

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

На правах рукописи

ИСЛОМОВ Ильёсходжа Икромходжаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ
С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Афанасьев Александр Александрович

Чебоксары - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СИСТЕМА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ МАССИВОВ НА ОСНОВЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	13
1.1 Автономные возобновляемые источники энергии на основе ветроэнергетических установок	13
1.2 Состояние и перспективы развития мировой ветроэнергетики	14
1.3 Схемы генерирования электроэнергии ветроэлектростанции в отдельной и совместной работе с сетью.....	16
1.4 Система стабилизации параметров ветроэнергетических установок.....	21
1.5 Классификация и структурная схема ветроустановок и типы применяемой электрической машины в качестве генератора.....	23
1.6 Конструкция трёхлопастных ветроэнергетических установок	27
1.7 Выводы по главе 1.....	29
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ВЕТРОУСТАНОВКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОРЕСУРСОВ В РЕГИОНАХ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН.....	30
2.1 Ветровые ресурсы Республики Таджикистан	30
2.2 Определение и расчет количества вырабатываемой электроэнергии с учетом среднегодовой скорости ветра.....	33
2.3 Оптимальный выбор основного оборудования ветроустановки в зависимости от градации скорости ветра.....	39
2.4 Моделирование работы ветроустановки с механическим планетарным редуктором.....	49
2.5 Классификация полупроводниковых частей системы управления преобразователя частоты.....	58

2.6 Моделирование схемы генерирования электроэнергии ветроустановки с выпрямительно-инверторным преобразователем.....	62
2.7 Имитационная и математическая модель ветроустановки в программе MultiSim.....	66
2.8 Теория и общий принцип построения системы регулирования сложных электромеханических систем ветроустановки с магнитным редуктором	70
2.9 Выводы по главе 2.....	72
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЕТРОУСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА.....	74
3.1 Принцип работы магнитного редуктора с плавнорегулируемым коэффициентом редукции	74
3.2 Баланс мощности, угловой скорости и момента магнитного редуктора	86
3.3 Разработка функциональной схемы ветроустановки с магнитным редуктором для стабилизации магнитного поля статора и быстроходного ротора.....	92
3.4 Алгоритм автоматизированной работы ветроустановки с магнитным редуктором и моделирование режима рекуперации электрической энергии от статора магнитного редуктора.....	97
3.5 Регуляторы в системе управления преобразователя частоты, подключённым к обмотке статора магнитного редуктора.....	100
3.6 Функциональные схемы управления ветроустановки с магнитным редуктором.....	106
3.7 Схема реверсивного управления ветроустановки с магнитным редуктором преобразователям частоты переменного тока.....	115
3.8 Электромагнитный редуктор как совокупность двух элементарных электрических машин	122

3.9 Уравнения динамического равновесия механических и электрических каналов управления магнитного редуктора	125
3.10 Момент инерции в ветроустановке с магнитным редуктором при разности скорости вращения валов	137
3.11 Выводы по главе 3.....	143
ГЛАВА 4 СИНХРОННАЯ РАБОТА ВЕТРОУСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКА ЕЁ ОКУПАЕМОСТИ	145
4.1 Синхронная работа гидроаккумулирующей электростанции с ветроэлектростанцией.....	145
4.2 Система электроснабжения насосной скважины с ветроагрегатом для водоснабжения жилых массивов	146
4.3 Параллельная работа альтернативных электростанций.....	150
4.4 Синхронные генераторы с постоянным магнитом.....	151
4.5 Преобразование энергии в генераторном режиме синхронной машины.....	152
4.6 Однолинейная схема ветроэнергетических установок с электромагнитным редуктором для электроснабжения жилого массива.....	154
4.7 Техника безопасности при эксплуатации ветроэнергетических установок.....	158
4.8 Определение экономической эффективности производства электроэнергии на ветроустановке с магнитным редуктором	162
4.9 Определение срока окупаемости ветроустановки с магнитным редуктором.....	163
4.10 Выводы по главе 4.....	167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	169
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	170
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчёт конструкционных характеристик ветроустановки с горизонтальной осью вращения	182

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты аналитического расчёта энергетических характеристик двухступенчатого регулируемого магнитного редуктора	185
ПРИЛОЖЕНИЕ В. График изменения скорости вращения магнитного редуктора при разной скорости тихоходного вала магнитного редуктора	186
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Аналитический расчёт графика угловых характеристик ветроустановки с магнитным редуктором в течение одного месяца.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Геометрические размеры и параметры магнитной системы магнитного редуктора.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Результаты аналитического расчёта кругового графика стабилизации электромеханических параметров магнитного редуктора	190
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. ЭВМ программа автоматизированного расчёта моментов и угловых скоростей магнитного редуктора	192
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Акты внедрения научных результатов.....	193

ВВЕДЕНИЕ

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 закономерностях работы ВЭУ, регулирования и стабилизации выходных электрических параметров ВЭУ, посвящены работы множества 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. Основными функциями оптимального управления ВЭУ за счет усовершенствования конструктивных частей и алгоритмов автоматизированного управления занимались А.А. Афанасьев, Ю.Г. Шакарян, В.З. Манусов, С. Н. Удалов. Из зарубежных ученых, которые занимались стабилизацией параметров ВЭУ с применением высокочувствительных полупроводниковых электронных аппаратов Н. Bindner, A. Rebsdorf, W. Byberg, R. Hoffmann, O. Carlson, J. Nylander, H. Beyer и др.

Анализ научных работ, перечисленных выше учёных, конструкторов и 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 приведены варианты максимального использования энергии ветра в момент резкого увеличения скорости ветра от допустимого значения. В работах также нет чёткого определения стабилизации параметров ВЭУ с помощью механического трансмиссионного редуктора.

Таким образом, исследование ВЭУ с магнитным редуктором (МР) является актуальным направлением технической науки 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 – исследовать схемы генерирования энергии ВЭУ и на их основе разработать схему 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 приводит к достижению 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 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 магнитным редуктором с переменным коэффициентом редукции, обеспечивает

стабилизацию скорости вращения ветрогенератора с использованием двухконтурной системы с новым алгоритмом автоматического управления, состоящей из внутреннего контура регулирования тока статора магнитного редуктора 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 магнитным редуктором включает в себя расчёт основных характеристик магнитного редуктора с плавно-изменяющимся коэффициентом редукции для стабилизации скорости вращения ветрогенератора с применением преобразователя частоты, подключённого к статору 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 срока окупаемости ветроустановки с магнитным редуктором на основе и выработки электроэнергии.

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

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная схема и методика расчёта позволяют разрабатывать ветроустановку с улучшенными технико-экономическими показателями и облегчают их 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 мощности от статора магнитного редуктора при увеличении скорости вращения ветроколеса.

3. Методика расчета схемы генерирования на ветроустановке с магнитным редуктором и замкнутой системой 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 расчёты в диссертационной работе, разработанные математические и имитационные модели, разработки функциональных схем и систем 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.

ГЛАВА 1 СИСТЕМА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ МАССИВОВ НА ОСНОВЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

1.1 Автономные возобновляемые источники энергии на основе ветроэнергетических установок

Электростанции на основе возобновляемых источников энергии на сегодняшний день являются быстроразвивающимся видом электростанций и одним из современных и высокотехнологичных способов генерирования энергий. С каждым годом в мире увеличивается строительство новых нетрадиционных электрических станций, таких как ветроэлектростанция (ВЭС), солнечная электростанция (СЭС), гидроэлектростанция (ГЭС) и др. [1, 17, 18].

Нетрадиционные автономные возобновляемые электростанции в ближайшем будущем заменят традиционные электростанции, такие как теплоэлектростанции на основе угля, природного газа и невозобновляемых энергоресурсов. Кроме того, ежегодно в мире спрос на электроэнергию увеличивается, несмотря на разработку энергосберегающих технологий и внедрение в быт и промышленность высокотехнологичного энергосберегающего электрооборудования.

Мы осознаем, что запасы традиционных невозобновляемых источников энергии не безграничны. По оценкам ведущих ученых, запасы невозобновляемых источников энергии начнут иссякать уже через 70-120 лет [19, 17]. Тенденция роста строительства электростанций на основе возобновляемых энергоресурсов положительно сказывается на экологии и климате всего земного шара, уменьшается количество выбросов углеводородных токсичных газов.

Если рассмотрим основные конструкционные части и оборудования электростанций (ЭС), таких как СЭС, ВЭС и ГЭС, которые генерируют энергию на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), то они кардинально отличаются друг от друга в зависимости от режима работы и способа генерирования энергии. Одной из главных особенностей, при строительстве ЭС на основе ВИЭ

является географическая особенность, т.е. наличие в местах строительства достаточного количества возобновляемых энергоресурсов [1, 13, 17, 18, 19].

Учитывая такую ситуацию в сфере выработки электроэнергии на основе возобновляемых энергоресурсов, нужно уделять особое внимание ветроэлектрическим станциям как более рациональным с точки зрения занимаемой площади электростанции.

1.2 Состояние и перспективы развития мировой ветроэнергетики

Динамика использования энергии ветра в мире ежегодно увеличивается, несмотря на высокие капиталовложения на строительство ВЭУ и на сезонный характер выработки электроэнергии. Это объясняется тем, что ветроэнергетика является одним из основных видов электростанций, которые широко используются в системе электроснабжения сельского хозяйства, промышленного предприятия и применяются в качестве основного источника питания для автономных и сезонных потребителей электроэнергии.

Для развития ветроэнергетики и повышения мощности энергосетей на основе чистой энергии в ряде стран мира законодательно устанавливаются льготы и финансовые поддержки для повышения технико-экономического показателя строящихся ВЭС [19]. Другими показателями развития данной отрасли является удорожание топливно-энергетического ресурса и неравномерное распределение энергоресурса на земном шаре. Например, странам, которые не имеют достаточного количества топливно-энергетического ресурса, приходится приобретать газ, нефть у других стран. Такая ситуация приводит к автоматическому удорожанию выпускаемой электроэнергии за счёт транспортировки энергоресурсов.

Тенденция роста использования энергии ветра наблюдается во всех точках земного шара. К началу 2016 года установленная мощность всех ветрогенераторов составляла 486,8 ГВт, а суммарная выработка электроэнергии на всей ВЭУ в мире – 706 ТВт • час. На сегодняшний день страны, которые интенсивно развивают

отрасль ветроэнергетики, – это Дания, которая производит 42% электроэнергии на основе ВЭУ от общего количества вырабатываемого электричества, Португалия – 27%, Никарагуа – 21%, Испания – 20%, Ирландия – 19%, Германия – 8% [1, 13, 17, 18, 19]. В последние годы проектирование и исследование ВЭУ активно наблюдается в России, Египте, ОАЭ, Китае, Японии и в некоторых странах Средней Азии.

Необходимо отметить, что несмотря на тенденцию роста в мире выработки электроэнергии за счёт ВЭУ, (Рисунок 1.1) стоимость основного оборудования и капиталовложение на сооружение ВЭУ не снижаются. Кроме того, из экономических соображений внедрение ВЭУ в систему электроснабжения как одного из основных видов источников энергии приведёт к снижению ценообразования электроэнергии от стоимости нефти и газа.



Рисунок 1.1 – Динамика использования энергии ветра в мире

Европейская комиссия опубликовала новый сценарий по развитию энергетического сектора в странах Европейского союза (ЕС) до 2030 года. Диаграмма состава новых мощностей европейской энергосистемы с 2010 по 2020 г. показана на рисунке 1.2 [13, 17, 19, 85].

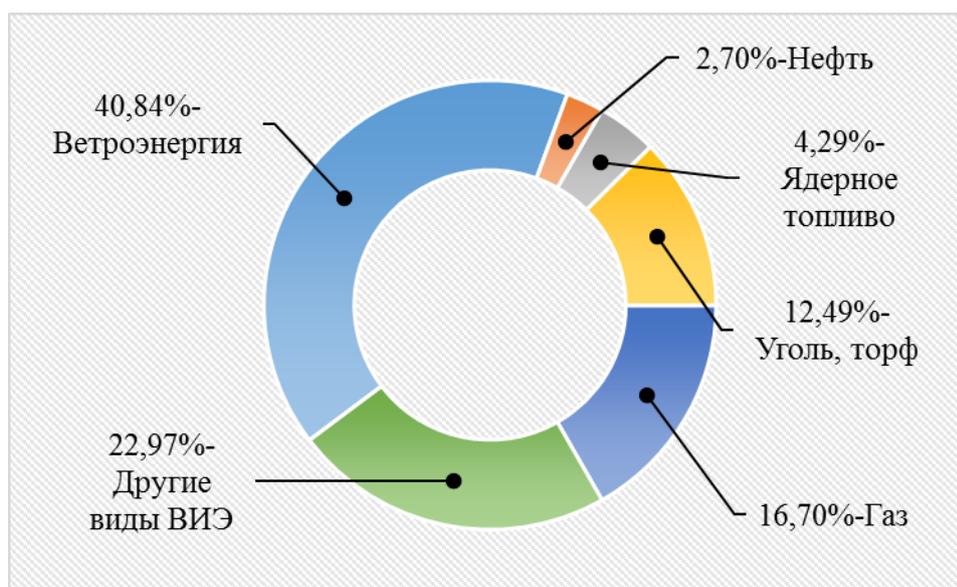


Рисунок 1.2 – Состав новых энерго мощностей, вводимых в ЕЭС с 2010 по 2020 г.
(источник: Европейская Комиссия по развитию энергосистемы)

Как видно из круговой диаграммы, большое внимание ЕС уделяет ветроэнергетике как одному из основных видов возобновляемых источников энергии для электроснабжения различных объектов народного хозяйства.

1.3 Схемы генерирования электроэнергии ветроэлектростанции в отдельной и совместной работе с сетью

Особенность схемы генерирования всех видов ВЭС заключается в рациональном и удобном преобразовании энергии ветра в электрическую, механическую и тепловую энергию не зависимо от переменной частоты вращения ветроколеса (ВК) [1, 17, 18, 85].

Схема генерирования электрической энергии ВЭУ, не подключённой к общей сети, в основном применяется в маломощных ВЭУ, предназначенных для энергоснабжения небольших ферм, домов и других небольших сооружений. В таких схемах не требуется постоянная частота вращения ВК, и на зажимах ВГ подключают аккумуляторные батареи для аккумуляции избыточной энергии (Рисунок 1.3).

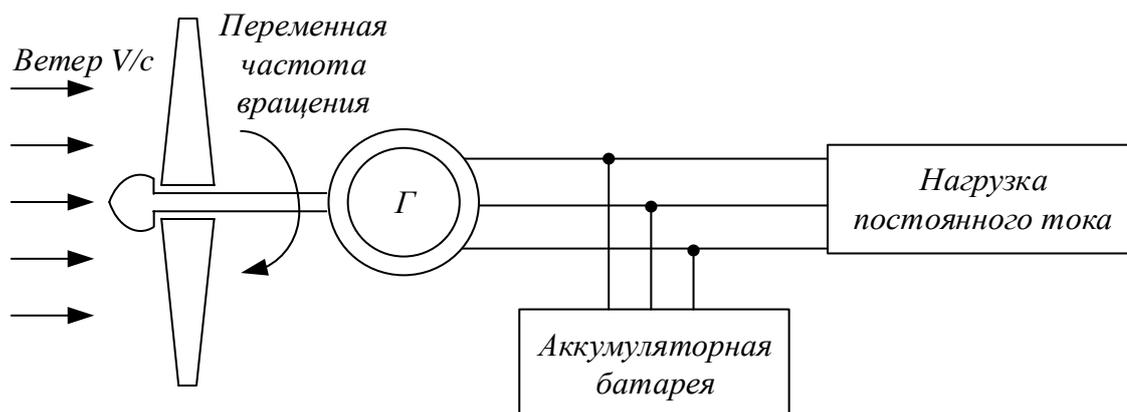


Рисунок 1.3 – Схема генерирования электрической энергии ВЭУ с аккумулярованием и с потребителем постоянного тока

Аккумулярование энергии ветра можно осуществить с помощью комплекса электрических, тепловых и аккумулирующих устройств (Рисунок 1.4). В качестве аккумулятора тепла и тепловой нагрузки используют резисторы с большим сопротивлением, которое не критичны к качеству электроэнергий.

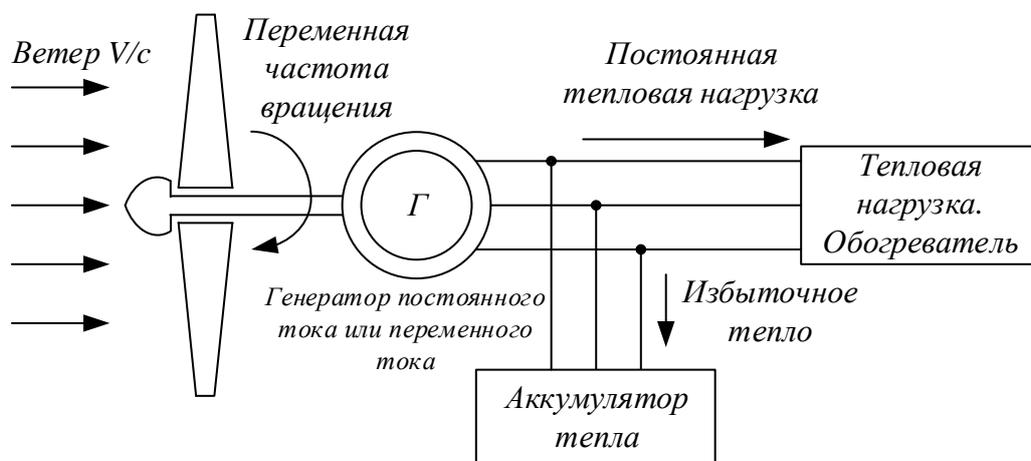


Рисунок 1.4 – Схема генерирования электрической энергии ВЭУ с использованием обогревательной системы (аккумулятор тепла) для тепловой нагрузки

Для водоснабжения сооружений и жилых домов можно использовать комплекс аккумуляционных баков для хранения воды (Рисунок 1.5). В таких схемах генерирования частота вращения ВЭУ не обязательно должна быть постоянной, поскольку ёмкость бака велика и, в случае максимума скорости ветра, система защиты насоса автоматически отключается и ВЭУ работает в режиме

холостого хода, т.е. без нагрузки. В такой системе главную роль играют выравненные графики нагрузки [1, 17, 18, 85]. Во время максимума скорости ветра аккумуляторный бак аккумулирует воду, а во время минимума скорости ветра бак сливает воду потребителям. Режим работы такой ВЭУ построен по принципу ГАЭС, но в отличие от них в качестве первичной энергии используется энергия ветра.

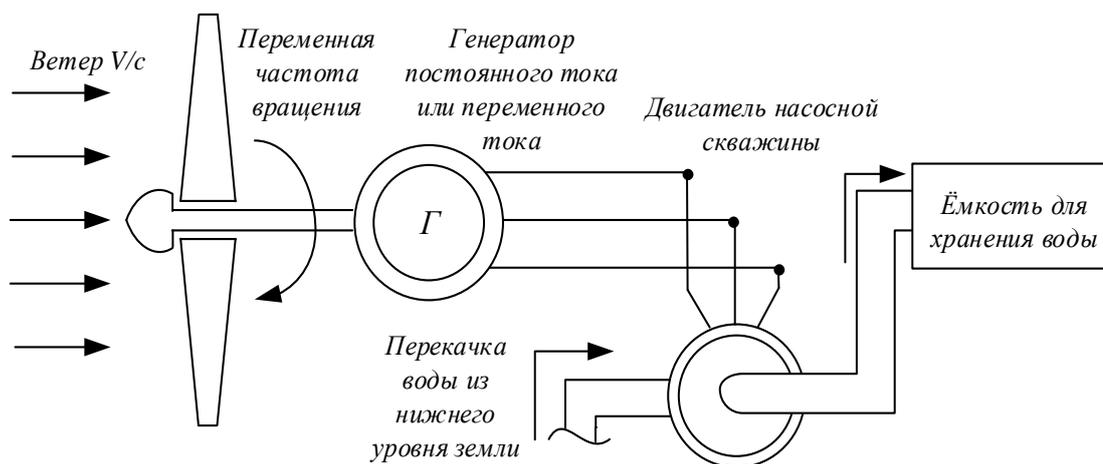


Рисунок 1.5 – Схема генерирования электрической энергии ВЭУ с использованием насосной скважины и аккумуляции воды для водоснабжения

Баланс количество энергии в схема генерирования электрической энергии ВЭУ с использованием насосной скважины и аккумуляции воды определяется по формуле:

$$W_{\text{ВЭС}} = W_{\text{потр}} + W_{\text{БАК}}, \quad (1.1)$$

где $W_{\text{потр}}$ – расход энергии для водоснабжения потребителей, кВт · час;

$W_{\text{БАК}}$ – расход энергии для заполнения емкости для аккумуляции воды, кВт · час.

Для схем ВЭУ с переменной частотой вращения ВК принимают выпрямительное устройство для потребителей постоянного тока. Далее с помощью инверторного преобразователя получают переменное напряжение со стандартной частотой. Отличительная особенность такой схемы генерирования электрической энергии ВЭУ заключается в том, что независимо от переменной частоты вращения ВК на выходе инверторного преобразователя можно получить переменное

напряжение с неизменяющейся частотой 50 Гц, близкой к частоте сети. Кроме того, такая схема позволяет синхронизировать ВЭУ с общей энергосистемой (Рисунок 1.6). Для синхронизации ВЭУ с общей сетью и при параллельной работы нескольких генераторов ВЭУ необходимо соблюдать следующие условия [1, 17, 18, 85].

- напряжение на выходе инвертора ВЭУ должно быть равно напряжению сети;
- частота на выходе инвертора ВЭУ должна равняться частоте сети;
- градусы фазы на выходе инвертора ВЭУ и сети должны быть одинаковыми;
- форма синусоидального тока и напряжения на выходе инвертора должна соответствовать параметрам сети.

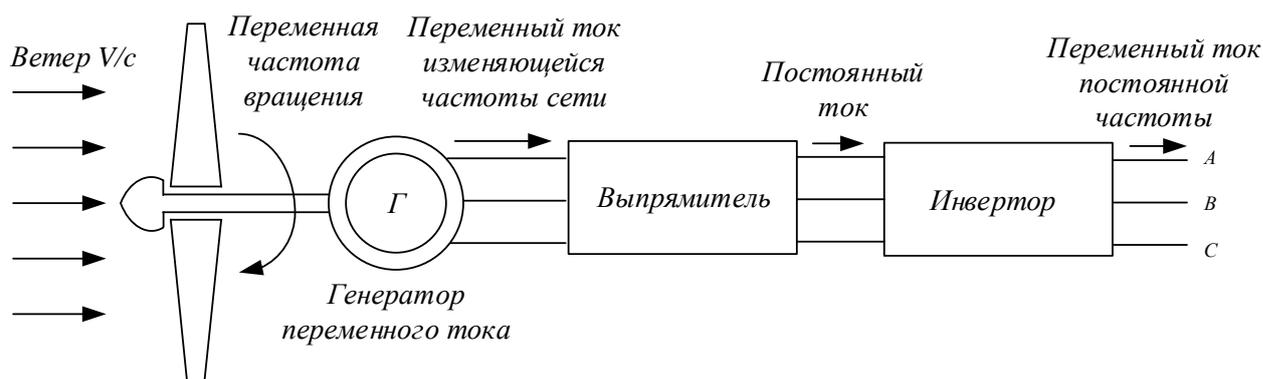


Рисунок 1.6 – Схема генерирования электрической энергии ВЭУ с использованием выпрямителя и инвертора для тепловой нагрузки

Схема генерирования ВЭУ, включённого непосредственно к нагрузке в основном применяется в автономных системах электроснабжения, некритичных к изменению напряжения и тока и не требующих подключения к общей сети.

Такая схема используется для теплоснабжения домов, сталеплавильных печей и для выработки дополнительной мощности в отдельных установках. При этом снижается график потребления нагрузки небольших цехов промпредприятий. Такую схему (Рисунок 1.7), можно использовать как один из способов энергосбережения и повышения экономических показателей промпредприятия.

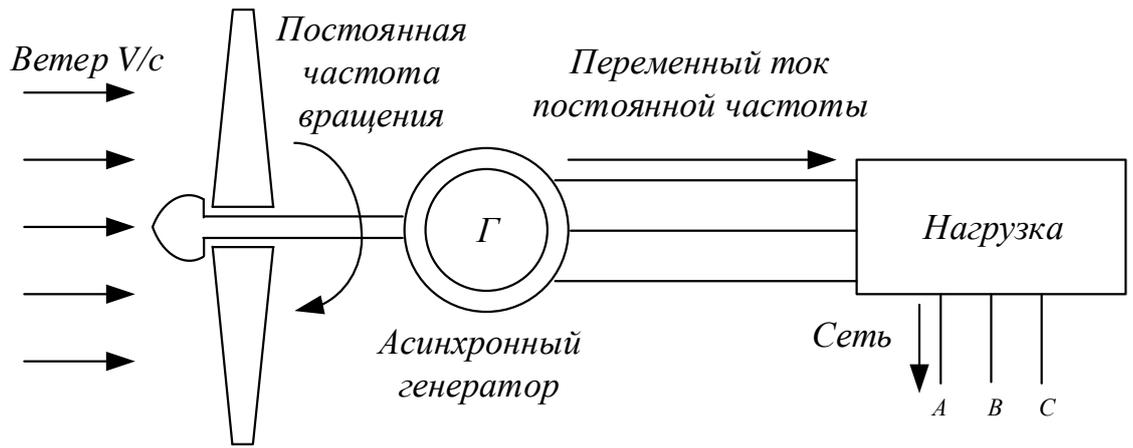


Рисунок 1.7 – Схема генерирования электрической энергии ВЭУ с использованием асинхронного генератора

Другая схема генерирования электроэнергии в ВЭУ – это регулировка скорости вращения ротора генератора с помощью буферной нагрузки, которое подключено к ротору генератора постоянного тока (Рисунок 1.8). Недостатком данной схемы генерирования – это большие потери энергии между контактными кольцами ротора и контактах управляющего резистора. Кроме того, у них ограниченный диапазон регулирования, которое зависит от сопротивления буферной нагрузки (резисторов).

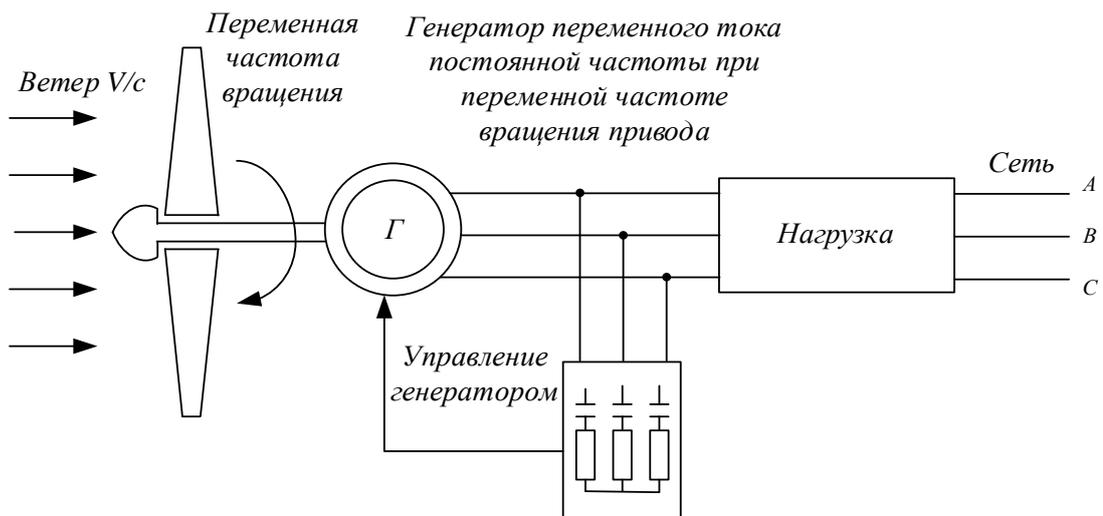


Рисунок 1.8 – Схема генерирования электрической энергии ВЭУ с использованием генератора постоянного тока с управлением буферной нагрузки

Другая более эффективная схема генерирования электроэнергии в ВЭУ – это совмещённая система ВЭУ с фотоэлектрическим преобразователем (Рисунок 1.9) [13, 17, 18, 19, 85].

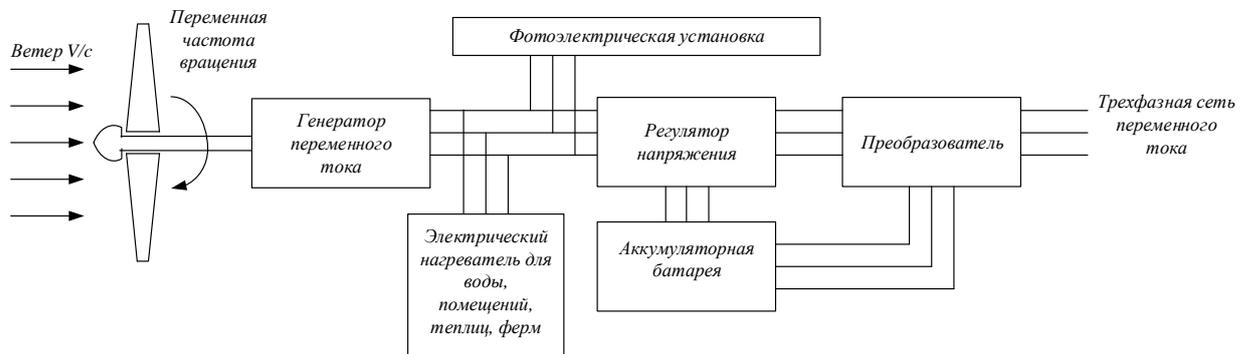


Рисунок 1.9 – Схема генерирования электрической энергии ВЭУ совместно с фотоэлектрической установкой с использованием генератора переменного тока

Такая совмещённая схема имеет одну общую систему контроля и преобразования энергии и позволяет выработать дополнительную мощность на основе чистых возобновляемых источников энергии для электроснабжения различных потребителей, включая небольшие промпредприятия.

1.4 Система стабилизации параметров ветроэнергетических установок

На сегодняшний день для обеспечения максимальной эффективности работы ВК изменяют частоту его вращения с учётом изменения скорости ветра, при этом сохраняя постоянным коэффициент быстроходности, для максимальной работы ВГ.

Для стабилизации выходных электрических параметров ВЭУ на сегодняшний день совершенствуют и принимают следующие способы управления:

1. Механические системы управления частотой вращения ВЭУ с помощью адаптивного поворота лопастей достаточно сложны и дороги, при этом методе во время стабилизации скорости вращения ВК наблюдаются скачки напряжения на зажимах главного генератора ВЭУ.

2. Чем меньше частота вращения и мощность ВЭУ, тем больше длина его радиус, поэтому только очень малые ветроколеса (радиусом до 2 м) удается

соединить напрямую с генератором. При больших размерах ветроколеса и при низких скоростях вращения приходится использовать повышающие механические редукторы, что удорожает себестоимость ветроустановки и ее обслуживания. Кроме того, механические редукторы состоят из тяжёлых трансмиссионных деталей, что приводит к утяжелению и жёсткости всех механических систем ВЭУ. Заменой редукторам могут стать новые типы многополюсных генераторов, работающих при малых частотах вращения. При применении таких генераторов не решается задача стабилизации всех выходных электрических параметров ВЭУ при резких скачках скорости ветра.

3. В некоторых конструкциях ВЭУ предусмотрены соединяющие муфты для отключения ветроколеса от ветрогенератора во время увеличения силы ветра. Питание потребителей электроэнергии осуществляется от аккумуляторных батарей. При возникновении такой ситуации, даже при плавном соединении генератора с ветроколесом, необходимы специальные демпфирующие устройства, для того чтобы исключить механические удары, перегрузки и броски напряжения на выходе ветрогенератора.

При всех достоинствах и недостатках ВЭУ следует учитывать специфические требования, предъявляемые к стабилизации выходных электрических параметров ВЭУ.

Благоприятные ветровые условия, как правило, существуют в малонаселенных районах, на островах и вблизи берега моря. Учитывая географические условия земного шара можно строить ВЭУ даже в промышленных районах, где наблюдается рост потребления электроэнергии. Кроме того, распределение ветровых ресурсов в зависимости от географических условий не всегда совпадает с ростом потребления электроэнергии.

На сегодняшний день потребителями энергии ВЭУ являются разнохарактерные электроустановки и оборудования, например, приёмники и системы отопления и обогрева, нечувствительные к формам напряжения и частоты, а осветительные и электронные приёмники очень чувствительны к перепадам напряжения и частоты. Отдельной проблемой являются силовые и

электромеханические приёмники, такие как маломощные и мощные электрические машины, насосные агрегаты, которые при перепадах напряжения быстро выходят из строя и увеличивают дополнительные затраты на ремонт. Еще одним из главных потребителей энергии ВЭУ являются осветительные и электронные устройства, что быстро выходит из строя при незначительных перепадах напряжения и частоты сети.

При строительстве ВЭУ необходимо уделить особое внимание характеру приёмников электроэнергии [14]. В зависимости от конструкционных частей и системы управления ВЭУ, себестоимость выпускаемой электроэнергии становится как дешёвой, так и относительно дорогой, поэтому при разработке схем управления ВЭУ необходимо максимально использовать энергию ветра и стабилизировать все электрические параметры.

Анализ парка ВЭУ показывает, что лишь 40-50% из них отвечают стандартным требованиям к качеству выпускаемой электроэнергии (например, к частоте). Учитывая эти показатели необходимо разработать схему и систему управления ВЭУ со стандартными выходными электрическими параметрами с учетом режима работы потребителей для их надёжного и дешёвого электроснабжения.

1.5 Классификация и структурная схема ветроустановок и типы применяемой электрической машины в качестве генератора

Обобщенная структурная схема ВЭУ (Рисунок 1.10) формирует электромеханические характеристики различных частей управления, т.е. момент вращения ВГ, и множественные факторы, такие как скорость ветра, момент инерции на валах, ёмкость аккумуляторных батарей и пропускная способность управляющего контроллера, с учетом коэффициентов редукции при заданных скоростях ветряного потока. При этом математическое описание всех параметров ВЭУ может быть получено вероятностными методами для надёжной работы всей системы.

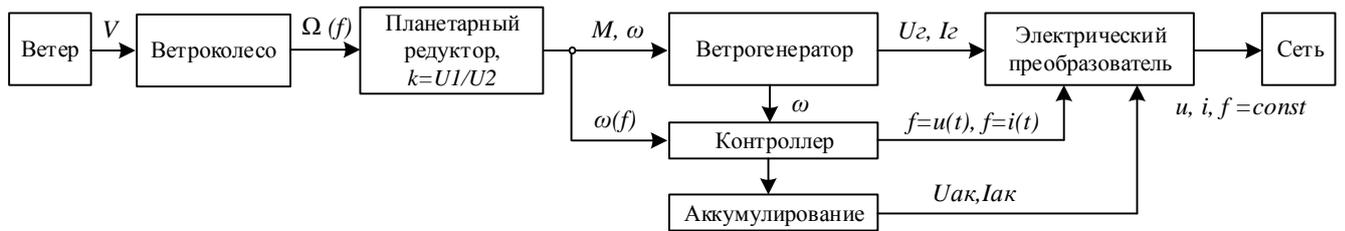


Рисунок 1.10 – Структурная схема модели ВЭУ с универсальным контроллером

Конструкции лопастей ВЭУ проектируют разной формы и длины, но при проектировании особое внимание уделяется аэродинамическим характеристикам, лёгкости и скорости вращения лопастей при малой скорости ветра. На сегодняшний день на ВЭУ устанавливают два типа ветроколеса, быстроходные малолопастные и тихоходные многолопастные [31, 85].

Трехлопастные ВК с горизонтальной осью вращения (Рисунок 1.11, а) отличаются из многополюсных вертикальных лопастей очень плавным вращением. Электродгенератор и редуктор, соединяющий его с валом ВК, расположены обычно на вершине опорной башни в поворотной головке. В целях обслуживания и ремонта электродгенератор удобно разместить внизу, но возникающие при этом сложности с передачей крутящего момента вниз по валам и значительные механические потери в валах обесценивают преимущество размещать электродгенератор наверху, внутри основного корпуса, горизонтально к ВК. Многолопастные ВК, развивающие большие крутящие моменты при слабом ветре, используются для перекачки воды, и там, где не требуется высокая частота вращения [1, 13, 17, 18, 19, 31, 85].

ВЭУ с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Кроме того, такая конструкция позволяет за счет только удлинения вала установить редуктор с генераторами внизу башни, что удобно для обслуживания и замены [1, 13, 17, 18, 19, 31, 85].

Принципиальными недостатками ВЭУ с вертикальной осью вращения являются (Рисунок 1.11, б):

1) большая подверженность их усталостным разрушениям из-за более часто возникающих автоколебательных процессов;

2) высокая пульсация крутящего момента, который приводит к нежелательной пульсации вала (ротора) генератора и впоследствии выходных электрических параметров генератора. С учётом такой ситуации подавляющее большинство ветрогенераторов (ВГ) выполняются по конструкции горизонтально-осевой схемы. Несмотря на это, исследование инерционных и аэродинамических характеристик ВЭУ с вертикально-осевыми ВК продолжается [17].

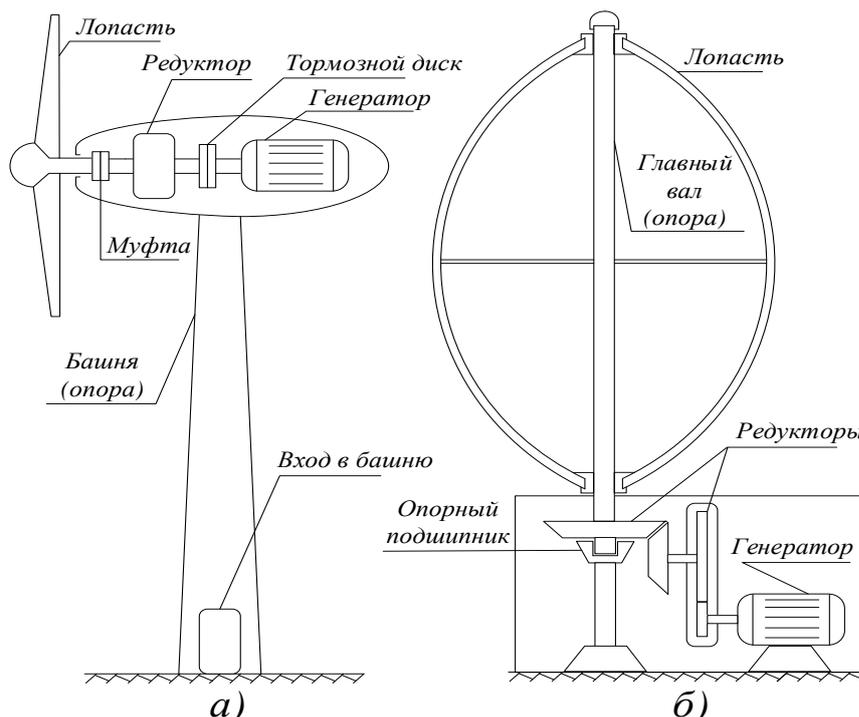


Рисунок 1.11 – Конструкция и основное оборудование ВЭУ:

а) – ВЭУ с горизонтальной осью вращения; б) – ВЭУ с вертикальной осью вращения

Быстроходные ветроколеса обычно конструируются с тремя лопастями больших и малых размеров. Диаметр ветроколеса с большими лопастями достигает до 50 м, а у малых – от 1 до 5 м. Благодаря быстроходности и плавному регулированию числа оборотов, они широко используются для электрификации небольших потребителей электроэнергии, таких как освещение, аккумулярование и обогрев [1, 17, 85].

Тихоходные ВК моментально вращаются при слабом ветре и имеют большой крутящий момент. Такие ветроколеса плохо поддерживают постоянство числа оборотов и не могут применяться в электроосвещении и электрификации, но

применяются в механических приводах. Кроме того, тихоходные ветроколеса из-за габаритных размеров не могут быть мощными относительно ВЭУ с быстроходными ветроколесами.

С учетом характеристики быстроходного и тихоходного ВК широкое распространение во всём мире получили трёхлопастные быстроходные ВЭУ.

Рассматривая ВЭУ как систему, преобразующую энергию ветра в другие виды, можно описать структурные части со всеми её элементами. Цикл преобразования энергии ветра в другие виды энергии с основными частями приведён на рисунке 1.12.

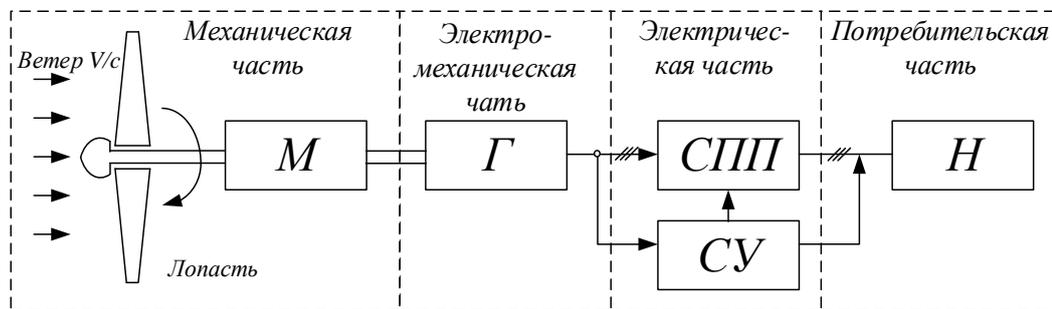


Рисунок 1.12 – Структурная часть схемы ВЭУ

Механическая часть. В этой части происходит преобразование непостоянной энергии потока ветра в механическую с помощью ВК, а именно в лопастях. Далее механический редуктор (мультипликатор) с основными механизмами, шестернями, ведущими и ведомыми валами, повышает угловую скорость, передавая повышенную угловую скорость на вал генератора.

Электро-механическая часть. Основным элементом этой части является генератор. Генератор на базе асинхронной машины или синхронной машины преобразовывает крутящий момент редуктора в электрическую мощность. Учитывая непостоянность крутящего момента редуктора на выходе генератора, значения тока и напряжения не постоянны, в связи с чем на валу генератора необходимо установить комплекс электротехнических средств и датчиков для регулирования и анализа параметров напряжения и тока.

Электрическая часть. В этой части сигнал из электро-механической части (крутящий момент, угловая скорость, момент, постоянность времени тока и

напряжения якоря машины и др.) поступает в систему полупроводниковых приборов (СПП), которые состоят из транзисторных преобразователей и системы управления (СУ), формирующих сигнал для регулирования и стабилизации выходных параметров напряжения и тока СПП.

Потребительская часть. Потребительская часть состоит из приёмников энергии, таких как тепловые, электрические и аккумулирующий. В зависимости от мощности приёмников электроэнергии на зажимах генератора возникают обратные токи, что приводит к обогреву СПП, поэтому в ВЭУ необходимо предусмотреть и обратный сигнал, зависящий от нагрузки, подключенной на выход электрической части.

Одним из основных оборудования ВЭУ является генератор, т.е. электрическая машина, применяющая в качестве преобразователя механической силы потока ветра в электрическую. Классификация основного оборудования и электрических машин (генератора) современной ВЭУ с вертикальной и горизонтальной осью вращения приведен на рисунке 1.13.

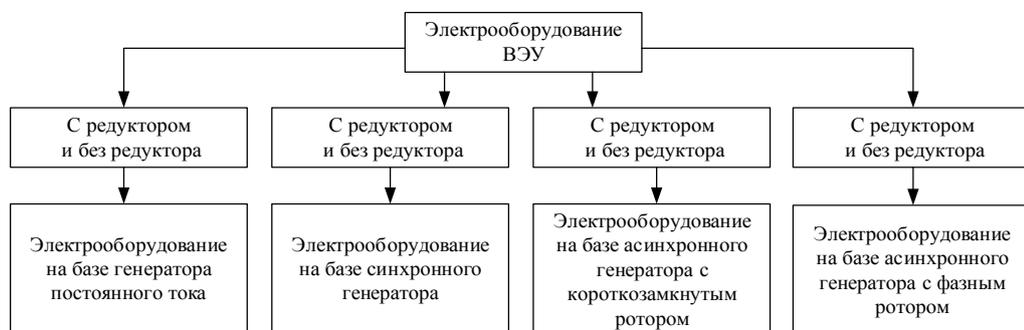


Рисунок 1.13 – Классификация ВЭУ по типу электрической машины

Генератор в основном выбирают с учетом аэродинамических характеристик ВЭУ, среднегодовой скорости ветра и способа генерирования энергии ветра в другие виды энергии.

1.6 Конструкция трёхлопастных ветроэнергетических установок

Все ВЭУ большой мощности практически являются тихоходными в зависимости от длины лопастей, поэтому для них устанавливают редуктор.

Лопастей 4 служат для преобразования энергии ветрового потока в крутящий момент, в зависимости от мощности ВЭУ длина лопастей достигает от 1,5 до 20 м. Электрогенератор 6 является главным компонентом ВЭУ, и для них принимают синхронные и асинхронные генераторы различного исполнения (Рисунок 1.14, а). Анализ основных частей ВЭУ показал, что все они на сегодняшний день являются громоздкими и на точность регулирования и стабилизации параметров частоты и напряжения влияют незначительно. Клиноременная передача в основном повышает угловую скорость и имеет малый срок службы по сравнению с мотор-редуктором (Рисунок 1.14, б).

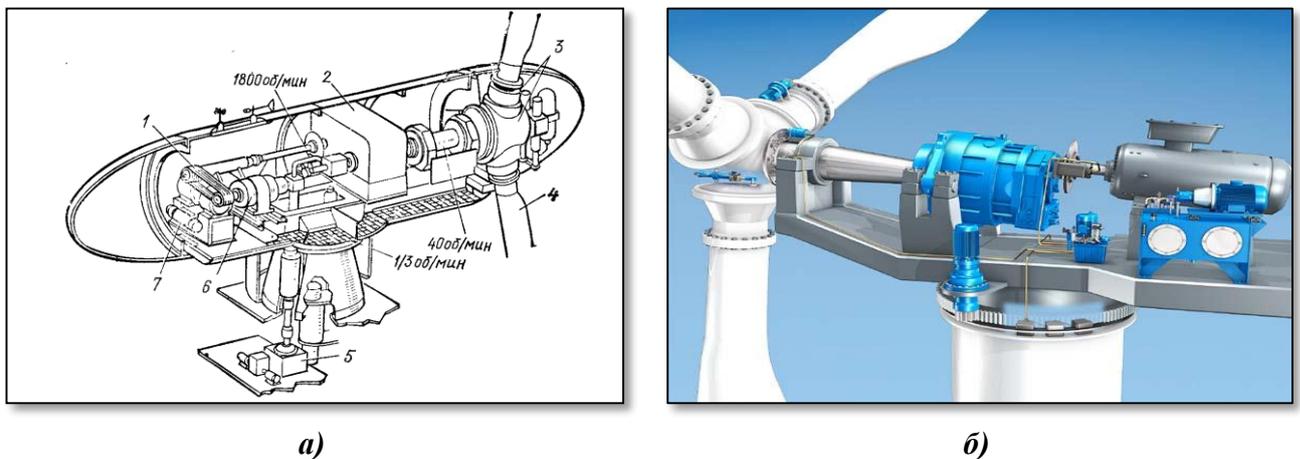


Рисунок 1.14 – Основные механизмы ВЭУ мощностью 100 кВт:

а) – ВЭУ с клиноременным редуктором; б) – новый тип ВЭУ с мотор-редуктором с встроенным планетарным редуктором; 1 – клиноременная передача; 2 – редуктор; 4 – лопасти; 5 – блок управления системой ориентации ветроколеса; 6 – электрогенератор; 7 – блок управления гидравлической системой поворота лопастей

Широкое распространение во всем мире получили трёхлопастные ВЭУ с горизонтальной осью вращения. Клиноременная передача 1 соединяет электрогенератор с валом редуктора для передачи коэффициента редукции, редуктор 2 у большинства ВЭУ служит для увеличения частоты вращения электрогенератора и имеет два вала, ведомый и ведущий. Ведомый вал соединяется с валом ветроколеса, а ведущий – с валом электрогенератора. Если частота вращения недостаточна для вращения ведущего вала, то в таких ВЭУ не устанавливают редуктор [17, 85].

