме стабилизации скорости вращения выходного вала, тихоходный вал (модулятор) работает в генераторном режиме, а быстроходный ротор работает в двигательном режиме.

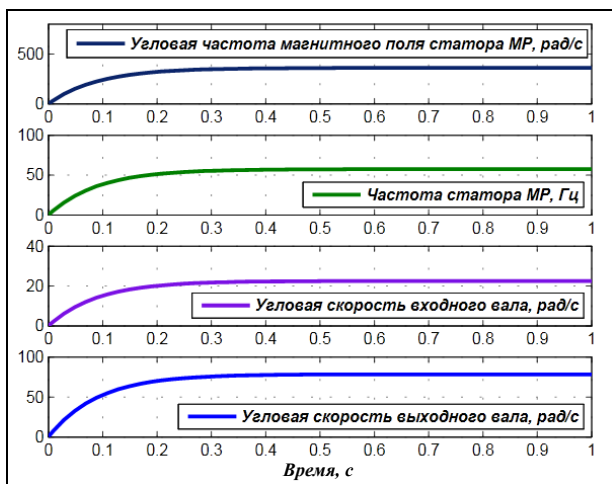


Рисунок 13 – Характеристики стабилизации скорости вращения выходного вала ВЭУ с МР при постоянной скорости модулятора

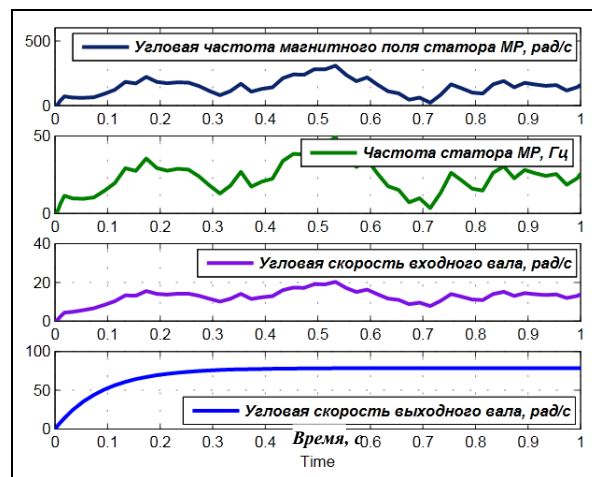


Рисунок 14 – Характеристики стабилизации скорости вращения выходного вала ВЭУ с МР при переменной скорости модулятора

В подразделах диссертации проведены математическое моделирование системы автоматической стабилизации ВЭУ с МР в двух режимах: первый, когда угловая скорость входного вала (модулятора) постоянна и второй, когда скорость вращения входного вала изменяется в зависимости от скорости ветра (Рисунки 15 и 16).

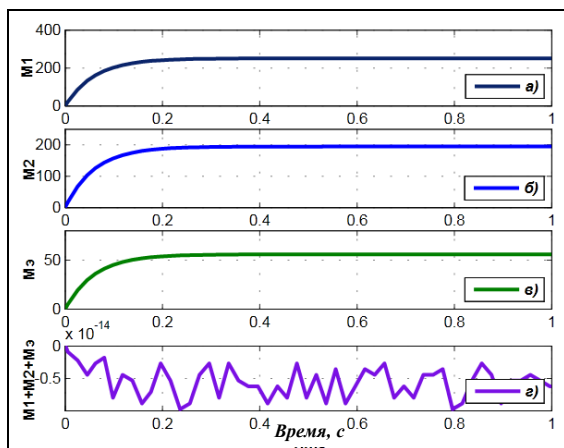


Рисунок 15 – Осциллограмма моментов тихоходного, быстроходного и электромагнитного момента МР при постоянной скорости вращения модулятора

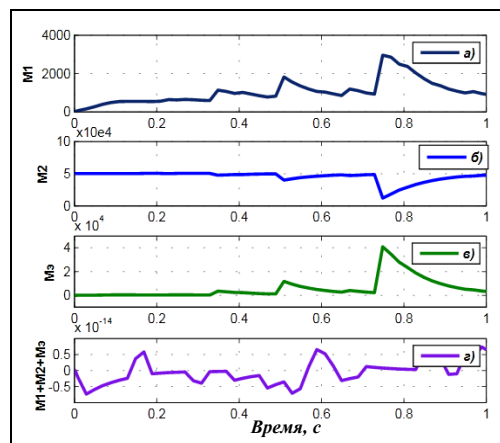


Рисунок 16 – Осциллограмма моментов тихоходного, быстроходного и электромагнитного момента МР при переменной скорости вращения модулятора

В схеме ВЭУ с МР имеют место три канала управления и три момента. Первый внешний момент M_1 возникает за счёт момента, создаваемого ВК, присоединённого к тихоходному валу (внешнему ротору модулятора). Второй момент M_2 в режиме мультипликатора возникает за счёт внешнего момента,

создаваемого силой ветра и электромагнитного момента M_{ε} создаваемого током обмотки статора для регулирования и стабилизации выходного вала МР.

Баланс моментов и угловых скоростей при моделировании МР принимает вид:

$$M_1 + M_2 + M_{\varepsilon} = 0 \quad (18)$$

$$\Omega_{BK} + \Omega_{\varepsilon} + \Omega_{ВЫХ} = 0 \quad (19)$$

$$\Omega_2 = \Omega_{BK} \pm \Omega_{CT} = 0 \quad (20)$$

Как видно из рисунка 17, при изменении угловой скорости модулятора пропорционально изменяется амплитудное значение ЭДС обмотки статора и выходное напряжение ПЧ, что приводит к стабилизации (Рисунок 18) скорости вращения выходного вала МР.

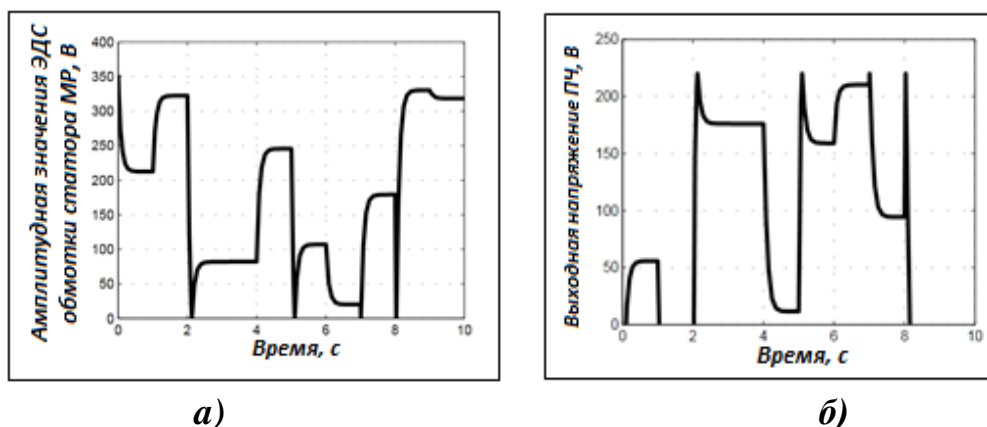


Рисунок 17 – Характеристики переходных процессов ВЭУ с МР при отсутствии регулирования магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – амплитудное значение ЭДС холостого хода обмотки статора; б) – выходное напряжение инвертора ПЧ