Гидравлическая система поворота лопастей предназначена для стабилизации скорости вращения ВК. При резком увеличении скорости ветра некорректно стабилизирует угловую скорость из-за инерционных составляющих ВК, что приводит к изнашиванию подшипников. Кроме того, стабилизация угловой скорости ВК путём механического управления не всегда эффективна, что ставит задачу о дополнительной системе регулирования на зажимах ВГ для синхронизации и стандартизации выходных электрических параметров.

1.7 Выводы по главе 1

1. Учитывая динамику использования ВЭУ в мире, необходимо разработать и рассчитать ВЭУ с универсальными конструкционными частями для электроснабжения различных потребителей.

2. В рассматриваемых схемах генерирования электроэнергии ВЭУ в основном установлен механический редуктор для изменения коэффициента редукции, вследствие чего невозможно качественно изменить коэффициент редукции с учетом изменяющейся скорости вращения ветроколеса.

3. Для генерирования энергии ветра необходимо рассмотреть и смоделировать комплекс технических средств в целях рационального использования мощности потока ветра, так как градация скорости ветра является случайной величиной и диапазон регулирования скорости ВК является важным фактором для выбора основного оборудования и систем регулирования.

2 Анализ схем генерирования ВЭУ показал, что все схемы разработаны с учётом характеристики потребителей и нет никаких универсальных схем генерирования энергии, что позволило бы применить их во всех объектах электроснабжения, независимо от рода тока и напряжения. Кроме того, схемы генерирования ВЭУ являются сложными и с точки зрения экономических показателей не всегда рентабельны.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ВЕТРОУСТАНОВКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОРЕСУРСОВ В РЕГИОНАХ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

2.1 Ветровые ресурсы Республики Таджикистан

После распада СССР все единые энергетические системы центральной Азии стали самостоятельными, и в Республике Таджикистан резко обострилась проблема нехватки электрической энергии. В 90-е годы на полную мощность работали только несколько гидроэлектростанций. Проблема в сфере энергоресурсов в Республике Таджикистан заключается в том, что данная местность является высокогорной, 93 % территории занимают горы, и лишь 7% – равнины. Средняя высота над уровнем моря в регионах составляет от 300 м и выше, что усложняет добычу невозобновляемых источников энергии, таких как нефть, газ и уголь. Кроме того, по предварительным расчетам их запасы незначительны. Строительство больших теплоэлектростанций в горных условиях требует больших экономических затрат и занимает больше полезной площади. Учитывая тенденцию потребления электроэнергии и скорость ветра (Рисунок 2.1) в различных городах и районах республики, нужно уделять большое внимание строительству электростанций и выработке электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии, таких как ВЭС.

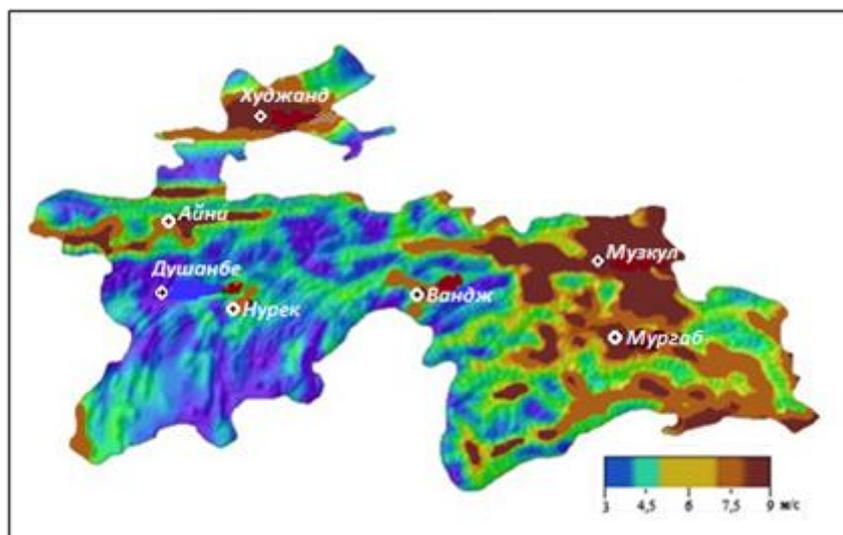


Рисунок 2.1 – Карта ветра Республики Таджикистан

С учётом уровня электроснабжения и способа генерирования энергии в зависимости от географических условий перечислим основные проблемы энергетики в регионах Республики Таджикистан:

1. Сезонный характер выработки электроэнергии на ГЭС.
2. В осеннее-зимний период самый низкий уровень выработки электроэнергии в ГЭС за счёт нетаяния ледников и незаполнения водохранилищ.
3. Высокий спрос на электроэнергию в зимний период из-за отсутствия централизованного теплоснабжения жилых и общественных зданий.
4. В летний период наблюдается избыток электроэнергии до 3-7 млрд кВт·час.
5. Заблокирован выход на рынок электроэнергии за счёт высокогорья и отсутствия высоковольтной ЛЭП, нет возможности импорта зимнего дефицита электроэнергии за счет избытка летнего.

Из рисунков 2.2 и 2.3 видно, что среднегодовая скорость ветра на высоте от 3 до 5 м в регионах Республики Таджикистан составляет от 5 до 8 м/с. При установке ВЭУ до 20 м и выше скорость ветра повышается от 12 до 15 м/с, в связи с чем целесообразно установить ВЭУ в целях генерирования и использования ветряных ресурсов для повышения уровня энергообеспечения различных приёмников энергии (жилые массивы, промпредприятия и др.).

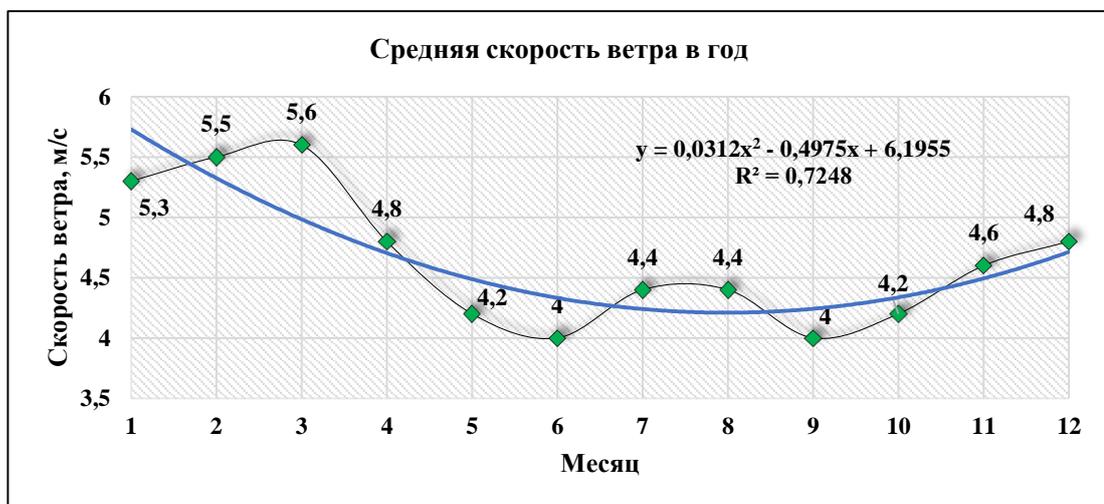


Рисунок 2.2 – Среднегодовая скорость ветра на территории г. Худжанда

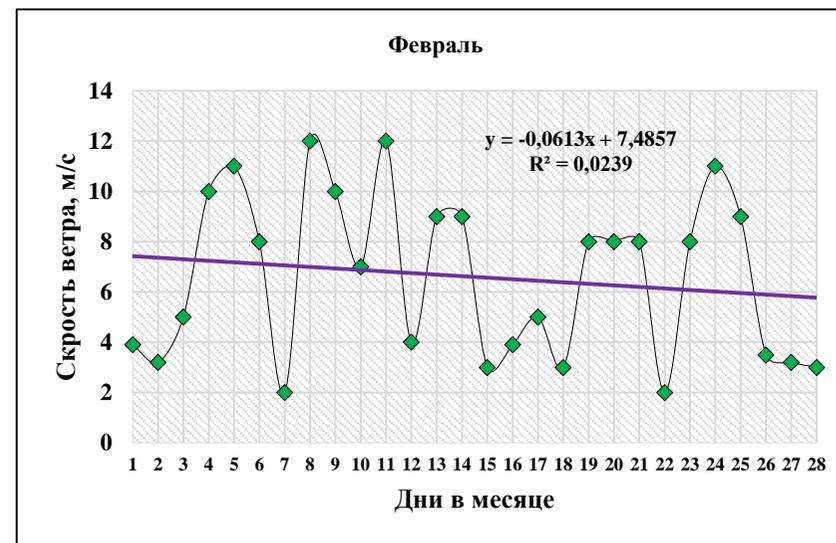
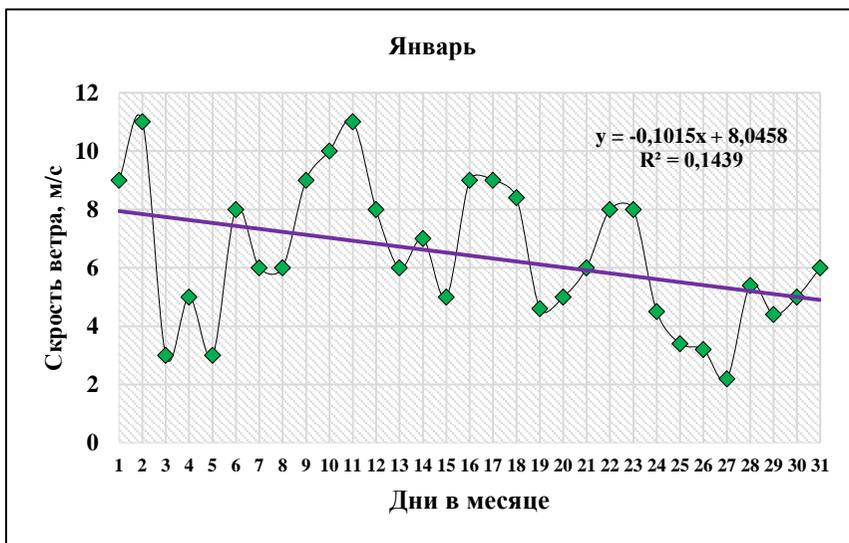
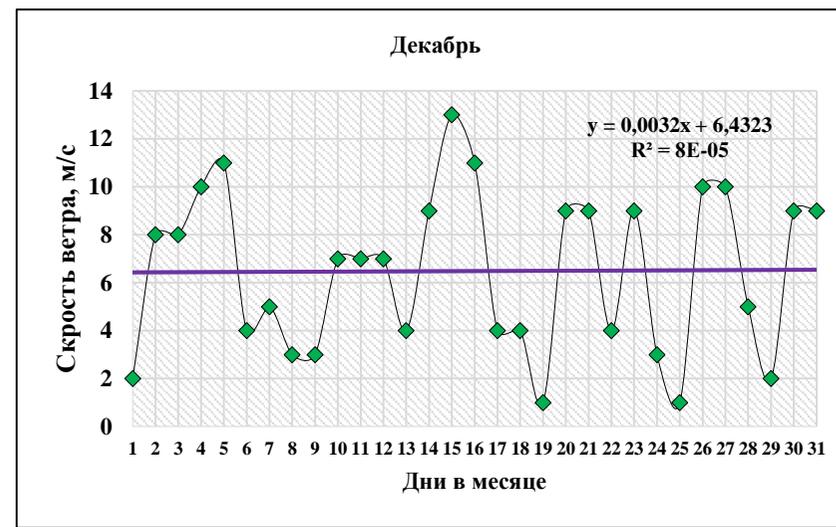
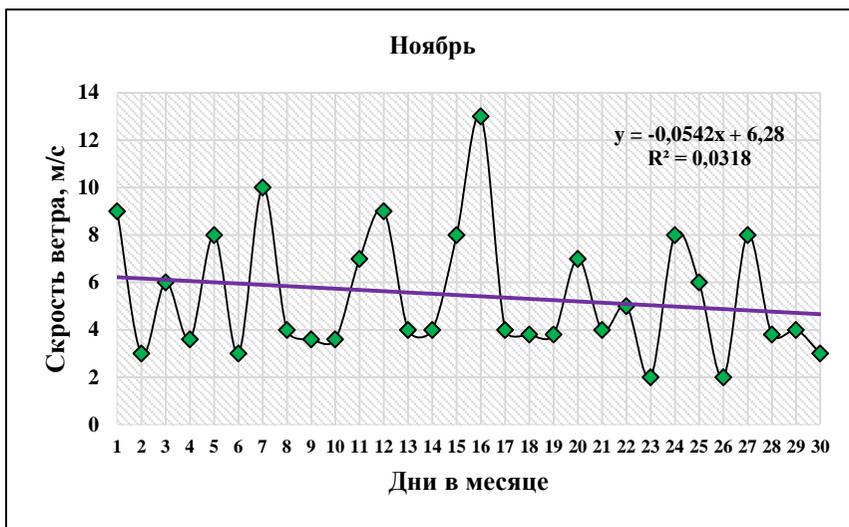


Рисунок 2.3 – Изменение скорости ветра в период с 1.11.2017 по 28.02.2017

Правительством Республики Таджикистан начиная с 2010 года в целях решения национальной стратегии об энергетической независимости в республике принят Закон Республики Таджикистан «Об использовании возобновляемых источников энергии» и Закон Республики Таджикистан «Об энергосбережении», что ставит задачу для расчёта и анализа ветровых ресурсов для строительства ВЭУ на территории Республики Таджикистан. Кроме того, для развития ВИЭ в республике объявлен мораторий на ввоз высокотехнологичного и современного оборудования, что положительно сказывается на технико-экономических показателях при строительстве ВЭУ.

2.2 Определение и расчет количества вырабатываемой электроэнергии с учетом среднегодовой скорости ветра

Для определения количества вырабатываемой электроэнергии ВЭУ необходимо учитывать ветряной поток на месте установки ВЭУ. Как правило вырабатываемая мощность на выходе ВЭУ связана с различными потерями, такими как потери на вращение ветроколеса и механические потери на валах. Поэтому мощность на выходе ВЭУ всегда будет меньше, чем мощность ветрового потока.

Различие между мощностью ветряного потока и мощностью на выходе ВЭУ определяется коэффициентом мощности [1, 13, 17, 18, 31, 60]:

$$k_p = 4a \cdot (1 - a)^2 \quad (2.1)$$

Коэффициент, определяющий разность скорости ветра:

$$a = \frac{V - V'}{V} = \frac{V - V''}{2V}, \quad (2.2)$$

где V – скорость ветра в пространстве ветроколеса, м/с;

V' – скорость ветра в плоскости лопастей ветроколеса, м/с;

V'' – скорость ветра за лопастями ветроколеса, м/с.

Определение кинетической энергии ветрового потока поступающая на поверхность лопасти [1, 13, 17, 18, 31, 60]:

$$E = \frac{mV^2}{2}, \quad (2.3)$$

где m – масса тела ветрового потока, кг;

V – переменная скорости ветра, м/с.

Создаваемый момент ветряным потоком в лопастях ВЭУ [1, 31, 60]:

$$M = \rho VF \quad (2.4)$$

Подставляя выражения (2.3) и (2.5), можно рассчитать мощность ветряного потока на лопастях ВЭУ:

$$P' = \frac{\rho V^3 F}{2} \quad (2.5)$$

Учитывая коэффициент мощности ВЭУ из-за разности скорости ветра и геометрических размеров лопастей, находим мощность ветряного потока:

$$P'' = k_p \frac{\rho V^3 F}{2} = k_p \frac{\rho \pi V^3 R^2}{2}, \quad (2.6)$$

где R – радиус лопастей, м;

F – площадь лопастей, м²;

V – скорость ветра в плоскости лопастей, м/с.

Коэффициент мощности ветроколеса k_p , характеризует преобразование механической энергии в электрическую мощность на выходе ВЭУ. Этот коэффициент определяет в процентном отношении, насколько ветер покрывает площадь ВК [1, 13, 17, 18, 31, 60].

Коэффициент использования энергии ветра – это отношение мощности ветроколеса к фактической мощности ветра с учётом площади ВК. Кроме этого, КПД ВЭУ зависит от аэродинамических характеристик, ВК конструкции и состава материала.

На сегодняшний день для повышения КПД ВЭУ и улучшения его аэродинамических характеристик при конструировании ВК применяют лёгкие и устойчивые композитные материалы [1, 31, 60].

$$\xi = \frac{M\omega}{\pi R \frac{\rho V}{2}} = \frac{M\omega R \frac{\rho V}{2} \omega}{\pi R \frac{\rho V}{2}} = \frac{M\omega R}{V} = MZ \quad (2.7)$$

КПД ВЭУ с механическим и электромеханическими устройствами определяются из выражения [20, 21]:

$$\eta = \frac{P''}{P'} = \frac{P_p^{\text{факт}}}{P_{\text{ВЭУ}}^{\text{расч}}} = \frac{C_p^{\text{факт}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot P_0}{C_p^{\text{расч}} \cdot P_0} = \frac{C_p^{\text{факт}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{эл}}}{C_p^{\text{расч}}}, \quad (2.8)$$

где $\eta_{\text{мех}}$, $\eta_{\text{эл}}$ – КПД механической передачи (механического редуктора или других видов редуктора) и генератора ВЭУ.

Нижеприведённый рисунок 2.4 показывает, что мощность на выходе ВК уменьшается в среднем до 41% и максимальный КПД ВК составляет 0,58. На сегодняшний день максимальный КПД ВК во всём мире составляет от 0,38 до 0,59 [1, 13, 17, 18, 31, 60].

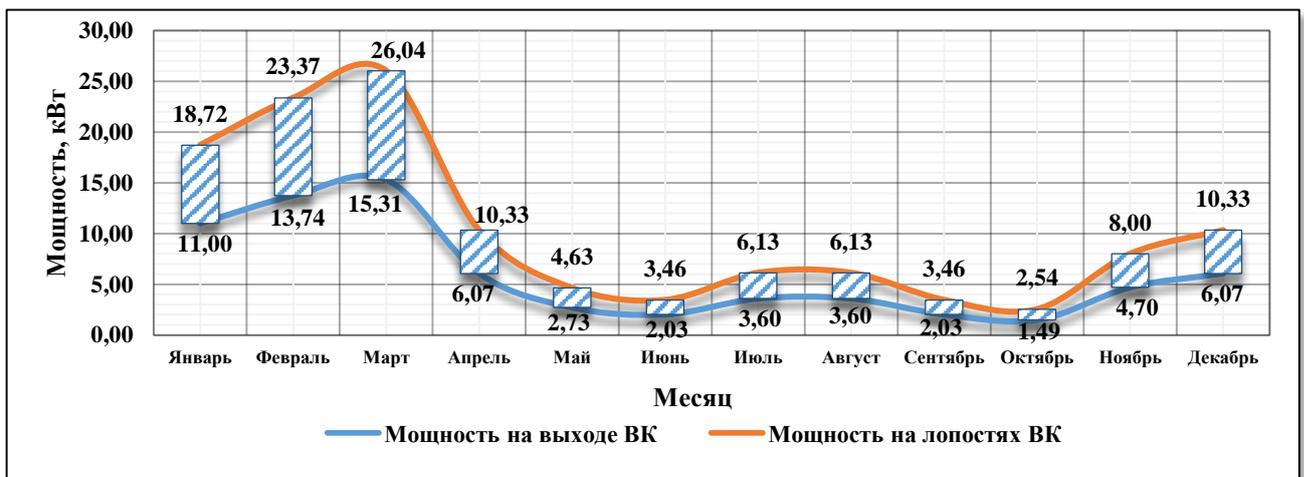


Рисунок 2.4 – График выработки электрической мощности ВЭУ

Зависимость величины скорости ветра от высоты установки ВЭУ определяется из выражения:

$$V = V_i \cdot \left(\frac{H}{H_i} \right)^n, \quad (2.9)$$

где V_i – скорость ветра на высоте H_i , м/с;

H – высота установки ВЭУ, м;

n – степень высотности (зависит от географического расположения ВЭУ от 0,1428 до 0,25) [1, 60].

Из рисунка 2.5 видно, что при установке ВЭУ на высоту 21 м от уровня земли в марте скорость ветра на поверхности лопастей увеличивается в 2,8 раза и достигает от 5,6 до 15,68 м/с.

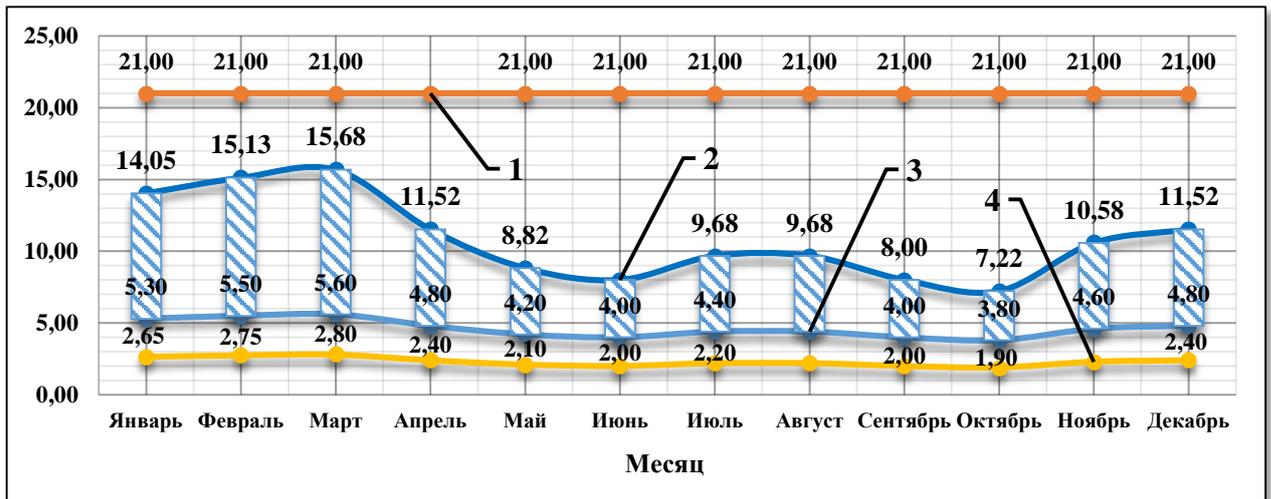


Рисунок 2.5 – График отношения мощности ветрового потока к мощности на выходе ветрогенератора: 1 – высота установки ВЭУ; 2 – средняя скорость ветра с учётом высоты установки ВЭУ; 3 – средняя скорость ветра над уровнем земли; 4 – показатель увеличения скорости ветра

Одна из важнейших характеристик ВЭУ – это её быстроходность [1, 60]. Быстроходность в зависимости от скорости ветра изменяется в течение времени (Рисунок 2.6) и определяется по формуле:

$$Z = \frac{\omega R}{V} \quad (2.10)$$

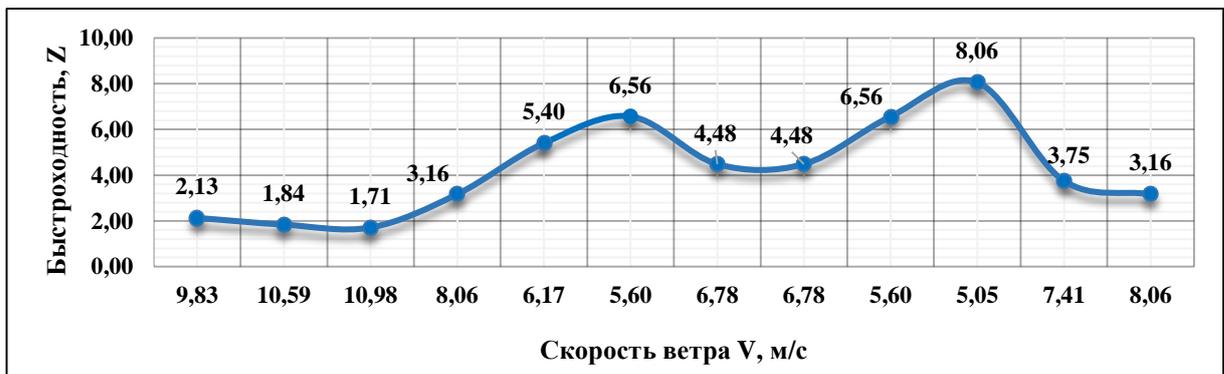


Рисунок 2.6 – Зависимость быстроходности от скорости ветра

Крутящий момент на валу ветроколеса рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{C_p F_p V^3 R}{2ZV} = C_M \frac{\pi \rho V^2 R^4}{2}, \quad (2.11)$$

где $C_M = \frac{C_p}{Z}$ – коэффициент крутящего момента.

На рисунке 2.7 приведены результаты расчёта крутящего момента ветроколеса в зависимости от скорости ветра.

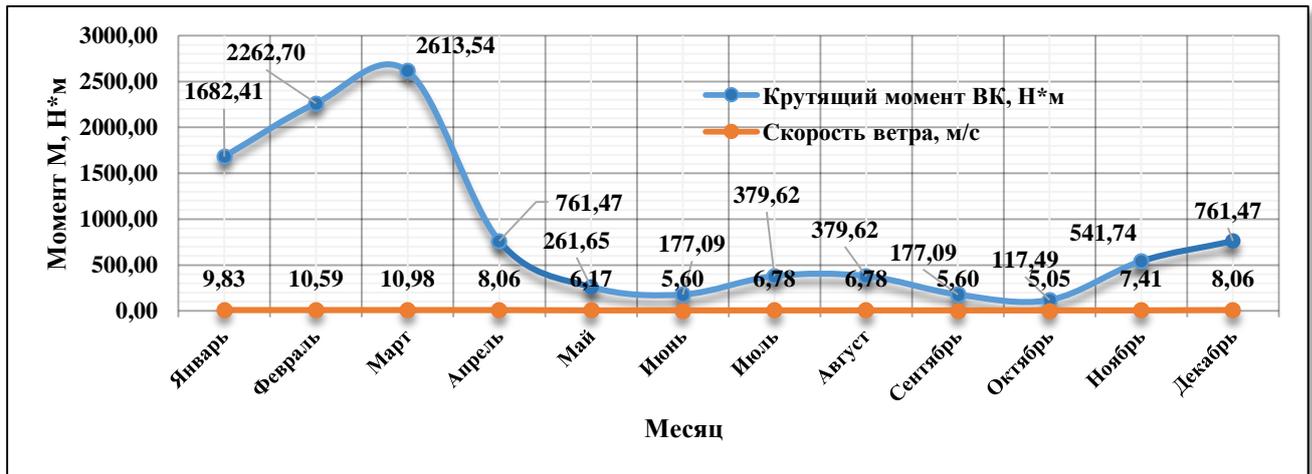


Рисунок 2.7 – Крутящий момент на валу ветроколеса в зависимости от скорости ветра

Количество вырабатываемой электроэнергии в ВЭУ определяется по формуле:

$$W = P_i \cdot t_i \cdot T = \frac{\rho \cdot V_i^3 \cdot T}{2}, \quad (2.12)$$

где t_i – время градации ветра, час;

T – число часов в году, час·год;

P_i – вырабатываемая мощность во время градации ветра, кВт.

Расчёт выработки электроэнергии ВЭУ показал, что максимальное количество вырабатываемой электроэнергии составляет в среднем 7094,84 кВт·час в марте, что существенно влияет на повышение энергоустойчивости в условиях нехватки электроэнергии в данном регионе. Кроме того, строительство ВЭУ значительно влияет на экономические показатели городов Республики

Таджикистан и снижает себестоимость выпускаемой продукции малых промышленных предприятий за счёт экономии на приобретении энергоресурсов и их транспортировке.

Из рисунка 2.8 видно, что при изменении скорости ветра V меняется и количество вырабатываемой электроэнергии W в ВЭУ в течение месяца или года. Для расчёта времени берём $T \approx 8760$ часов.

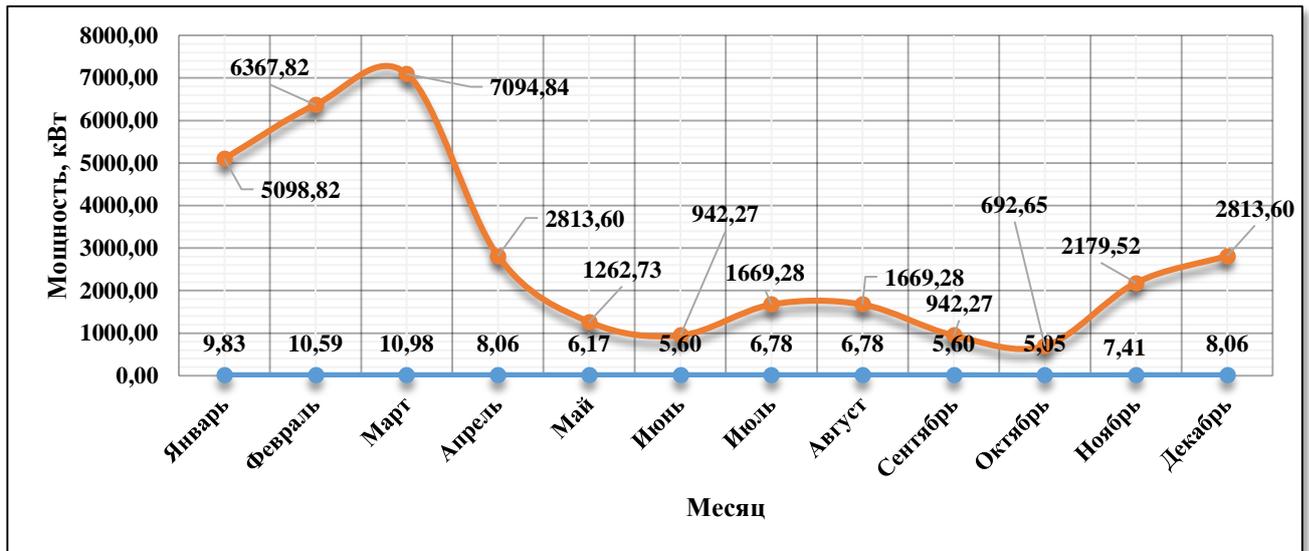


Рисунок 2.8 – График зависимости выработки электроэнергии от скорости ветра за год

Расчет объёма выработки электроэнергии в ВЭУ можно выполнить во всех географических зонах земного шара и определить среднегодовую мощность ВЭУ.

Изменяющаяся заданная частота вращения лопастей ВЭУ:

$$\omega_{\text{зад}} = f(V), \quad (2.13)$$

где f – заданная частота СГ, Гц;

V – минимальная скорость ветра, м/с.

Анализируя вышеприведённые формулы для определения количества вырабатываемой энергии ВЭУ с учётом всех перечисленных переменных величин, можно записать функцию, зависящую от времени:

$$N(t) = f(V, M, F, R, Z, C_p) \quad (2.14)$$

Учитывая характеристики ветроколеса с горизонтальной осью вращения, необходимо разрабатывать комплекс электротехнических систем для более рационального использования энергии потока ветра. Кроме того, такие расчёты можно проводить в любых географических условиях, где среднегодовая скорость ветра превышает 3-4 м/с.

2.3 Оптимальный выбор основного оборудования ветроустановки в зависимости от градации скорости ветра

Переменная градация скорости ветра создаёт проблему не только с вопросами выходных электрических параметров генератора ВЭУ, но и затрудняет выбор основного оборудования ВЭУ, таких как лопасть, редуктор и генератор. Для оптимального выбора основного оборудования ВЭУ необходимо измерить скорость ветра в течение нескольких лет, рассчитать среднюю, среднеквадратичную скорость градации ветра.

Наиболее важным вопросом при проектировании ВЭУ является точное определение энергетического потенциала скорости ветра в местах установки ВЭУ. При неправильном прогнозировании и расчёте предварительной мощности ветрового потока строительство ВЭУ с высокотехнологичными устройствами может стать нерентабельным. Правильный выбор основного оборудования ВЭУ и точное определение диапазона скорости ветра значительно влияет на технико-экономические показатели, срока окупаемости, энергетических характеристик и число часов выработки электроэнергии в год.

Так как ветер является переменной величиной, с учётом максимальной и минимальной скорости ветра необходимо рассчитать оптимальный диапазон изменения скорости ветра для безостановочного вращения ВГ.

Поскольку энергия ветра – переменная величина, то энергетическая характеристика ВЭУ состоит из нескольких переменных, изменяющихся в течение определённого промежутка времени:

$$W_{ВЭУ} = \int_0^T f[V, \Omega_{БК}, \Omega_{ред}, \eta_{ВЭУ}, \Omega_{ВГ}, M_{ВГ}, P_{ВГ}] dt, \quad (2.15)$$

где V – переменная скорость ветра, м/с;

$\Omega_{БК}$ – угловая скорость ветроколеса, рад/с;

$\Omega_{ред}$ – угловая скорость редуктора, рад/с;

$\eta_{ВЭУ}$ – КПД ВЭУ;

$\Omega_{ВГ}$ – угловая скорость вала ветрогенератора, рад/с;

$M_{БК}$ – момент ветроколеса, Н·м;

$P_{БК}$ – выходная выработанная мощность ветрогенератора, Вт.

Конструкция ВЭУ состоит из ВК, редуктора для повышения угловой скорости ВК, ветрогенератора (ВГ) для выработки электроэнергии. Необходимо все эти части ВЭУ выбрать оптимальными в зависимости от среднегодовой скорости ветра. Оптимальный выбор основного оборудования ВЭУ возможен при точном прогнозировании ветровых ресурсов, а ветровые ресурсы зависят от географических условий и высоты установки ВЭУ.

Таким образом, в интегральной формуле энергетической характеристики ВЭУ (2.15) необходимо добавить следующие переменные значения:

$$W_{ВЭУ}^{cp} = \int_0^T f[V_{cp}, \Omega_{БК}^{cp}, \Omega_{ред}^{cp}, \eta_{ВЭУ}^{cp}, \Omega_{ВГ}^{cp}, M_{ВГ}^{cp}, P_{ВГ}^{cp}] dt \quad (2.16)$$

Тогда с учётом среднеквадратичной скорости ветра:

$$W_{ВЭУ}^{cp.кв} = \int_0^T f[V_{cp.кв}, \Omega_{БК}^{cp.кв}, \Omega_{ред}^{cp.кв}, \eta_{ВЭУ}^{cp.кв}, \Omega_{ВГ}^{cp.кв}, M_{ВГ}^{cp.кв}, P_{ВГ}^{cp.кв}] dt \quad (2.17)$$

Для целесообразного строительства ВЭУ и выбора основного оборудования необходимо учитывать следующие условия:

$$\Omega_{БК} = V_p(t) \Rightarrow \max, \quad (2.18)$$

$$P_{ВГ} = P_p(t) \Rightarrow \max, \quad (2.19)$$

$$T_{нпростой} = T_{наруза}(t) \Rightarrow \max, \quad (2.20)$$

где $\Omega_{БК}$, – угловая скорость ветроколеса, рад/с;

V_p , – расчётная скорость ветра, м/с;

$P_{ВГ}$ – мощность ветрогенератора, кВт;

P_p – расчётная мощность ветрогенератора, кВт;

$T_{\text{простой}}$ – время простоя, час.

Вышеприведённые условия минимизируют время простоя ВЭУ, схема которой приведена на рисунке 2.9, из-за неточного определения мощности основного оборудования и увеличивают количество выработанной электроэнергии на ВЭУ. Кроме того, для снижения времени паузы ВЭУ из-за отсутствия скорости ветра необходимо учитывать силы воздействия ветра на ВК.

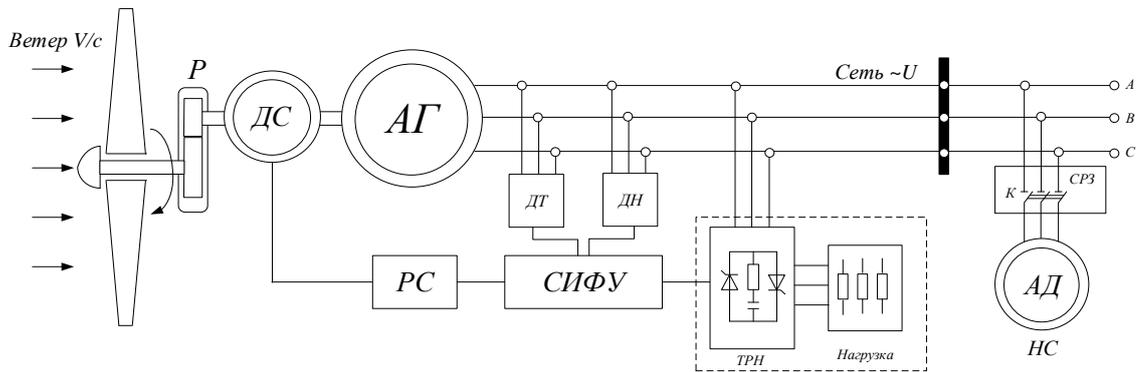


Рисунок 2.9 – Схема генерирования электроэнергии ВЭУ: ВК – ветроколесо; Р – редуктор; ДС – датчик скорости (тахогенератор); АГ – асинхронный генератор; РС – регулятор скорости; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; СИФУ – система импульсно-фазного управления; ТРН – тиристорный регулятор напряжения; Н – нагрузка (буферная нагрузка); К – автоматический выключатель; АД – асинхронный двигатель; НС – насосная станция

Нижеизложенная формула (2.21) показывает, что для генерирования электроэнергии в ВЭУ необходимо рассчитать масса-габаритные размеры крутящих валов для того, чтобы сила ветра смогла вращать лопасти ВК:

$$F_{\text{ветер}} = m \cdot \frac{dV}{dt} = -F_{\text{ВК}} \leq F_{\text{ВР}} \quad (2.21)$$

Если скорость ветра является не нормальной и неопределённой величиной, то дисперсия случайных величин скорости ветра – это её отклонение от математических ожиданий.

Дисперсия случайных величин скорости ветра определяется по формуле:

$$\sigma_x^2 = s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (V - \bar{V}_{cp})^2}{n}, \quad (2.22)$$

где V – анализируемые показатели;

\bar{V} – среднее значение скорости ветра, м/с;

n – количество значений в анализируемой совокупности данных.

Среднеквадратичное отклонение скорости ветра – это корень из дисперсии, который называется стандартным отклонением и рассчитывается по формуле:

$$s_0 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}}{n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V - \bar{V}_{cp})^2}}{n} \quad (2.23)$$

Учитывая, что ветер – случайная величина, для более точного расчёта необходимо проанализировать скорость ветра в течение не менее 30 дней. Тогда для расчёта среднеквадратичного отклонения скорости ветра выбираем один месяц или же 30 значений по последовательности дней.

Среднеквадратичное отклонение по последовательной выборке до 30 значений скорости ветра определим по формуле:

$$s_0 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}}{n-1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V - \bar{V}_{cp})^2}}{n-1} \quad (2.24)$$

Средняя скорость ветра [2]:

$$V_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (2.25)$$

Среднеквадратичную скорость ветра определим по формуле:

$$V_{cp.кв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_{ном}^2}{n}}, \quad (2.26)$$

где V – скорость ветра, м/с;

n – число градации скорости ветра.

При смешанном и хаотичном графике распределения случайных величин определим математическое ожидание скорости ветра с учётом дисперсии и среднеквадратичное отклонение скорости ветра:

$$M[\sigma_x^2] = \frac{n-1}{n} \cdot \sigma_x^2 \quad (2.27)$$

Доверительный интервал для дисперсии и среднеквадратичного отклонения скорости ветра определим по формуле:

$$X_k^2 = X_{n-1}^2 = \frac{(n-1)s_x^2}{\sigma_x^2} = V_k^2 = V_{n-1}^2 = \frac{(n-1)s_x^2}{\sigma_x^2}, \quad (2.28)$$

где $k=(n-1)$ – степень свободы нормального распределения скорости ветра, на единицу меньше числа измеряемой величины.

Необходимо отметить, что для проверки правильности выбора электрооборудования, исходя из условия статистической обработки (Рисунок 2.10), необходимо учитывать наибольший период градации скорости ветра в течение длительного периода времени. Для полного и надёжного прогнозирования скорости ветра необходимо измерить скорость ветра в длительный период, укрупняя значение скорости ветра по месяцам или по дням, и анализировать данные нескольких источников, которые занимаются измерением скорости ветра, таких как государственные метеослужбы городов и регионов, интернет источники Google, GisMeteo, Yandex, Yahoo и др., в целях уменьшения вероятности ошибок во время статистических методов анализа случайных величин скорости ветра [39, 40].

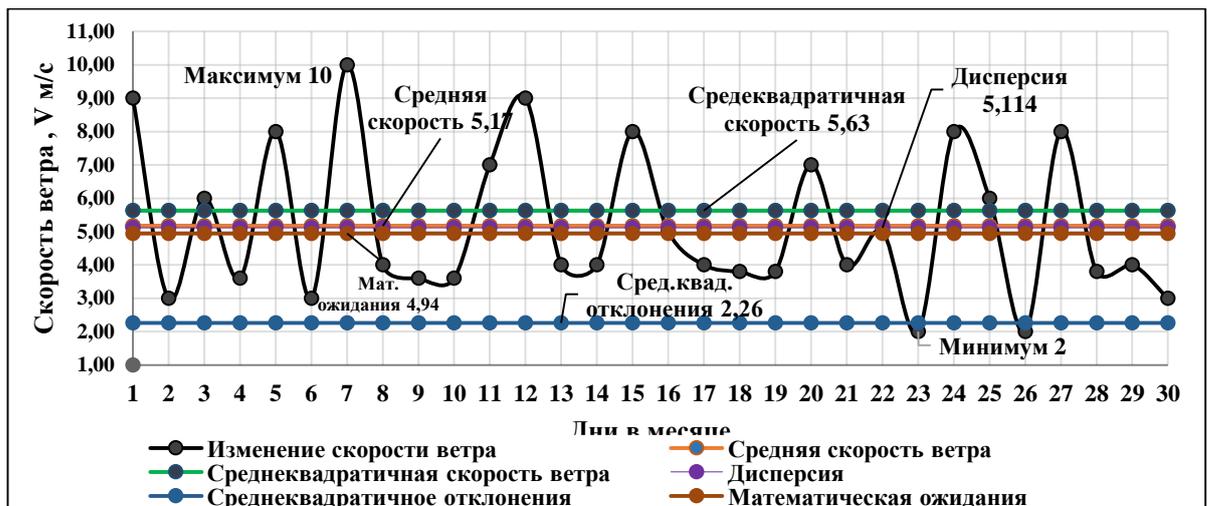


Рисунок 2.10 – Статистический метод определения скорости ветра¹

¹ Расчёт выполнен в программе Microsoft Excel. Градация скорости ветра в Согдийской области, г. Худжанд, Республика Таджикистан.

При построении гистограммы случайного распределения скорости ветра необходимо определить интервал наблюдения скорости ветра. Масштаб интервала наблюдения выше 30 значений определим по формуле

$$\Delta X_i = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{r} = \Delta V_i = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{n}, \quad (2.29)$$

где r – ширина интервала наблюдения;

n – число наблюдений, в нашем случае число дней градации скорости ветра в месяце.

С учётом вышеприведённых формул смоделируем гистограмму случайных величин скорости ветра в период одного месяца в программе Matlab Simulink.

По показаниям гистограммы (Рисунки 2.11-2.14) можно определить математическое ожидание скорости ветра и доверительный интервал. Таким образом, все основного оборудования ВЭУ выбираем исходя из доверительного интервала скорости ветра.