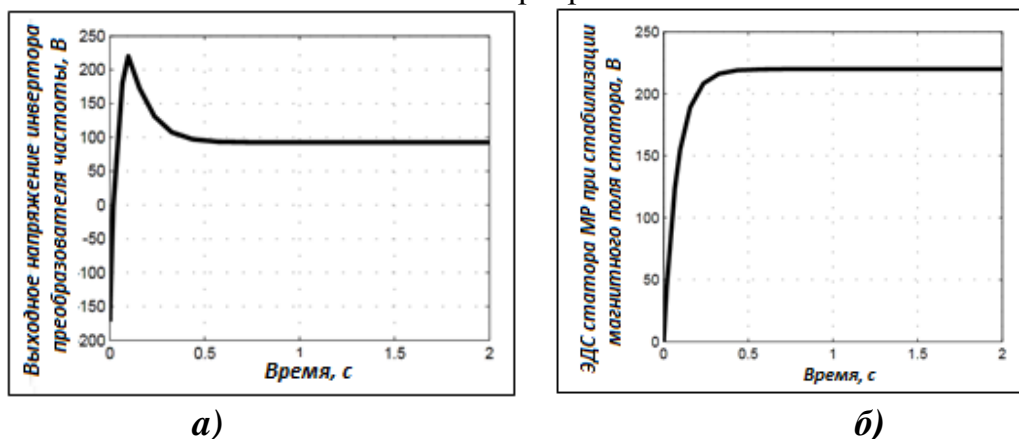


Рисунок 18 – Характеристики переходных процессов ВЭУ с МР при регулировании магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – выходное напряжение инвертора ПЧ; б) – ЭДС статора при стабилизации быстроходного ротора

Разработана схема рекуперации энергии ВЭУ с МР (Рисунок 19). К обмотке статора МР присоединены два ПЧ: первый выполняет функцию передачи мощности к статору во время уменьшения частоты вращения ВК, а второй выполняет функцию рекуперации избыточной мощности статора во время увеличения скорости вращения ВК. При увеличении скорости вращения ВК

сигнал на выходе ДС пропорционально увеличивается и подаётся сигнал на СИФУ для открытия управляемых транзисторов выпрямителя. При этом избыточная мощность проходит через промежуточное звено постоянного тока и рекуперуется через инвертор в сеть. Частота магнитного поля статора МР:

$$\omega_p = \pm(p_2\Omega_2 - z\Omega_1) \quad (21)$$

где $p_2 = z - p_1$ – число пар полюсов внутреннего ротора.

В приведённом выражении (21) отрицательный знак соответствует генераторному, а положительный знак двигательному режиму (Рисунок 20). Зависимость угловой скорости магнитного поля статора МР от скорости вращения роторов определено из выражения:

В режиме стабилизации МР, при изменениях скорости вращения ветроколеса Ω_1 скорость вращения электрогенератора Ω_2 должна оставаться неизменной, равной $\Omega_{2зад}$. С этой целью ошибка сохранения этого значения указанной скорости $\varepsilon = \Omega_{2зад} - \Omega_1$, через ПИД – регулятор подается на канал управления частотой ω_1 источника питания обмотки статора. Зависимость угловой скорости от тока $\omega = \omega(I_y)$, и от коэффициента регулирования $\omega = kI_y$, будем иметь формулу для стабилизации магнитного поля статора МР:

$$\omega = k \left[I_y + k_n \left(\varepsilon + \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \right] \quad (21)$$

$$E = k_1 \left[I_{y1} + k_{n1} \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{n1}} \int_0^t \varepsilon dt + T_{d1} \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \right] \quad (22)$$

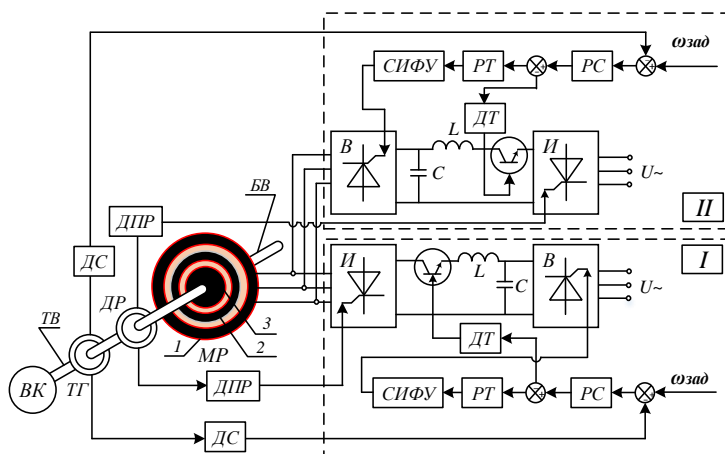


Рисунок 19 – Схема управления и рекуперации энергии ВЭУ с МР: I – контур стабилизации быстроходного ротора МР путём изменения величины магнитного поля статора статическим ПЧ; II – контур рекуперации энергии статора МР; ДС – датчик скорости; ДПР – датчик положения ротора; ВК – ветроколесо; ТГ – тахогенератора; МР – магнитный редуктор; В – выпрямитель; И – инвертор; С – конденсатор; L – индуктивность; ДТ – датчик тока; СИФУ – система импульсно-фазного управления; РС – регулятор скорости

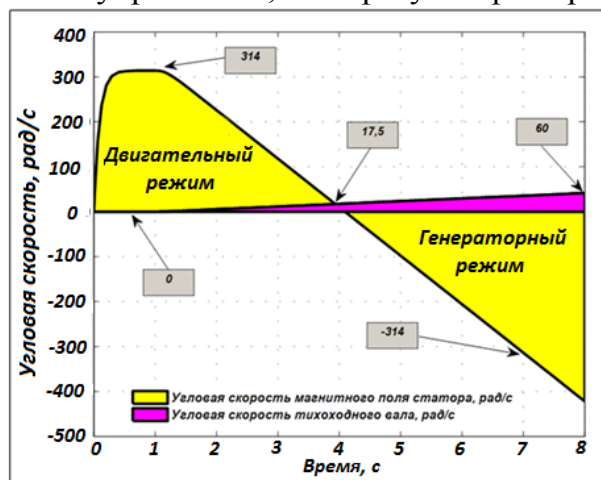


Рисунок 20 – Зависимости угловой скорости магнитного поля статора МР от скорости вращения тихоходного вала в двигательном и генераторном режиме

Зависимость угловой скорости от тока $\omega = \omega(I_y)$, и от коэффициента регулирования $\omega = kI_y$, будем иметь формулу для стабилизации магнитного поля статора МР:

Для стабилизации скорости Ω_2 необходимо также воздействовать на ток статора МР путём изменения входного напряжения инвертора E .