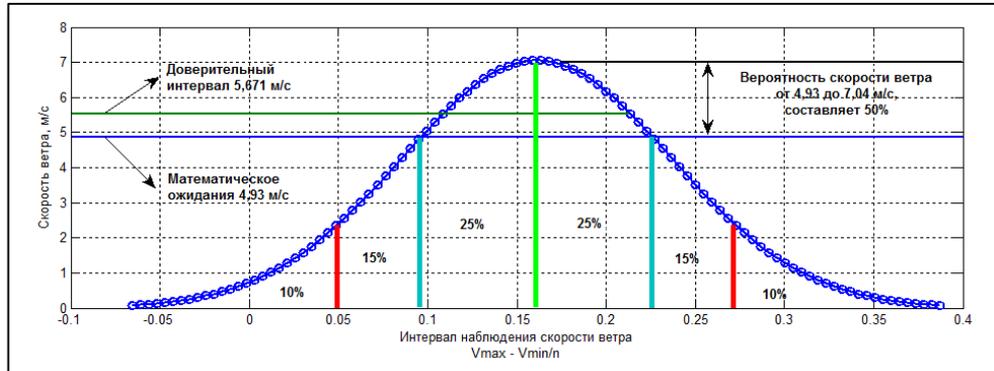


Рисунок 2.11 – Гистограмма статистического случайного распределения скорости ветра в ноябре

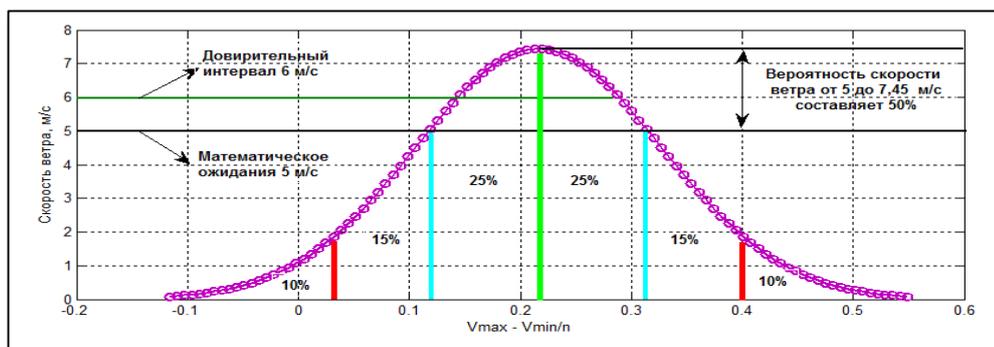


Рисунок 2.12 – Гистограмма статистического случайного распределения скорости ветра в декабре

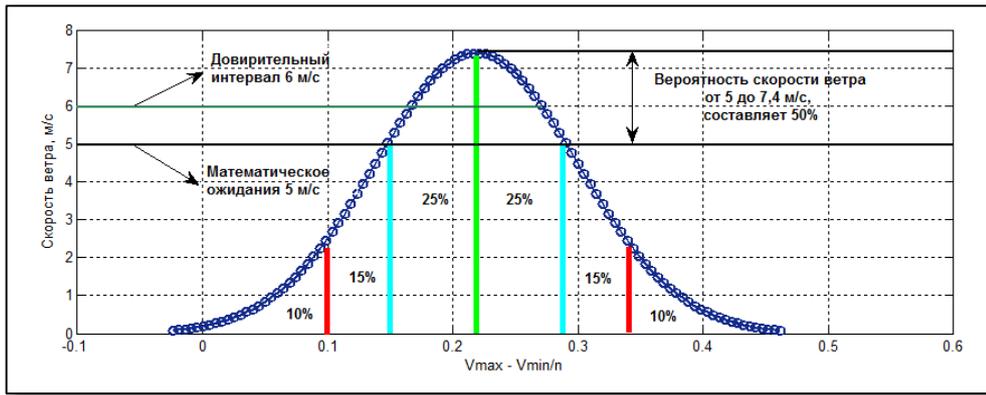


Рисунок 2.13 – Гистограмма статистического случайного распределения скорости ветра в январе

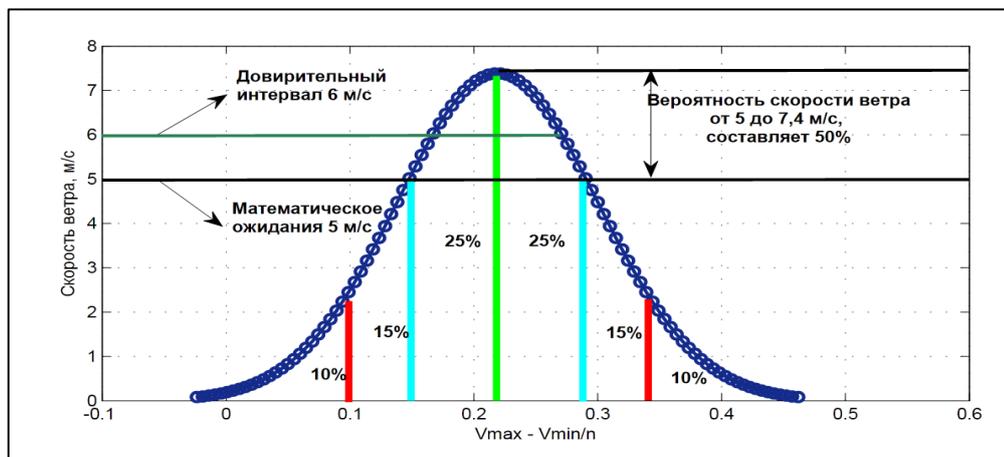


Рисунок 2.14 – Гистограмма статистического случайного распределения скорости ветра в феврале²

Тогда с учётом статистических методов определения скорости ветра условия (2.18), (2.19), (2.20) принимают следующий вид:

$$\Omega_{BK} = V_{\text{дов}}(t) \Rightarrow \max, \quad (2.30)$$

$$P_{BГ} = P_{\text{дов}}(t) \Rightarrow \max, \quad (2.31)$$

$$T_{\text{простой}} = T_{\text{дов}}(t) \Rightarrow \max. \quad (2.32)$$

где $V_{\text{дов}}$ – доверительная скорость ветра, м/с;

$P_{\text{дов}}$ – доверительная мощность скорости ветра, кВт;

$T_{\text{дов}}$ – доверительное время простоя ВЭУ, час.

² Гистограмма статистического случайного распределения скорости ветра смоделирована в программе Matlab 9. Значения градации скорости ветра в Согдийской области, г. Худжанд, Республика Таджикистан.

Вышеприведённые формулы (2.30), (2.31), (2.32) отчётливо показывают, что при определении основных параметров ВЭУ угловая скорость, мощность стремятся к максимуму, а время простоя ВЭУ из-за отсутствия и ослабления скорости ветра стремится к минимуму.

По графику изменения скорости ветра в течение месяца известно, что по доверительному значению скорости ветра целесообразно выбрать основного электрооборудования ВЭУ. Следовательно, доверительный интервал скорости ветра является фактическим значением, и при этом заполняется относительно большой объём площади изменяющегося графика случайных величин. Это даст возможность максимально использовать энергию ветра, что значительно скажется на капиталовложениях при строительстве ВЭУ. По статистическим расчётам и доверительным мощностям ветра выбираем основное оборудование ВЭУ для рационального использования мощности ветра и уменьшения времени простоя ВЭУ.

Рассматривая скорость ветра как случайную величину можно строить график изменения скорости ветра в течение времени. Такая система наблюдения широко используется в метеорологических службах.

Как видно из гистограммы случайных величин (Рисунки 2.11, 2.12, 2.13, 2.14) доверительный интервал скорости ветра в течение месяца составляет от 6 до 7 м/с, что целесообразно для установки ВЭУ. Результаты статистических расчётов скорости ветра приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты статистического метода определения скорости ветра в период одного месяца

Величина	Значение	Величина	Значение
1. Сумма скорости ветра, м/с	155,20	9. Средняя скорость ветра, м/с	5,17
2. Медиана, м	4,00	10. Математическое ожидание, м/с	4,943
3. Мода, м	4,00	11. Среднеквадратичное отклонение, м/с	2,261
4. Минимум, м/с	2,00	12. Дисперсия	5,114
5. Максимум, м/с	10,00	13. Среднеквадратичная скорость ветра, м/с	5,630
6. Размах, м/с	8,00	14. Правильность расчёта, %	94,886
7. Количество, день	30,00	15. Доверительный интервал, м/с	5,671

С учётом уравнений (2.31-2.33) момент вращения ветроколеса, вызванный переменной скоростью ветра, принимает вид:

$$M_{BK} = \frac{P_{\text{дог}}}{\omega_{\text{дог}}} = \frac{C_p F \rho V_{\text{дог}}^3}{2ZV_{\text{дог}}} \quad (2.33)$$

Тогда мощность ВЭУ на выходе ВГ с учётом коэффициента торможения и доверительного интервала скорости ветра

$$P = C_p \frac{\rho \cdot V_{\text{дог}}^3 \cdot F}{2} \quad (2.34)$$

По показаниям градации скорости ветра (Рисунок 2.15) можно определить среднюю и среднеквадратичную скорость ветра в течении всего месяца. Для дальнейшего расчёта показателей мощности ВЭУ за основу берётся среднеквадратичный показатель всех параметров ВЭУ, таких как средняя активная мощность на выходе генератора, момент вращения, угловая скорость и т.д.

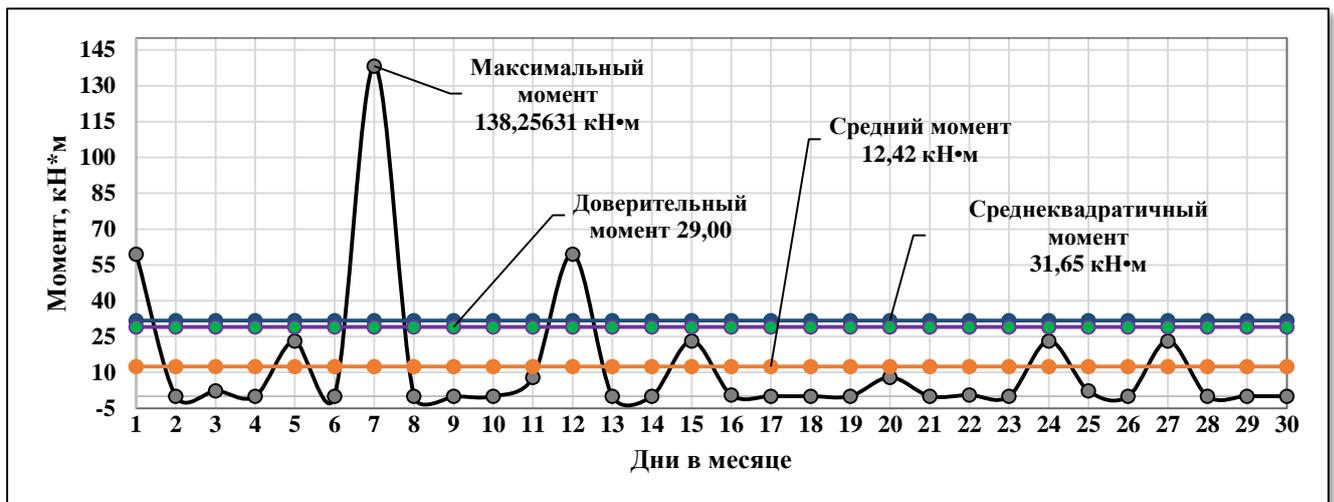
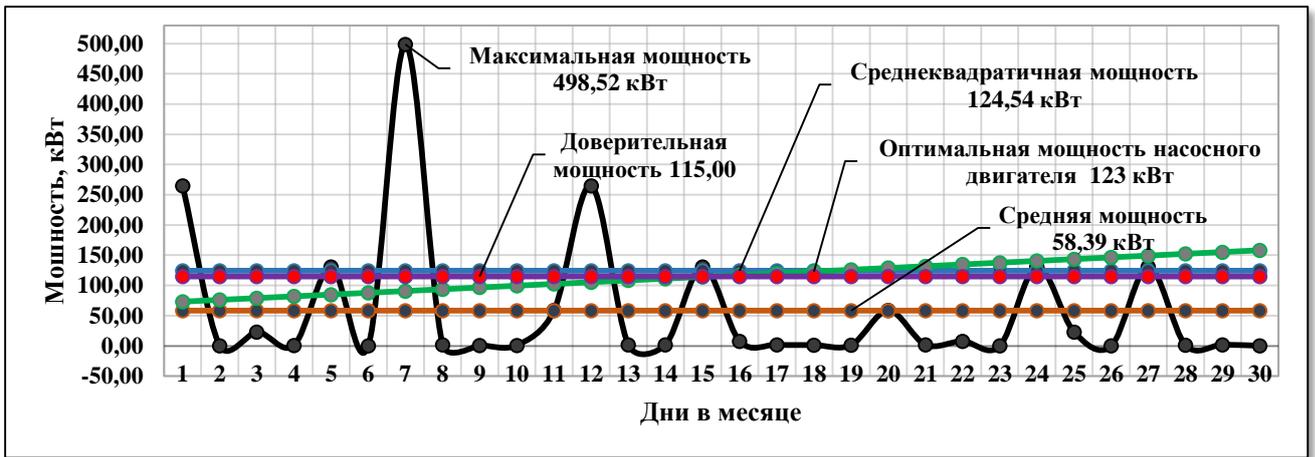


Рисунок 2.15 – Момент вращения ВЭУ³

Среднеквадратичный показатель в отличие от среднего близок к максимальной мощности и при этом в графиках, которые зависят от случайных величин, заполняет большую площадь для выявления оптимального значения с учётом максимального и минимального показателей мощности ВЭУ [40]. На рисунке 2.16 приведен график выбора мощности ВЭУ по статистическому расчету

³ Параметры ВЭУ с горизонтальной осью вращения, Н_{ВЭУ} – высота установки 23 м, R – радиус ВК 3,2 м.

Рисунок 2.16 – Выработка мощности ВЭУ⁴

Учитывая все перечисленные случайные величины ВЭУ, выбираем мощность двигателя для насосной станции, которая питается от ВЭУ.

Мощность двигателя насосной станции определяется из следующего выражения:

$$P_p^{дог} = \frac{k_3 \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_{п} \cdot \eta_{н}}, \quad (2.35)$$

где $k_3 = 1,1-1,4$ – коэффициент запаса;

γ – плотность перекачиваемой жидкости, Н/м³;

Q – производительность насоса, м³/с;

H – напор насоса, м;

$\eta_{п}$ – КПД передачи (при непосредственном соединении насоса с двигателем $\eta_{п} = 1$);

$\eta_{н}$ – КПД насоса (принимается для центробежных насосов с давлением свыше 39 000 Па с КПД, равным 0,6 – 0,75).

Таким образом, для определения основных параметров ВЭУ и оптимального выбора основных оборудования ВЭУ (Таблица 2.2) необходимо выявить среднегодовую и среднеквадратичную скорость ветра. Как показывают исследования, среднеквадратичная скорость ветра и доверительный интервал

⁴ Параметры ВЭУ с горизонтальной осью вращения, $H_{вэу}$ – высота установки 23 м, R – радиус ВК 3,2 м.

скорости ветра дадут возможность более точно определить ожидаемую энергию ветра.

Таблица 2.2 – Параметры оптимального выбора основного оборудования ВЭУ в зависимости от средней и среднеквадратичной скорости ветра

ВЭУ с горизонтальной осью вращения, высота ВЭУ 23 м, радиус ветроколеса 3,2 м, быстроходность 3-4				
Доверительный момент, кН•м	Средняя скорость ветра, м/с	Доверительная мощность, кВт	Номинальная мощность генератора ВЭУ, кВт	Номинальная мощность двигателя насосной станции, кВт
29	5,671	115	100	90

2.4 Моделирование работы ветроустановки с механическим планетарным редуктором

Для передачи движения от двигателя к исполнительному механизму применяются различные виды редукторов, благодаря которым увеличивается крутящий момент и уменьшается частота вращения роторов. Современные механические редукторы обладают трансмиссионными характеристиками и получили широкое распространение в машиностроении и ветроэнергетике. Зубчатые передачи в редукторах обладают высоким КПД и могут передавать большие нагрузки от ведущего вала к ведомым [37, 58].

В ветроэнергетике планетарные редукторы широко используются для повышения угловой скорости вала генератора при малом значении скорости ветра на лопастях ВК. В маломощной ВЭУ в основном ВК непосредственно соединено с генератором и не используются редукторы для повышения угловой скорости.

Планетарной зубчатой передачей называют механизм, предназначенный для передачи и преобразования вращательного движения от ведущего вала к ведомому, содержащий зубчатые колеса с перемещающейся осью вращения, предназначенной для создания трансмиссии [37, 58].

Основными звеньями планетарной зубчатой передачи являются: центральные зубчатые колеса, оси которых неподвижны, сателлиты – зубчатые

колеса с перемещаемыми осями вращения и водило – звено, в котором установлены оси сателлитов. Как правило, планетарные механизмы изготавливаются соосными. Пример простейшей планетарной зубчатой передачи, которая широко используется в ветроэнергетике, приведен на рисунке 2.17.

Передаточное отношение такой простейшей передачи $i \leq 9$, коэффициент полезного действия $h=0,96...0,98$. Ее особенность заключается в применении нескольких сателлитов, расположенных с равными угловыми шагами. Кинематическая многосателлитная передача имеет несколько зон зацепления (в зависимости от числа сателлитов) с центральным колесом.

Кинематическая схема наиболее распространённой в ветроэнергетике планетарной передачи приведена на рисунке 2.17. Центральное колесо *1* называют солнечным, *2* – сателлитом (от трёх до четырёх), *3* – зубчатая колесо.

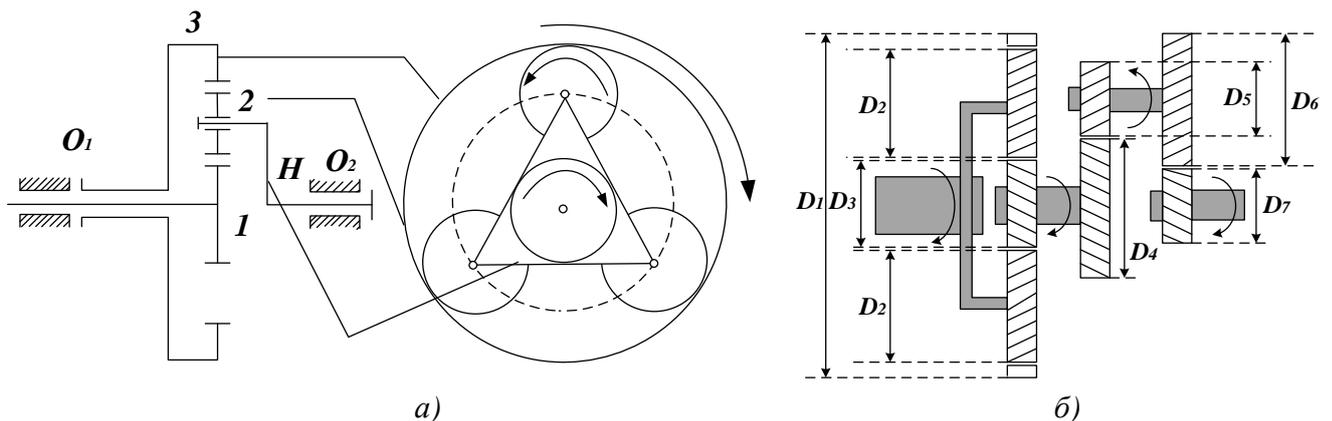


Рисунок 2.17 – Кинематическая схема механического планетарного редуктора:
а) – планетарная зубчатая передача (условное изображение); *б*) – разрез планетарного редуктора с диаметрами шестерни; 1-3 – зубчатые колесо; 2 – сателлит; Н – водило

Определяем общее передаточное отношение одноступенчатого редуктора:

$$U_{ред}^{1-c} = \frac{n_{вх}^1}{n_{вых}^2} = \frac{\omega_{вх}}{\omega_{вых}}, \quad (2.36)$$

где $n_{вх}$, $\omega_{вх}$ – частота вращения и угловая скорость входного вала одноступенчатого редуктора, об/мин, рад/с;

$n_{вых}$, $\omega_{вых}$ – частота вращения и угловая скорость выходного вала одноступенчатого редуктора, об/мин, рад/с.

Общее передаточное отношение для двухступенчатого планетарного редуктора

$$U_{\text{общ.пл.ред}}^{2-c} = U_1 \cdot U_2, \quad (2.37)$$

где U_1, U_2 – передаточное число первой и второй ступеней планетарного редуктора.

Учитывая конструкцию планетарного редуктора и количество его шестерни на втором звене, для определения передаточного отношения принимаем количество 4 шестерни.

Тогда:

$$U_{\text{ред}} = U_2 = 4, \quad (2.38)$$

$$U_1 = \frac{U_{\text{ред}}^1}{U_2} = \frac{n_{\text{ред}}^1}{n_2} = \frac{\omega_{\text{ред}}^1}{\omega_2}, \quad (2.39)$$

$$U_1 = \frac{n_I}{n_{II}} = \frac{\omega_I}{\omega_{II}}, \quad (2.40)$$

$$U_2 = \frac{n_{II}}{n_{III}} = \frac{\omega_{II}}{\omega_{III}}, \quad (2.41)$$

где U_1 – передаточное число первой ступени;

U_2 – передаточное число второй ступени;

$n_I, n_{II}, n_{III}, \omega_I, \omega_{II}, \omega_{III}$ – частота вращения и угловая скорость звеньев МПР, об/мин, рад/с.

Частота вращения и угловая скорость звеньев МПР:

$$n_I = n_{\text{вх}} = \omega_{\text{вх}}, \quad (2.42)$$

$$n_{II} = \frac{n_{\text{вх}}}{U_1}, \quad (2.43)$$

$$n_{III} = \frac{n_{II}}{U_2} = n_{\text{вых}}, \quad (2.44)$$

Где $n_{\text{вх}}, n_{\text{вых}}, \omega_{\text{вх}}, \omega_{\text{вых}}$ – входная и выходная частота вращения и угловая скорость валов МПР, об/мин, рад/с.

КПД редуктора для одноступенчатого редуктора составляет до $\eta_1 = 0,96$, а для планетарного редуктора КПД определяем из выражения

$$\eta_2 = 1 - \frac{U_{нл} - 1}{U_{нл}} \cdot (1 - \eta_1^2) \quad (2.45)$$

В зависимости от количества сателлитов КПД планетарного редуктора составляет от 0,93 до 0,96, но при установке дополнительных сателлитов и резких переключений шестерни КПД планетарного редуктора ухудшается [42, 48].

Исходя из этого условия, определяем мощности на выходе вала редуктора:

$$P_1 = \frac{P_{II}}{\eta_1} \quad (2.46)$$

Крутящий моменты на валу МПР:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_i}{n_i} \quad (2.47)$$

Конструкция ВЭУ с МПР (Рисунок 2.18) состоит из ВК, механического планетарного редуктора для повышения угловой скорости ВК, механического переключающего устройства для стабилизации угловой скорости выходного вала и от механических датчиков скорости [37].

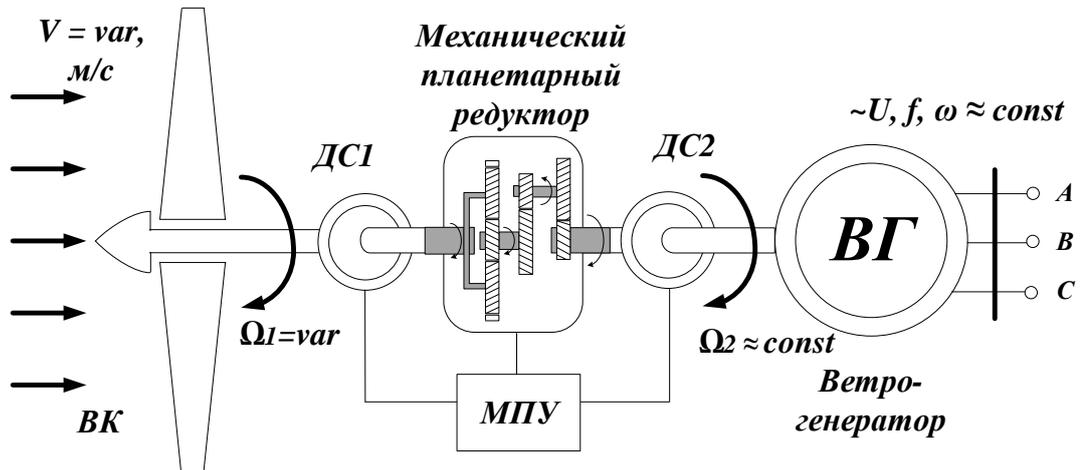


Рисунок 2.18 – ВЭУ с механическим планетарным редуктором

Виброскорость механических передач – это первая производная от виброперемещения вращающегося механизма её частоты и скорости (Рисунок 2.19).

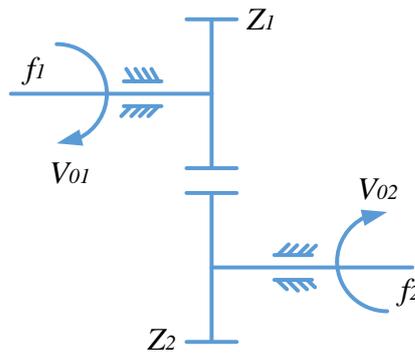


Рисунок 2.19 – Кинематическая схема зубчатой передачи механического планетарного редуктора ветроустановки

Амплитуда виброскорости с учётом частоты вибрации определяем по формуле:

$$V(t) = \frac{dS(t)}{dt} = S_0 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f(t)) = V_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f(t)), \quad (2.48)$$

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

S_0 – амплитуда виброперемещение.

Выше приведенные вибрации называется однокомпонентной т.е. в этой системе присутствует только одна вращающий элемент. Если вибрация является двухкомпонентной т.е. суммой двух вращающих элементов, то она может быть задана следующим выражением:

$$V(t) = V_{01} \cdot \cos(2\pi \cdot f_1(t)) + V_{02} \cdot \cos(2\pi \cdot f_2(t)), \quad (2.49)$$

где f_1 и f_2 – соответственно частота этих вибраций, Гц.

На рисунке 2.20 показана конструкция МПР ВЭУ фирмы Suzlon Energy Ltd⁵, диаметр которого составляет 64 м, номинальная мощность 4-6 полюсного генератора составляет 1000 кВт [110, 111].

⁵ Индийская машиностроительная компания, крупнейший в Азии (и один из крупнейших в мире) производитель ветрогенераторов. В 2008 году компания занимала 10,5 % мирового рынка ветрогенераторов, находясь на пятом месте по этому показателю.

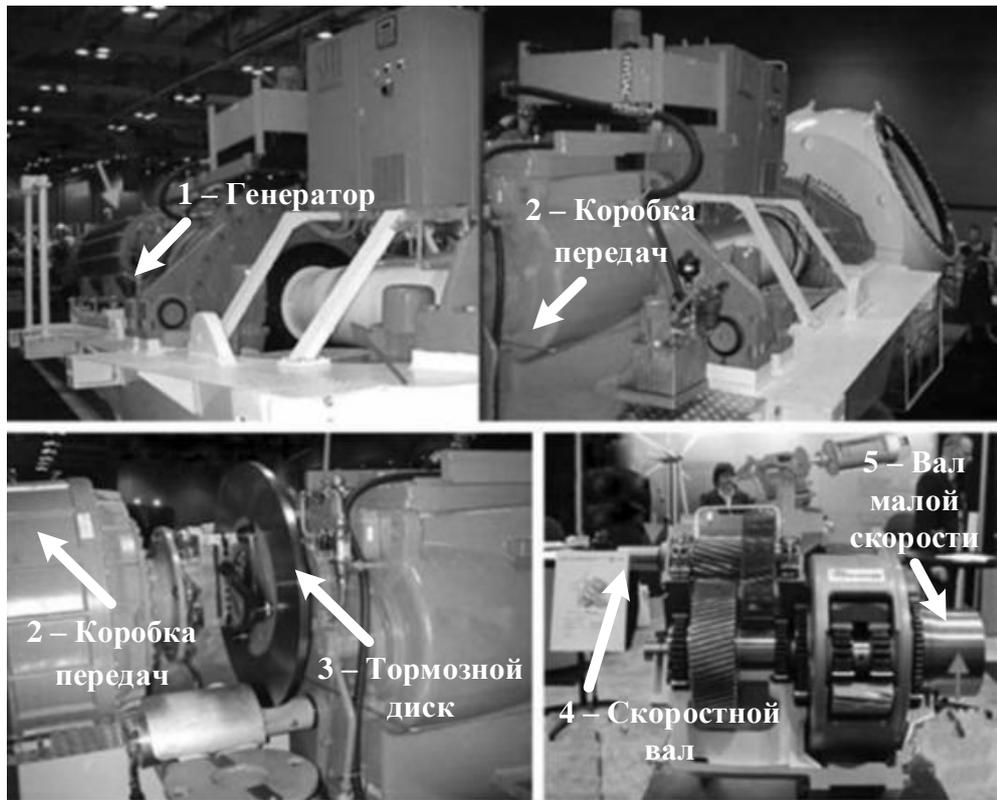


Рисунок 2.20 – Общий вид конструкции автоматической коробки передач механического планетарного редуктора ВЭУ с автоматической механической системой стабилизации выходного вала

На скоростном валу 5 жёстко связан генератор 1, и на вал малой мощности 5 соединено ВК. Коробка передач 2 заполнена маслом для уменьшения силы трения и вибрации вращающихся шестерён. Кроме того, масло в коробке передач выполняет функцию ослабления динамических переключений между шестернями для уменьшения сопротивления трения между зубцами и частоты сцепления зубцов. Тормозной диск 3 состоит из твёрдого холоднокатаного железного диска и выполняет функцию защиты ВГ от чрезмерного увеличения скорости вращения ВК [37].

Механический планетарный редуктор в ВЭУ соединен с валом ВК и ВГ. Применение МПР в качестве мультипликатора и стабилизирующего устройства нецелесообразно, а именно:

- утяжеляет общий вес ВЭУ;
- создаёт шум при увеличении скорости ветра;

- из-за сопротивления и силы трения между зубцами быстро изнашиваются шестерни и подшипники;
- уменьшается КПД из-за трения между зубцами при резких переключениях зубцов шестерни;
- дополнительные расходы на смазочные материалы и замену шестерён и подшипников.

Для более точного анализа ВЭУ с ПР моделируем математическую модель МПР в среде программы Matlab, Simulink (Рисунок 2.21). Приведённые выше математическая и имитационная модели состоят из пиктограмм, которые составлены из математических формул с учётом инерционных моментов, и работают в динамическом режиме.

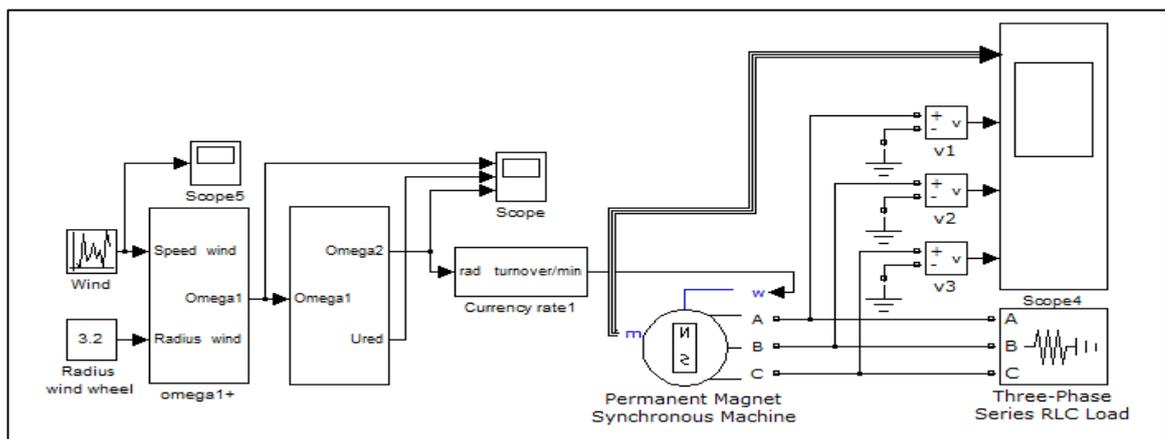


Рисунок 2.21 – Имитационная модель механического планетарного редуктора в программе Matlab Simulink

Для изменения коэффициента редукции пропорционально скорости вращения входного вала, необходимо плавно изменять диаметр сателлитов МПР. Такое плавное изменение имеется в механических коробках передач автомобиля.

Отдельным недостатком МПР является то, что у них ограничена широта, диапазон регулирования и стабилизация выходного (скоростного) вала.

Как показывает осциллограмма на рисунке 2.22, при изменении скорости вращения ВК пропорционально изменяется коэффициент редукции МПР и при этом скорость выходного вала остаётся постоянной до переключения ведущих и

ведомых шестерён редуктора. Но при резком переключении шестерни для изменения диаметров в целях стабилизации угловой скорости выходного вала происходит инерционный скачок скорости за счет частоты сцепления между зубцами шестерни (точка наблюдения 1 и 2, Рисунок 2.22).

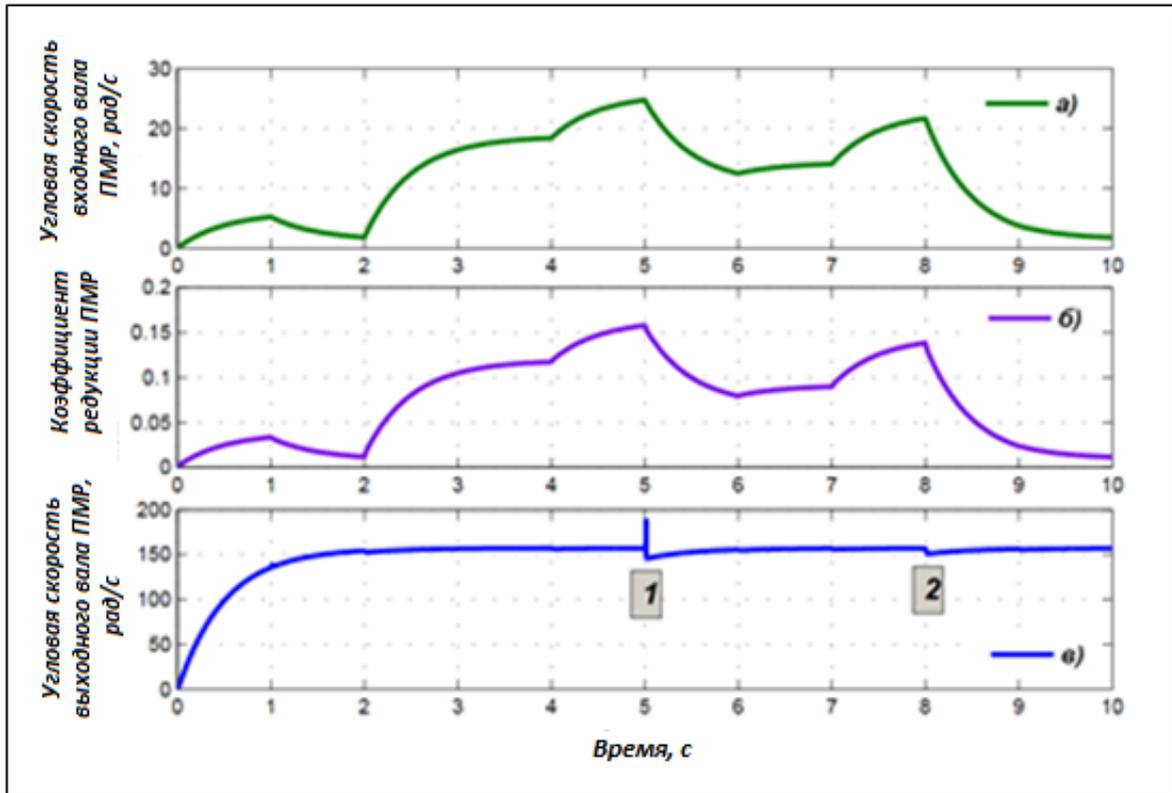


Рисунок 2.22 – Угловая скорость выходного вала планетарного механического редуктора при плавном переключении коэффициента редукции

Отдельным недостатком МПР является то, что у них ограничено широта диапазон регулирования и стабилизация выходного (скоростного) вала.

Из осциллограммы результатов моделирования ВЭУ с МПР (Рисунок 2.23) видно, что при изменении скорости вращения выходного вала МПР, который жёстко соединен с валом ротора ВГ, во время скачка скорости на выходном вале МПР за счёт переключения и плохого сцепления зубцов шестерни на зажимах ВГ происходит резкое повышение и понижение напряжения (Рисунок 2.24), что не допустимо для синхронизации с сетью и для питания высокочувствительных электроприёмников, которые подключены к выходным зажимам ВГ.

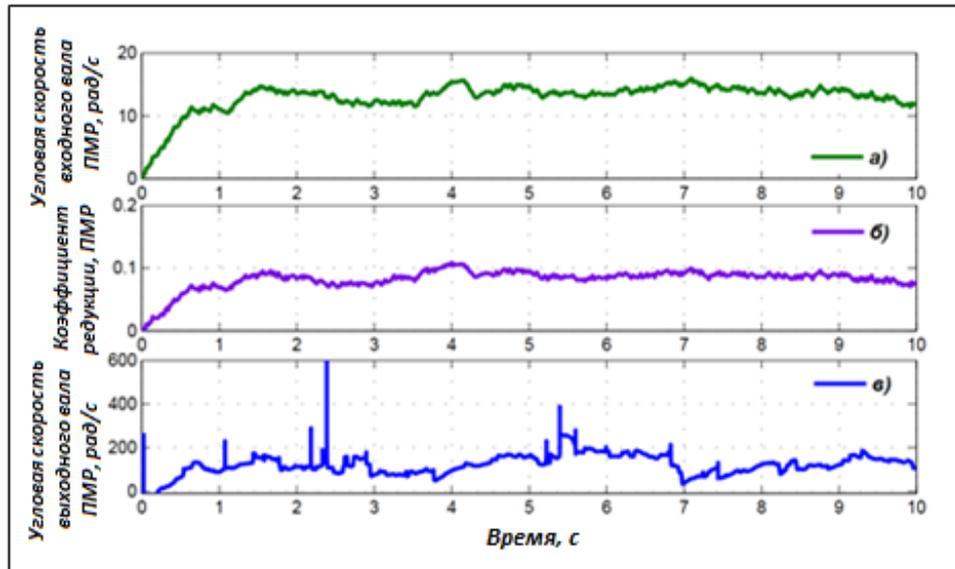


Рисунок 2.23 – Угловая скорость выходного вала планетарного механического редуктора при резких инерционных переключениях коэффициента редукции

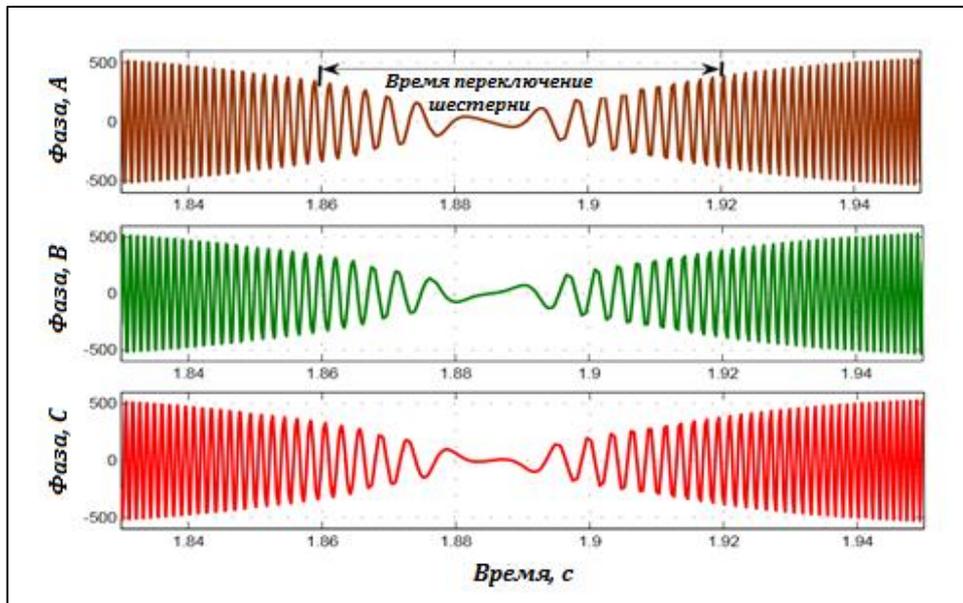


Рисунок 2.24 – Осциллограмма напряжения на зажимах ветрогенератора при стабилизации и трансмиссии угловой скорости ветроколеса с МПР

При всех достоинствах МПР необходимо отметить, что при сильном вращении вала и шестерни КПД всего механизма начинает ухудшаться. Кроме того, конструкция МПР не позволяет плавно и равномерно регулировать скорость вращения. Только благодаря трансмиссии зубчатых передач и шестерён увеличивается и уменьшается угловая скорость вращения выходного вала (скоростного вала) в зависимости от скорости вращения ВК.

Конструкция планетарных передач во многом зависит от их назначения и области применения. Для уменьшения размеров передачи МПР необходимо увеличить число сателлитов, что приведет к утяжелению всей конструкции ВЭУ с МПР. Другим недостатком таких редукторов является то, что в них установлено максимум 5 или 6 штук регулирующих шестерён, в связи с чем невозможно в широком диапазоне регулировать скорость выходного вала.

2.5 Классификация полупроводниковых частей системы управления преобразователя частоты

Начиная с середины прошлого века преобразователи частоты (ПЧ) на основе микропроцессорных и полупроводниковых технологий широко начали использоваться в системе управления электроприводов различных мощностей для оптимального режима работы механизмов и производственных оборудований [54, 88, 90].

На сегодняшний день частотные преобразователи широко используются в системе управления электроприводами и включают в себя множество специальных функций, которые обеспечивают надёжную работу электромеханических систем.

Одно из главных достоинств современного ПЧ – это наличие в нём встроенного регулятора процесса типа ПИД. При подаче обратного сигнала от датчика скорости, который соединен с управляющим валом электромеханического объекта, ПЧ надёжно регулирует оптимальную скорость вращения вала при заданных значениях скорости, тока и напряжения с учётом внешних возмущений. Поэтому ПИД-регулятор широко применяют в системе управления для точного поддержания скорости вращения валов электроприводов независимо от резких изменений нагрузки на выходных зажимах генераторов. Благодаря обратному сигналу по скорости ПЧ предотвращает резонансные механические скачки на валах, при режиме разгона, торможения и ускорения. При разгоне, если задано слишком большое ускорение и недостаточно мощности для обеспечения разгона электропривода, инвертор автоматически увеличивает время разгона. В случае

перегрузки вместо аварийного отключения электропривода или механизмов. ПЧ продолжает работу, пропорционально уменьшая скорость вращающегося механизма, что обеспечивает надёжную работу механизмов без остановки. При торможении ПЧ продлевает время торможения с учётом инерционных моментов вращающегося вала, что обеспечивает плавное регулирование всей системы. Ещё одним важнейшим достоинством ПЧ является его интеллектуальное управление электрическими параметрами. В этом режиме система управления инвертором ПЧ автоматически отслеживает ток потребления, параметр нагрузки и амплитуду напряжения на управляемом электромеханическом объекте и в зависимости от заданных значения тока, напряжения и мощности пропорционально корректирует для надёжной работы всей управляемой системы.

Классификация полупроводниковых частей, схемы управления ПЧ, где на входе подаётся источник переменного тока и управляемый выпрямитель 1 с сигнальным входом α , которым задаётся сигнал управления, управляемый выпрямитель 2. Третья часть ПЧ состоит из промежуточной цепи 4 и 5, которые одновременно выполняют функцию фильтрации и управления выходного напряжения постоянного тока выпрямителя. Четвёртая часть состоит из инвертора 6 с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) и 7 с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), которая формирует переменный ток заданной частоты с синусоидальной формой напряжения.

Для схемы ПЧ с АИМ применяют управляемый выпрямитель 1, промежуточная цепь с изменяющей постоянного тока 5 и 7, а также инвертор с ШИМ. Такую схему можно управлять тремя контурами ПЧ с помощью систем управления выпрямителям (СУВ), систем управления промежуточным звеном (СУПЗ) и систем управления инвертором (СУИ) для желаемого управления частоты и напряжения электромеханического объекта.

Так как схема генерирования ВЭУ с МР является динамической системой, то для управления ею моделируем выпрямитель с управляющим транзистором. В промежуточном звене между выпрямителем и инвертором вставим управляющий транзистор для управления значением постоянного напряжения. Также в схеме

инвертора вставим управляющий транзистор для более точного управление амплитудой выходного напряжения инвертора (Рисунок 2.25).

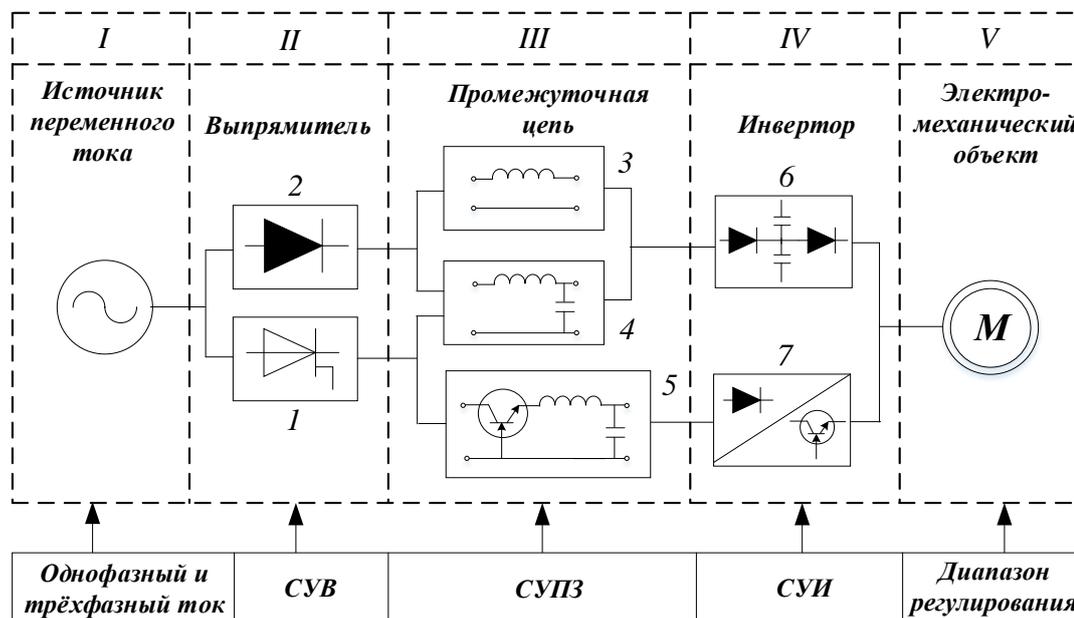


Рисунок 2.25 – Классификация полупроводниковых частей, схемы преобразователя частоты:
 1 – неуправляющий выпрямитель; 2 – управляющий выпрямитель; 3, 4, 5 – полупроводниковые элементы промежуточного звена; 6 – амплитудно-импульсный модулятор; 7 – широтно-импульсный модулятор

Выпрямитель напряжения – первый элемент, который непосредственно подключается к трёхфазной или однофазной сети переменного тока с фиксированной частотой (в большинстве случаев 50 Гц). Основными элементами выпрямителей ПЧ являются полупроводниковые элементы с неуправляемыми диодами и управляемыми тиристорами. В управляемых выпрямителях диод заменяют на тиристор с тремя электродами анод, катод и управляемым сигналом для открывания и закрывания затвора. Благодаря управляемому затвору можно изменить величину выпрямляемого напряжения путём подачи сигнала на вход затвора. Промежуточная цепь в системе ПЧ представляет собой фильтр для сглаживания постоянного напряжения на выходе выпрямителя. На управляемой промежуточной цепи установлен транзистор, который управляется с помощью внешнего сигнала для прерывания постоянного напряжения в промежуточной цепи. Катушка индуктивности и конденсатор поддерживают напряжение при

разных частотах коммутации транзистора и тем самым эффективно управляют значением постоянного напряжения в данной цепи. Кроме того, в промежуточной цепи в схеме генерирования ВЭУ установлена аккумуляторная батарея для аккумуляции избыточного тока. Инвертор – последний контур (звено) в ПЧ, который формирует нужное значение переменного напряжения для управления электромеханическим объектом (в основном электрические машины). Для получения более точной формы синусоидального тока на выходе инвертора ПЧ устанавливают RLC – фильтры (Рисунок 2.26).