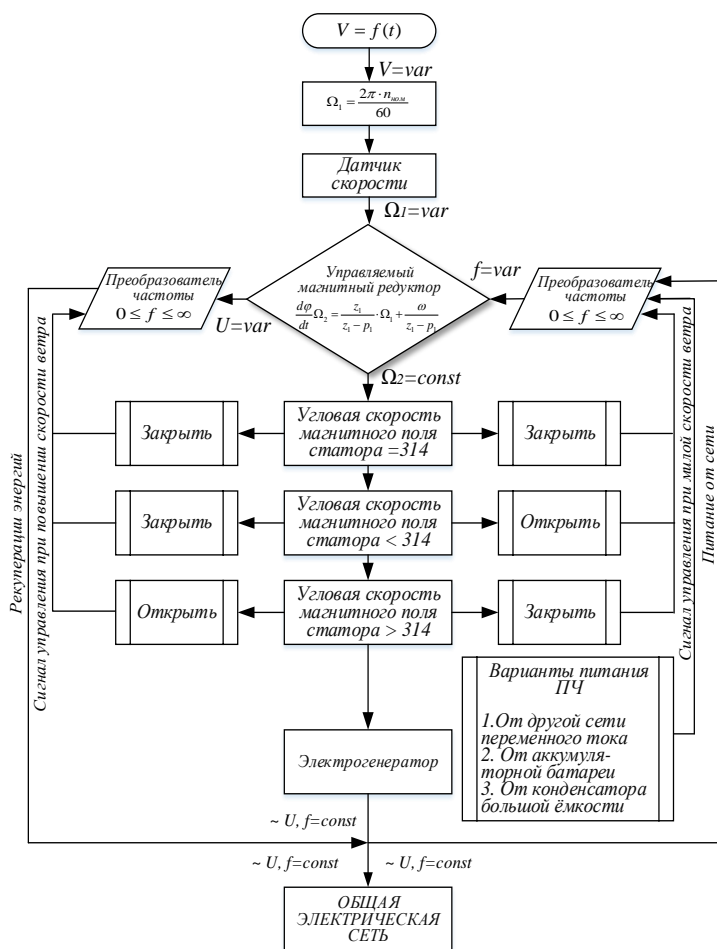


Рисунок 21 – Алгоритм автоматизированной работы статического ПЧ, подключённого к статору МР во время питания и рекуперации энергий от статора

источниками энергии для повышения мощности единой сети. ВЭУ с МР выполняет условия синхронной работы с несколькими источниками питания и обеспечивает устойчивость всех электрических величин, таких как отклонение частоты сети (0,1-0,2 Гц), симметрия фаз, синусоидальность напряжения независимо от частоты вращения тихоходного ротора, т.е. ВК. Благодаря конструкционным частям и характеристикам переходного процесса МР является надёжным стабилизирующим устройством для синхронизации ВЭУ с единой сетью.

На рисунке 22 показана модель синхронной работы ВЭУ с МР, микро-ГЭС и ДЭС в единую сеть. Учитывая схемы синхронизации ВЭУ с различными источниками энергии, для электроснабжения различных приёмников, целесообразно применить ВЭУ с МР, так как на выходном валу МР скорость вращения постоянна не зависимо от переменной скорости ветра, что позволяет выработать электроэнергию по всем нормам, переделываемыми к качеству электроэнергии для электроснабжения различных высокочувствительных электроприёмников.

Разработаны алгоритм работы ВЭУ с МР и порядок её расчёта. Алгоритм работает следующим образом (Рисунок 21): переменная скорость ветра поступает в лопасти ВК, который соединен с входным валом МР и имеет угловую скорость $\Omega_1=var$; ПЧ корректирует частоту магнитного поля статора в диапазоне, $0 \leq f \leq \infty$; за счёт регулирования частоты магнитного поля статора выходной вал вращается с постоянной скоростью $n_{ном}=const$, $\Omega_{ном}=const$. Избыточная мощность при увеличении скорости ветра от МР поступает в универсальный контроллер (УК). На выходе УК установлен выпрямитель для преобразования переменного тока в постоянный для зарядки аккумуляторов. Инвертор преобразует постоянный ток аккумулятора в переменный для отдачи мощности в сеть.

В четвёртой главе

рассмотрена синхронная работа ВЭУ с МР с сетью и с другими

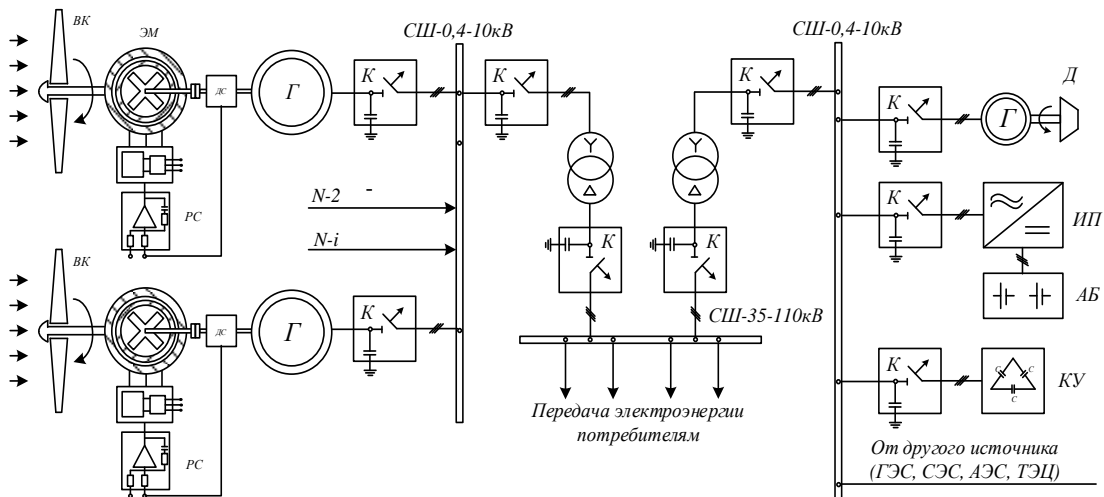


Рисунок 22 – Схема подключения ВЭУ с магнитным редуктором, соединенным в единую сеть, ВК – ветроколесо содержит «N» ВЭУ, ЭМ – электромагнитный редуктор, ПЧ – преобразователь частоты, ДС – датчик скорости, РС – регулятор скорости, К – коммутационный аппарат, содержащий пускорегулирующий аппарат и релейную защиту, ДЭС – дизельная электростанция содержит «N» ДЭС, ИП – инверторный преобразователь, АБ – аккумуляторная батарея, КУ – компенсирующее устройство

Как видно из рисунка 23 значение напряжения общей сети стабильно показывает номинальное значение 1000 В во время параллельной работы ВЭУ с МР с различными электростанциями, подключенными в единую сеть.

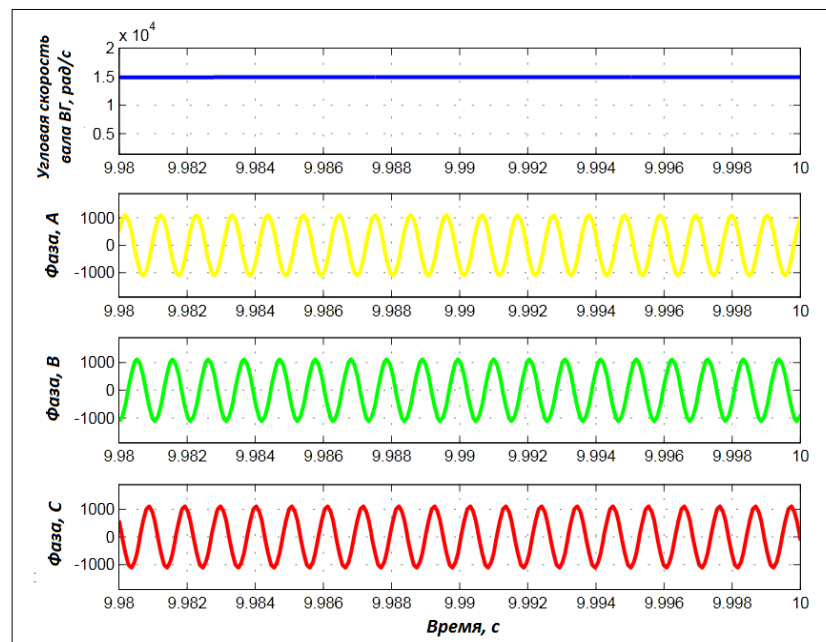


Рисунок 23 – Осциллограмма синхронной работы ВЭУ с МР, СЭС и ГЭС совместно с единой сетью, выходное напряжение ВГ 1000 В

В работе произведен технико-экономический расчёт ВЭУ с МР и определен максимальный срок окупаемости с учётом количества вырабатываемой электроэнергии и коэффициента использования установленной мощности в ВЭУ с МР.

$$\text{Коэффициент использования установленной мощности} = \frac{\text{Действительная выработка электроэнергии за данный период времени}}{\text{Энергия, которая может быть выработана, если генератор будет работать со 100\% – ной мощностью весь данный период времени}} \quad (23)$$

Коэффициент использования установленной мощности приводит к следующему параметру: число часов максимума использования мощности ветрового потока:

$$T_{\text{max ВЭУ}}^{\text{мо}} = K_{\text{цум}} \cdot T = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{N_{\text{уст}}} \quad (24)$$

где $\mathcal{E}_{\text{год}}$ – вырабатываемая энергия ВЭУ в год, кВт · час;

$N_{\text{уст}}$ – установленная (номинальная) мощность генератора ВЭУ кВт.