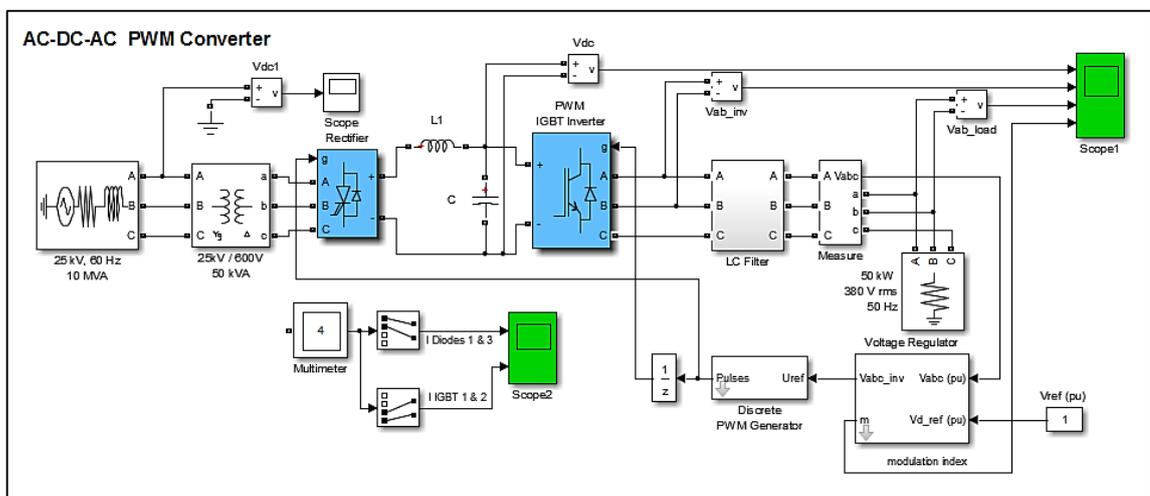


Рисунок 2.26 – Модель системы конвертации ПЧ с управляемым выпрямителем и инвертором в программе Matlab Simulink

По осциллограмме напряжения контуров ПЧ видно, что на выходе инвертора напряжения после фильтрации форма напряжения синусоидальная. Управляя обратной связью ПЧ в зависимости от электромеханических параметров электромеханического объекта, можно получить на выходе ПЧ необходимую форму напряжения и частоты для управления магнитной индукцией статора электромеханического объекта.

Применение ПЧ (Рисунок 2.27) в качестве регулирующего устройства в системе генерирования ВЭУ обеспечивает надёжное управление электромеханического объекта во всех диапазонах скорости вращения валов и механизмов путём пропорциональной адаптации выходного напряжения инвертора в зависимости от нагрузки приложенных к валу электромеханических объектов ВЭУ.

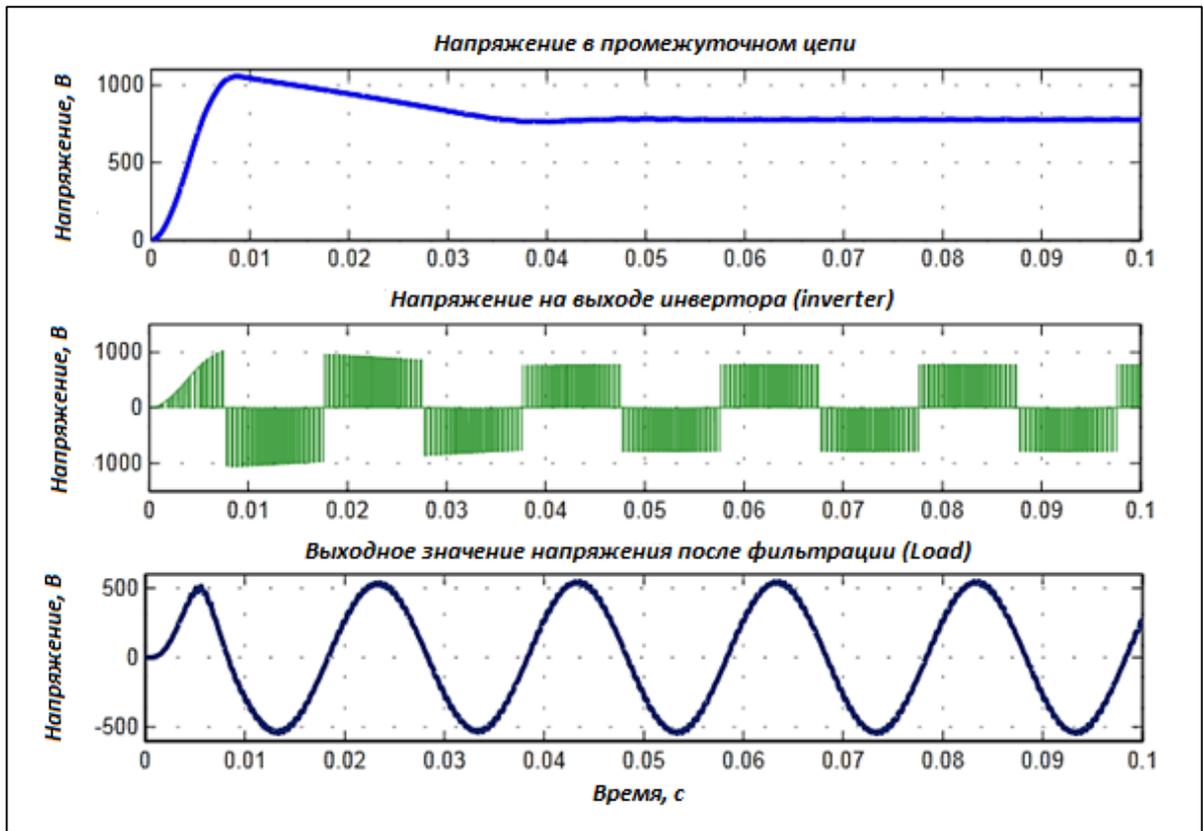


Рисунок 2.27 – Осциллограмма напряжений контуров ПЧ

Благодаря системе управления ПЧ с обратной связью по току и по напряжению, на статоре электрохимического объекта ВЭУ возникает стабильное магнитное поле и в воздушных зазорах, что обеспечивает надёжное управление с учётом нагрузки, приложенной на ВГ.

2.6 Моделирование схемы генерирования электроэнергии ветроустановки с выпрямительно-инверторным преобразователем

При неравномерном вращении ветроколеса в зависимости от переменной градации скорости ветра на выходных зажимах ВГ напряжение и ток хаотично изменяются. Кроме того, при разных частотах магнитного поля статора за счёт разности скорости вращения ротора форма тока и напряжения на выходе ВГ становится несинусоидальной. Стабилизация величины напряжения и тока в системе генерирования электрической энергии в ВЭУ осуществляется с применением (управляющий и не управляющий) выпрямителя для выпрямления

изменяющих выходных значений напряжения и тока на зажимах ВГ и инверторного преобразователя для преобразования постоянного напряжения выпрямителя в переменный со стандартным значением выходного напряжения, форма которого близка к синусоидальной. Схема генерирования ВЭУ с универсальным контроллером с выпрямительно-инверторным преобразователем напряжения (Рисунок 2.28) содержит три основных преобразовательных элемента: выпрямитель, аккумулятор, инвертор, и один управляющий контроллер.

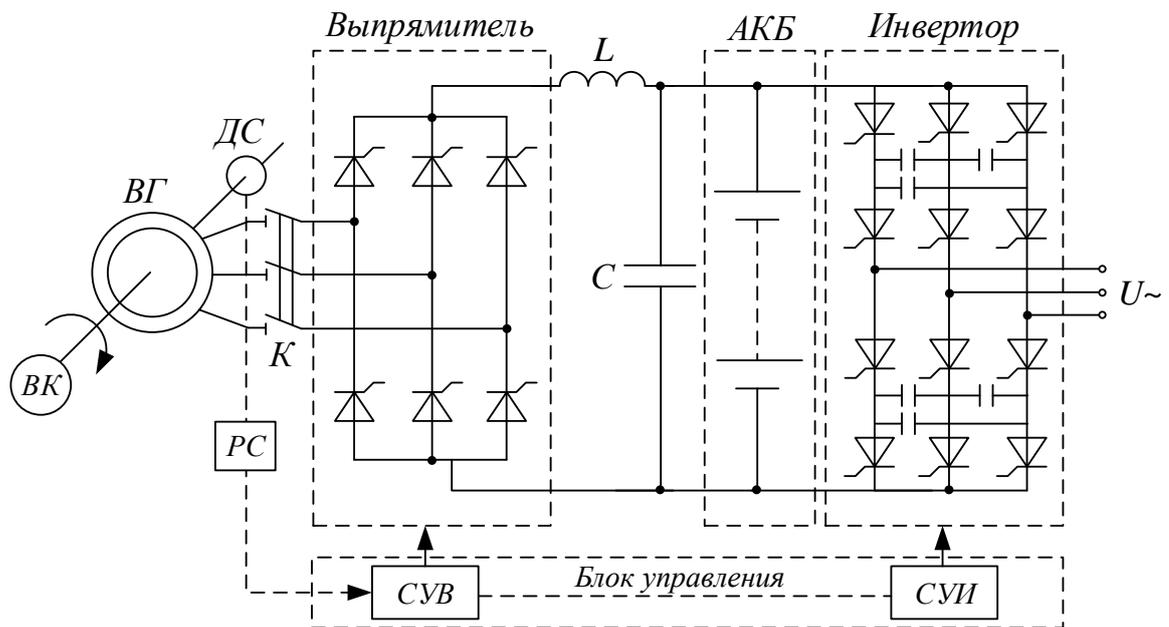


Рисунок 2.28 – Схема генерирования ВЭУ с универсальным контроллером на основе выпрямителя и инвертора: ВК – ветроколесо; ВГ – ветрогенератор; ДС – датчик скорости; РС – регулятор скорости; LC – фильтр; АКБ – аккумуляторная батарея; СУВ – система управления выпрямителем; СУИ – система управления инвертором

Выпрямитель на основе управляемых диодов преобразовывает напряжение электрического генератора ветроэнергетической установки на постоянный для зарядки аккумуляторной батареи (АКБ). Между выпрямителем и АКБ установлены LC элементы для фильтрации выходного постоянного напряжения выпрямителя. После преобразования переменной напряжения ВГ выпрямителем, управляющий инвертор на основе тиристорных элементов преобразовывает постоянную напряжения в переменные напряжения стандартной частоты (Рисунок 2.29).

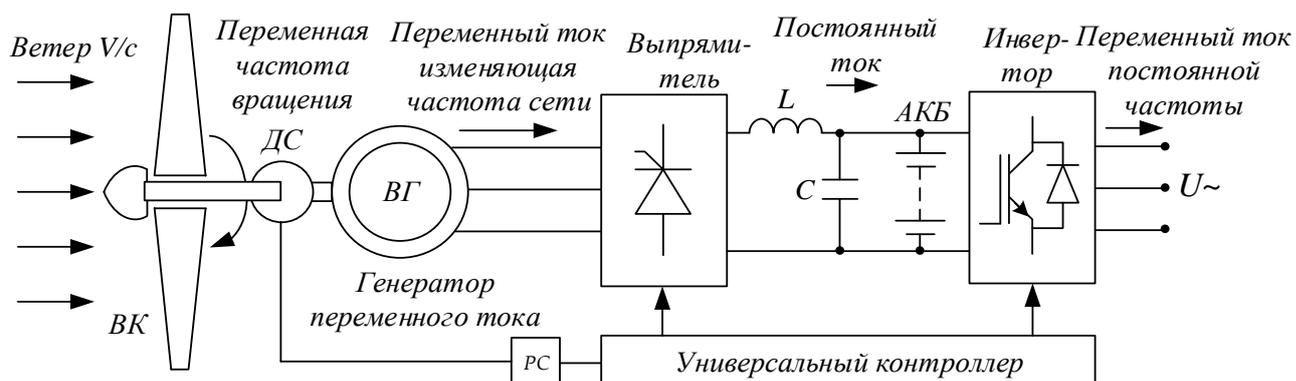


Рисунок 2.29 – Схема генерирования электроэнергии ВЭУ с выпрямительно-инверторным преобразователем

Имитационная схема ВЭУ с универсальным контроллером на основе выпрямителя и инвертора приведена на рисунке 2.30.

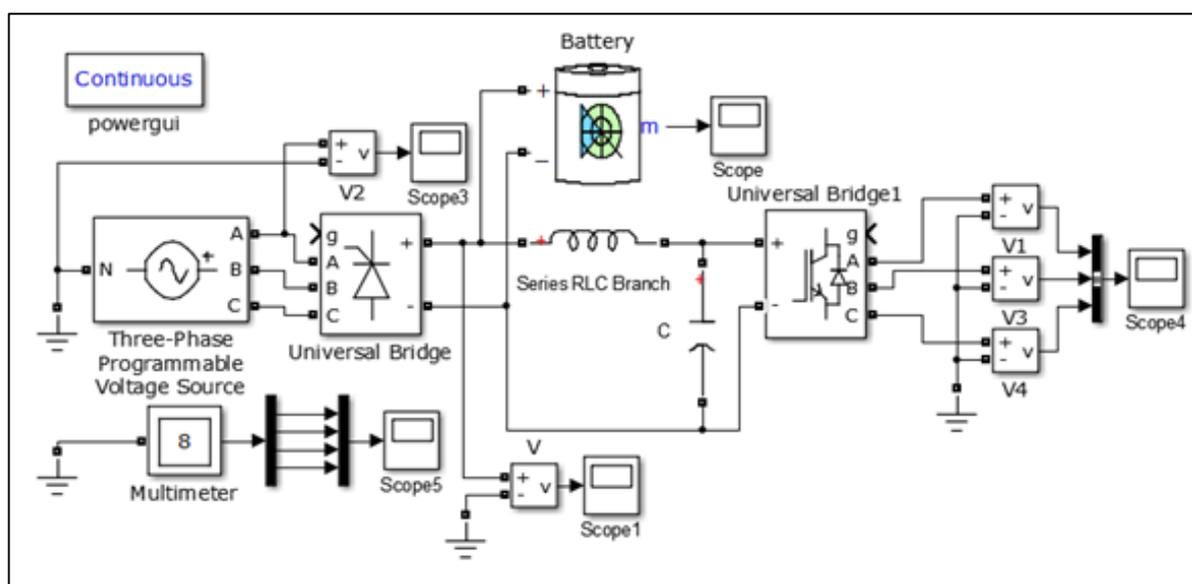


Рисунок 2.30 – Имитационная модель ВЭУ в выпрямительно-инверторный режим

Осциллограмма результатов напряжения имитационной модели ВЭУ с универсальным контроллером на основе выпрямителя и инвертора приведена на рисунках 2.31 и 2.32. В данной схеме начальный сигнал выдаёт датчик скорости ДС, подсчитывая скорость вращения ВК в течение времени, и подаёт на РС для формирования сигнала на блок управления БУ для управления выпрямителем и инвертором.

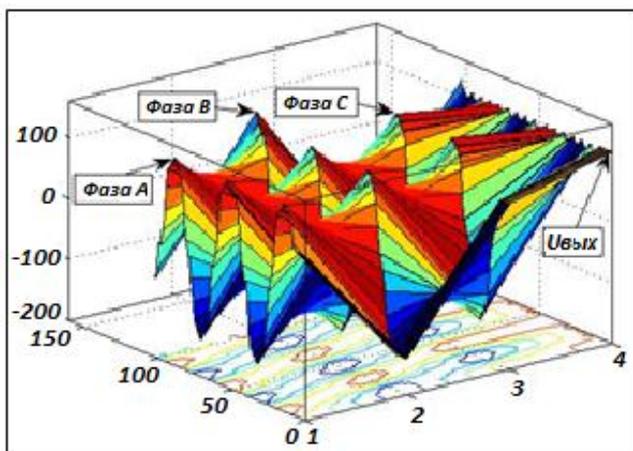


Рисунок 2.31 – Трёхмерная осциллограмма моделирования напряжения ветроустановки с выпрямительно-инверторным преобразователем

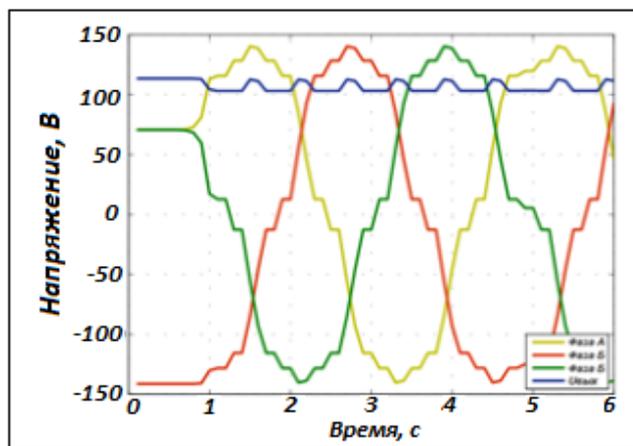


Рисунок 2.32 – Одномерная осциллограмма моделирования напряжения ветроустановки с выпрямительно-инверторным преобразователем

Из осциллограммы преобразования напряжения (Рисунок 2.33) видно, что при точном регулировании блока управления тиристорным преобразователем (ТП) форма и частота напряжения на выходных зажимах инвертора равны стандартным значениям.

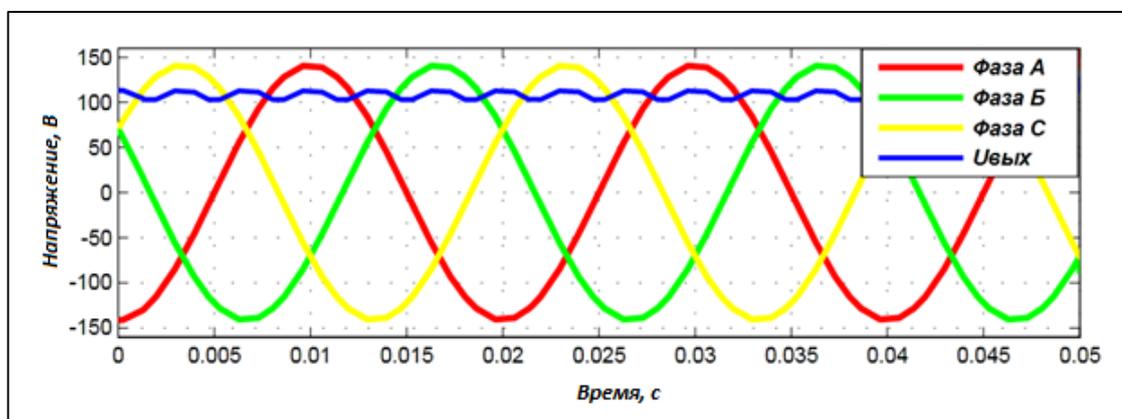


Рисунок 2.33 – Осциллограмма преобразования напряжения на выходе выпрямителя и инвертора при идеальном сглаживании синусоидальной формы напряжения

Амплитуда и частота выходного напряжения на зажимах инверторного преобразователя зависят от частоты переключения тиристоров. Такое обстоятельство ставит задачу более точного выбора датчика скорости на валах ВГ для более точного переключения тиристоров в зависимости от заданного уровня и частоты выходного напряжения на выходе инвертора.

Важным промежуточным узлом системы преобразования из постоянного в переменный ток являются фильтры. Фильтры выполняют функцию сглаживания пульсации выпрямлённого напряжения или тока для равномерного распределения гармоник тока в угловом пространстве.

2.7 Имитационная и математическая модель ветроустановки в программе MultiSim

Далее рассмотрим имитационную модель ВЭУ с механическим редуктором и короткозамкнутым асинхронным генератором. Для рационального использования скорости ветра в различных географических условиях целесообразно установить несколько ветроагрегатов в местах, где среднегодовая скорость ветра превышает 4 м/с, т.е. необходимо максимально использовать территорию с достаточным количеством потенциала скорости ветра. Исходя из этих условий, для моделирования ВЭС целесообразно установить 4 и более ветроагрегатов для покрытия ветряных полезных площадей и увеличения установленной мощности всей ВЭС. В рассматриваемой схеме моделирования (Рисунок 2.34) *U5-U8* лопасти, которые соединены с механическим редуктором *P1-P4*; редуктор подключён непосредственно к ротору (индуктор) ветрогенератора, и на всех узлах системы соединены трёхканальные осциллографы для снятия выходных параметров напряжения и частоты. На зажимах ВГ напряжение составляет 380 кВ. Подключены два повышающих трансформатора *T4-T6* типа *TM-16/0,4/10 кВ*, которые повышают напряжение до *10000 В*. Мощность каждого ветроагрегата составляет 2,5 кВт, а суммарная мощность 10 кВт. В зависимости от скорости ветра и с учётом географических особенностей в модели можно установить генераторы различной мощности. В качестве нагрузки в схеме установлена осветительная нагрузка *X4-X6* и асинхронный двигатель *M9*.

Рассматривая ВЭУ как комплекс сложных взаимодействующих систем, можно описывать математическое уравнение напряжения асинхронного

генератора в d - q координатах при изменяющихся значениях частоты которое, установлено в качестве основного генератора на ветроустановки:

$$\begin{cases} u_{ds} = -r_s \cdot i_{ds} - \omega_s \cdot \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = -r_s \cdot i_{qs} + \omega_s \cdot \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ u_{dr} = -r_r \cdot i_{dr} - \omega_r \cdot \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = -r_r \cdot i_{qr} + \omega_r \cdot \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \end{cases}, \quad (2.50)$$

где u_{ds} , u_{qs} , u_{dr} , u_{qr} – напряжения обмотки статора и ротора, В;

i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} – токи обмотки статора и ротора, А;

ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , ψ_{qr} – потокосцепления обмоток статора и ротора;

ω_s , ω_r – угловая скорость вращения электромагнитного поля статора и ротора, рад/с.

Опишем потокосцепление статора и ротора в зависимости от тока и величины индуктивности в обмотках статора и ротора:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -(L_s + L_m) \cdot i_{ds} - L_m \cdot i_{dr} \\ \psi_{qs} = -(L_s + L_m) \cdot i_{qs} - L_m \cdot i_{qr} \\ \psi_{dr} = -(L_r + L_m) \cdot i_{dr} - L_m \cdot i_{ds} \\ \psi_{qr} = -(L_r + L_m) \cdot i_{qr} - L_m \cdot i_{qs} \end{cases}, \quad (2.51)$$

где r_s , r_r – активное сопротивление статора и ротора, Ом;

L_s , L_r , L_m – собственные и взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, Гн.

Тогда значения тока в статоре и роторе в зависимости от изменяющей частоты магнитного поля статора:

$$\begin{cases} i_{ds} = C \cdot \frac{du_d}{dt} - \omega_s \cdot C \cdot u_q \\ i_{qs} = C \cdot \frac{du_q}{dt} - \omega_s \cdot C \cdot u_d \end{cases}, \quad (2.52)$$

Вызываемый электромагнитный момент ветроколеса с учетом потерь на лопастях:

$$M_{ВЭУ} = \frac{0,5 - 0,59}{\Omega} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot F \cdot V_c^3, \quad (2.53)$$

где Ω – угловая скорость лопастей ВЭУ, рад/с;

C_p – коэффициент торможения ВЭУ, рад/с;

γ – разница линейной скорости вращения конца лопасти со скоростью вращения ВК;

β – угол поворота лопастей ВЭУ;

ρ – плотность воздуха с учетом географических условий, Па;

F – площадь ветроколеса, м²;

V_c – средняя или фактическая скорость ветра, м/с.

Электромагнитный момент генератора ВЭУ в зависимости от угловой скорости вращения ротора и момента инерции

$$M_{ген} - M_{ВЭУ} = J_e \cdot \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (2.54)$$

где $M_{ген}$ – электромагнитный момент генератора ВЭУ, Н·м;

$M_{ВЭУ}$ – момент на лопастях ВЭУ, Н·м;

J_e – момент инерции на валу генератора, Н·м;

ω_r – угловая скорость вращения электромагнитного поля, рад/с.

Для распределения электроэнергии по ВЛ в имитационной модели в программе MultiSim (Рисунок 2.34) установлены параметры линии, такие как длина линии, активное и реактивное сопротивления распределительной сети R1.

Показания осциллографов XCS4 и XCS2 демонстрируют максимальное напряжение 385 В, что близко к стандартным значениям напряжения 400 В (Рисунок 2.35, а и б). По показаниям осциллографов XSC3, XSC4 видно, что при изменении скорости вращения ветроколеса хаотично изменяет напряжение на выходе ВГ, что недопустимо для различных потребителей электроэнергии (Рисунок 2.35, в и г).

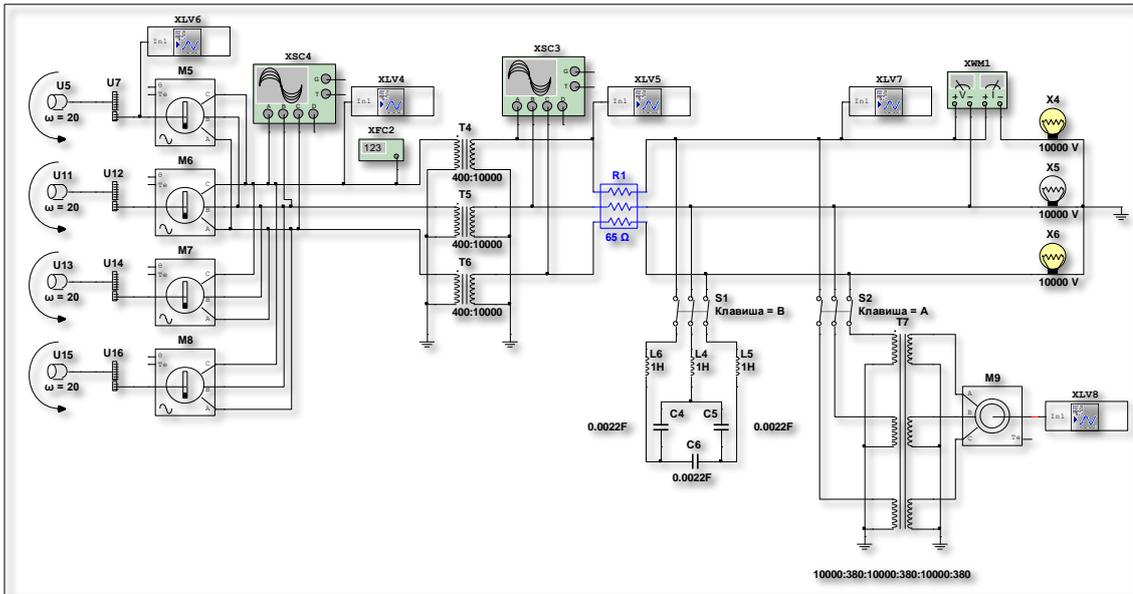
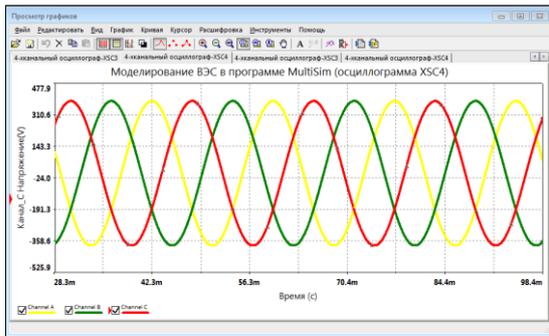
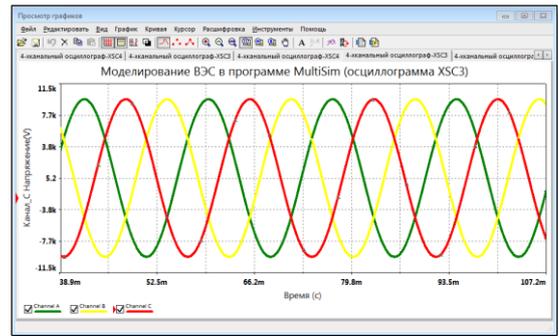


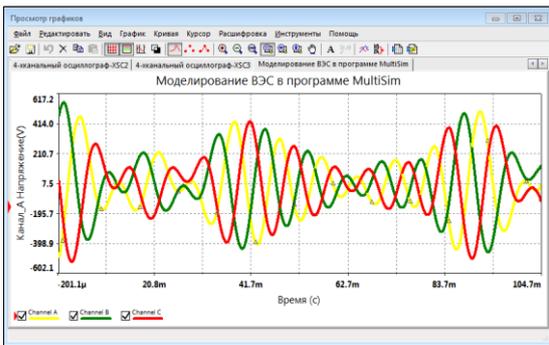
Рисунок 2.34 – Имитационная модель ВЭУ на платформе прикладной программы MultiSim 12



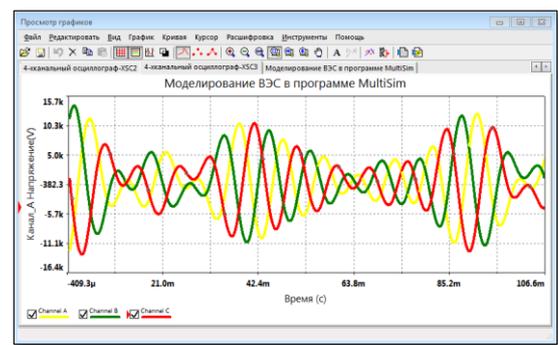
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.35 – Показания осциллограммы имитационной модели ВЭУ: а) – показания осциллограммы XSC4 на выходе ВГ при постоянной скорости ВК; б) – показания осциллограммы XSC3 после повышающего трансформатора при постоянной скорости вращения ветроколеса; в) – показания осциллограммы XSC4 при непостоянной скорости вращения ВК; г) – показания осциллограммы XSC4 при непостоянной скорости вращения ВК

Потери напряжения в трансформаторе, ЛЭП и СЭС с учётом сопротивлений всех элементов

$$\begin{cases} \Delta u_{dl} = u_{dl2} - u_{dl1} = r_a \cdot i_{dl} + L_a \cdot \frac{di_{dl}}{dt} - \omega_s \cdot L_a \cdot i_{ql} \\ \Delta u_{ql} = u_{ql2} - u_{ql1} = r_a \cdot i_{ql} + L_a \cdot \frac{di_{ql}}{dt} - \omega_s \cdot L_a \cdot i_{dl} \end{cases}, \quad (2.55)$$

где r_a – активное сопротивление схемы замещения силового трансформатора, Гн;
 L_a – индуктивность схемы замещения силового трансформатора, Ом.

Вышеприведённые математические уравнения генерирования электроэнергии в ВЭУ показывают, что во всех звеньях преобразования энергии ветра присутствует угловая скорость вращения ВГ и угловая скорость вращения магнитного поля статора генерирующего генератора ВЭУ.

2.8 Теория и общий принцип построения системы регулирования сложных электромеханических систем ветроустановки с магнитным редуктором

В современных автоматических системах управления электроприводом используются все более высокотехнологические полупроводниковые элементы, взаимодействующие между собой сигналами обратной связи [90].

На сегодняшний день конструкция современного ВЭУ позволяет автоматически регулировать скорость и момент вращения валов в заданном диапазоне, посредством регулирования электрических величин, таких как ток, напряжение и частота. Регулирование осуществляется на основе сигналов обратной связи, исходящих из механических, электронных, и микропроцессорных регуляторов. В зависимости от конструкции технического оборудования ВЭУ схему регулирования выполняют двумя типами: первая – разомкнутая схема (Рисунок 2.36, а) регулирования ВЭУ и вторая – замкнутая схема. Схему разомкнутой системы регулирования электроприводов ВЭУ (Рисунок 2.36, б) на практике редко применяют. Недостатком данной схемы управления является

отсутствие обратных сигналов k_{oc} , вследствие чего не учитывается изменение момента вала ВГ за счёт инерционных возмущений f_j и тока нагрузки, приложенного на выходных зажимах ВГ, что приводит к нестабильной работе всей системы управления.

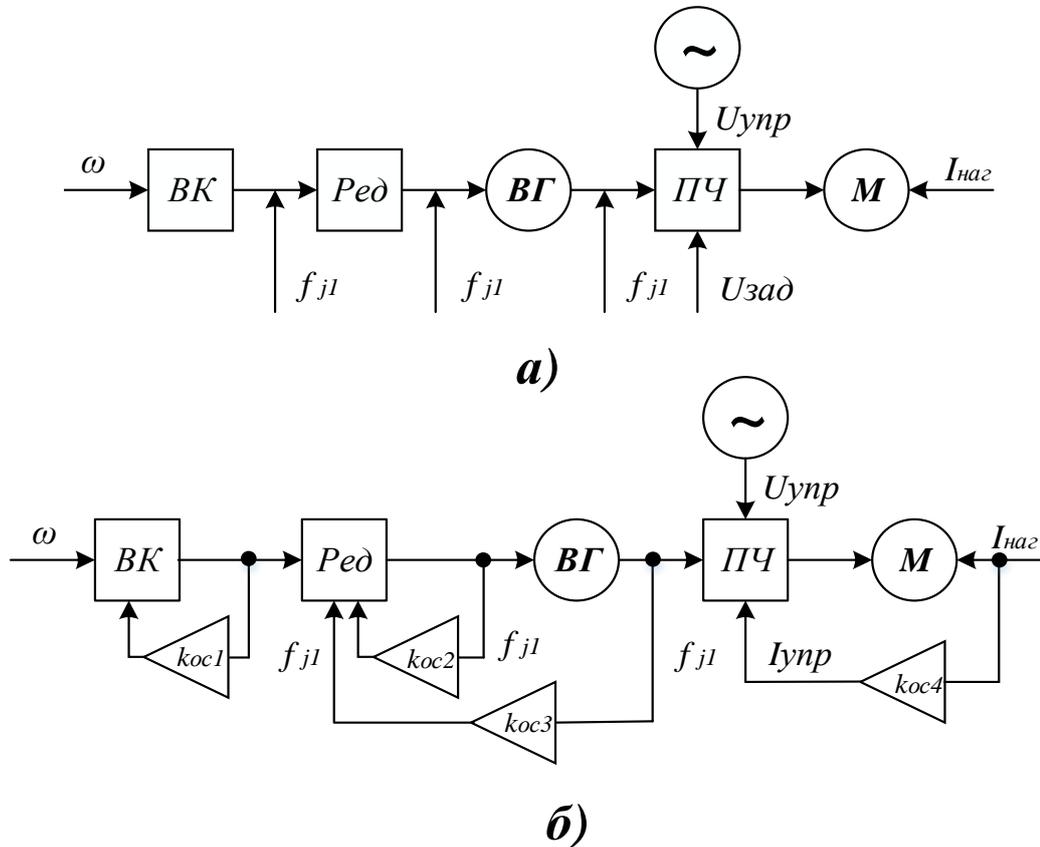


Рисунок 2.36 – Функциональная схема управления ВЭУ: а) – разомкнутая схема управления; б) – замкнутая схема управления с обратной связью

В замкнутых системах регулирования управление осуществляется отрицательным сигналом обратной связи, который формируется исходя из заданного сигнала управления. В данной системе отрицательная обратная связь может состоять из нескольких независимых контуров управления, таких как обратная связь по току, напряжения, скорости и момента. Кроме того, отрицательная обратная связь с заданным значением регулирования обеспечивает устойчивость системы при переходных процессах, формируя сигнал с учётом инерционных моментов и токов нагрузки ВГ, и описывает динамическое состояние всей системы ВЭУ.

Принятая замкнутая система управления в ВЭУ позволяет точно поддерживать уровень скорости и момента на валах, несмотря на воздействие инерционных возмущений в заданном диапазоне регулирования. Основными источниками обратной связи в замкнутой системе являются аналоговые и цифровые датчики на основе механических, полупроводниковых и микропроцессорных элементов, а регулирование и анализ сигналов осуществляется адаптивными системами, в которых автоматически выбирается режим работы в зависимости от процесса протекания переходных процессов. Программное обеспечение, в котором заложен алгоритм автоматизированного управления и заданный закон регулирования, обеспечивает надежное регулирование ВЭУ в разных режимах работы.

В современных системах управления электромеханическим комплексом программное обеспечение выполняет роль формирования сигналов для точного и надёжного управления электромеханическими объектами и содержит в себе информацию о последовательности действий органов управления и их характере работы. Наиболее распространённая форма программного обеспечения – это численное программное управление с вводом информации в виде чисел, определяющих последовательность операции или действия электромеханических объектов ВЭУ с учётом инерционных и иных внешних воздействий.

2.9 Выводы по главе 2

1. Исследование и расчет потенциалов ветроэнергетических ресурсов в регионах и городах Республики Таджикистан произведен с целью внедрения закона о возобновляемых источниках энергии, а именно ВЭУ, а также для выработки дополнительной мощности в электрических сетях.

2. Для проектирования ВЭУ необходимо анализировать среднегодовую скорость ветра в течение нескольких лет, для точного определения доверительного интервала скорости ветра методами статистики. Кроме того, все основное электрооборудование ВЭУ необходимо выбрать с учётом доверительного

интервала скорости ветра, так как этот показатель покрывает значительную площадь изменяющего графика скорости ветра в разных промежутках времени.

3. Предложенный статистический метод определения случайных величин градации скорости ветра можно использовать и в других географических зонах для точного выбора основных оборудований ВЭУ.

4. Анализ потенциала ветроэнергетических ресурсов Республики Таджикистан показал, что в городах и районах целесообразно установить ВЭУ с учетом нехватки электроэнергии в зимний период электроснабжения.

5. Применение МПР в ВЭУ нецелесообразно с точки зрения качества вырабатываемой электроэнергии в ВЭУ и у них ограниченно диапазон регулирования из-за ограниченного количество шестерён. В случае синхронизации ВЭУ в единую сеть при резких изменениях скорости ветра, угловой скорости выходного вала МПР за счёт момента инерции сателлитов и жёсткости механических передач из одного сателлита к другому скачкообразно изменяется угловая скорость выходного вала. Это явление может негативно влиять на синхронизацию ВЭУ в единую сеть и даже привести к выходу из строя высокочувствительных потребителей электроэнергии, таких как осветительные и электронные приборы.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЕТРОУСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

3.1 Принцип работы магнитного редуктора с плавнорегулируемым коэффициентом редукции

Магнитный редуктор (МР) является бесконтактной электромеханической машиной и используется как трансмиссионное устройство в электромеханических системах. Рассматриваемый МР выполнен в виде электрической машины с двумя роторами и с общим статором. Статор МР подключён к ПЧ для создания бесступенчатого и плавной трансмиссии между роторами с целью регулировки и стабилизации вращения выходного вала. Принцип работы МР, как у синхронного генератора, но в отличие от синхронного генератора основная волна магнитной индукции создаётся тихоходным ротором (модулятором) за счёт внешней скорости вращения и момента, приложенного к входному валу. Постоянные магниты, которые расположены в пазах быстроходного ротора, при вращении, в воздушном зазоре формируют волну магнитной индукции, форма которой близка к синусоидальному закону. Как и в других видах электрических машин, у МР связь между роторами и статором осуществляется величиной магнитного поля, что обеспечивает бесшумное вращение при резких изменениях скорости и моментов на валу.

Магнитный редуктор – это, по сути, две электрические машины, принцип работы которых заключается в плавной трансмиссии угловых скоростей валов путём изменения взаимодействующих электромагнитных индукций между двумя воздушными зазорами.

На рисунке 3.1 показана схема разреза основных конструктивных частей МР, подключённого к обмотке статора ПЧ.

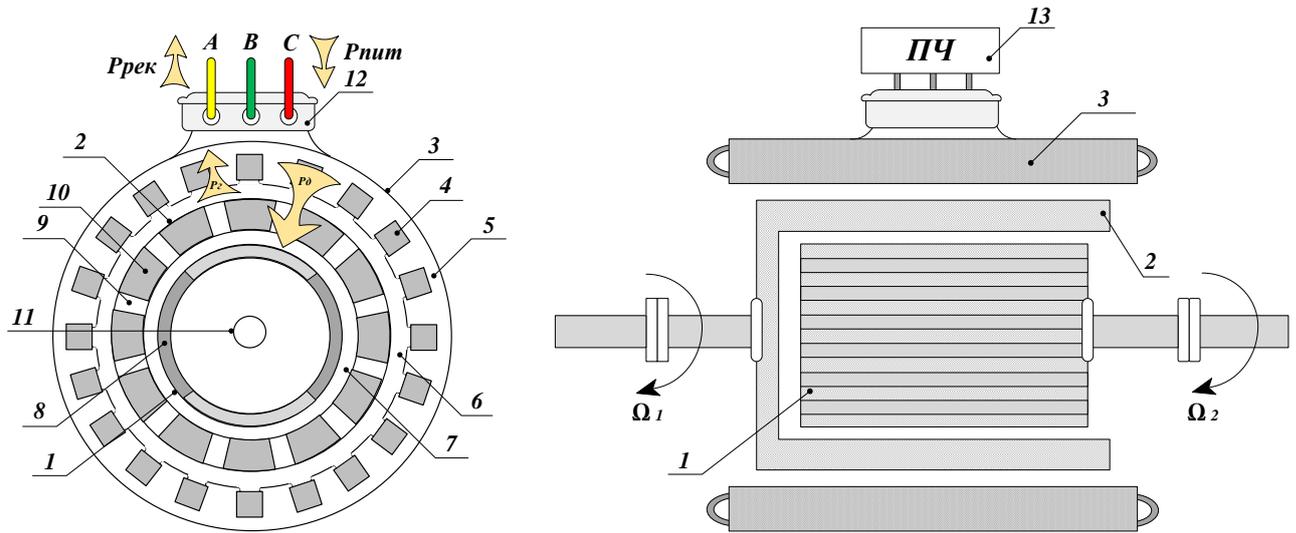


Рисунок 3.1 – Схема разреза основных конструктивных частей магнитного редуктора⁶:

- 1 – быстроходный ротор; 2 – тихоходный ротор; 3 – статор; 4 – обмотки статора;
 5 – магнитопровод статора; 6 – воздушный зазор между статора и тихоходного ротора;
 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 – выходная фаза обмотки статора;
 13 – статический преобразователь частоты

Трансмиссионный МР имеет статор 3 с числом пар полюсов p_3 , магнитное поле от статора поступает в сторону тихоходного ротора (модулятора), и на другой стороне между модулятором 2 и быстроходным ротором 1 индуцируется магнитное поле с числом пар полюсов $z - p_3$. Это магнитное поле взаимодействует с быстроходным ротором, имеющим такое же число пар полюсов $z - p_3$.

Второй быстроходный разнополярный магнитоэлектрический ротор 1 с числом пар полюсов $2(z - p_3)$ вращается с угловой скоростью Ω_2 .

Трёхфазная обмотка статора МР подключена к сети переменного тока через ПЧ и регулирует частоту магнитного поля статора ω . В результате изменения частоты магнитного поля статора с помощью ПЧ угловая скорость магнитного поля

будет изменяться в пространстве со скоростью $\Omega_{CT} = \pm \frac{\omega}{p_1}$.

⁶ Геометрические размеры магнитной системы магнитного редуктора приведены в приложении.

Формирование электромагнитных моментов МР аналогично с классическими синхронными машинами и имеет максимум и минимум величины в зависимости от диапазона регулирования угловой скорости магнитного поля статора.

МР в качестве плавнорегулируемого и трансмиссионного оборудования можно применить в таких отраслях, как робототехника, машиностроение, оборонная техника, ветроэнергетика и в регулируемых электрических комплексах и системах [36, 48, 50].

Минимальная магнитная проводимость в воздушных зазорах МР. Из конструкционной части МР известно, что у МР имеются два воздушных зазора: первый – между статором и модулятором, второй – между модулятором и быстроходным ротором.

Тогда минимальная и максимальная магнитная проводимость первого и второго ротора определяются из выражения:

$$\lambda_{1\min} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{b_{\text{мнар}}}{2}\right)^2 + (\delta_1)^2}}, \quad \lambda_{1\max} = \frac{1}{\delta_1}, \quad (3.1)$$

$$\lambda_{2\min} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{b_{\text{пнн}}}{2}\right)^2 + (\delta_2)^2}}, \quad \lambda_{2\max} = \frac{1}{\delta_2}. \quad (3.2)$$

Магнитная индукция в воздушных зазорах МР. Минимальную удельную магнитную проводимость рассчитываем исходя из конструкционных размеров МР. Основная магнитная индукция во втором воздушном зазоре между статором и быстроходным ротором, вызванная полюсной обмоткой статора с числом пар полюсов $2p_1$, определяется из выражения:

$$B_{\delta_2} = F_1 \mu_0 \Lambda \quad (3.3)$$

Магнитодвижущая сила (МДС) магнитного поля обмотки статора МР:

$$F_{1m} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_w k_{w1}}{p_1} \quad (3.4)$$

Тогда амплитуда гармоники МДС магнитного поля статора МР:

$$F_1 = F_{1m} \sin(\omega t + p_1 \varphi_c) \quad (3.5)$$

Амплитуда и гармоника МДС магнитного поля статора зависит от угловой частоты тока статора ω и угловой координаты перемещения статора φ приведено на рисунке 3.2.

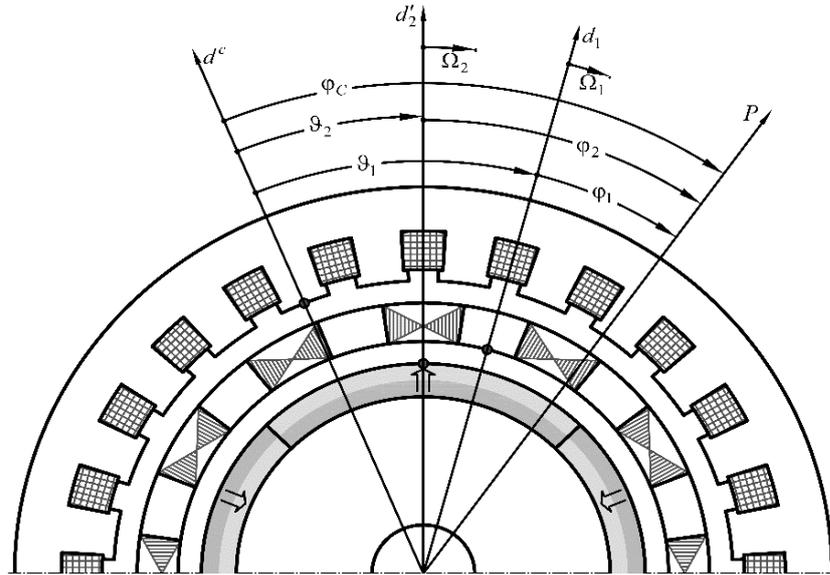


Рисунок 3.2 – ϑ_1, ϑ_2 – угловые координаты продольных осей соответственно наружного d_1 и внутреннего d_2' роторов относительно продольной оси статора d^c ; φ_1, φ_2 – угловые координаты точки наблюдения P соответственно на поверхности наружного и внутреннего роторов; Ω_1, Ω_2 – угловые скорости вращения наружного и внутреннего ротора

После подстановки выражения магнитной индукции (3.3) и удельной магнитной проводимости находим величину магнитной индукции во втором воздушном зазоре, создаваемой обмотками статора МР:

$$B_{\delta 2} = F_{1m} \mu_0 (\Lambda'_0 - \Lambda'_{1m} \cos z\varphi_1) \sin(\omega t + p_1\varphi_c), \quad (3.6)$$

где $\Lambda'_0 - \Lambda'_{1m} \cos z\varphi_1$ – удельная магнитная проводимость рассматриваемого воздушного зазора.