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = N_{\text{уст}} \cdot K_{\text{цум}} \cdot T \quad (25)$$

где T – число часов работы ВЭУ в год, час.

Для составления сметы на строительство ВЭУ с МР определены капиталовложения на основное оборудование ВЭУ с МР: генератор, магнитный редуктор, ветроколесо и др. Отдельную часть сметы (затрат) составляют дополнительные капиталовложения на ремонтно-монтажные работы при сооружении ВЭУ с МР: строительство башни, покупка проводов и кабелей, а также расходы на заработную плату персонала.

С учётом дохода 59350,19 рублей в год, а доход появился за счёт выработки электроэнергии на ВЭУ с МР, и затраты 263500 рублей: на основное оборудование, дополнительные капиталовложения на сооружение ВЭУ с МР и прочие расходы, определяем срок окупаемости ВЭУ с МР:

$$T_{\text{ок}} = \frac{263500}{59350,19} = 4,44 \text{ год}$$

Срок окупаемости ВЭУ с МР по результатам расчёта составил 4,44 года, что эффективно в условиях дефицита электроэнергии на территории Республики Таджикистан. Кроме того, при массовом выпуске МР себестоимость МР и оборудования ВЭУ с МР значительно снижаются и соответственно будет уменьшаться срок окупаемости.

В заключении формулируются следующие основные выводы и перспективы дальнейших исследований по результатам диссертационной работы:

1. Разработанная математическая и компьютерная модели работы системы ветроустановки с магнитным редуктором описывают переходные процессы стабилизации выходных электрических параметров ветрогенератора. Использование магнитного редуктора в качестве стабилизирующего устройства позволяет оптимизировать режим генерирования электроэнергии ветроустановки.

2. Алгоритм автоматизированной работы и регулирования электромеханической системы ветроустановки с магнитным редуктором включает в себя функцию управления скоростью магнитного поля статора, током и напряжением на выходе статического преобразователя частоты с целью

поддержания постоянства скорости вращения быстроходного ротора, в том числе, при изменении мощности на зажимах ветрогенератора.

3. Магнитный редуктор в качестве стабилизирующего устройства ветроустановки работает, как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. В режиме двигателя в обмотку статора магнитного редуктора поступает мощность от преобразователя частоты, а в режиме генератора избыточная мощность ветроколеса передаётся от обмотки статора через преобразователь в сеть.

4. Предложенные схемы и алгоритмы управления энергией обмотки статора магнитного редуктора дают возможность максимально использовать ветровую энергию, в том числе, при её избыточном уровне.

5. Конструктивные особенности и управление режимом работы магнитного редуктора позволяют синхронизировать ветроустановку с сетью для выработки дополнительной мощности и выравнивания графика нагрузки в часы максимума потребления электроэнергии.

6. Срок окупаемости ВЭУ с МР на территории Республики Таджикистан составляет 4,44 года, что достаточно эффективно для системы энергетики.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК

1. Исломов, И. И. Синхронная работа гидроаккумулирующей электростанции с ветроэлектростанцией / И. И. Исломов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 60-62.

2. Исломов, И. И. Система электроснабжения насосной скважины с ветроагрегатом для водоснабжения жилых массивов / И. И. Исломов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 4. – С. 62-64.

3. Исломов, И. И. Техника безопасности при эксплуатации ветроэнергетических установок / И. И. Исломов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 27-39.

4. Исломов, И. И. Регулируемый магнитный редуктор / Афанасьев, А.А., Генин, В.С., Исломов, И.И., Калинин, А.Г., Токмаков, Д.А. // Электротехника – 2017. – № 7. – С. 55-59. (авторский вклад – 0,96 с.)