Зависимость магнитной индукции и магнитной проводимости в воздушных зазорах показывает, что во втором воздушном зазоре между модулятором и быстроходным ротором присутствуют три вида гармоник магнитной индукции, с учётом магнитной проводимости двух воздушных зазоров.

$$\left. \begin{aligned} B'_{\delta 2} &= -\frac{1}{2} F_{1m} \mu_0 \Lambda'_{1m} \sin(\omega t + p_1 \varphi_c - z \varphi_1) \\ B''_{\delta 2} &= -\frac{1}{2} F_{1m} \mu_0 \Lambda'_{1m} \sin(\omega t + p_1 \varphi_c + z \varphi_1) \\ B'''_{\delta 2} &= F_{1m} \mu_0 \Lambda_0 \sin(\omega t + p_1 \varphi_c) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Из рисунка 3.2 видно, что только первая гармоника магнитной индукции является рабочей, тогда угловая точка наблюдения φ_1 модулятора принимает вид:

$$\varphi_1 = \varphi_c - \mathcal{G}_1 = \varphi_c - \mathcal{G}_{10} - \Omega_1 t \quad (3.8)$$

Подставляя выражение угловой точки наблюдения в выражение (3.8), и зафиксируем в последней аргумент синусоидальной функции, описывающий волну индукции, и находим волну индукции во втором воздушном зазоре.

$$(z - p_1) \varphi_c - z \Omega_1 t - \omega t = const \quad (3.9)$$

Дифференцируя этот выражение по времени, находим скорость перемещения основной рабочей волны индукции во втором воздушном зазоре относительно статора МР.

$$\frac{d\varphi_c}{dt} \Omega_2 = \frac{z}{z - p_1} \Omega_1 + \frac{\omega}{z - p_1} \quad (3.10)$$

Анализируя полученные результаты и зависимости соотношения магнитной индукции второго воздушного зазора, отметим следующие выводы:

1. Волна магнитной индукции во втором воздушном зазоре имеет число пар полюсов $(z - p_1)$. Число пар полюсов внутреннего ротора должно строго соблюдать равенство $p_2 = (z - p_1)$ для синхронного вращения основного магнитного поля во втором воздушном зазоре со скоростью Ω_2 .

2. Скорость вращения выходного вала Ω_2 прямо пропорционально скорости вращения входного вала Ω_1 и угловой частоте напряжения статора ω_{CT} .

Из выражения (3.10) также можно определить скорость вращения основной рабочей гармоники магнитной индукции в первом воздушном зазоре относительно статора и модулятора, которая вращается в пространстве с угловой скоростью Ω .

$$\Omega = \frac{d\varphi_c}{dt} = -\frac{\omega}{p_1} \quad (3.11)$$

Тогда угловое положение модулятора φ_1 принимает вид:

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = -\frac{\omega}{p_1} - \Omega_1 \quad (3.12)$$

Из дифференциального уравнения, определяющего угловое положение модулятора, (3.12) выясняется, что рабочая волна магнитной индукции в первом воздушном зазоре вращается встречно вращению модулятора.

Магнитная индукция в первом воздушном зазоре между статором и модулятором, вызванная полюсами магнитов внутреннего ротора, будет равна:

$$B_{\delta 1} = F_1^M \mu_0 \Lambda', \quad (3.13)$$

$$F_1^M = F_{1m}^M \cos p_2 \varphi_2. \quad (3.14)$$

Тогда после подстановки выражения магнитной индукции в первом воздушном зазоре (3.12) и удельной магнитной проводимости находим величину магнитной индукции в первом воздушном зазоре, создаваемой обмотками статора МР.

$$B_{\delta 2} = F_{1m}^M \mu_0 (\Lambda'_0 - \Lambda'_{1m} \cos z \varphi_1) \cos p_1 \varphi_2 \quad (3.15)$$

Из вышеприведённого выражения следует, что в первом воздушном зазоре между статором и тихоходным ротором имеются три вида гармоник магнитной индукции.

$$\left. \begin{aligned} B'_{\delta 2} &= -\frac{1}{2} F_{1m}^M \mu_0 \Lambda'_{1m} \cos(p_2 \varphi_2 - z \varphi_1) \\ B''_{\delta 2} &= -\frac{1}{2} F_{1m}^M \mu_0 \Lambda'_{1m} \cos(p_2 \varphi_2 + z \varphi_1) \\ B'''_{\delta 2} &= F_{1m}^M \mu_0 \Lambda'^2_0 \cos p_2 \varphi_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Эти гармоники магнитной индукции взаимодействуют между собой с разными частотами магнитного поля статора, частотой движения тихоходного ротора, магнитами быстроходного ротора и формируют три поля магнитной индукции, которое определяем из выражения 3.16.

По результаты моделирования гармоник магнитной индукции во втором воздушном зазоре МР (Рисунок 3.3) видно, что значения магнитной индукции при

максимуме скорости вращение тихоходного ротора и при увеличении частоты магнитного поля статора МР до 314 рад/с, достигает до 1,5 Тл.

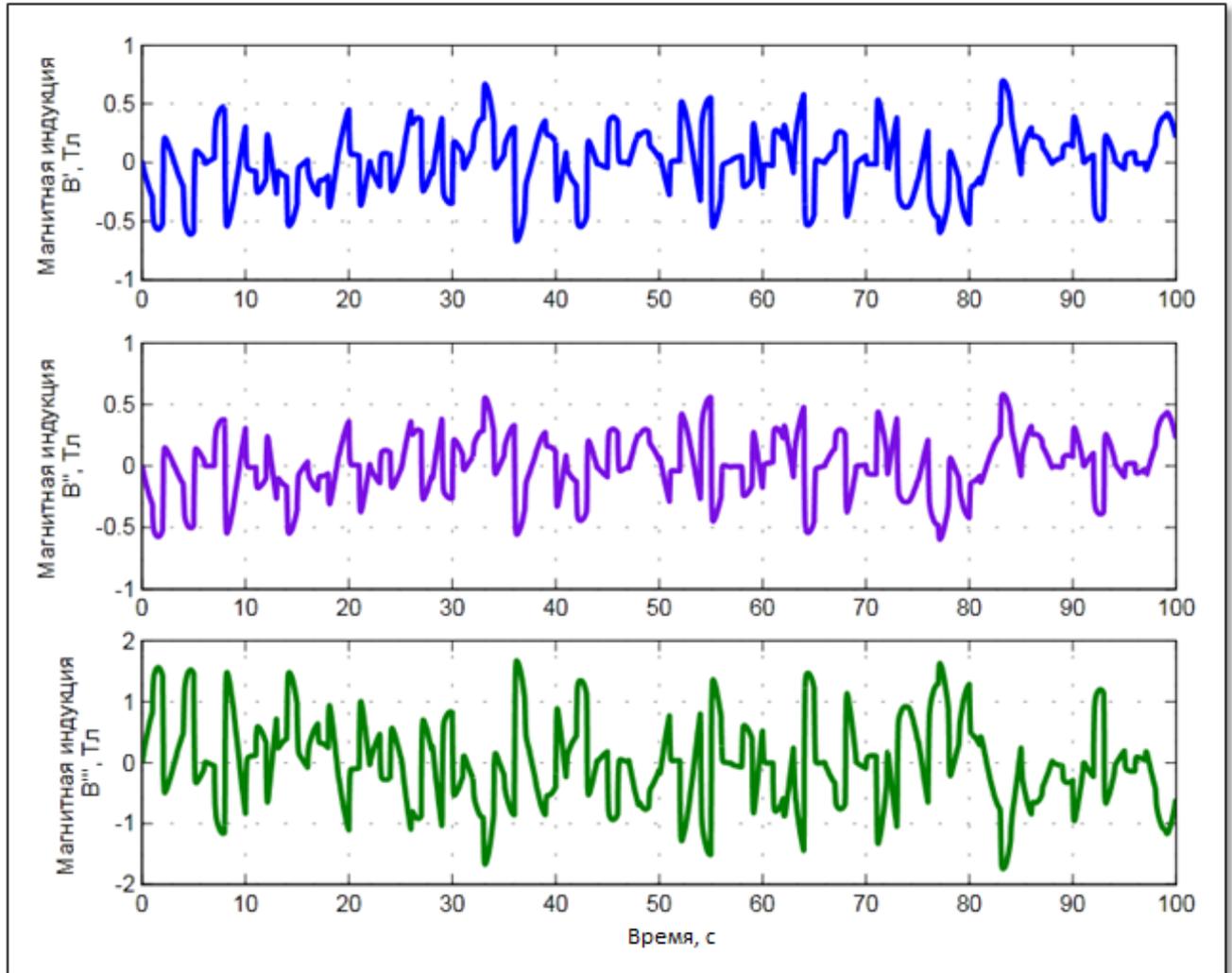


Рисунок 3.3 – Результаты моделирования гармоник магнитной индукции во втором воздушном зазоре МР

Гармоника магнитной индукции первого выражения (3.16) является рабочей, тогда, учитывая аргументы функции косинуса в формуле (3.16) константой и используя рисунок 3.2, запишем.

$$\cos p_2 \varphi_2 p_2 \varphi_2 - z \varphi_1 = p_2 (\varphi_c - \Omega_2 t - \vartheta_{20}) - z (\varphi_c - \Omega_1 t - \vartheta_{10}) = const \quad (3.17)$$

Дифференцируя эту формулу по времени и учитывая дифференциальное уравнение скорости вращения быстроходного вала Ω_2 , а также связи угловых скоростей Ω_1 и Ω_2 , с учётом числа пар полюсов $p_2 = z - p_1$ получим следующее равенство, которое объясняет скорость вращения магнитного поля статора МР.

$$\frac{d\varphi_c}{dt} = \frac{1}{p_1} (z\Omega_1 - p_2\Omega_2) = \frac{z}{p_1}\Omega_1 - \frac{p_2}{p_1} \left(\frac{z}{p_2}\Omega_1 + \frac{\omega}{p_1} \right) = -\frac{\omega}{p_1} \quad (3.18)$$

Последнее выражение показывает, что магнитное поле, описываемое формулой (3.16), во-первых, неподвижно относительно МДС основной гармоники обмотки статора, во-вторых, имеет то же число полюсов, что и сама обмотка.

Основная гармоника магнитного поля в первом воздушном зазоре $B'_{\delta 1}$, взаимодействует с аналогичной гармоникой, вызванной обмоткой статора МР, и будет создавать электромагнитный момент M_I , который уравнивается внешним моментом, приложенным к валу наружного ротора.

Результирующая магнитная индукция в первом воздушном зазоре состоит из составляющих, обусловленных соответственно магнитами внутреннего ротора и обмоткой статора.

Главным достоинством МР является наличие в наружном роторе ферромагнитных стержней, предназначенных в виде беличьей клетки для усиления электромагнитного момента, которые вращаются автономно, независимо от скорости перемещения магнитного поля статора.

Благодаря соотношению разности пар полюсов тихоходного и быстроходного ротора у МР возникает коэффициент редукции:

$$i_{MP} = \frac{z}{z - p_1} \quad (3.19)$$

Тогда скорость вращения тихоходного и быстроходного ротора МР с учётом регулирования частоты статора f принимает вид:

$$\Omega_2 = i_{MP} \cdot \Omega_1 + \frac{\omega}{z - p_1} \quad (3.20)$$

Применяя МР в качестве редуктора для трансмиссионного и стабилизирующего устройства в ВЭУ, выражение (3.20) принимает вид:

$$\Omega_2 = \frac{z}{z - p_1} \Omega_{BK} + \frac{\omega}{z - p_1} \quad (3.21)$$

Режим регулирования частоты статора МР осуществляется путём подключения к обмотке статора статического ПЧ, в результате которого магнитное

поле статора пропорционально будет изменяться в зависимости от скорости вращения ВК в пространстве по закону $\Omega_{CT} = \pm \frac{2\pi \cdot f_1^*}{p}$. Знак минус реализуется в зависимости от соотношения угловой скорости вращения роторов МР и объясняет зависимость угловой скорости статора МР в зависимости от изменения частоты магнитного поля.

Приведённый ниже расчётный график зависимости угловой частоты вращения ВК от частоты, подаваемой ПЧ на статор МР (Рисунок 3.4) отчётливо показывает, что при увеличении скорости ВК знак частоты статора МР становится отрицательным. Такой отрицательный знак объясняется тем, что ПЧ не потребляет энергию от сети, а наоборот работает в режиме отдаёт энергию из статора МР в сеть.

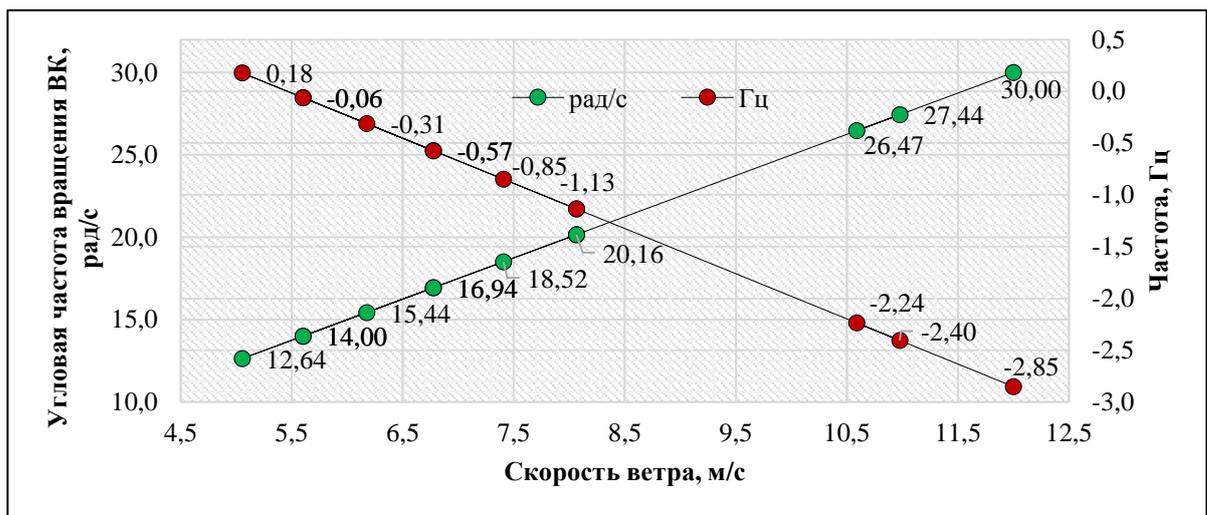


Рисунок 3.4 – График зависимости частоты питания ПЧ от угловой скорости ВК

Тогда с учётом соотношения угловых скоростей двух роторов формула частоты регулирования магнитного поля статора МР принимает вид:

$$\omega = \Omega_2(z - p) - z\Omega_{BK} = z_1 - p_1 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n_{юм}}{60} - \Omega_2 \right) \quad (3.22)$$

Результаты расчёта зависимости частоты вращения магнитного поля статора от угловой скорости ВК приведены на рисунке 3.5.

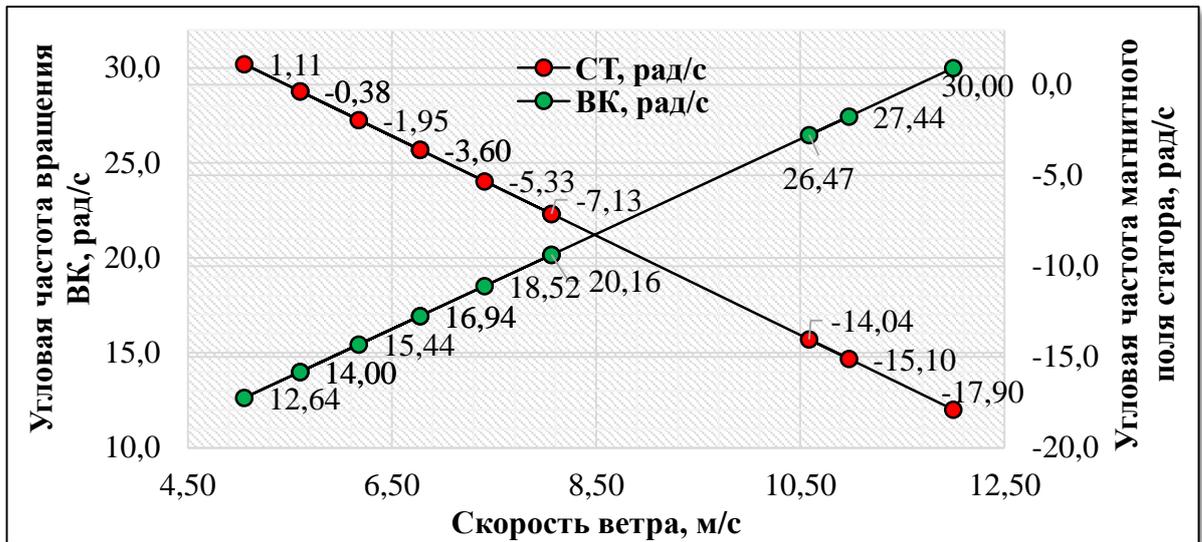


Рисунок 3.5 – График зависимости частоты вращения магнитного поля статора от угловой скорости ВК

Рассматривая МР как электрическую машину с двумя роторам, и находим электромагнитные моменты тихоходного и быстроходного ротора:

$$M_1 = 3\delta_1 k_{\delta 1} p_1 \frac{E_\delta E_0}{\omega x_a} \Lambda'_0 \sin \theta_1, \quad (3.23)$$

$$M_2 = 3 \frac{D_2}{D_1} p_2 k_{\delta 2} \delta_2 \frac{E_\delta E_0}{\omega x_a} \Lambda'_0 \sin \theta_2, \quad (3.24)$$

где E_0 , E_δ – соответственно ЭДС холостого хода и результирующей трёхфазной обмотки статора, В;

δ_1 , $k_{\delta 1}$, p_1 , p_2 , $k_{\delta 2}$, D_1 , D_2 , θ_1 , θ_2 – размеры и коэффициенты воздушных зазоров, числа пар полюсов, наружные диаметры, углы нагрузки соответственно тихоходного и быстроходного валов, мм;

Λ_0' – постоянная составляющая сквозной удельной магнитной проводимости двух воздушных зазоров;

X_a – индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки статора, Ом.

Для ЭДС обмотки статора, наведенной магнитным потоком воздушного зазора между роторами и статором МР:

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = -jx_{af} F_{m1}^M - jx_a \dot{I}_d - jx_a \dot{I}_q \quad (3.25)$$

Электродвижущая сила холостого хода обмотки статора МР:

$$\dot{E}_0 = -jx_{af} F_{m1}^M \quad (3.26)$$

Обмотка статора имеет постоянное значение активного сопротивления, а индуктивное сопротивление рассеяния статора МР изменяется в зависимости от частоты поля:

$$X_\sigma = 4\pi\mu_0 f N k_p w_k^2 l (\lambda_{II} + \lambda_{JI}) \quad (3.27)$$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции магнитов тихоходного и быстроходного ротора с обмотками статора МР:

$$x_{af} = \omega \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} l \tau_1 \Lambda'_{1m} w k_{w1}, \quad (3.28)$$

где Λ'_{1m} – постоянная удельной магнитной проводимости между воздушными зазорами, т.е. между роторами и статором МР.

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки статора с постоянными магнитами роторов:

$$x_a = \omega \frac{6\mu_0}{\pi^2} l \tau_1 \Lambda'_0 \frac{(w k_{w1})^2}{p_1} \quad (3.29)$$

Моделирование показало, что при изменении скорости вращения тихоходного ротора индуктивное сопротивление взаимоиндукции магнитов тихоходного и быстроходного роторов и индуктивное сопротивление статора с постоянными магнитами роторов (Рисунок 3.6) пропорционально изменяются. Такое изменение индуктивных сопротивлений МР обусловлено изменением угловой частоты статора в целях стабилизации напряжения обмотки статора МР.

Основная гармоника МДС магнитов ротора МР:

$$F_{m1}^M = -\frac{4}{\pi} h_m H_{cB} \quad (3.30)$$

Тогда баланс напряжения обмотки статора принимает вид:

$$\dot{U} - \dot{I} Z = -\dot{E}_\delta \quad (3.31)$$

где $z = r + jx_\sigma$ – полное сопротивление рассеяния обмотки статора МР, Ом;

r, X_{σ} – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора МР, Ом.

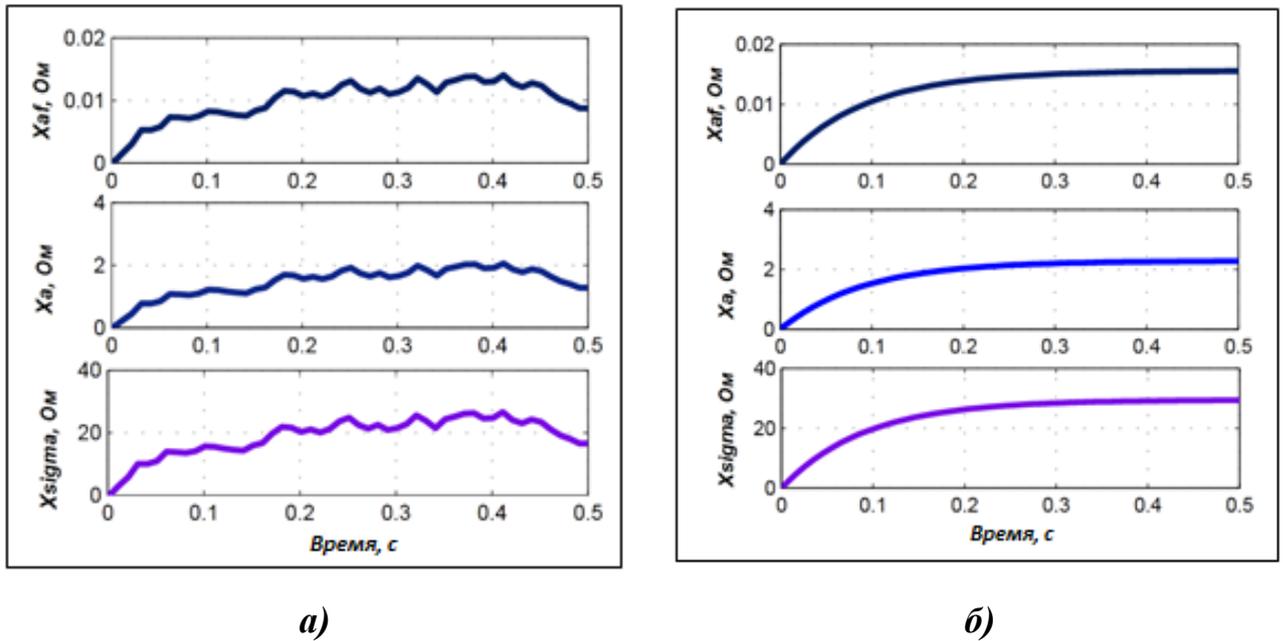


Рисунок 3.6 – Осциллограмма результатов моделирования индуктивного сопротивления взаимной индукции магнитов статора и ротора магнитного редуктора: а) – при нестабилизированной частоте магнитного поля статора; б) – при стабилизированной частоте магнитного поля статора

Тогда электромагнитная мощность обмотки статора МР с учётом сопротивления рассеяния:

$$P_{\sigma} = 3E_{\delta} I \cos \psi_1 \quad (3.32)$$

При расчёте рабочего режима МР рассмотрим два режима работы. Первый режим работы МР основан на балансе мощностей в зависимости от энергетических каналов. Во втором режиме МР работает как два совмещённых элементарных электрических машин.

Рассматривая МР как мультипликатор и редуктор для стабилизации выходного вала на вал тихоходного вала присоединяем ВК как внешний источник механических и электромагнитных каналов.

3.2 Баланс мощности, угловой скорости и момента магнитного редуктора

Рассматриваемое электромеханическое устройство МР обладает функциями регулируемой электрической машины, работает в зависимости от применения в двигательном и генераторном режимах.

Для регулирования и стабилизации выходных параметров МР имеет три основных управляемых каналов: первый регулируется через статический ПЧ подключенный к обмотке статора МР, и питается от независимого и зависимого источника питания переменного или постоянного тока в зависимости от режима работы.

При режиме работы МР в качестве мультипликатора наружный ротор (тихоходный ротор) является входным электромеханическим каналом, а внутренний ротор является выходным каналом.

При рассмотрении МР как редуктора, электромеханическая мощность валов одинакова.

$$M_1\Omega_1 = M_2\Omega_2, \quad \frac{M_2}{M_1} = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}, \quad (3.33)$$

где M_1 , M_2 , Ω_1 , Ω_2 – электромагнитные моменты и скорости вращения соответственно входного и выходного валов, Н·м, рад/с.

В режиме редуктора ПЧ питает катушек обмотки статора постоянным током. Формирование электромагнитных моментов M_1 и M_2 основано на взаимодействии магнитных потоков статора и внутреннего ротора (быстроходного ротора) МР. Источником этих взаимодействий являются магниты постоянного или переменного тока в зависимости от угловой частоты вращения магнитного поля статора.

Соотношения электромагнитных моментов тихоходного и быстроходного ротора (Рисунок 3.7) различаются их в знаках и определяются по формуле:

$$\frac{M_1}{M_2} = -\frac{z}{z - p_1}. \quad (3.34)$$

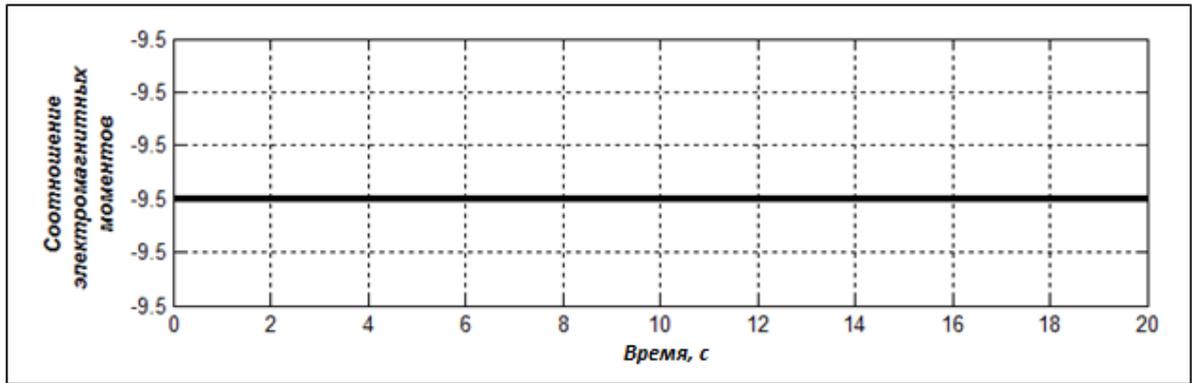


Рисунок 3.7 – Осциллограмма отношения электромагнитных моментов тихоходного и быстроходного ротора

Следовательно, если известен момент одного из роторов (валов), то можно определить момент другого ротора с учётом угловой частоты вращения статора.

Скорость вращения тихоходного и быстроходного вала (Рисунок 3.8) должна соответствовать базовой формуле:

$$\Omega_2 = \frac{z}{z - p_1} \Omega_1 + \frac{\omega}{z - p_1}, \quad (3.35)$$

где ω – угловая частота источника питания обмотки статора, рад/с.

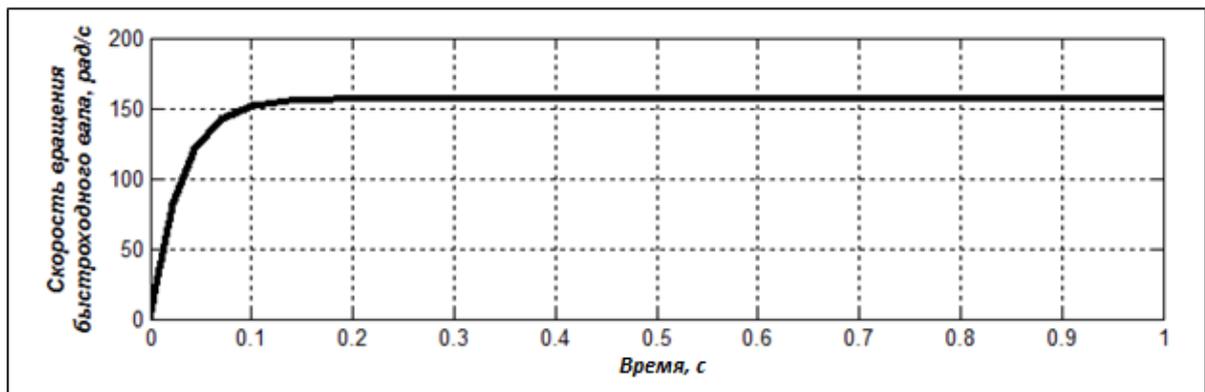


Рисунок 3.8 – Осциллограмма угловой скорости быстроходного вала 157 рад/с

Умножая левую и правую часть формулы скорости выражения быстроходного ротора МР (3.35) на моменты M_2 с учётом соотношения разницы моментов (3.34), получим формулу мощности быстроходного ротора:

$$M_2 \Omega_2 = -M_1 \Omega_1 + M_2 \frac{\omega}{z - p_1}. \quad (3.36)$$

Разница между мощностями тихоходного и быстроходного ротора, отчётливо представляет электромагнитную мощность, которая обменивается

обмотками статора МР с питающей сетью:

$$P_g = M_g \frac{\omega}{p_1}, \quad (3.37)$$

где M_g – электромагнитный момент, создаваемый обмоткой статора и воздействующий на сердечник статора, Н·м.

На рисунке 3.9 показаны результаты моделирование осциллограммы электромагнитной мощности, которая обменивается обмотками статора МР с питающей сетью.

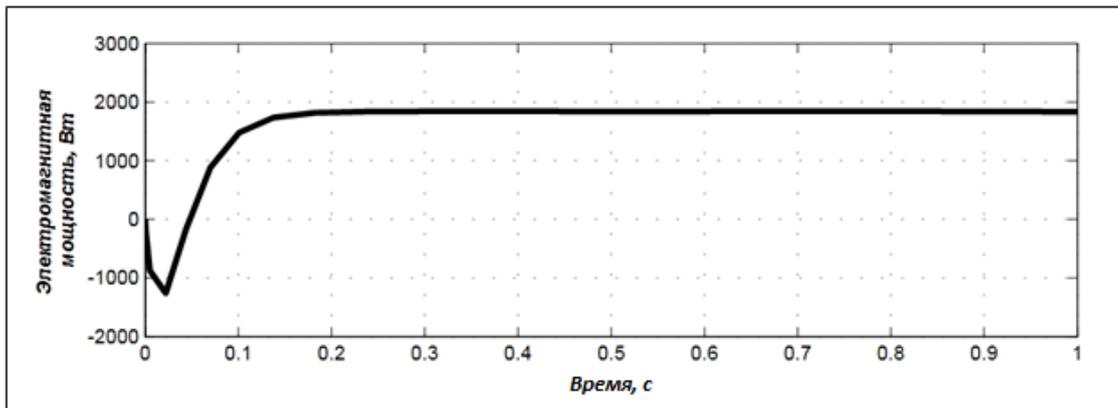


Рисунок 3.9 – Осциллограмма электромагнитной мощности, которая обменивается обмотками статора МР с питающей сетью

Электромагнитный момент, действующий на статор с трёхфазной обмоткой, находим по классической формуле [33, 34, 36, 48]. Результаты электромагнитного момента статора МР приведены на рисунке 3.10.

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_1 \Psi_d I_q \quad (3.38)$$

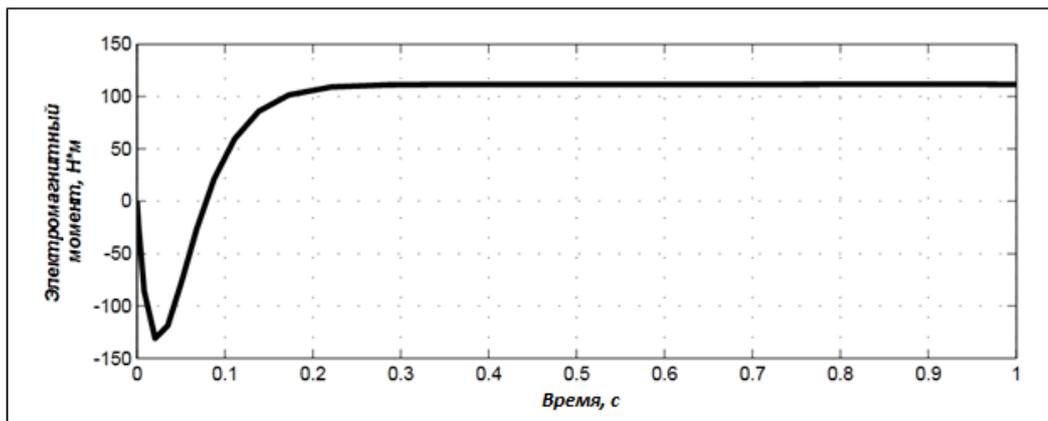


Рисунок 3.10 – Электромагнитный момент статора МР

Тогда величина электромагнитного момента МР определяется по формуле:

$$M_3 \frac{\omega}{p_1} = M_2 \frac{\omega}{z - p_1} \quad (3.39)$$

Вышеприведённые выражения описывают соотношения моментов тихоходного и быстроходного ротора с учётом электромагнитного момента МР (Рисунок 3.11 и 3.12):

$$M_1 = -M_3 \frac{z}{p_1}; \quad M_2 = M_3 \frac{z - p_1}{p_1} \quad (3.40)$$

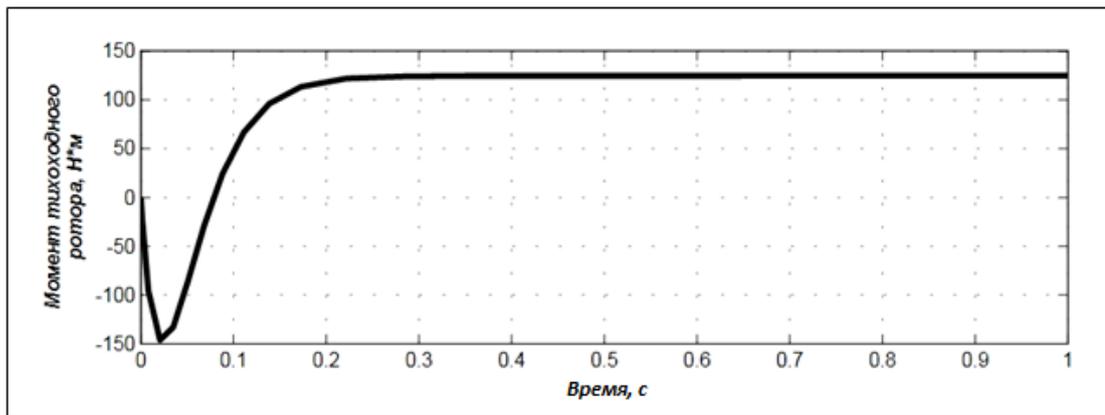


Рисунок 3.11 – Осциллограмма момента тихоходного ротора МР

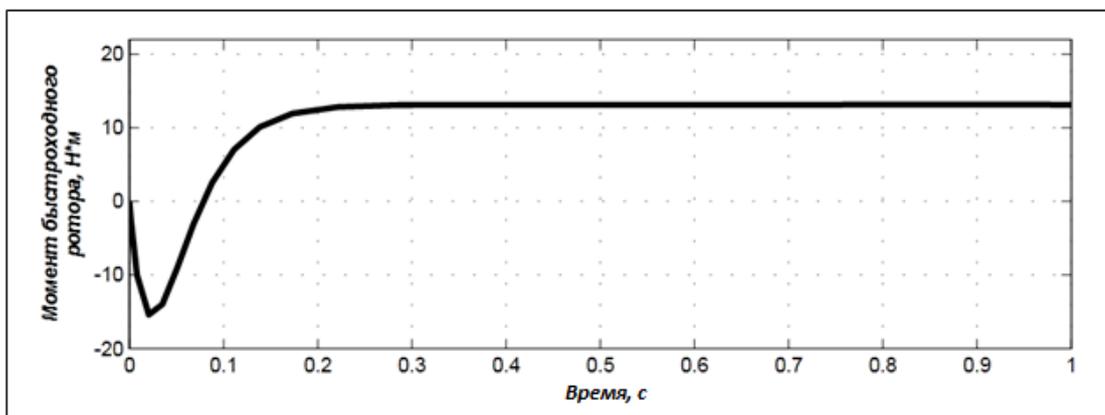


Рисунок 3.12 – Осциллограмма момента быстроходного ротора МР

Тогда баланс моментов тихоходного и быстроходного роторов и электромагнитного момента принципиально должен соответствовать следующему выражению:

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0 \quad (3.41)$$

Моменты M_1 и M_2 на валах МР действуют встречно друг к другу. С учётом баланса моментов (3.41) модуль момента тихоходного вала равняется модулю

суммы быстроходного и электромагнитного момента:

$$|M_1| = |M_2 + M_3| \quad (3.42)$$

Как видно из результата моделирования моментов МР (Рисунки 3.13 и 3.14) сумма моментов при переменной и постоянной скорости вращения первого ротора равно нулю.

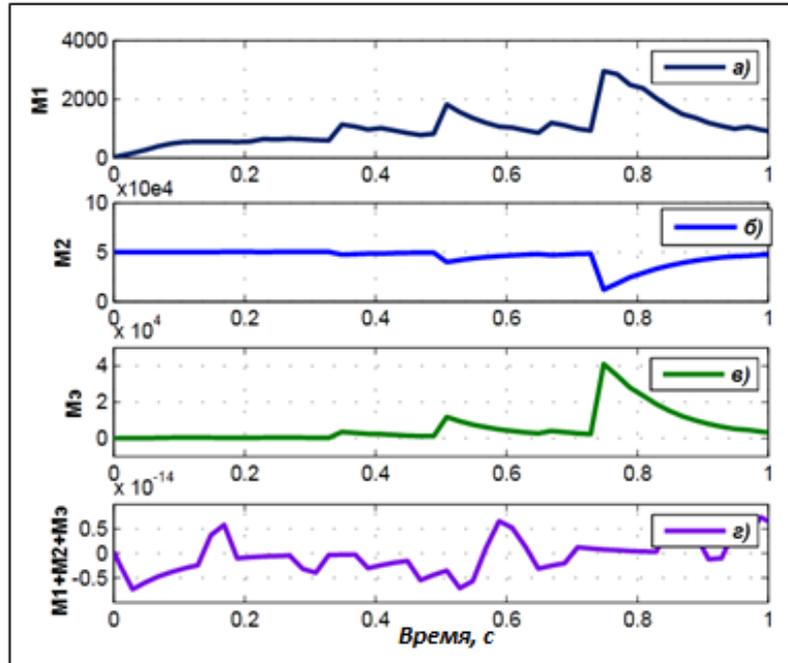


Рисунок 3. 13 – Осциллограмма результатов моделирования моментов магнитного редуктора при переменной скорости вращения первого ротора

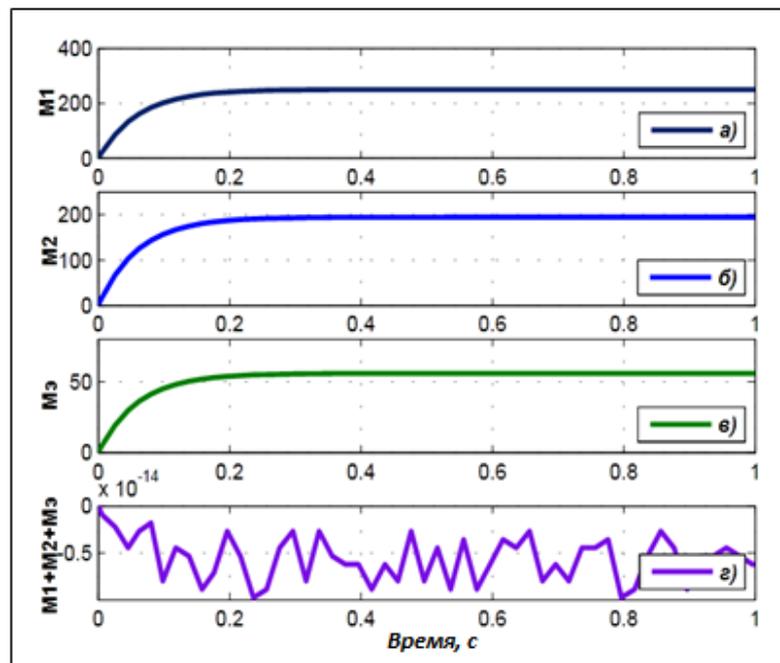


Рисунок 3.14 – Осциллограмма результатов моделирования моментов магнитного редуктора при постоянной скорости вращения первого ротора

Из механики движения равновесия роторов МР видно, что сумма всех сил, действующих на тело, и сумма моментов этих сил равнялись нулю (Рисунки 2.13 и 3.14). Формулы (3.41) также указывают на два важных вывода:

1. Электромагнитные моменты M_1 и M_2 будут всегда присутствовать, если имеется электромагнитный момент M_3 .
2. Для нахождения электромагнитных моментов M_1 и M_2 по формулам (3.80) достаточно определить электромагнитный момент M_3 .

На рисунке 3.15 показаны результаты аналитического расчёта графика зависимости моментов МР по формулам (3.38, 3.40).

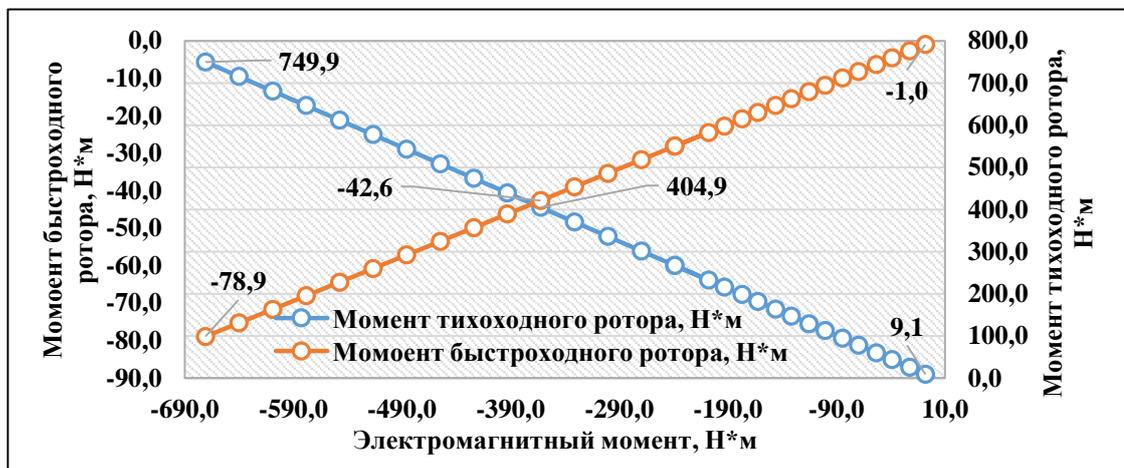


Рисунок 3.15 – Аналитический расчёт графика зависимости моментов МР

Математическое моделирование моментов и угловых скоростей ВЭУ с МР в программе Matlab Simulink показало, что все вышеприведённые математические описания процессов генерирования электроэнергии являются точными и достоверными, что доказывает показания осциллограммы (Рисунки 3.13 и 3.14). Размеры МР на переменном токе, формирующие габариты синхронной машины, будут определяться величиной момента M_1 приложенного на тихоходном валу, т.е. внешнего момента ВК создаваемой скорости ветра, и этот момент будет больше, чем электромагнитный момент M_3 МР. При постоянном и переменном вращении ВК в МР всегда присутствует не только баланс мощности, но и баланс угловых

скоростей всех трёх каналов управления⁷.

Баланс угловых скоростей МР определяется из выражения:

$$\begin{cases} \Omega_2 = \Omega_1 + \Omega_{CT} & \text{при } V_{ветра} \leq V_{уст} \\ \Omega_2 = \Omega_1 - \Omega_{CT} & \text{при } V_{ветра} \geq V_{уст} \end{cases} \quad (3.43)$$

Вышеприведённая круговая диаграмма баланса угловых скоростей МР (Рисунок 3.16) показывает, что угловая скорость магнитного поля статора во время уменьшения и увеличения угловой скорости тихоходного ротора компенсирует и рекуперировывает необходимые угловые скорости в целях стабилизации угловой скорости быстроходного ротора.

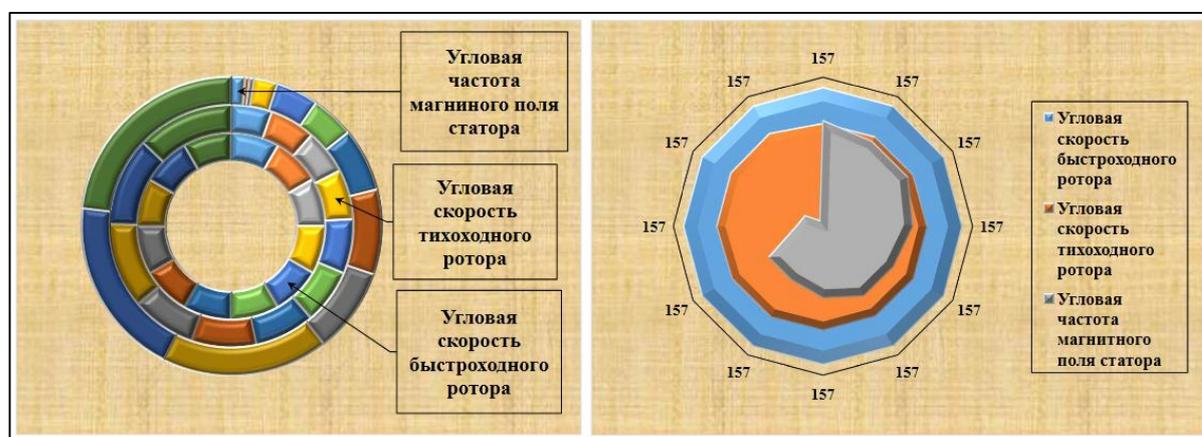


Рисунок 3.16 – Круговая диаграмма баланса угловых скоростей магнитного редуктора при переменной скорости вращения первого ротора

Угловая скорость МР показывает, что при изменении частоты статора ПЧ в заданном диапазоне мы получим две разные угловые скорости: первая – переменная, а вторая – фиксированная.

3.3 Разработка функциональной схемы ветроустановки с магнитным редуктором для стабилизации магнитного поля статора и быстроходного ротора

Основное требование, предъявляемое к параметрам ВЭУ, – это качественная выработка электроэнергии для электроснабжения различных чувствительных и не

⁷ Первый канал – тихоходный ротор, второй канал – статор МР, третий канал – быстроходный ротор.

чувствительных приёмников электроэнергии, подключенных к выходным зажимам ВГ.

Разработанная схема генерирования электроэнергии ВЭУ с МР состоит из сложных электромеханических, электронных и полупроводниковых систем, управление которых взаимодействует между собой, формируя сигналы для стабилизации напряжения и частоты ВГ.

Для стабилизации выходных параметров ВГ рассмотрим схему генерирования ВЭУ с МР (Рисунок 3.17). Магнитный редуктор состоит из статора 3, внешнего ротора 1 и внутреннего ротора 2, которые взаимодействуют между собой разными магнитными индукциями в воздушных зазорах δ_1 , между статором и модулятором и δ_2 , между модулятором и быстроходным ротором. К внешнему ротору 1 присоединён вал ВК, который вращается переменнo в зависимости от градации скорости ветра со скоростью Ω_1 . К внутреннему ротору присоединен вал ВГ со скоростью Ω_2 [37, 50].

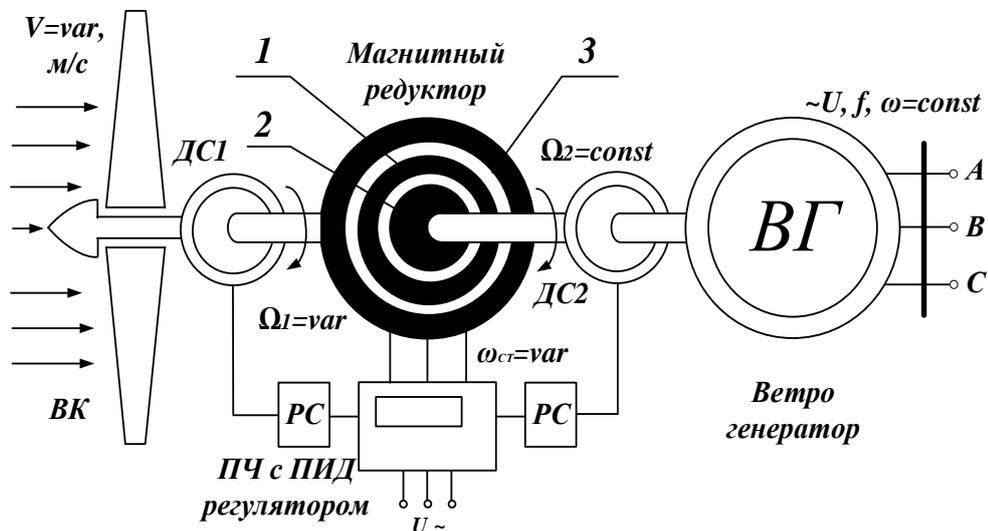


Рисунок 3.17 – Функциональная схема генерирования ВЭУ с МР

Трёхфазная обмотка статора подключена к ПЧ, которая регулирует угловую частоту магнитного поля статора МР и в результате магнитное поле статора МР будет изменяться в зависимости от градации скорости ветра $\pm \Omega_{ст}$. Датчик скорости ДС1 через регуляторы скорости подает сигнал пропорционально, интегрально и дифференциально, в зависимости от изменения скорости ВК $U_{ДС1} = \Omega_1(V)$, а ДС2 в

зависимости от изменения нагрузки на зажимах ВГ $U_{ДС2} = \Omega_2(P)$. Предложенная схема представляет собой замкнутую схему управления и изменяет величину магнитного поля статора МР в зависимости от нагрузки, приложенной на зажимах ВГ.

При моделировании такой схемы необходимо рассчитать оптимальную скорость ветра для того, чтобы рационально выбрать основные оборудования ВЭУ с МР. При увеличении ветра до предельного заданного значения входной скорости вращения модулятора, значение выходной частоты ПЧ равняется нулю, а при увеличении скорости ветра от допустимого значения из выходных зажимов статора МР избыточная мощность рекуперуется обратно в сеть и выходная скорость МР остается неизменной на заданном уровне.

При уменьшении скорости ветра и, соответственно, тихоходного ротора скорость вращения быстроходного вала и генератора уменьшается, тогда сигнал датчика, который установлен на валу ВК, уменьшается, и регулятор скорости с учётом сигнала датчика скорости $ДС1$ увеличивается для увеличения выходной частоты ω ПЧ. Для стабилизации скорости вращения выходного вала при разных скоростях вращения входного вала способствует регулятор скорости с пропорционально-интегральной и дифференциальной функцией.

Такую схему генерирования ВЭУ с МР можно моделировать в разомкнутой и замкнутой системах управления ВЭУ с МР.

Результаты моделирование схемы генерирования ВЭУ с МР по формулам 3.20, 3.21, 3.22 и с учётом функциональной схемы рисунка 3.17 показало, что при изменении угловой скорости ВК от 0 до 20 рад/с необходимо регулировать частоту статора ПЧ в диапазонах от 0 до 50 Гц, для стабилизации угловой скорости вращения выходного ротора до заданного значения (заданная значение выходного ротора при моделировании $\Omega_2 = 78,5$ рад/с).

Благодаря такой трансмиссионной характеристике МР позволяет стабилизировать выходные электрические параметры ВГ независимо от градации скорости ветра на ВК (Рисунки 3.18 и 3.19).

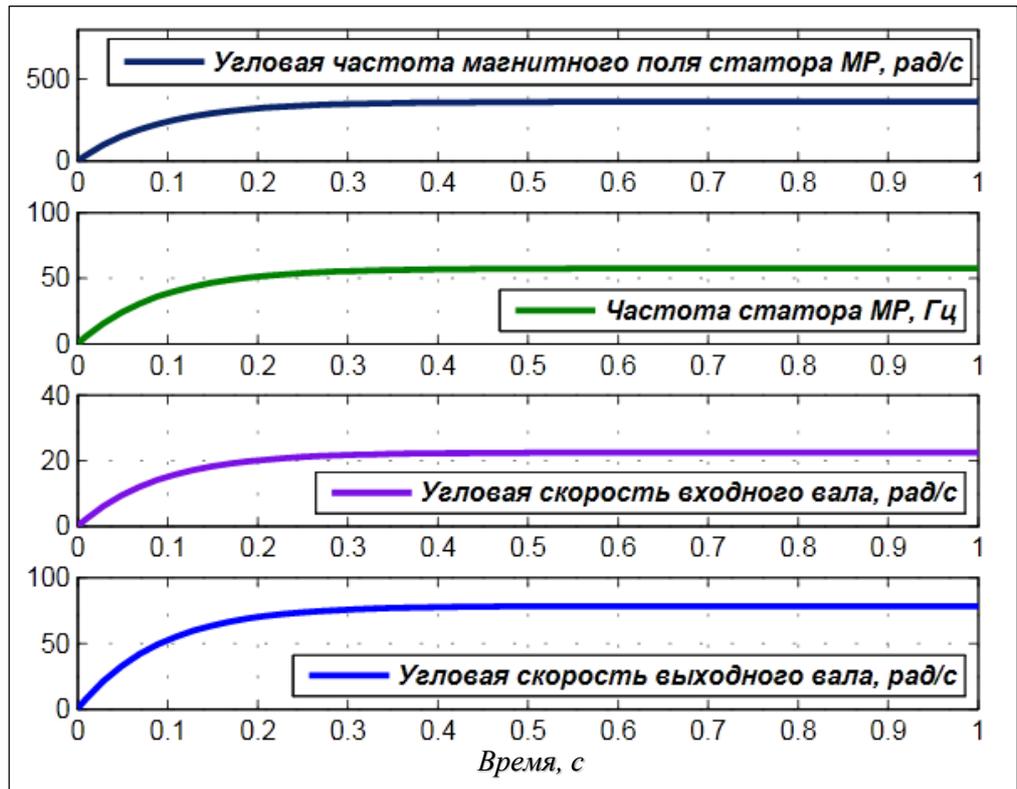


Рисунок 3.18 – Характеристики скорости вращения выходного вала ВЭУ с МР при постоянной скорости входного ротора

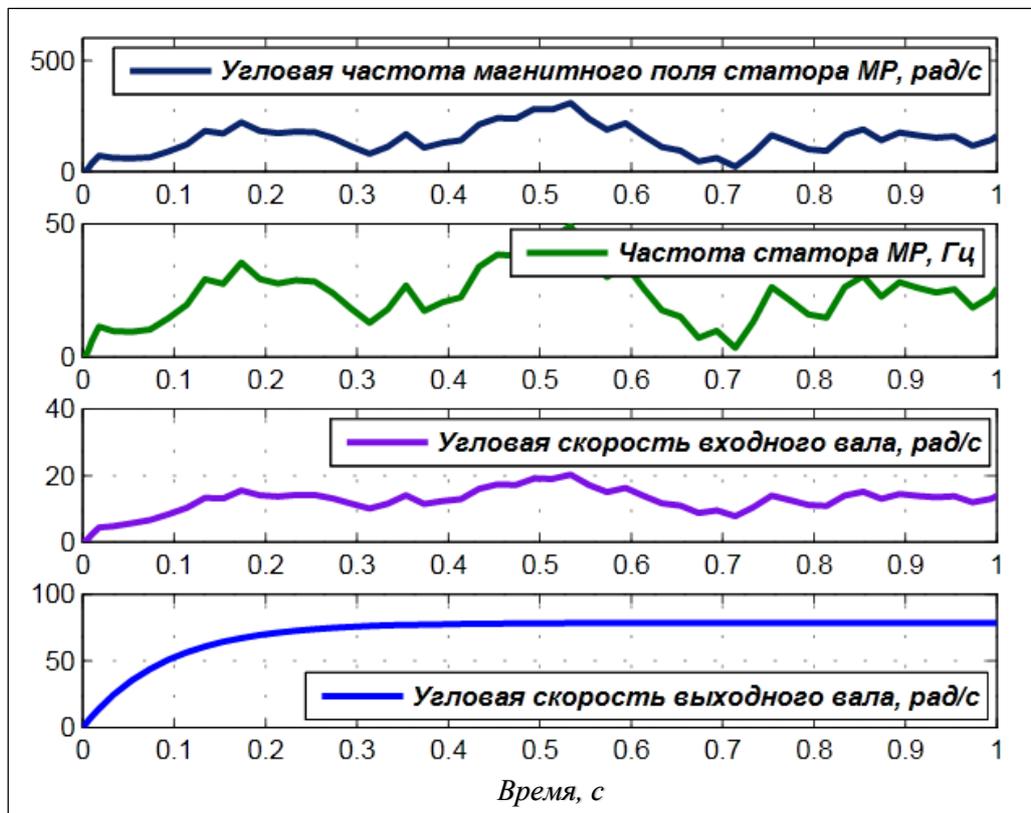


Рисунок 3.19 – Характеристики стабилизации скорости вращения выходного вала ВЭУ с МР при переменной скорости входного ротора

Схема автоматического управления ВЭУ с МР является электромеханическим комплексом и включает в себя механический, электромеханический, электронный, регулирующий микропроцессорные полупроводниковые органы, которые, взаимодействуя между собой, формируют различные сигналы управления для поддержания устойчивой работы и качественного генерирования электроэнергии с учётом внешних возмущений.

В рассматриваемой структурной схеме (Рисунки 3.20 и 3.21) приведён процесс регулирования основных частей путём формирования сигналов исходящих от нескольких параметров, таких как скорость, частота, напряжение и ток статора МР, управляемые через ПЧ с ПИД регулятором.

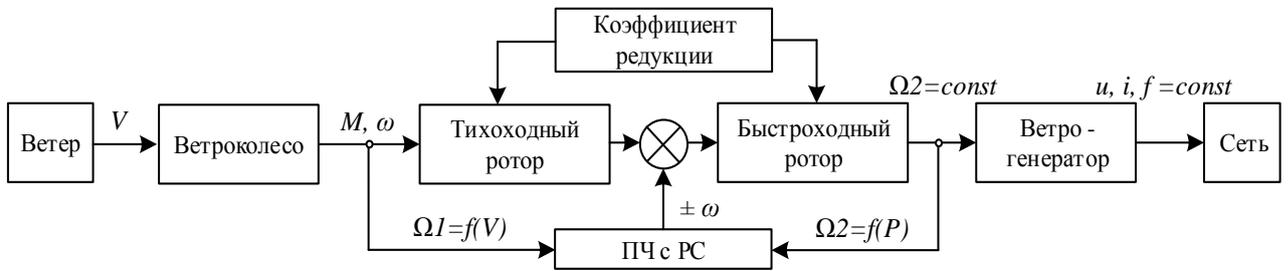


Рисунок 3.20 – Структурная схема управления основными устройствами модели ВЭУ с МР

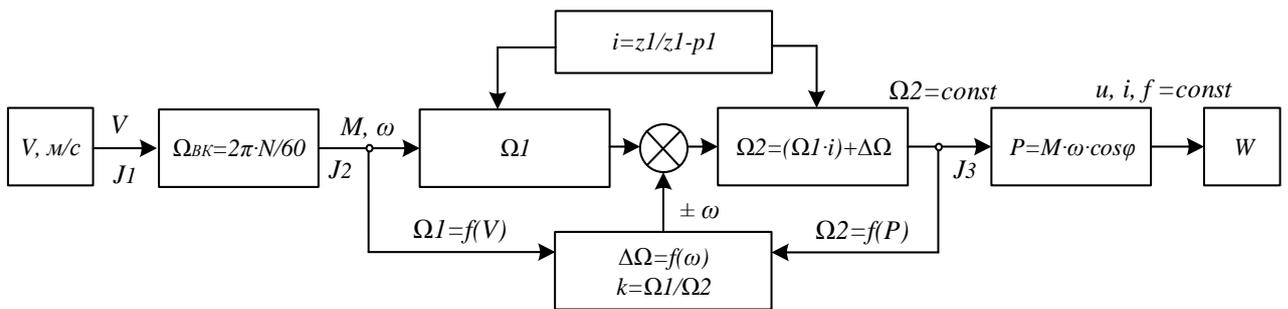


Рисунок 3.21 – Структурная схема управления математической модели ВЭУ с МР

Рассматривая МР в качестве многополюсника (Рисунок 3.22) с различными входными и выходными электромеханическими параметрами, составим упрощённую схему многополюсника МР при постоянных и переменных электромеханических величинах, действующих между собой при стабилизации выходного вала.

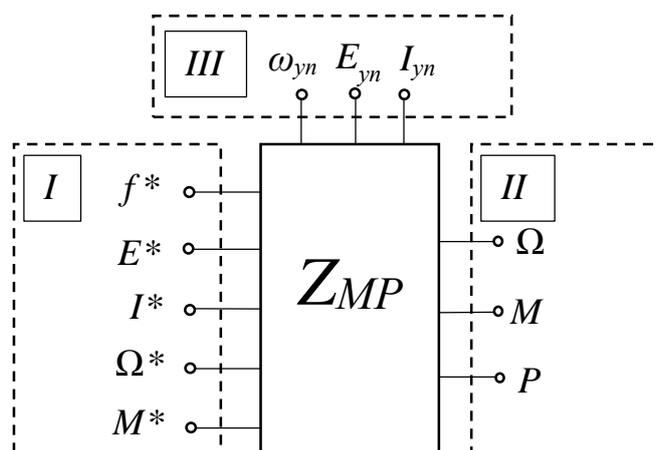


Рисунок 3.22 – Схема многополюсника магнитного редуктора

В многополюснике первый контур является блоком переменной величины входа, второй контур – постоянным заданным значением, а третий – управляющим контуром, предназначенным для поддержания всех заданных значений второго контура (выхода многополюсника).

3.4 Алгоритм автоматизированной работы ветроустановки с магнитным редуктором и моделирование режима рекуперации электрической энергии от статора магнитного редуктора

Алгоритм автоматизированной работы ВЭУ с МР (Рисунок 3.23) работает следующим образом. Переменная скорость ветра поступает в лопасти, которые соединены с входным валом МР и имеют угловую скорость Ω_l . Датчик скорости, который расположен на тихоходном валу, формирует сигнал в зависимости от скорости вращения ВК и поступает на РС. Регулятор скорости на основе усилителей ПИД выдаёт сигнал на ПЧ, подключённую к статору МР для изменения величины угловой частоты магнитного поля статора. В алгоритме рассмотрены два сигнала датчика скорости: первый на тихоходном и второй на быстроходном валу. Первый датчик формирует сигнал в зависимости от скорости ветра, а второй – в зависимости от нагрузки приложенного на вал ВГ. В зависимости от сигналов РС ПЧ корректирует частоту питания магнитного поля статора в диапазоне

$0 \leq f \leq \infty$. При регулировании частоты статора выходной вал вращается с постоянной частотой, т.е. $n_{ном} = const$, $\omega_{ном} = const$. Избыточная мощность из зажима обмотки статора МР при увеличении скорости ветра рекуперируется и поступает в универсальный контроллер (УК). На выходе УК установлен выпрямитель для преобразования переменного тока в постоянный для зарядки аккумуляторов. Инвертор преобразовывает постоянный ток аккумулятора в переменный для отдачи избыточной мощности в сеть.

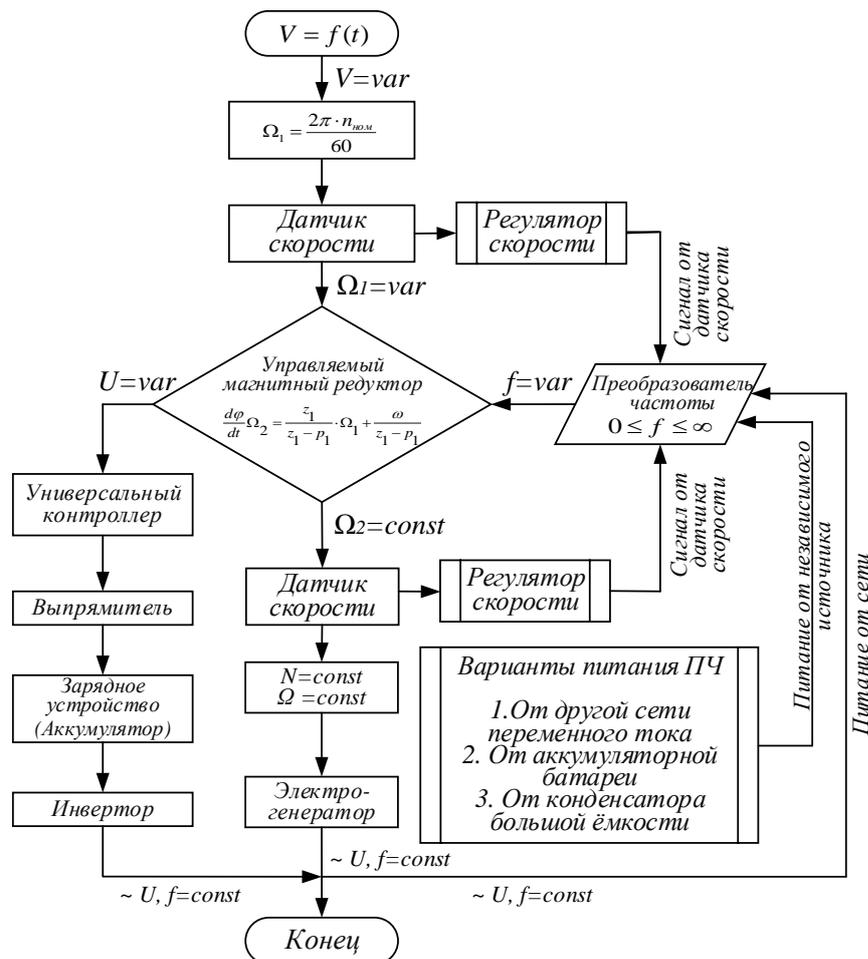


Рисунок 3.23 – Алгоритм автоматизированной работы ВЭУ с магнитным редуктором для стабилизации скорости вращения электрогенератора

Новый алгоритм автоматизированной работы ВЭУ с МР позволяет максимально использовать энергию ветра за счёт рекуперации излишков мощности статорной обмотки МР, в случае увеличения скорости ветра и при этом максимально используется энергия ветра.

На рисунке 3.24 показан алгоритм автоматизированной работы статического ПЧ, подключённого к статору МР, во время питания и рекуперации энергии от статора.

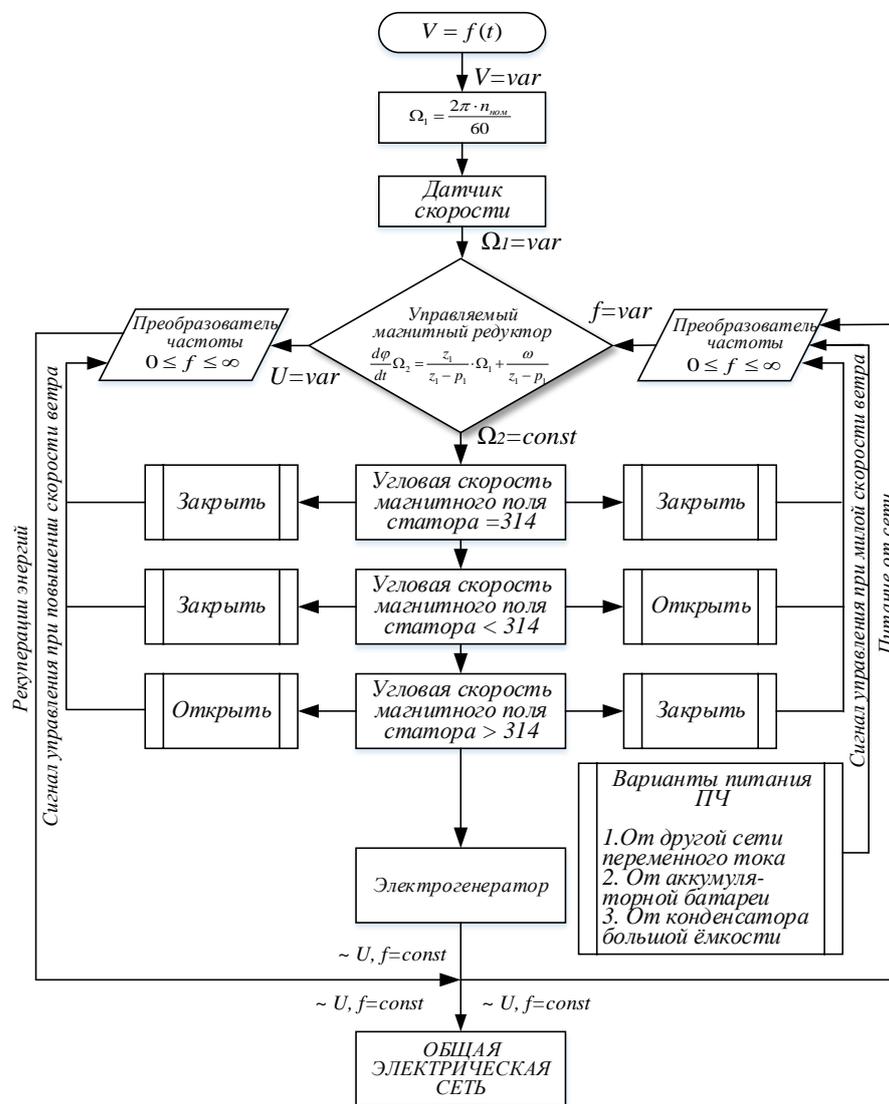


Рисунок 3.24 – Алгоритм автоматизированной работы статического ПЧ, подключённого к статору МР во время питания и рекуперации энергии от статора

Разработанный алгоритм фиксирует три положения угловой скорости магнитного поля статора МР. Первое, когда угловая скорость магнитного поля статора равна 314 рад/с, в это время сигнал не поступает на управляющие электроды транзисторов ПЧ и оба транзистора ПЧ находятся в закрытом положении. Второе, когда угловая скорость магнитного поля статора меньше 314 рад/с, в это время сигнал управления поступает для открытия транзисторов ПЧ2, в целях отдачи частоты в статор МР. Третье, когда угловая скорость

магнитного поля статора больше 314 рад/с, в это время сигнал управления поступает для открытия транзисторов ПЧ1, в целях рекуперации частоты и электрической энергии от статора МР.

Алгоритм автоматизированной работы и регулирования электромеханических частей ВЭУ с МР включает в себя следующие основные функции:

1. Выявление требуемого уровня скорости в пределах диапазона регулирования с учётом минимума и максимума значений тока и напряжения статора МР.

2. Поддержание установленного значения скорости с учётом внешних воздействий и возмущения при переменчивом значении мощности на зажимах ВГ:

3. Автоматическое устранение влияния внутренних значений, т.е. влияние основных инерционных моментов на итог регулирования выходных электрических параметров ВГ.

4. Регулирование скорости вращения быстроходного вала МР с учётом моментов инерций на валах и моментов нагрузки, приложенных на ВГ в виде нагрузки.

5. Рекуперация избыточной энергии из статора МР через ПЧ во время увеличения скорости вращения ВК от заданного максимального диапазона вращения.

3.5 Регуляторы в системе управления преобразователя частоты, подключённым к обмотке статора магнитного редуктора

Регулятор - управляющее устройство, которое формирует сигнал ошибки для регулирования системы. Для управления регуляторов служат сигналы отрицательной обратной связи, от статических и динамических систем. Регуляторы формируют сигнал ошибки по математическим законам, таким как пропорциональный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) [54, 86].

Математический закон регулятора типа ПИД:

$$h(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^{\tau} e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.44)$$

где $h(t)$ – изменяющая функция во времени, в нашем случае изменяющая скорость входного вала МР $\Omega(t)$;

P, I, D – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие переменной функции $h(t)$;

K_p, K_i, K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты переменной функции $h(t)$.

Тогда с учётом изменяющейся скорости входного вала МР $\Omega(t)$, математический закон регулятора типа ПИД принимает вид;

$$\Omega(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^{\tau} e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.45)$$

ПИД-регуляторы широко используются во всех звеньях электропривода и позволяют компенсировать инерционные силы при быстродействии всей системы регулирования.

Выполним расчёт параметров ПИД-регулятора скорости для системы ВЭУ с МР:

Для ПИД-регуляторов скорости справедливы следующие передаточные функции и равенства:

$$W_{PC} = K + \frac{1}{T_I} = K_{PC} \cdot \frac{T_{OC}P + 1}{T_{OC}P}, \quad (3.46)$$

$$K_{PC} = \frac{R_{OC}}{R_{BX1}}, \quad (3.47)$$

$$T_{OC} = R_{OC} \cdot C_{OC}, \quad (3.48)$$

$$K_{OC} = K_{TF} \frac{R_{BX1}}{R_{BX2}}. \quad (3.49)$$

Вышеприведённые равенства позволяют рассчитать параметры ПИД - регулятора тока, схема которого приведена на рисунке 3.25.

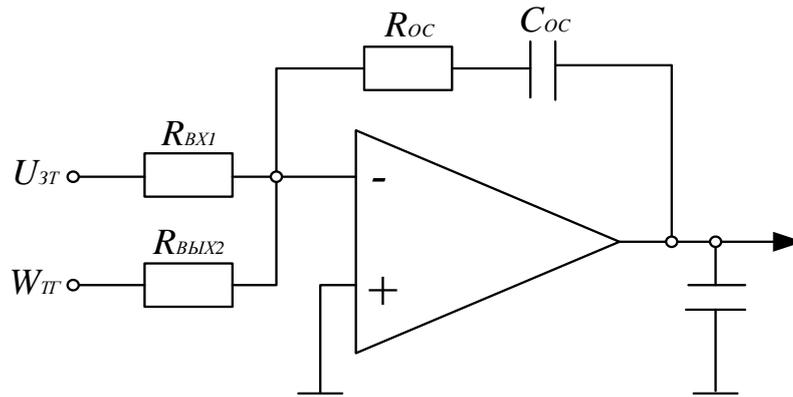


Рисунок 3.25 – Схема ПИД-регулятора скорости на основе операционного усилителя

Определяем постоянную времени статора МР:

$$T_C = \frac{L_{CМР}}{R_{CМР}} \quad (3.50)$$

Электромеханическая постоянная времени первого ротора МР:

$$T_{M1} = J_1 \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta M} \quad (3.51)$$

Электромеханическая постоянная времени второго ротора МР:

$$T_{M2} = J_2 \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta M} \quad (3.52)$$

Напряжение ПИД-регулятора скорости:

$$U_{3T} = \frac{I_{cm}}{K_T} \quad (3.53)$$

При установке тахогенератор (ТГ) на валах – как основной датчик скорости, который подаёт сигнал на ПИД – регулятор и служит для формирования сигнала статического преобразователя частоты. Коэффициент ТГ определим из выражения:

$$K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ}}{\omega} \quad (3.54)$$

Коэффициент передачи потенциометрического делителя в цепи ТГ, который присоединён к выходному валу МР:

$$K_{oc} = K_{ТГ} \frac{R_{BX1}}{R_{BX2}} \quad (3.55)$$

Тогда находим входное сопротивление аналогового ПИД-регулятора скорости:

$$R_{BX2} = K_{IT} \frac{R_{BX1}}{K_{OC}} \quad (3.56)$$

Передаточный коэффициент пропорциональной составляющей регулятора скорости:

$$K_{PC} = \frac{K_T \cdot c \cdot T_{M2}}{r_{ял} \cdot K_{OC} \cdot T_{M1}} \quad (3.57)$$

Передаточный коэффициент интегральной составляющей регулятора скорости:

$$K_{II} = \frac{K_{PC}}{T_{M2}} \quad (3.58)$$

Коэффициент регулятора скорости по сопротивлениям:

$$K_{PC} = \frac{R_{OC}}{R_{BX1}} \quad (3.59)$$

Тогда находим величину РС обратной связи и их постоянного времени работы:

$$R_{OC} = R_{BX1} \cdot K_{PC}, \quad (3.60)$$

$$T_{OC} = T_{M2} \cdot R_{OC} \cdot C_{OC}, \quad (3.61)$$

$$C_{OC} = \frac{T_{M2}}{R_{OC}}. \quad (3.62)$$

Для математического описания ВЭУ сначала найдем передаточную функцию МР. Зная число пар полюсов статора $p = 17$ и число стержней статора $z = 19$, найдем коэффициент редукции роторов МР:

$$i_{p1} = \frac{z}{z - p}, \quad (3.63)$$

$$i'_{p2} = \frac{1}{p - z}. \quad (3.64)$$

Для составления динамического состояния ВЭУ определим постоянную времени статора и роторов МР.

$$T_{CTMP} = \frac{X_{CTMP}}{R_{CTMP} \cdot \omega}, \quad (3.65)$$

$$T_{m1} = J_1 \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta M}, \quad (3.66)$$

$$T_{m2} = J_2 \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta M}. \quad (3.67)$$

Учитывая все вышеприведённые расчеты, передаточную функцию МР запишем следующим образом:

$$W_{P1}(p) = \frac{i_p}{(T_{m1}p + 1) \cdot (T_{CTMP}p + 1)}, \quad (3.68)$$

$$W_{P2}(p) = \frac{i_{p2}}{(T_{m2}p + 1) \cdot (T_{CTMP}p + 1)}. \quad (3.69)$$

На основе вышеприведённых расчётов моделируем ПИД-регулятор скорости в платформе программы Matlab Simulink (Рисунок 3.26).

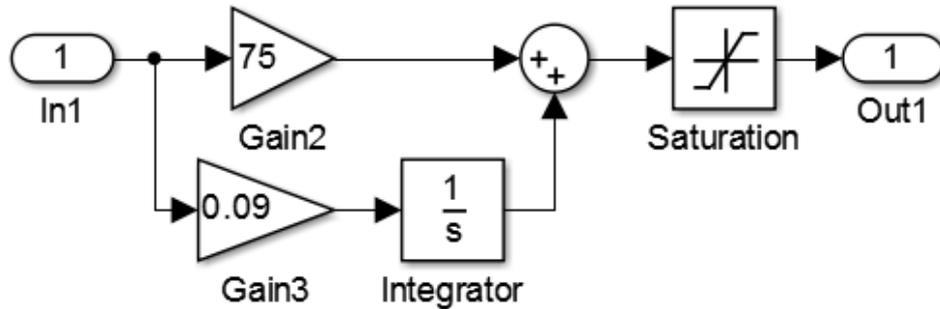


Рисунок 3.26 – Модель регулятора скорости в программе Matlab Simulink

Модель, представленная в виде ПИД-регулятора, выполняет функцию работы аналогового и цифрового регулятора скорости и даёт сигнал на ПЧ для изменения частоты магнитного поля статора МР. На основе модели регулятора моделируем схему ВЭУ с МР в программе Matlab Simulink (Рисунок 3.27).

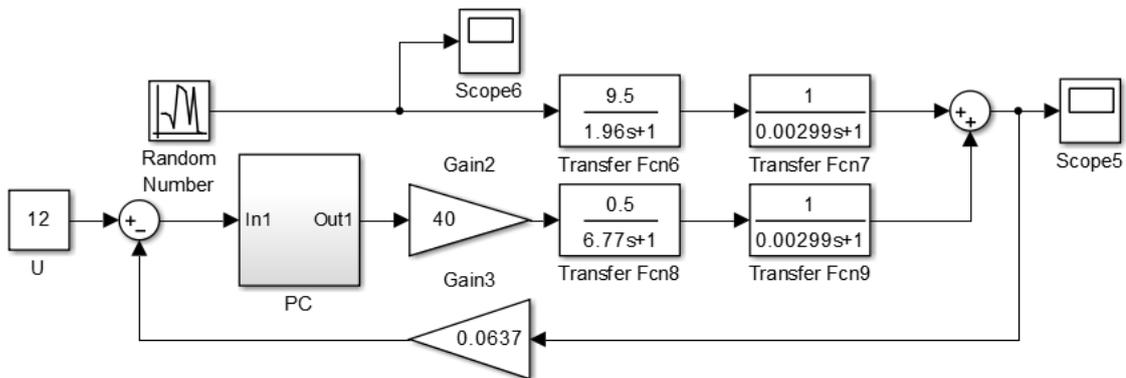


Рисунок 3.27 – Модель ВЭУ с МР в динамическом режиме с регулятором скорости на выходном валу

В нижеприведённых моделях и структурной схеме управление (Рисунок 3.28) осуществляются на основе частотных и сигнальных методов управления в программе Matlab Simulink (Рисунок 3.29). Как видно из структурной схемы при моделировании систем управления и стабилизации выходного вала МР во всех элементах присутствует значение ошибки от e_1 до e_4 . В структурной схеме входная величина это ВК, а измерительный прибор ИП1 измеряет значение угловой скорости ВК. В физической модели блоки ИП служат как датчики скорости валов. Как было указано выше МР имеет три канала управления: 1 – ротор тихоходного вала, 2 – статор МР и 3 – ротор быстроходного вала. При моделировании, отрицательная обратная связь поступает на 2-й канал управления для стабилизации тока, напряжения и частоты магнитного поля статора и, по сути, значения этого канала должны быть постоянными.

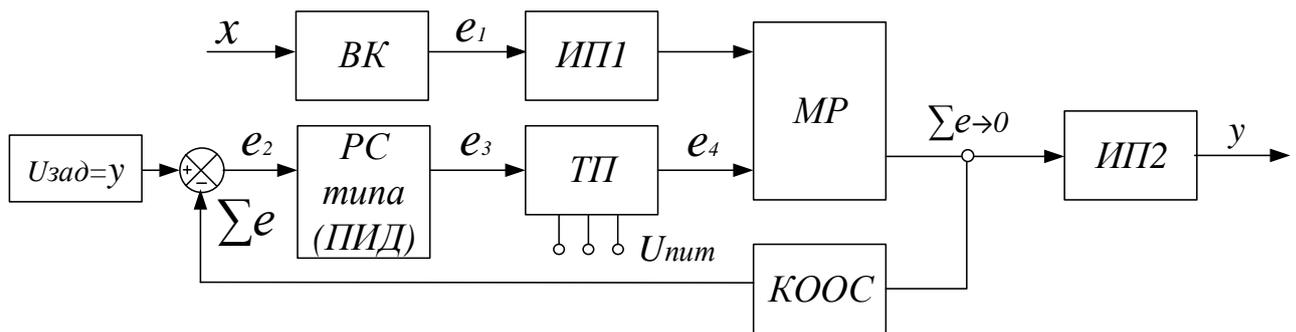


Рисунок 3.28 – Структурная схема управления ВЭУ с МР с отрицательной обратной связью с ПИД – регулятором

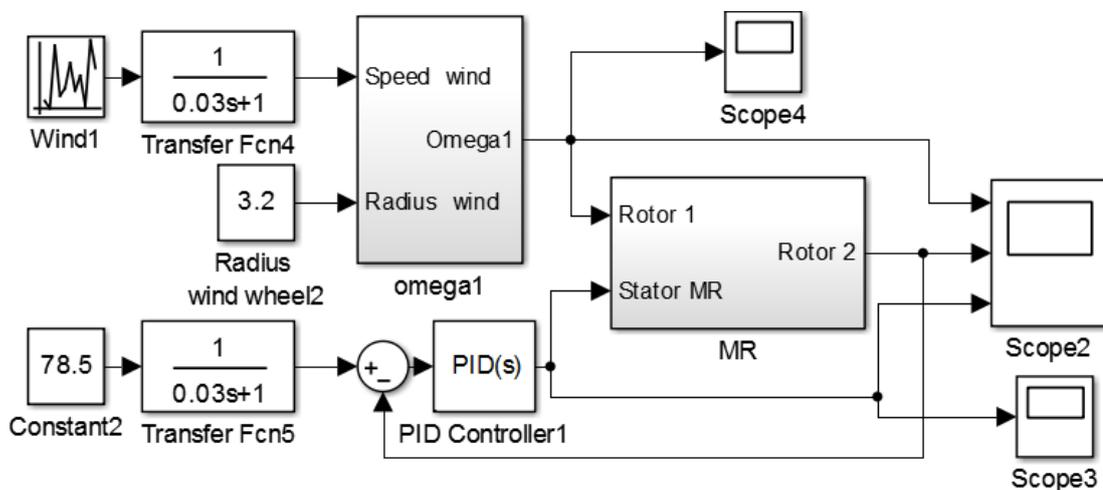


Рисунок 3.29 – Динамическая модель ВЭУ с МР с отрицательной обратной связью по скорости и с ПИД – регулятором в программе Matlab Simulink

Сигнал обратной связи поступает в ПИД от 2-го канала на регулятор с учётом всех ошибок во всех узлах управления, формирует сигнал $U_{зад} = y_{зад}$ и корректирует (пропорционально, интегрально и дифференциально) частоту магнитного поля статора с помощью ПЧ. Результаты моделирования стабилизации скорости вращения быстроходного вала МР приведены на рисунке 3.30.

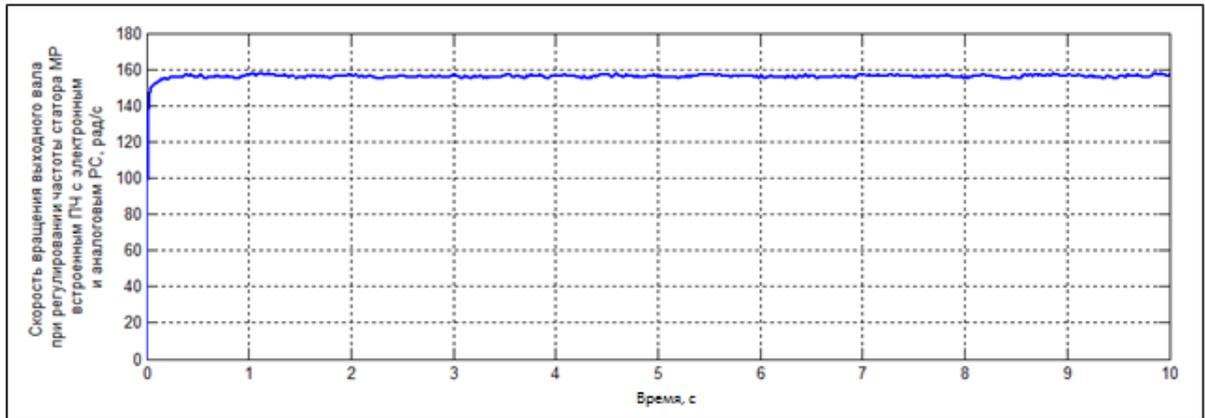


Рисунок 3.30 – Скорость вращения выходного вала МР при регулировании частоты магнитного поля статора МР встроенной ПЧ с электронным и аналоговым РС

Формирующая сигнал на выходе ПЧ, подключенного на статоре МР:

$$y(t) = k_{П} \left[\varepsilon(e) + \frac{1}{T_{И}} \int_0^t \varepsilon(t) dt \right] \quad (3.70)$$

Приведённая структурная схема управления ВЭУ с МР является инерционно-динамической системой, состоящей из двух разных валов с разными угловыми скоростями. Каждый вал соединён с разными по величине конструкциями, которые состоят из ВК, МР с двумя роторами и ВГ. Сложность такой системы состоит в том, что на каждый вал взаимодействуют разные переменные динамические силы.

3.6 Функциональные схемы управления ветроустановки с магнитным редуктором

Схема генерирования ВЭУ с трансмиссионным МР переменного тока строится на базе синхронного генератора с двумя короткозамкнутыми роторами с частотным управлением статора, при этом в качестве регулирующего и

стабилизирующего источника питания применяются полупроводниковые преобразователи частоты, работающие в режиме источника напряжения (ПЧН), источника тока (ПЧТ) или частоты.

Точное и рациональное управление МР зависит от технических и энергетических характеристик системы ВЭУ, где МР работает как основной трансмиссионный электропривод, который установлен между ВК и ВГ двумя независимыми валами. В МР с ограниченным диапазоном регулирования и отсутствием динамических режимов применяется частотный параметрический способ управления, при котором регулируется частота и действующее значение выходного напряжения ПЧН в соответствии с заданной скоростью одного или обоих валов.

В МР с диапазоном регулирования до 100, к которым предъявляются высокие требования в динамическом режиме, применяется частотно-токовый способ регулирования. При этом регулируется частота и действующие значения выходного тока ПЧТ в зависимости от абсолютной величины скольжения (разности скорости ротора относительно заданного значения) и при заданной скорости действующей нагрузки. В этой системе управление мгновенным значением трёхфазных питающих напряжений и токов осуществляется с использованием векторного принципа регулирования.

Частотное регулирование МР осуществляется ПЧ по принципу отношения величины питающего напряжения к частоте $U_{ПЧ}/f_{ПЧ}$. Регулируемая частота ПЧ определяется величиной, задаваемой ω_z скоростью вращения второго вала МР, которая жестко связана с роторами ВГ. Регулируемая частота статора МР линейно изменяется в зависимости от заданного напряжения и изменяется с характеристикой $f_{ПЧ}(u_{zc})$. Функциональная схема такой системы МР приведена на рисунке 3.31. В канал регулирования напряжения включается функциональный преобразователь ФП, который обеспечивает требуемое соотношение между частотой вращения первого вала МР и выходным напряжением ПЧ, подключённого к статору МР. При этом необходимо предусмотреть отрицательную обратную связь по выходному напряжению ПЧ $U_{ПЧ}$, чтобы ПЧ обладал свойством источника

напряжения в зависимости от скорости. Это связь позволяет точно выполнить требуемое соотношение между частотой и напряжением.

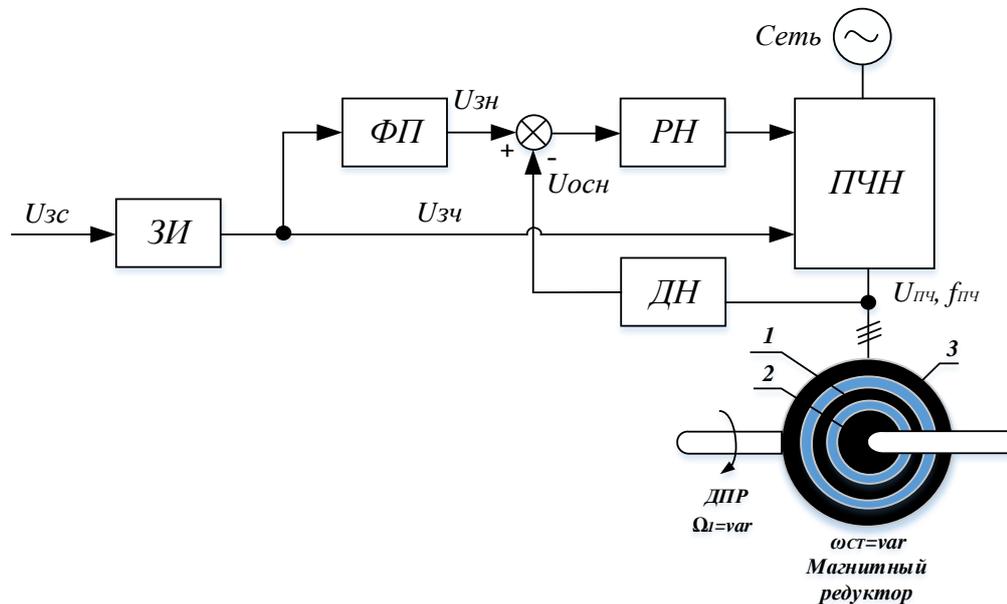


Рисунок 3.31 – Функциональная схема управления МР с ПЧН

Другим видом системы регулирования МР с помощью статического ПЧ является изменение параметров напряжения и частоты $U_{ПЧ} / f_{ПЧ}$ статора МР по системе электропривода с частотным регулированием скорости.

Режим работы МР с высоким диапазоном регулирования и высокими динамическими режимами работы, с частыми пусками, торможениями и внезапными реверсами, принимается система с частотно-токовым управлением (Рисунок 3.32). В таких схемах ПЧ работает в режиме источника тока типа ПЧТ, которое управляется с отрицательной обратной связью по току статора и скорости входного вала МР. Такая система регулирования осуществляется с заданной скоростью и нагрузкой на валу управляющего МР и имеет большой диапазон регулирования скорости до $D_{рег}=100:1$.

Функциональная схема МР с частотно-токовым управлением (Рисунок 3.33) имеет два канала управления: первый – канал изменяет частоту и угловую скорость магнитного поля статора, второй – токовый, который управляет значением тока в статоре МР. Выходная частота ПЧТ формируется пропорционально заданной скорости и скорости изменения входного вала (тихоходного ротора) и ток статора I_2

формируется в зависимости от величины разности заданной скорости и фактической скорости вала с учётом моментов инерции.