5. Исломов, И. И. Функциональная схема стабилизации скорости вращения ветрогенератора с использованием электромагнитного редуктора / И. И. Исломов // Энергетик. – 2017. – №5 – С. 41 – 43.

6. Исломов, И. И. Стабилизация напряжения и частоты электрогенератора ветроэнергетической установки с помощью магнитного редуктора / Афанасьев А.А., Исломов, И. И., Чихняев В.А., Дмитренко, А.М. // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 14–25. (авторский вклад – 2,5 с.)

7. Исломов, И. И., Исследования ветроэлектрических установок с механическим планетарным редуктором и магнитным редуктором для повышения и стабилизации угловой скорости ветрогенератора / И. И. Исломов // Известия Тульского государственного университета. – 2017. – Выпуск 4. – С. 274-280.

Публикации в других изданиях

8. Ислотов, И. И. Синхронная работа ветроэлектростанций с гидроаккумулирующей станцией / И. И. Ислотов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2012. – № 1. – С. 109-112.

9. Ислотов, И. И. Регулирование напряжения ветрогенератора и схема электроснабжения жилого массива ветроэлектростанцией / И. И. Ислотов // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: Межвуз. сб. науч. тр., посвященный юбилею кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий. – Уфа: Уфимский гос. ун-т, Нефтяной тех. университет, 2014. – С. 94-95.

10. Ислотов, И. И. Определение среднегодовой скорости ветра в регионах Республики Таджикистан и расчеты выработки электроэнергии на ветроэлектростанции / И. И. Ислотов // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы: тр. Всерос. науч.-практ. конференция. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 135-138.

11. Ислотов, И. И. Конструкционное исполнение электромагнитного редуктора ветроэлектростанций / И. И. Ислотов // Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). – Уфа: УГНТУ, 2016. – С. 129-132.

12. Ислотов, И. И. Функциональная схема стабилизации скорости вращения ветроэнергетической установки с использованием электромагнитного редуктора / И. И. Ислотов // Вестник ПИТТУ им. акад. М. Осими. – 2016. – №1. – С. 109-113.

13. Ислотов, И. И. Схемы генерирования ветроустановки для электроснабжения с механическим и магнитным редуктором / И. И. Ислотов, // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика: Мат. ХLI Междунар. науч.-практ. конф. – Алматы: Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. – С. 64-68.

14. Ислотов, И. И. Статистический метод определения скорости ветра для рационального выбора основных оборудования ВЭУ / И. И. Ислотов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Междунар (VI Всерос.) науч.-техн. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – Т. 1 – С. 192-198.

15. Ислотов, И. И. Оптимальный выбор основного оборудования ВЭУ в зависимости от градации скорости ветра / И. И. Ислотов // Региональная энергетика и электротехника: проблема и решения: сб. науч. тр.– Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – Вып. 12. – С. 64-69.

16. Ислотов, И. И. Результаты моделирования схемы генерирования электроэнергии ветроэлектроустановкой с магнитным редуктором / И. И. Ислотов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Мат. XII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 324-326.

17. Ислотов, И. И. Рекуперативный режим работы магнитного редуктора в

системе генерирования ветроэлектроустановки / И. И. Исломов // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Мат. I междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 166-171.

18. Исломов, И. И. Реверсивный режим работы магнитного редуктора / И.И. Исломов // Электромехатроника и управление: Мат. XIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2018. – Т. 4. – С. 6.

19. Исломов, И. И. Рекуперация энергии в статоре магнитного редуктора как один из факторов энергосбережения в системе генерирования ветроэлектроустановки / И. И. Исломов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2012. – № 1. – С. 70-73.

ИСЛОМОВ Ильёсходжа Икромходжаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.02.2019 г. Формат 60×84/16. Печ. л. 1,4.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 23

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Пантера»