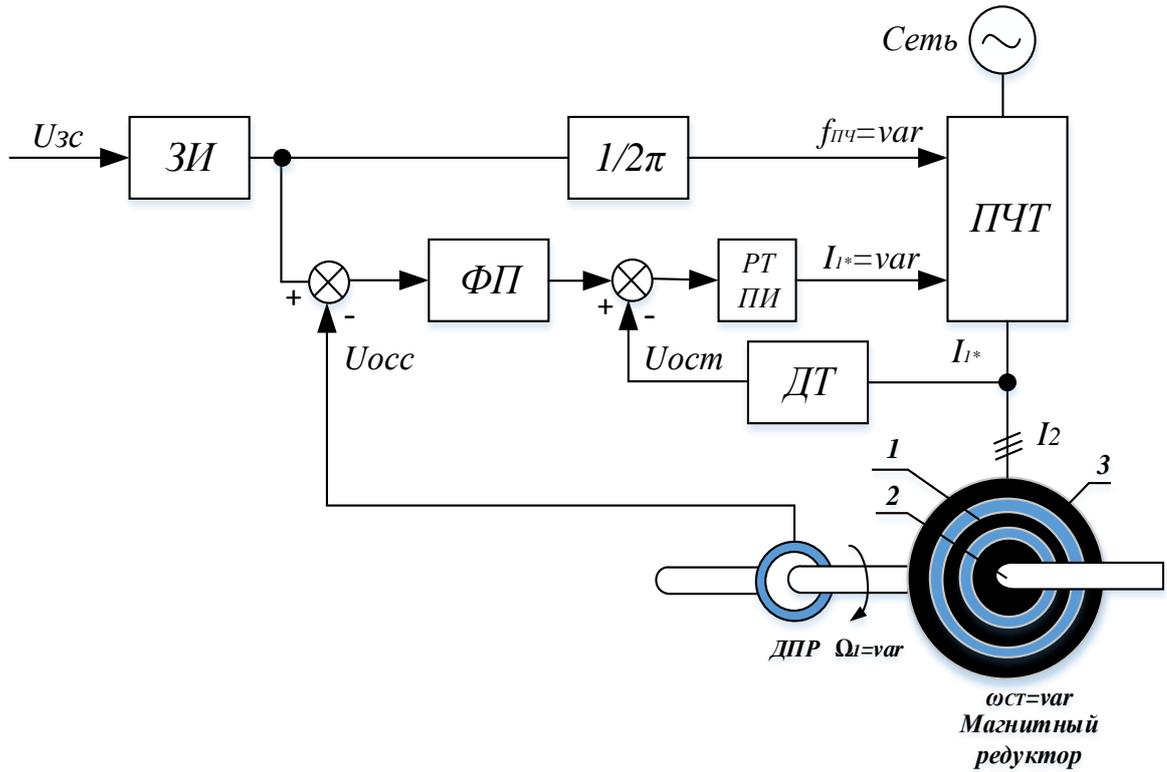


Рисунок 3.32 – Функциональная схема управления МР с ПЧТ

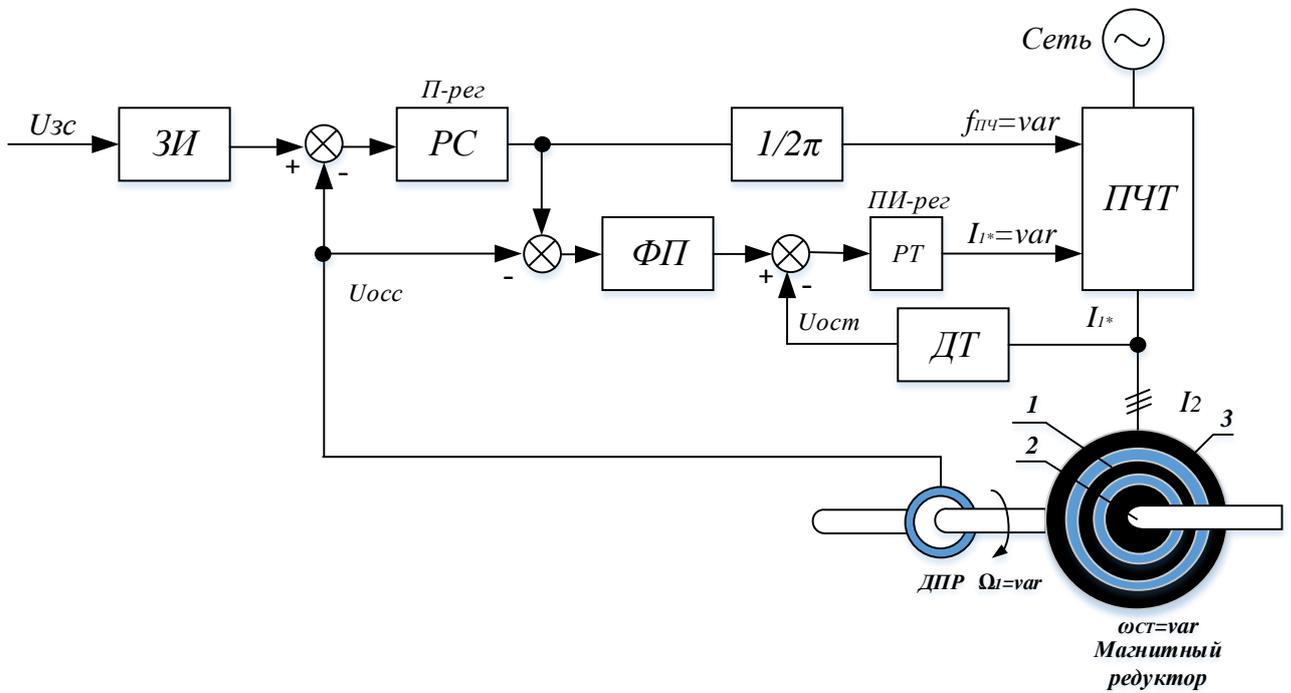


Рисунок 3.33 – Функциональная схема управления МР с ПЧТ с сравнивающим сумматором частоты и тока

Заданный ток формируется в блоке функционального преобразователя (ФП). Для повышения точного регулирования в схеме предусмотрено РТ типа ПИ (можно использовать ПИД) и отрицательная обратная связь по току статора с датчиком тока ДТ. Измерение величины скорости осуществляется датчиком скорости (ДТ). В качестве датчика скорости вала ротора служит датчик положения ротора (ДПР) (Рисунок 3.34).

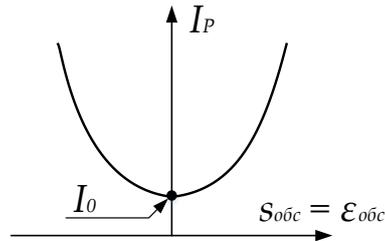


Рисунок 3.34 – Регулировочная характеристика функционального преобразователя (зависимость изменения тока на выходе ФП от абсолютного скольжения и скорости ДПР от заданного)

Величина тока ПЧТ состоит из активной части, а реактивная часть пропорционально току намагничивания статора I_0 , поддерживается постоянной.

Заданный ток состоит из активных и реактивных токов:

$$I_{зад} = \sqrt{I_P^2 + I_0^2}, \quad (3.71)$$

где I_P – активный расчётный ток статора, А;

I_0 – реактивный ток намагничивания статора, А.

Абсолютное скольжение или ошибка по заданной скорости и скорости ДПР определяется по формуле:

$$s_{обс} = \epsilon = \omega_{зад} - \omega_{ДПР}, \quad (3.72)$$

где $\omega_{зад}$ – заданная скорость вращения, рад/с;

$\omega_{ДПР}$ – фактическая скорость вращения датчика положения ротора, рад/с.

Предложенная функциональная схема управления ВЭУ с МР (Рисунки 3.35 и 3.36) на тихоходном валу имеет датчик положения ротора (ДПР). Этот датчик (резольвер) в зависимости от скорости вращения вала ротора выдает сигнал на РС. На выходных зажимах МР, которые подключён ПЧ, одновременно

соединен датчик тока (ДТ), который формирует сигнал в зависимости от величины тока статора. Блок управления, выпрямитель и инвертор (БУВ, БУИ) управляют электродами транзисторов, вызывая сигнал открытия и закрытия в соответствии с пространственным положением тихоходного ротора МР. Наличие двух сигналов управления обеспечивает жёсткую позитивную связь между переключением тока в обмотках статора и пространственным (угловой скоростью) положением тихоходного ротора относительно заданного значения угловой скорости быстроходного ротора МР.

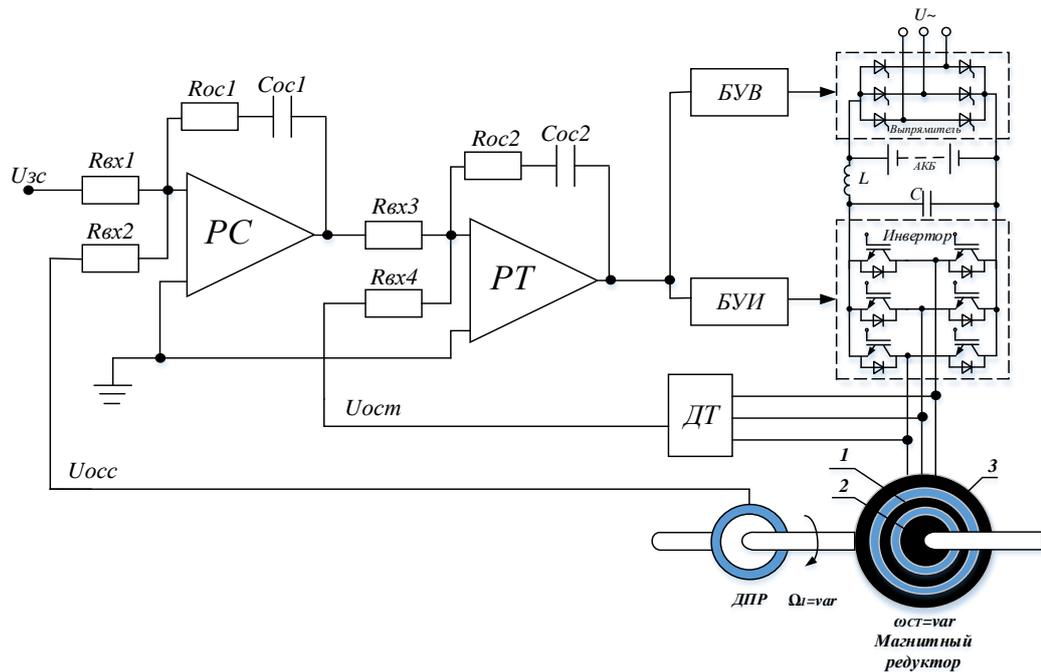


Рисунок 3.35 – Схема управления ВЭУ с МР с регулятором тока и скорости

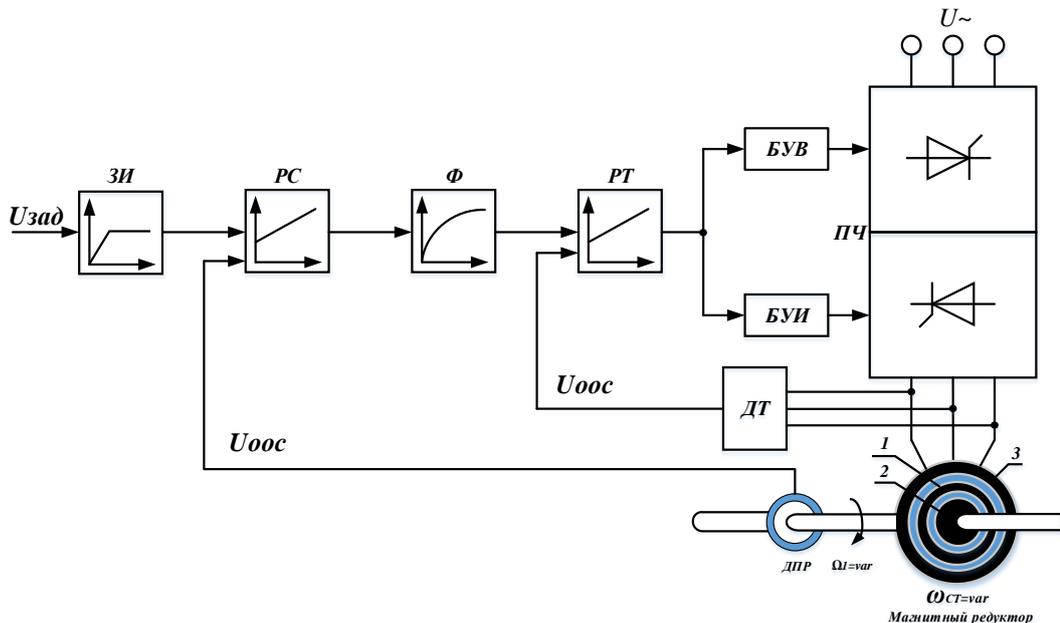


Рисунок 3.36 – Функциональная схема управления ВЭУ с МР

Все вышеприведённые базовые функциональные схемы управления являются взаимосвязанными звеньями и формируют единый сигнал управления. Учитывая возможности моделирования сложных электромеханических процессов, вышеприведённые схемы управления ВЭУ с МР смоделируем частотно-токовым управлением МР в программе Matlab Simulink [86]. Система непрерывного управления МР, как и система управления электроприводами, является совокупностью взаимосвязанных электротехнических и электронных элементов, обеспечивающих непрерывное во времени управление координатами систем электропривода МР постоянного и переменного тока. Закон непрерывного управления МР определяется от её технологического назначения и принципа работы.

Диапазон регулирования скорости вращения МР представляет собой отношение максимального и минимального значения скоростей:

$$D_{pez} = \frac{\Omega_{max}}{\Omega_{min}} = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} \quad (3.73)$$

Данный диапазон регулирования в системе электропривода с синхронным и асинхронным генератором имеет предел ограничения по максимальной скорости. Благодаря рекуперативной характеристике ПЧ, подключенной к статору МР, диапазон регулирования ограничивается только по минимальной скорости вращения. При увлечении скорости вращения первого вала или угловой скорости вращения магнитного поля статора от заданного значения максимальной скорости, избыточная скорость вращения в виде тока и напряжения рекупируется из статора МР через ПЧ в сеть.

Точность регулирования угловой скорости магнитного поля статора МР зависит от следующих возмущающих воздействий:

$$\sum \Delta\omega_{cm} = \Delta\omega_c + \Delta\omega_n + \Delta\omega_t \pm \Delta\omega_{mp}, \quad (3.74)$$

где $\Delta\omega_c$, $\Delta\omega_n$, $\Delta\omega_t$, $\Delta\omega_{mp}$, – отклонения (возмущения) угловой скорости магнитного поля статора при изменении нагрузки, напряжения, температуры и от увеличения скорости вращения тихоходного ротора, рад/с.

Процентное значение перепада скорости МР определяется по величине скорости тихоходного ротора, и эта величина в системе ВЭУ с МР может превышать заданную скорость магнитного поля статора МР.

$$\kappa = \frac{\sum \Delta \omega_{cm}}{\omega_{он}} = \frac{\omega_{он} \pm \omega_{уст}}{\omega_{он}} \cdot 100\% \quad (3.75)$$

В классической формуле определения перепада скорости от заданного значения при воздействии внешних возмущений величины скорости идеального холостого хода и скорости в установившемся режима являются отрицательными. При определении перепада скорости в МР установившаяся скорость магнитного поля статора может превышать заданное значения, поэтому величина коэффициента перепада может превышать единицу. Такая ситуация описывает характеристику рекупераций энергии от статора МР в сеть.

Моделирование сигналов отрицательной обратной связи при стабилизации скорости вращения выходного вала МР в рассматриваемом функциональном схеме. Суммарное напряжение на выходе усилителя РС $U_{сум}$ определяется как разность величины заданного напряжения $U_{зад}$ и напряжения обратной отрицательной связи $U_{осс}$, $U_{сум} = U_{осс} - U_{зад}$. Напряжение обратной связи в системе управления МР формируется как алгебраическая сумма напряжения обратной связи по скорости, которую выдает датчик скорости (тахогенератор или датчик положения ротора), $U_C = \gamma \cdot \omega$ и по току статора МР $U_T = R_{ш} \cdot I_C$.

Общее математическое описание формирования напряжения обратной связи по скорости и по току:

$$U_{ос} = \gamma \omega + \beta \cdot I \cdot R_C \quad (3.76)$$

Тогда суммарное и заданное значения напряжения на выходе усилителя РС равны:

$$U_{сум} = U_{зд} = -\gamma \omega + \beta \cdot I \cdot R_C, \quad (3.77)$$

где $\gamma = U_{ТГ}/\Omega_{ТГ}$, $\beta = R_{ш}/R_C$ – коэффициенты обратной связи по скорости и по току.

Как показывают выражения 3.76 и 3.77, сигналы отрицательной обратной связи, формируется с учётом скорости вращения двух валов и амплитудного значения тока и напряжения статора магнитного редуктора.

Как видно из рисунков 3.37 и 3.38, любые отклонения скорости и тока при воздействии внешних возмущений приводят к изменению напряжения на выходе усилителя $U_{СУМ}$ и ПЧ с учётом изменения напряжения и коэффициентов обратной связи стабилизирует напряжение, ток и угловую частоту магнитного поля статора МР, что приводит к стабилизации скорости быстроходного ротора МР.

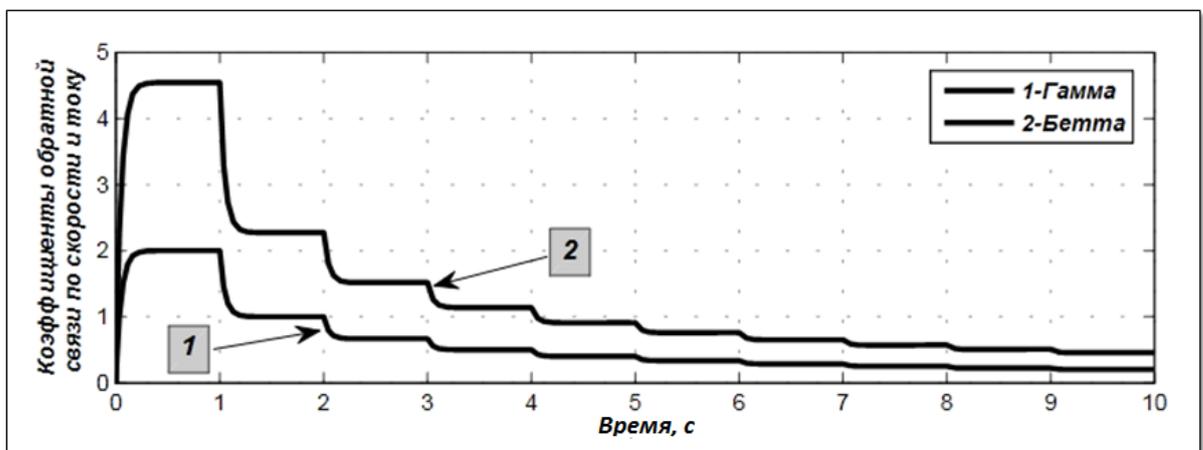


Рисунок 3.37 – Осциллограмма коэффициентов обратной связи по скорости γ и по току β при переменной скорости вращения тихоходного ротора МР

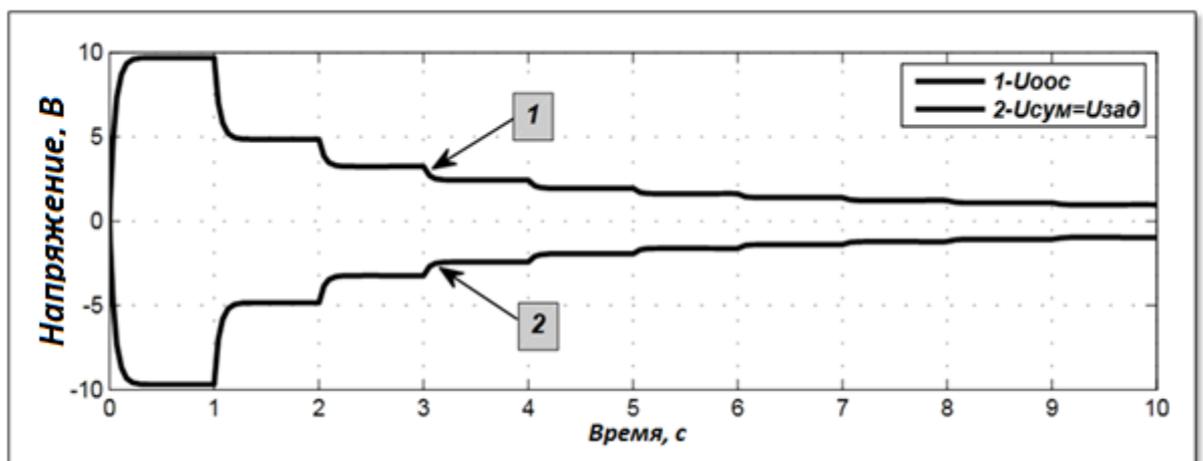


Рисунок 3.38 – Осциллограмма суммарного $U_{СУМ}$ и заданного $U_{Зад}$ значения напряжения на выходе усилителя РС при переменной скорости вращения тихоходного ротора МР

3.7 Схема реверсивного управления ветроустановки с магнитным редуктором преобразователям частоты переменного тока

Многие схемы управления транзисторным управлением электроприводов имеют одностороннюю проводимость, и во время торможения ток обмотки статора электрической машины не может изменить своё направление, т.е. не может рекупироваться обратно в сеть [42, 43].

При реверсивном режиме работы ПЧ и рекуперации энергии применяют две группы транзисторов с разными направлениями тока на выходе. Управление этими группами транзисторов может быть отдельно, при котором одновременно работает только одна группа транзисторов, и совместно, при котором одновременно работают обе группы. Принцип работы реверсивной работы или режима рекуперации энергии показан на рисунке 3.39. В данной блок – схеме представлен один комплект СИФУ для управления ключами транзисторов через ключи «вперёд» и «назад».

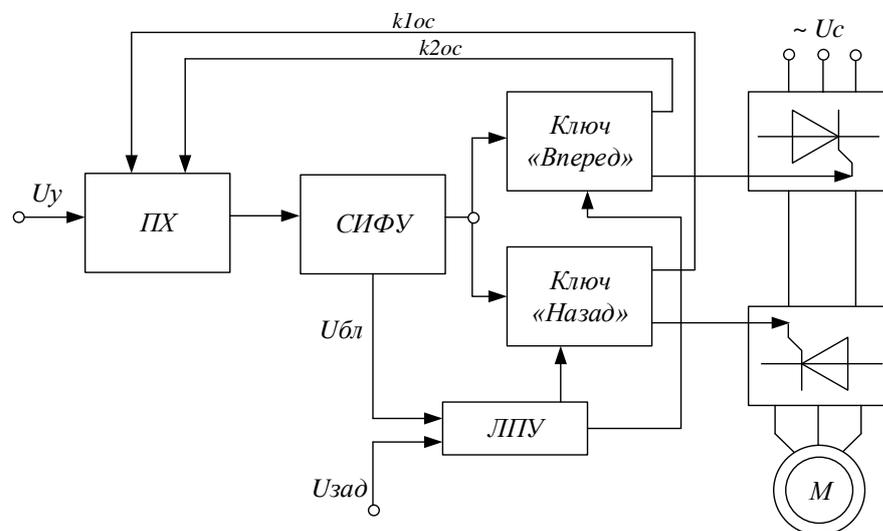


Рисунок 3.39 – Блок-схема реверсивного транзисторного ПЧ

Так как сигнал для переключения идёт отдельно, то благодаря логическим переключающим устройствам (ЛПУ) исключается возможность одновременного подключения транзисторов. Встроенный алгоритм автоматизированной работы ЛПУ даёт команду на открывание только на один из указанных ключей с одновременной выдачей блокирующего сигнала $U_{бл}$ на другой ключ, при этом

исключая возможность подключения одновременно двух управляющих ключей транзистора «вперёд» и «назад». Для контроля состояния ключей транзисторов в данной схеме предусмотрено устройство переключения характеристики сигналов (ПХ), на которое поступает отрицательный обратный сигнал от управляющих ключей транзисторов.

Изменение тока и напряжения статора связано с переходом двигательного режима работы МР от генераторного, т.е. в режим рекуперации и отдачи избыточной энергии переменного тока в сеть, обусловленной увеличением скорости вращения тихоходного ротора МР.

В этом режиме транзисторная группа с ключом «вперёд» работает в режиме инвертора, преобразовывая постоянный ток промежуточного звена в переменный ток со стандартной частотой и напряжением сети, а вторая группа транзисторов с ключом «назад» работают в выпрямительном режиме. В режиме двигателя, когда угловая скорость тихоходного ротора меньше заданной величины, ключи группы транзисторов работают в обратном режиме.

В рассматриваемой блок-схеме основным элементом, который формирует сигнал управления, является блок ЛПУ с заданным уровнем напряжения $U_{зад}$ и с сигналом отрицательной обратной связи, которые исходят от управляющих ключей групп транзисторов k_{1OC} и k_{2OC} . В схеме рекуперации ВЭУ с МР (Рисунки 3.40 и 3.41) на статоре МР соединены два ПЧ: первый выполняет функцию отдачи мощности к статору во время уменьшения частоты вращения ВК, а второй выполняет функцию рекупераций избыточной мощности статора во время увеличения скорости вращения ВК [43]. При увеличении скорости вращения ВК магнитный поток тихоходного ротора увеличивается тем самым ток и ЭДС статора увеличивается, тогда напряжение на выходе ДС пропорционально увеличивается и падает сигнал на СИФУ для того, чтобы открыть затвор управляемых транзисторов выпрямителя. При открытии затвора транзистора избыточная мощность проходит через управляющее промежуточное звено постоянного тока и рекуперуется через инвертор в сеть.

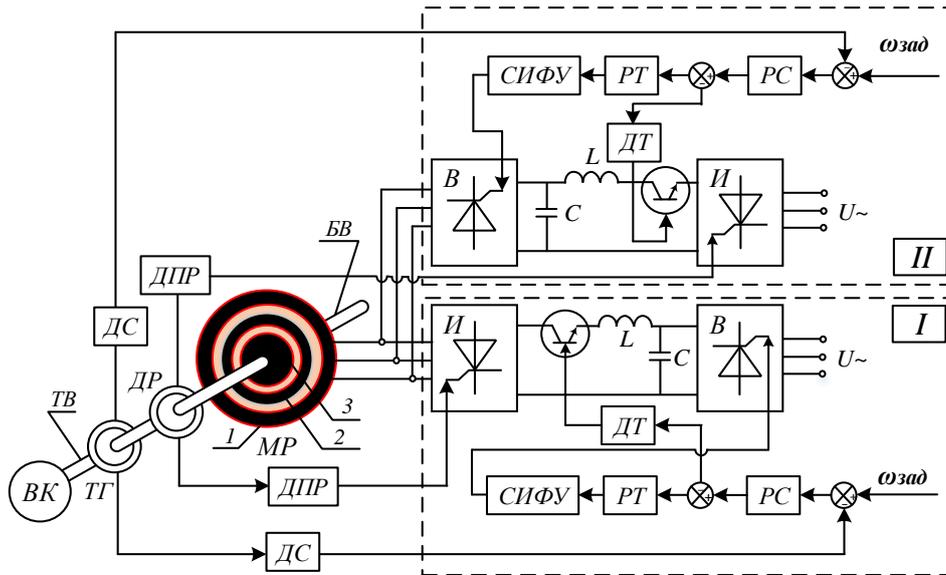


Рисунок 3.40 – Схема управления и рекуперации энергии ВЭУ с МР: I – контур стабилизации быстроходного ротора МР путём изменения величины магнитного поля статора статическим ПЧ; II – контур рекуперации энергии статора МР; ДС – датчик скорости; ДПР – датчик положения ротора; ВК – ветроколесо; ТГ – тахогенератора; МР – магнитный редуктор; В – выпрямитель; И – инвертор; С – конденсатор; L – индуктивность; ДТ – датчик тока; СИФУ – система импульсно-фазного управления; РС – регулятор скорости

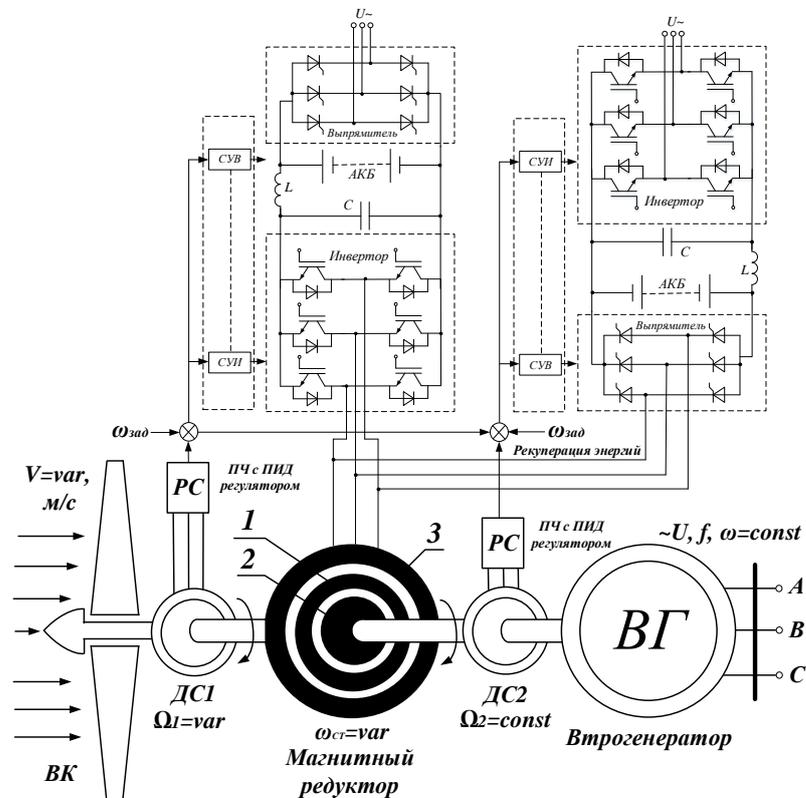


Рисунок 3.41 – Электромеханическая схема реализации алгоритма автоматизированной работы ВЭУ с МР

Основным входом и выходом мощности для стабилизации выходного вала является электрический канал управления 12. Как видно из рисунка 3.42, из электрического канала (обмотки статора) избыточная мощность $P_{рек}$ рекуперуется в сеть. При уменьшении мощности статора из выходных зажимов статора мощность P_{nut} обратно поступает в статор в целях стабилизации электромагнитной мощности статора МР.

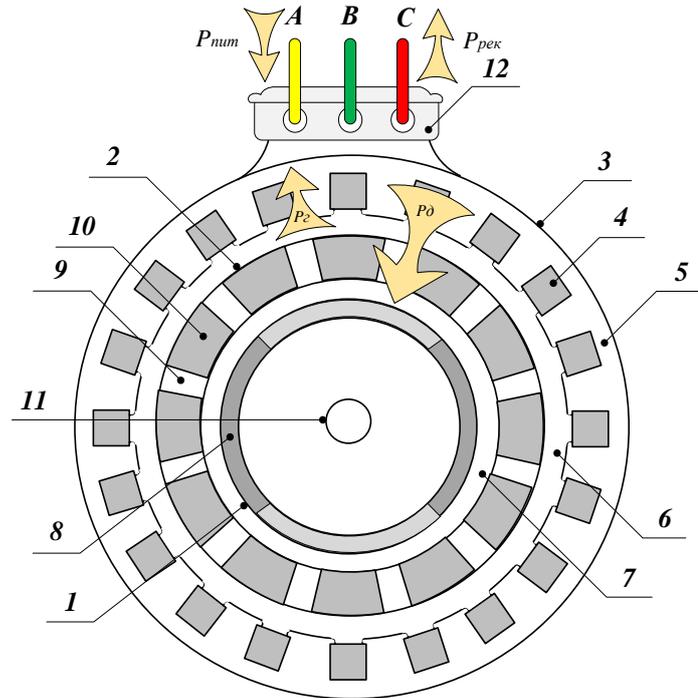


Рисунок 3.42 – Схема разреза магнитного редуктора: 1 – быстроходный ротор; 2 – тихоходный ротор; 3 – статор; 4 – обмотки статора; 5 – магнитопровод статора; 6 – воздушный зазор между статором и тихоходным ротором; 7 – воздушный зазор между роторами; 8 – постоянные магниты быстроходного ротора; 9 – немагнитная сталь тихоходного ротора; 10 – шихтованные ферромагнитные стержни тихоходного ротора; 11 – вал быстроходного ротора; 12 – выходные зажимы статора

Как показано на рисунке 3.43, угловая координата вращения тихоходного ротора МР изменяется неравномерно, а угловая координата вращения быстроходного ротора, независимо от угловой координаты вращения тихоходного ротора и угловой координаты магнитного поля статора, вращается равномерно в течение времени.

Основным входом и выходом мощности для стабилизации выходного вала является электрический канал управления 12.

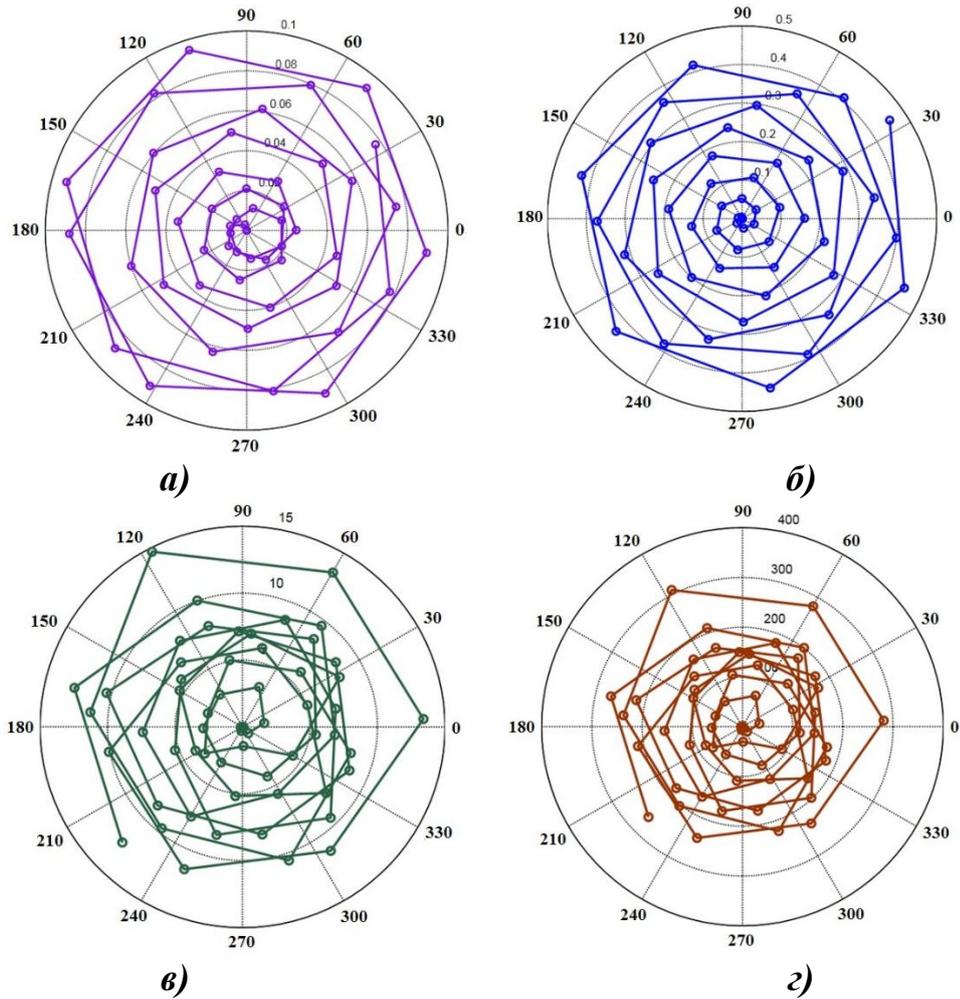
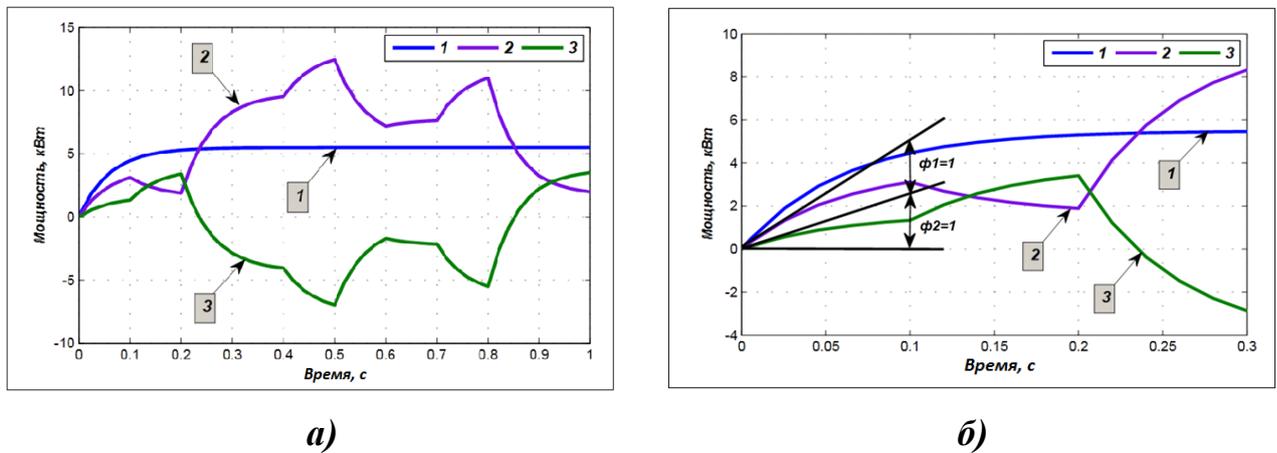


Рисунок 3.43 – Результаты моделирования системы управления угловых координат скорости и магнитного поля МР: а) – угловая координата наблюдения скорости вращения тихоходного ротора; б) – угловая координата наблюдения скорости вращения быстроходного ротора; в) – угловая координата наблюдения скорости вращения магнитного поля статора; г) – угловая координата наблюдения рекуперации магнитного поля статора

Как видно из кривых осциллограмм мощности статора МР (Рисунок 3.44) мощность рекуперации 3 пропорционально увеличивается в зависимости от уменьшения мощности питания 2 статора ПЧ изменение углов мощности питания и рекуперация в интервале времени наблюдения одинаковы (Рисунок 3.44, б $\phi_1 = \phi_2$, кривая 2 и 3), при этом электромагнитная мощность статора МР остаётся неизменной 1 . Такая характеристика баланса мощности в статоре МР обеспечивается, благодаря тому, что МР в зависимости от скорости вращения тихоходного ротора работает в генераторном и двигательном режимах т.е.

потребляет мощность и отдаёт мощность в сеть, стабилизируя электромагнитную мощность статора (Рисунок 3.44, а, кривая 1).



а) б)
Рисунок 3.44 – Осциллограмма мощности статора магнитного редуктора при рекуперации энергии

Электромагнитная мощность статора МР:

$$P_{ЭМСТ} = M_{ЭМСТ} \cdot (\pm \Omega_{СТМР}) = M_{ЭМСТ} \cdot \left(\pm \frac{\omega}{p_1} \right) \quad (3.78)$$

В зависимости от скорости вращения ВК МР будет работать в двигательном или генераторном режиме (Рисунок 3.45).

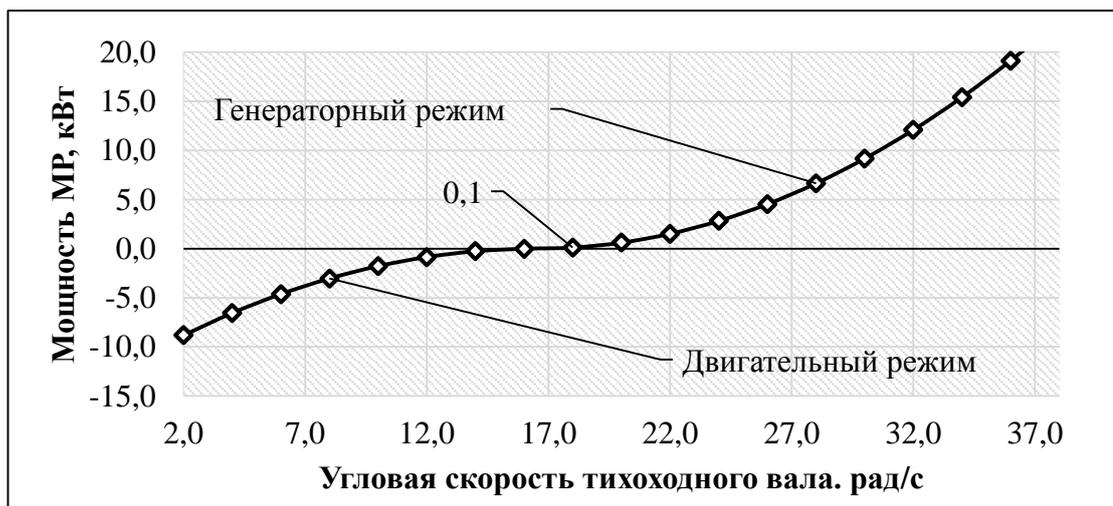


Рисунок 3.45 – Аналитический расчёт графика зависимости мощности МР от угловой скорости тихоходного вала

Система уравнений (3.79) доказывает, что в процессе генерирования мощности в статоре МР присутствует избыточная мощность за счёт увеличения

мощности ВК, а именно мощности ветрового потока за счёт увеличения скорости ветра на лопастях ВК.

$$\begin{cases} M_{BK} \Omega_{BK} + P_{ЭМСТ} = M_3 \Omega_3 \\ M_{BK} \Omega_{BK} = P_{ЭМСТ} + M_3 \Omega_3 \end{cases} \quad (3.79)$$

Формирование электромагнитной мощности осуществляется благодаря магнитным потокам в воздушных зазорах между статором и тихоходным ротором и статором, и быстроходным ротором. Баланс магнитного потока между воздушными зазорами осуществляется благодаря магнитным потокам статора МР и с помощью статического ПЧ.

При отсутствии статического ПЧ на статоре МР суммарное значение магнитного потока в воздушных зазорах опишем интегральным уравнением:

$$\sum \Phi_{СТ} = \int_{-\infty}^T \Phi_2 dt + \int_{-\infty}^T \Phi_3 dt \quad (3.80)$$

При регулировании значения магнитного потока в воздушных зазорах суммарное значение магнитного потока в двух воздушных зазорах описывается интегральным уравнением:

$$\sum \Phi_{СТ} = \int_{-\infty}^T \Phi_1 dt + \int_{-\infty}^T \Phi_2 dt + \int_{-\infty}^T \Phi_3 dt \quad (3.81)$$

Величина магнитного потока статора МР в зависимости от ЭДС и частоты ПЧ изменяется по выражению:

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{k \cdot f^*} \quad (3.82)$$

Отдача мощности и рекуперации энергии для стабилизации выходного вала и мощности статора МР описывается следующим коэффициентом пропорциональности:

$$k = \frac{\Omega_{BK}}{\Omega_{зад}} = \frac{M_{BK}}{M_{зад}} = \frac{I_{СТ}}{I_{зад}} = \frac{E_{СТ}}{E_{зад}} = \frac{P_{BK}}{P_{зад}} = \pm \frac{\omega_{СТ}}{p_1} \quad (3.83)$$

Благодаря конструкционным характеристикам МР в системе генерирования энергии ВЭУ можно максимально использовать энергию ветра и при этом решать проблему синхронизации и стабилизации электрических параметров ВЭУ.

Использование МР вместо ПМР не только уменьшает массогабаритные размеры ВЭУ, но и повышает надёжность и срок службы ВЭУ.

Для реализации схемы рекуперативной характеристики энергии ВЭУ с МР применён универсальный управляющий контроллер на основе микропроцессора со встроенным алгоритмом автоматизированной работы с вводом задающих сигналов управления.

В схеме рекуперации энергии статора ВЭУ с МР инвертор ПЧ выполняет функцию коммутатора ЭДС обмотки статора, наводимая вращающим магнитным полем тихоходного ротора.

Рекуперативный режим работы ПЧ обеспечит двухсторонний поток энергии от статора МР в сеть и обратно в статор. Такой режим работы позволяет повысить КПД использования энергии ветра в МР. При нерекуперативном режиме или использовании ПЧ без функции рекуперации избыточной мощности от статора МР за счёт увеличения скорости ветра рассеивается в виде тепла, что уменьшает срок службы МР.

3.8 Электромагнитный редуктор как совокупность двух элементарных электрических машин

По конструкционным частям и в соответствии с характеристиками скорости вращения роторов l при $z > p_1$ и $\omega > 0$, при подключении к обмотке статора ПЧ, направление вращения тихоходного и быстроходного ротора и магнитного поля статора одинаковы, а моменты тихоходного и быстроходного ротора M_1 и M_2 противоположны. Электромагнитные моменты на воздушных зазорах между статором и тихоходным ротором и между статором и быстроходным ротором формируют магнитное поле в зависимости от величины моментов или от угловой скорости валов МР.

По сути, конструкция МР представляет собой две элементарные электрические машины с двумя воздушными зазорами, двумя роторами с одной общей обмоткой статора.

Таким образом, когда МР работает как мультипликатор, то первая

элементарная электрическая машина всегда работает в генераторном режиме с воздушным зазором δ_1 и электромагнитным моментом M_1 , с током обмотки статора I_1 , передовая мощность P_1 зависит от угловой скорости тихоходного вала (тихоходного ротора) Ω_1 . Тогда вторая элементарная электрическая машина работает в двигательном режиме с воздушным зазором δ_2 и электромагнитным моментом M_2 , с током обмотки статора I_2 , потребляя мощность P_2 от статического ПЧ, который подключен к обмоткам статора МР.

В зависимости от режима работы МР мощность статора описывается следующими неравенствами:

$$M_1\Omega_1 < M_2\Omega_2, \quad M_1\Omega_1 > M_2\Omega_2 \quad (3.84)$$

Тогда результирующий ток статора состоит из двух токов:

$$I = I_1 + I_2 \quad (3.85)$$

Соответственно мощности в генераторном режиме и двигательном режиме:

$$M_1\Omega_1 + P_s = M_2\Omega_2, \quad (3.86)$$

$$M_1\Omega_1 = P_s + M_2\Omega_2, \quad (3.87)$$

где $P_s = 3E_\delta I_c \cos \Psi_1 = M_\Delta \cdot \omega / p_1$ – электромагнитная мощность статора, подключённого статического ПЧ, зависящей от моментов тихоходного и быстроходного ротора, Вт.

Результаты моделирование коэффициентов мощности ВЭУ с МР приведены на рисунке 3.46.

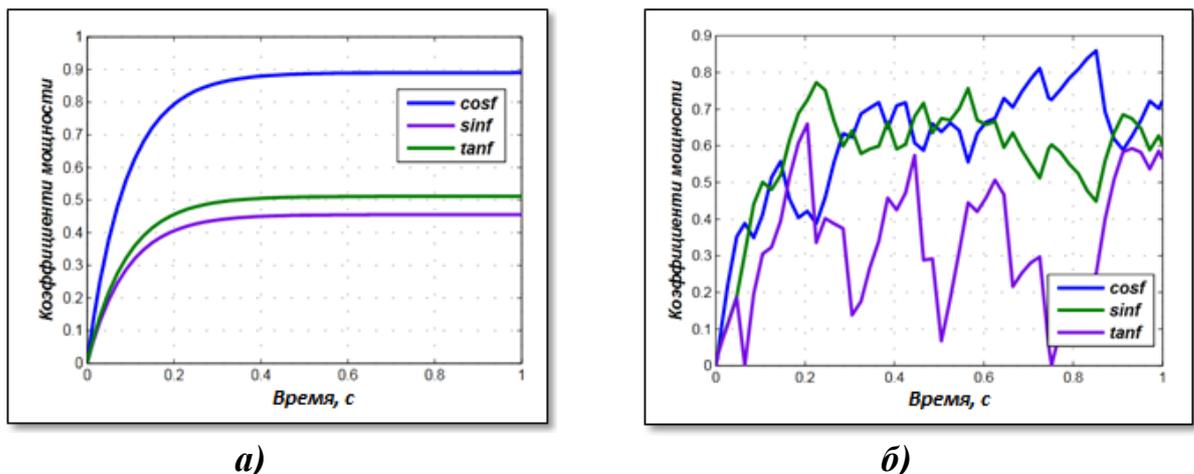


Рисунок 3.46 – График изменения коэффициентов мощности МР: а) – при стабилизации скорости вращения быстроходного вала; б) – при не стабилизации скорости вращения быстроходного вала

Рассмотрим режим работы МР, при котором момент и скорость вращения входного вала (тихоходного ротора) постоянны $M_1\Omega_1 = const$. Тогда магнитное поле магнитов быстроходного ротора присутствует в двух воздушных зазорах, т.е. между статором и тихоходным ротором и между тихоходным и быстроходным роторами. Тогда число пар полюсов в первом зазоре p_1 , а во втором зазоре равняется $p_2 = z - p_1$.

Электромагнитные мощности P_1 и P_2 формируются магнитным полем в воздушных зазорах между статором и тихоходным ротором и между тихоходным и быстроходным роторами и передаются через первый воздушный зазор к статору и через второй воздушный зазор внутреннему ротору (тихоходному ротору).

Поскольку скорость вращения магнитного поля статора отличается от скорости вращения тихоходного и быстроходного ротора МР Ω_1, Ω_2 , то электромагнитные моменты статора M_{s1} и M_{s2} отличаются от электромагнитных моментов ротора M_1 и M_2 .

Электромагнитные моменты и мощности тихоходного и быстроходного роторов связаны с соответствующими токами в обмотке статора I_1 и I_2 .

Тогда формула мощности тихоходного и быстроходного роторов принимает вид:

$$M_1\Omega_1 = M_{s1} \frac{\omega}{p_1} = 3E_{\delta 1} I_1 \cos \psi_1; \quad M_2\Omega_2 = M_{s2} \frac{\omega}{p_1} = 3E_{\delta 2} I_2 \cos \psi_2 \quad (3.88)$$

где $\psi = \langle (E_{\delta i}, I_i), i=1,2$ – фазовый сдвиг тока и результирующей ЭДС обмотки статора МР.

Если приложить внешний момент $M_{I_{\text{вн}}} = M_1$ к тихоходному валу, то он действует на направление вращения магнитного поля статора МР и вызывает в воздушном зазоре δ_1 магнитного поля магнитов ротора. В таком режиме первая элементарная машина (тихоходный ротор с статором) работает в генераторном режиме и создаёт электромагнитный момент M_1 , взаимодействующий со стержнями модулятора в направлении против его вращения.

Тогда обмотка статора будет отдавать ПЧ электромагнитную мощность:

$$P_{\vartheta 1} = 3E_{\delta 1} I_1 \cos \psi_1 = M_{\vartheta 1} \omega / p_1 \quad (3.89)$$

Во втором воздушном зазоре δ_2 между статором и быстроходным ротором формируется электромагнитный момент M_2 , который взаимодействует с внутренним быстроходным ротором в направлении его вращения, тогда вторая элементарная машина работает в двигательном режиме, и будет потреблять от ПЧ мощность.

$$P_{\vartheta 2} = 3E_{\delta 2} I_2 \cos \psi_2 = M_{\vartheta 2} \omega / p_1 \quad (3.90)$$

При приложении на входном валу (тихоходном роторе, модуляторе) внешнего момента выражения баланса мощностей в МР с ПЧ принимает вид:

$$M_{1\text{вн}} \Omega_1 + M_{\vartheta} \omega / p_1 = M_2 \Omega_2 \quad (3.91)$$

где $M_{\vartheta} = M_{\vartheta 1} + M_{\vartheta 2}$ – суммарное составляющее электромагнитных моментов статора Н·м.

Как уже было изложено во второй главе диссертации, в системе стабилизации и регулирования ВЭУ используется механический планетарный редуктор. Установка МР вместо МПР в качестве мультипликатора для стабилизации и регулирования между валами ВК и ВГ обеспечивает постоянство частоты вращения ВГ при переменной градации скорости ветра. Кроме того, МР позволяет рационально использовать ветряной ресурс путём аккумуляирования избыточной мощности в случае увеличения скорости ветра, и в случае слабой скорости ветра аккумуляторные батареи разряжаются для поддержания необходимого уровня мощности.

3.9 Уравнения динамического равновесия механических и электрических каналов управления магнитного редуктора

С учётом анализа баланса электромагнитных моментов и мощностей в электрических каналах МР, рассмотрим уравнения механического движения для тихоходного вала, который соединен с внешним ротором и к нему приложен

внешний момент ВК и быстроходного вала, который соединён с ротором ВГ и к нему приложено момент ВГ:

$$J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = M_{\text{вк}} - M_1; \quad J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = M_2 + M_3 - M_{\text{эз}}, \quad (3.92)$$

где J_1, J_2 – суммарные моменты инерции ветроколеса с тихоходным ротором и быстроходным ротором с ротором электрогенератора⁸, кг·м²;

$M_{\text{вк}}$ – внешний момент, передаваемый тихоходному валу (ротору) ветроколесом; электромагнитные моменты валов M_1, M_2 , Н·м;

$M_{\text{эз}}$ – внешний момент, прикладываемый к быстроходному валу со стороны электрогенератора (ветрогенератора), Н·м.

Электромагнитный момент МР с учётом формулы (3.92) определяем из выражения:

$$M_3 = M_2 \frac{p_1}{z - p_1} \quad (3.93)$$

Тогда уравнение механического движения быстроходного вала МР принимает вид:

$$J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = M_2 \frac{z}{z - p_1} - M_{\text{эз}} \quad (3.94)$$

Углы нагрузки тихоходного и быстроходного валов находим в дифференциальной форме, с учётом управления трёх каналов МР:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{p_1} [\omega - (z - p_1)] \Omega_2 + z\Omega_1, \quad (3.95)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \left[\Omega_2 - \frac{z}{z - p_1} \Omega_1 - \frac{\omega}{z - p_1} \right], \quad (3.96)$$

Уравнение равновесия напряжения статора с учётом угловых скоростей двух ротором и тока статора определяем следующим уравнением:

$$U_m \sin \theta_1 = [(z - p)\Omega_2 - z\Omega_1]L_c I_{m1} \quad (3.100)$$

⁸ Момент инерции смоделирован с учётом массогабаритных размеров вращающихся элементов ВЭУ с магнитного редуктора.

Уравнение (3.100) можно использовать вместо дифференциального уравнения (3.95) для нахождения угла θ_1 тихоходного вала (Рисунок 3.47):

$$\sin \theta_1 = \frac{1}{U_{m1}} [(z - p_1)\Omega_2 - z\Omega_1] L_c I_{m1} \quad (3.101)$$

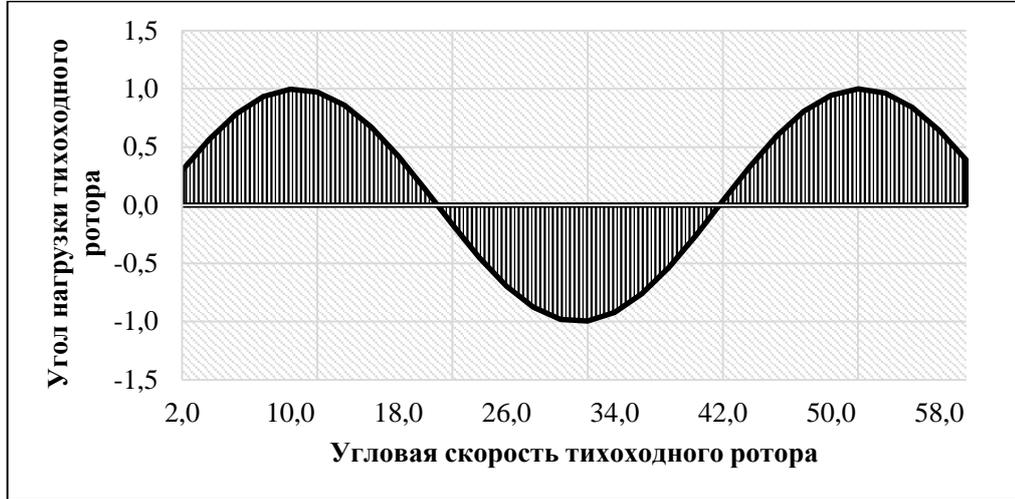


Рисунок 3.47 – Аналитический расчёт графика угла нагрузки тихоходного ротора МР по уравнению (3.95)

Тогда разомкнутая система управления будет описываться всего тремя дифференциальными уравнениями (3.95), (3.96) и (3.100). Первая часть данного уравнения равна разности скорости магнитного поля статора и магнитов быстроходного ротора в воздушных зазорах МР.

Дифференциальные уравнения равновесии электрического канала, т.е. обмотки статора, в зависимости от тока и выходного напряжения ПЧ представлены в следующей форме:

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = -U_{m1} \cos \theta_1 - \Psi_q \omega - r I_{m1}, \quad (3.102)$$

$$U_{m1} \sin \theta_1 = -\Psi_q \omega, \quad (3.103)$$

где $\Psi_d \omega = -E_{0m} = -x_{af} F_{m1}^M = -x_{af} \frac{4}{\pi} h_m H_{св}$ — амплитудное значение ЭДС обмотки статора МР, В;

$\Psi_q = -L_q I_{m1}$; $\Psi_q \omega = -x_q I_{m1}$; I_{m1} — амплитуда основной гармоники тока обмотки статора МР, А;

$U_{m1} = \frac{2}{\pi} E$ – амплитудное значение основной гармоники напряжения статора

магнитного редуктора, В;

E_{II} – выходное напряжение звена постоянного тока статического преобразователя частоты, который подключен к обмоткам статора МР (Рисунок 3.48). Это напряжение противоположно по знаку выходному напряжению первой гармоники преобразователя частоты, В.

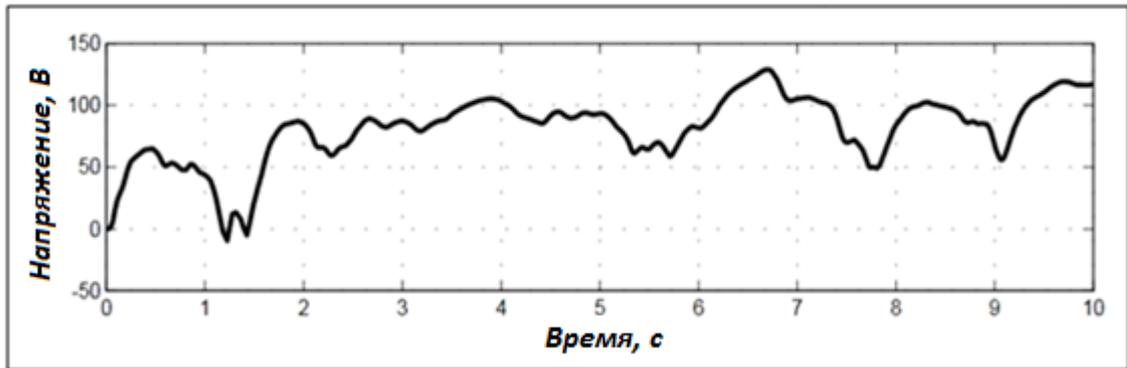


Рисунок 3.48 – Значение ЭДС выходного напряжения звена постоянного тока ПЧ

Из результата аналитического расчёта зависимости выходных напряжения инвертора ПЧ E_{II} , от угловой скорости тихоходного вала Ω_2 и ЭДС обмотки статора МР (напряжения статора) U_m (Рисунок 3.49) видно, что при увеличении скорости тихоходного ротора пропорционально увеличивается ЭДС обмотки статора МР (Рисунок 3.50 в переменном режиме).

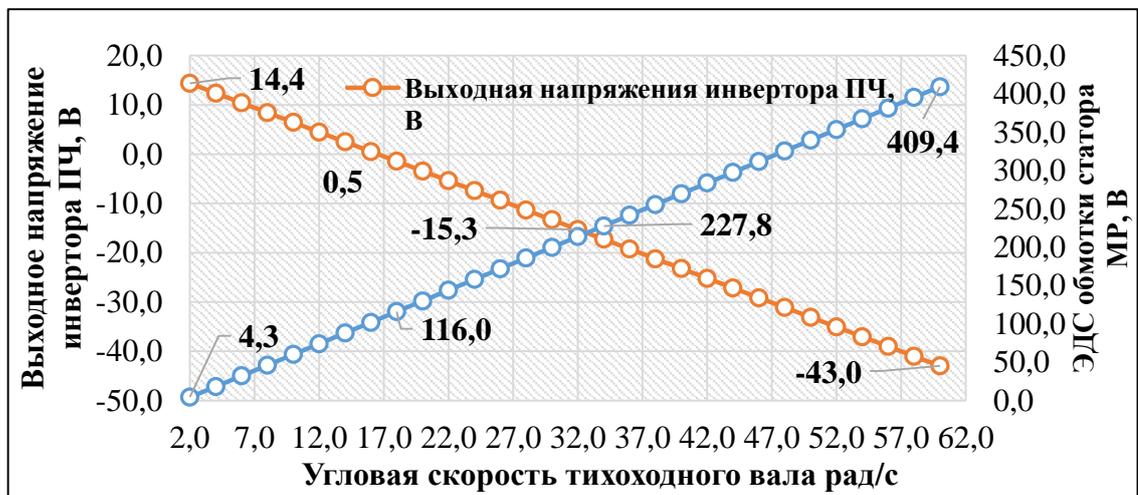


Рисунок 3.49 – Аналитический расчёт графика зависимости выходных напряжения инвертора ПЧ от угловой скорости тихоходного вала и ЭДС обмотки статора МР

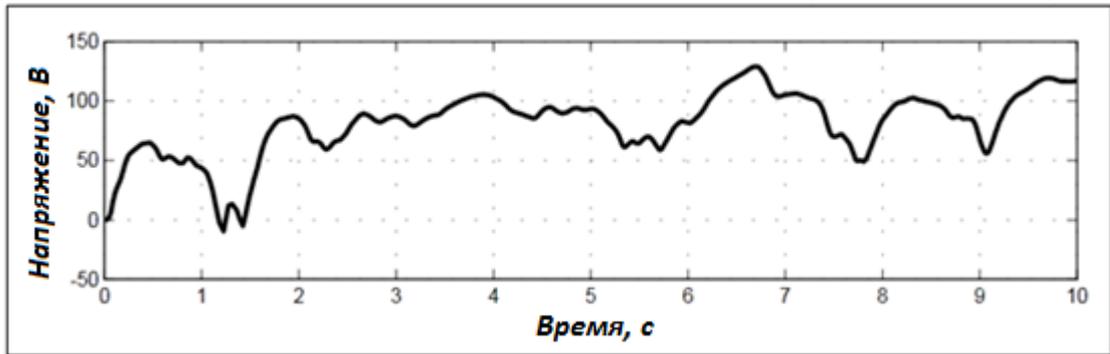


Рисунок 3.50 – Значение первой гармоники напряжения синхронной машины

Зависимость угловой скорости магнитного поля статора МР от скорости вращения роторов определяем из выражения:

$$\omega_p = \pm(p_2\Omega_2 - z\Omega_1), \quad (3.104)$$

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

В вышеприведённом выражении (3.104) и в рисунке 3.51 отрицательный знак соответствует генераторному, положительный знак двигательному режиму.

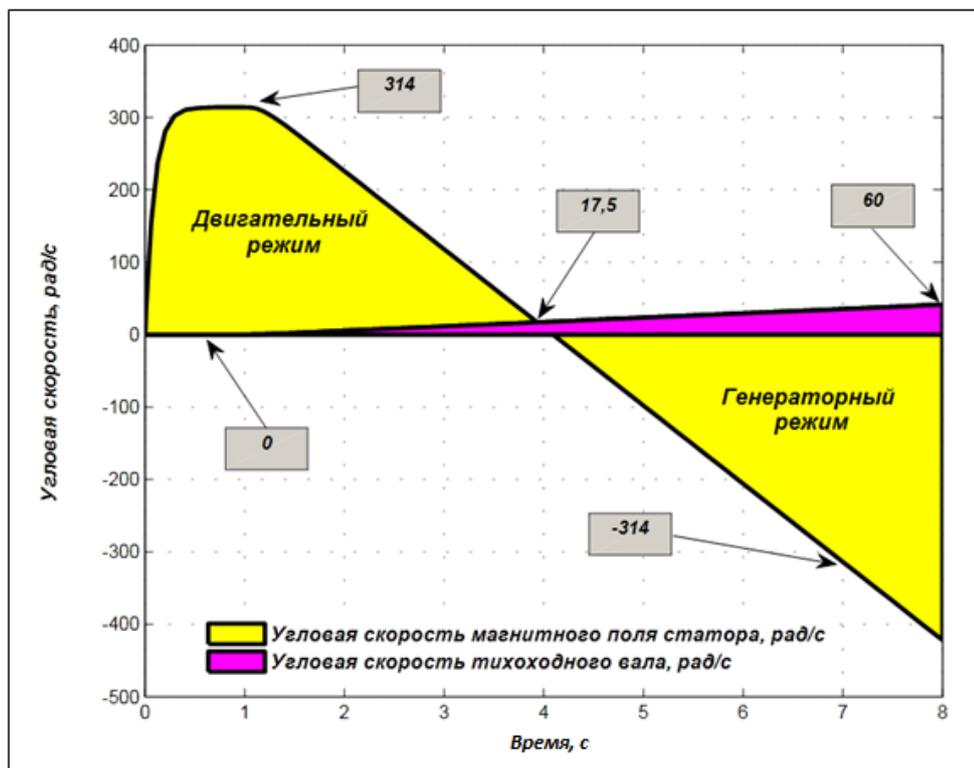


Рисунок 3.51 – Моделирование зависимости угловой скорости магнитного поля статора МР от скорости вращения тихоходного вала в двигательном и генераторном режиме

При увеличении скорости вращения тихоходного ротора питающая частота ПЧ уменьшается, и величина угловой скорости магнитного поля принимает отрицательный знак, а при уменьшении угловой скорости тихоходного ротора питающая частота ПЧ увеличивается, и величина угловой скорости магнитного поля статора принимает положительный знак. Моделирование зависимости угловой скорости магнитного поля статора МР от скорости вращения тихоходного вала в двигательном режиме показало, что при $\Omega_1 = 0$, питающая частота ПЧ $\omega = 314$ и с увеличением Ω_1 до 17,5 угловая скорость магнитного поля статора уменьшается до нуля. При увеличении угловой скорости тихоходного вала от 17,5 и выше наблюдается генераторный режим и процесс рекуперации энергии от статора МР.

В формулах (3.102), (3.103) поперечный ток представлен амплитудой первой гармоники тока статора $I_q = I_{m1}$, т.к. система управления преобразователем частоты формирует названную гармонику тока, совпадающую по фазе с ЭДС обмотки статора. В этом случае продольный ток статора I_d будет равен нулю. Уравнения (3.92 - 3.104) позволяют описать переходные процессы в рассматриваемой ВЭУ с регулируемым магнитным редуктором при отсутствии обратных связей по скорости и по току электрогенератора [36]. В программе Matlab моделируем амплитудные значения ЭДС обмотки статора (Рисунок 3.52) при переходном процессе и при не стабилизации магнитного поля статора МР.

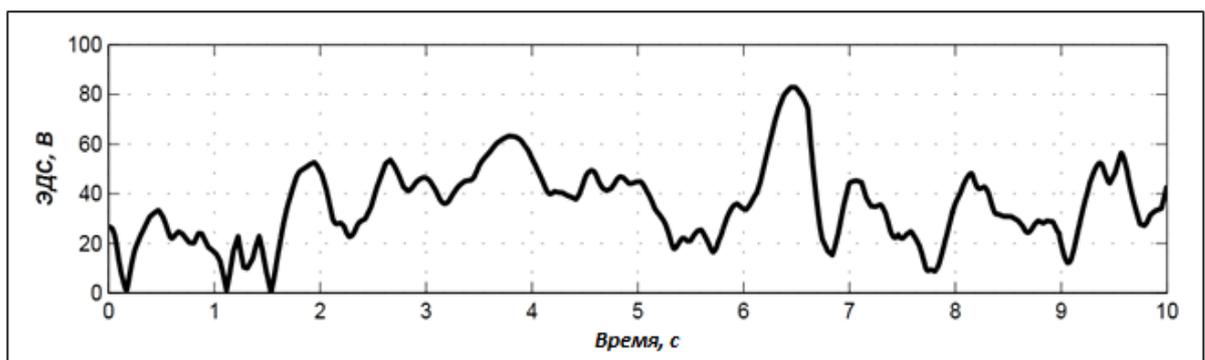


Рисунок 3.52 – Результирующий ЭДС обмотки статора при переходном процессе

Результаты моделирования (осциллограмма) напряжения статора МР при переменном вращении тихоходного вала (модулятора) приведены в рисунке 3.53.

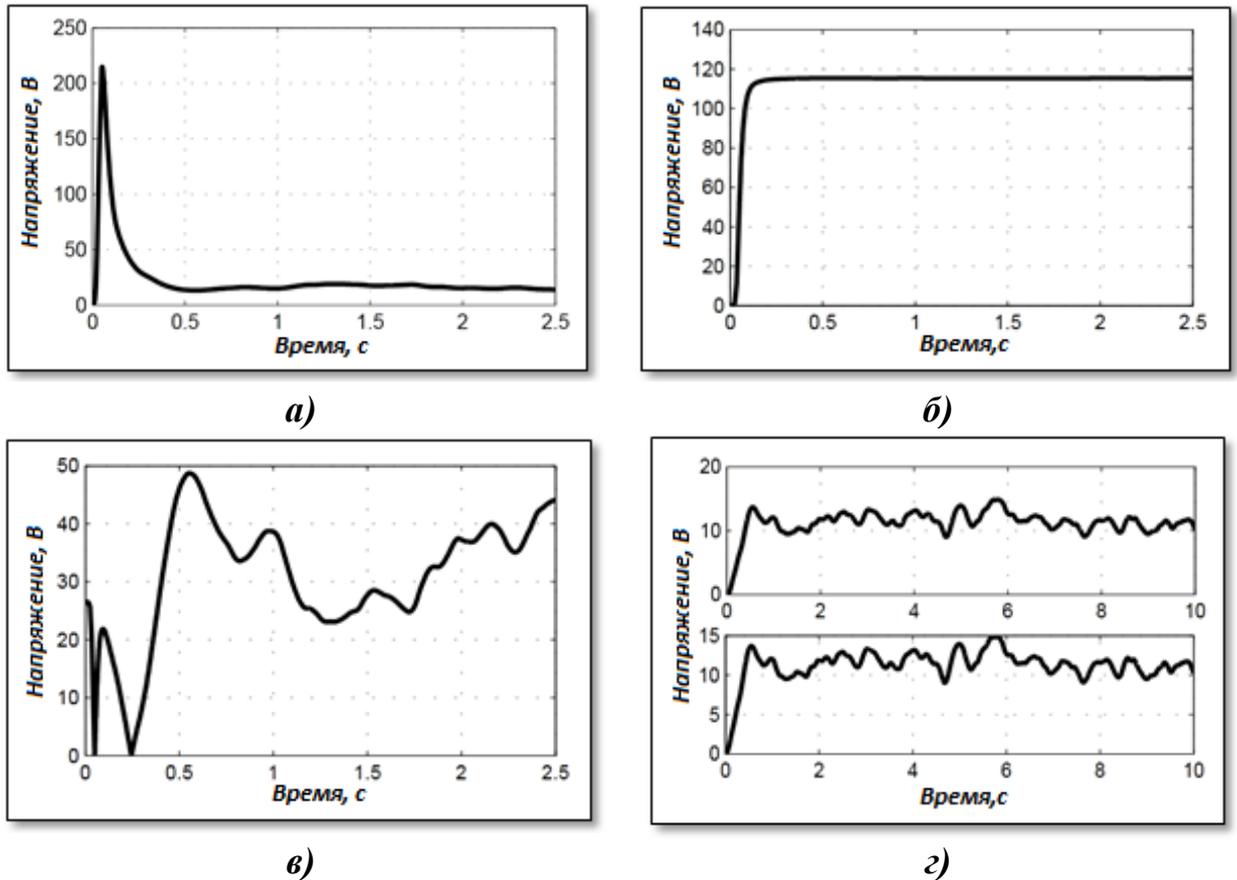


Рисунок 3.53 – Осциллограмма напряжение статора магнитного редуктора при переменном вращении тихоходного вала (модулятора): а) – осциллограмма выходного напряжения инвертора ПЧ, подключённой к статору МР; б) – осциллограмма амплитуды первой гармоники напряжения статора; в) – осциллограмма результирующей ЭДС обмотки статора; г) – осциллограмма уравнения равновесия электрического канала, т.е. обмотки статора при не стабилизации магнитного поля статора магнитного редуктора

Следует обратить внимание, что формула $\dot{U} - \dot{I}Z = -\dot{E}_\delta$, определяет результирующую ЭДС обмотки статора E_δ , наведенную магнитным полем воздушного зазора, в установившемся режиме. Для переходных процессов эту ЭДС следует определить по формуле, вытекающей из выражений (3.102 и 3.103) [48, 36].

$$E_\delta = \sqrt{(E_{0m} - I_{m1}r)^2 + \left(L_{aq} \frac{dI_{m1}}{dt}\right)^2}, \quad (3.105)$$

где $L_{aq} = L_q - L_\sigma$ – индуктивность взаимоиндукции обмотки статора по поперечной оси, Гн.

Во время изменения скорости вращения ВК скорость вращения выходного вала должна оставаться неизменной т.е. при присоединении на быстроходный вал МР ротора электрогенератора, скорость вращения ротора ЭГ должна оставаться неизменной в целях стабилизации выходных электрических параметров ВГ.

Потокоцепление обмотки статора по продольной оси:

$$\Psi_d = \frac{4}{\pi^2} l \tau_1 \Lambda_{1m}'' h_m H_{cB} w_1 k_{w1} \quad (3.106)$$

Индуктивность взаимоиндукции обмотки статора:

$$L_a = \frac{6}{\pi^2} l \tau_1 \Lambda_0' \frac{(w k_{w1})^2}{p_1} \quad (3.107)$$

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

$$\frac{dI_{m1}}{dt} = \frac{1}{L_c} (U_{m1} \cos \theta_1 - E_{0m} - r I_{m1}), \quad (3.108)$$

где $I_q = I_{m1}$ – поперечный ток обмотки статора, равный полному току из-за отсутствия продольного тока ($I_d = 0$), А;

r – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

Решая дифференциальное уравнение (3.108), получим упрощённую формулу значения тока статора, зависящую от выходного значения ЭДС ПЧ и ЭДС обмотки статора:

$$I_{m1} = \frac{1}{L_c} \int (U_{m1} \cos \theta_1 - E_{0m} - r I_{m1}) dt \quad (3.109)$$

$$I_{m1} = \frac{t \cdot \left(\frac{1}{L_c} U_{m1} \cos \theta_1 - E_{0m} \right)}{1 + rt} \quad (3.110)$$

где $L_c = L_a + L_\sigma$ – синхронная (полная) индуктивность обмотки статора, Гн;

L_σ – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн.

Результаты аналитического расчёта зависимости тока статора и ЭДС обмотки статора от угловой скорости тихоходного вала МР приведены на рисунке 3.54.

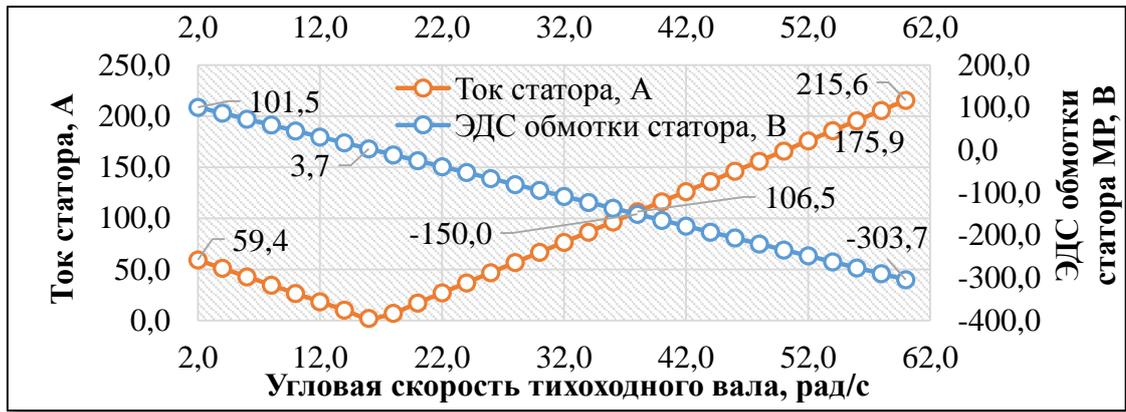


Рисунок 3.54 – Аналитический расчёт графика зависимости тока статора и ЭДС обмотки статора от угловой скорости тихоходного вала МР

Амплитудное значение ЭДС холостого хода обмотки статора МР (Рисунок 3.55) определяется из выражения [36]:

$$E_{0m} = [(z - p_1)\Omega_2 - z\Omega_1]\Psi_d \quad (3.111)$$

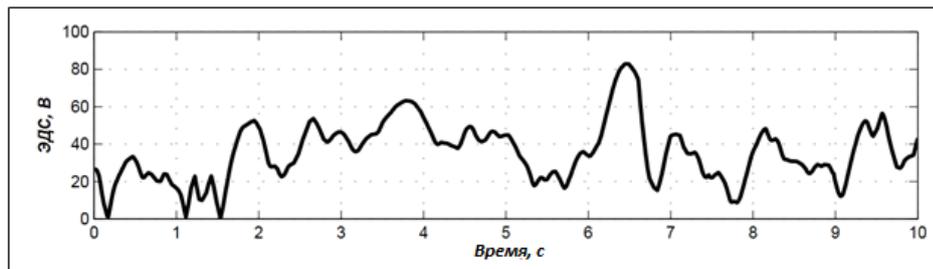


Рисунок 3.55 – Амплитудное значение ЭДС обмотки статора при переменной скорости тихоходного вала

На рисунках 3.56-3.59 приведены графики изменения электромеханических параметров МР при не регулировании магнитного поля статора.

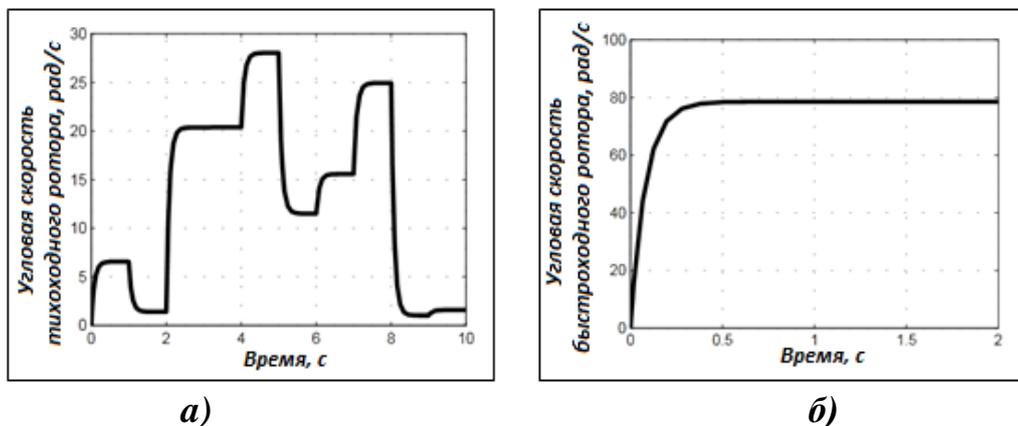
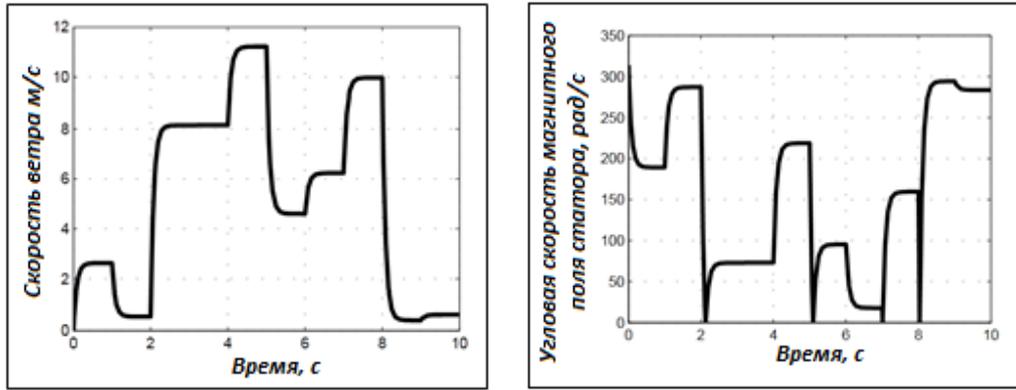


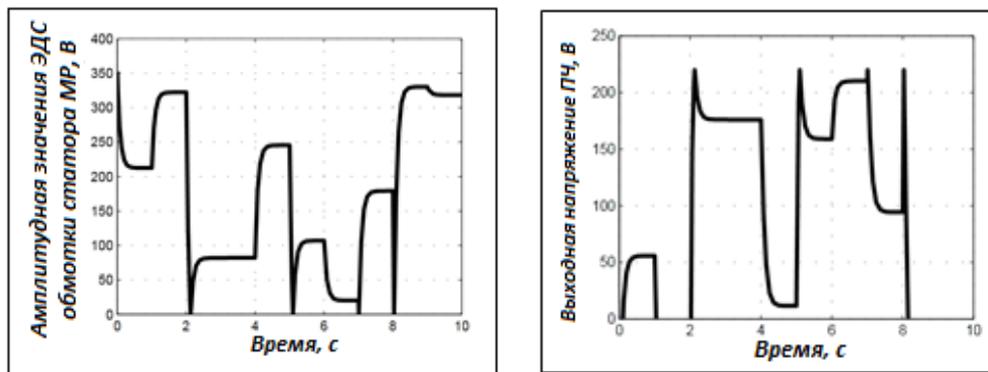
Рисунок 3.56 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при не регулировании магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – угловая скорость быстрого ротора при переменном вращении ВК; б) – угловая скорость быстрого ротора



а)

б)

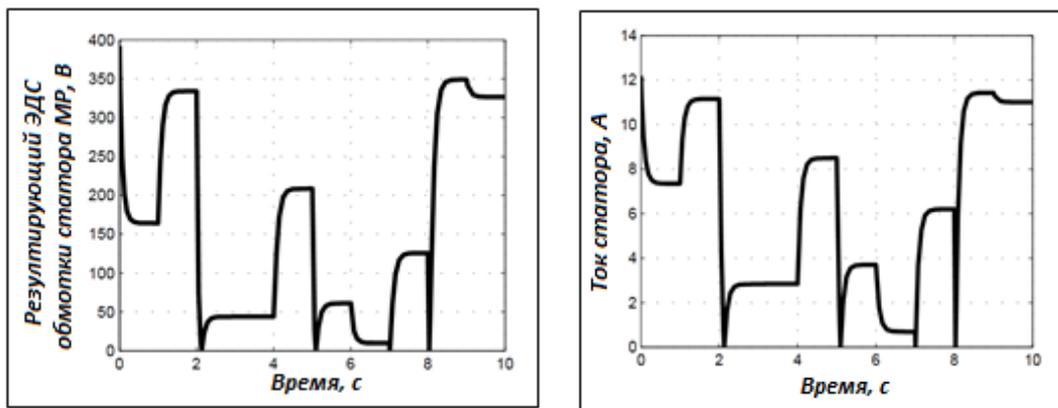
Рисунок 3.57 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при не регулировании магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) угловая скорость быстрогоходного ротора при переменном вращении ВК; б) угловая скорость магнитного поля статора МР



а)

б)

Рисунок 3.58 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при не регулировании магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – амплитудное значение ЭДС холостого хода обмотки статора; б) – выходная напряжения инвертора ПЧ



а)

б)

Рисунок 3.59 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при не регулировании магнитного поля статора, статическим преобразователем частоты; а) – результирующая ЭДС обмотки статора по выражению (3.105); б) – ток статора по выражению (3.110)

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. Предполагая зависимость $\omega = \omega(I_y)$ линейной, равной $\omega = kI_y$, будем иметь:

$$\omega = k \left[I_y + k_n \left(\varepsilon + \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \right] \quad (3.112)$$

Для стабилизации скорости Ω_2 необходимо также воздействовать на ток статора путём изменения входного напряжения инвертора E . По аналогии с предыдущей обратной связью можем записать:

$$E = k_1 \left[I_{y1} + k_{n1} \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{n1}} \int_0^t \varepsilon dt + T_{d1} \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \right] \quad (3.113)$$

На нижеприведённых характеристиках переходного процесса ВЭУ с МР (Рисунки 3.60-3.63), приведены графики угловой скорости магнитного поля статора, амплитудного значения напряжения обмотки статора, выходного значения ЭДС преобразователя частоты и тока статора МР при стабилизации (регулирование) магнитного поля статора статическим преобразователем частоты.

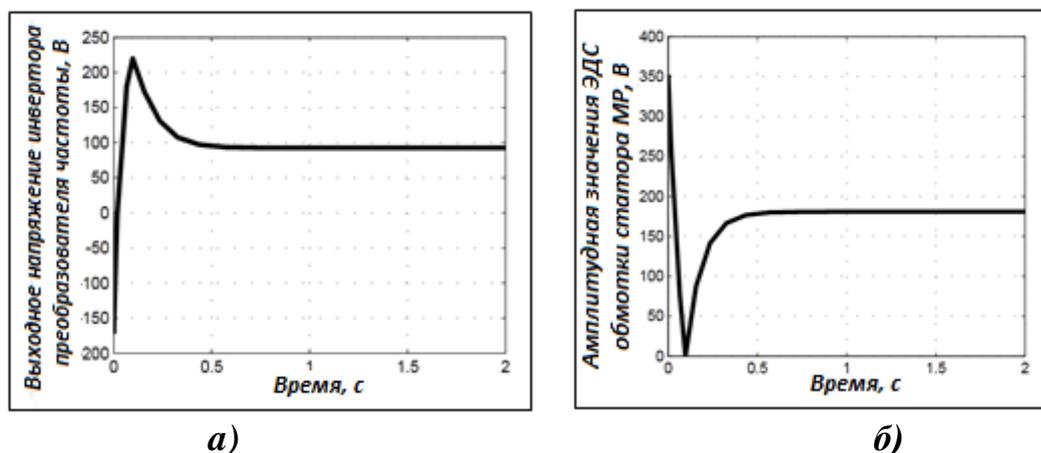
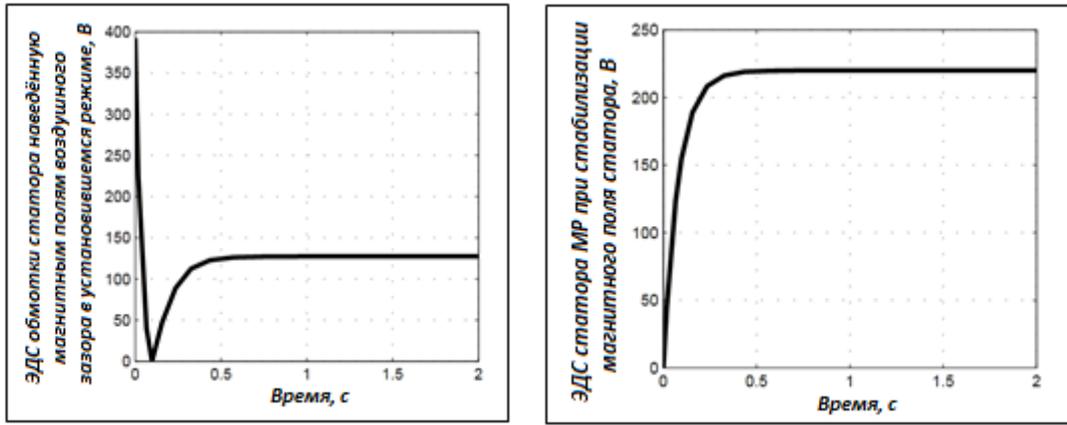


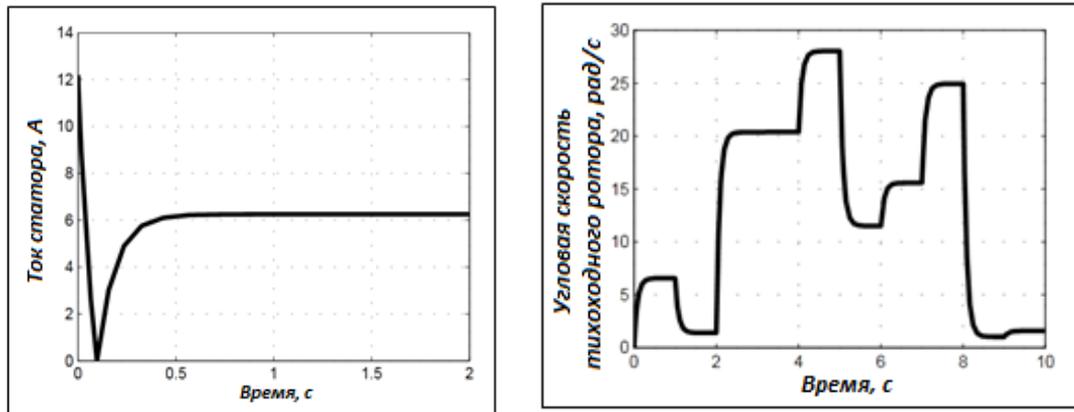
Рисунок 3.60 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при стабилизации (регулирование) магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – выходная напряжения инвертора ПЧ; б) – амплитудное значение основной гармоники напряжения статора



а)

б)

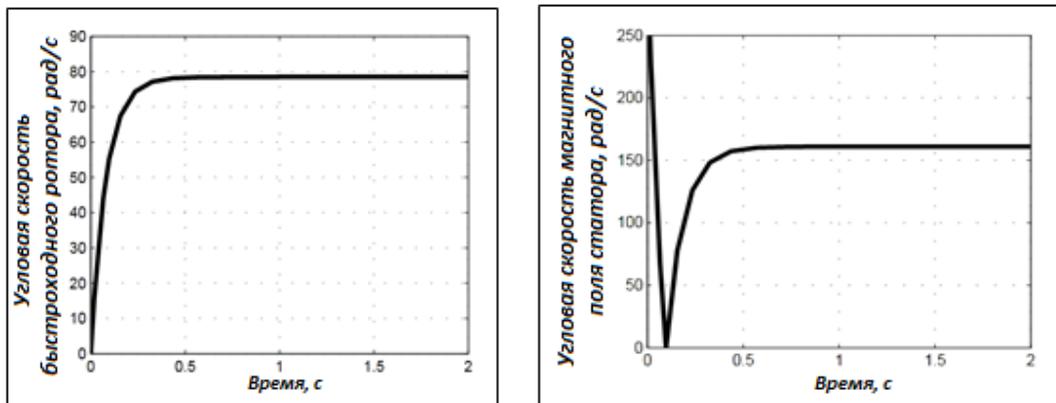
Рисунок 3.61 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при стабилизации (регулирование) магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – ЭДС обмотки статора, наведенной магнитным полем воздушного зазора; б) – ЭДС статора при стабилизации быстроходного ротора по выражению (3.105)



а)

б)

Рисунок 3.62 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при стабилизации (регулирование) магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – ток статора по выражению (3.110); б) – угловая скорость тихоходного ротора



а)

б)

Рисунок 3.63 – Характеристика переходных процессов ВЭУ с МР при стабилизации (регулирование) магнитного поля статора статическим преобразователем частоты; а) – угловая скорость быстроходного ротора; б) – угловая скорость магнитного поля статора МР

3.10 Момент инерции в ветроустановке с магнитным редуктором при разности скорости вращения валов

Рассматривая ВЭУ с МР как механическую инерционную систему необходимо определить все инерционные части. Любая сложная электромеханическая система состоит из механических, электрических и полупроводниковых элементов, которые, взаимодействуя между собой, формируют комплекс движущих систем с определённой силой, что приводит к дополнительным колебательным силам с определённой массой, силой и угловой скоростью относительно точки вращения (Рисунок 3.64).

$$\frac{d\omega_i}{dt} = 0, \text{ если } \sum_1^m M_i = 0 \quad (3.114)$$

Схему инерционного состояния ВЭУ с МР можно описать по первому и второму законам Ньютона, которые объясняют вращательный механизм с определённой массой и скоростью движения, имеющим фиксированную ось вращения.

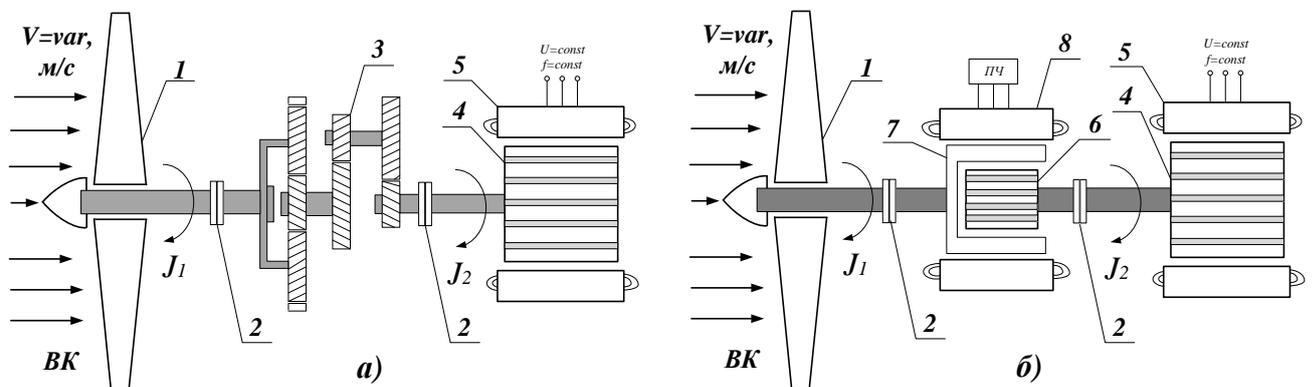


Рисунок 3.64 – Кинематическая схема ВЭУ: а) – ветроустановка с планетарным механическим редуктором; б) – ветроустановка с магнитным редуктором

Момент инерции зависит от скорости вращения всех валов относительно угловой скорости, массы роторов МР, ВГ и ВК. Исходя из того, что угловая скорость входного вала МР постоянно изменяется в зависимости от градиции скорости ветра, момент инерции по второму закону Ньютона определяет динамическую систему [54].

Тогда момент инерции ВЭУ с МР принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{BK} = J_{BK} \cdot \frac{d\Omega_{BK}}{dt} \\ M_{P1} = J_{P1} \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} \\ M_{P2} = J_{P2} \cdot \frac{d\Omega_2}{dt} \\ M_{\text{ЭГ}} = J_{\text{ЭГ}} \cdot \frac{d\Omega_{\text{ЭГ}}}{dt} \end{array} \right. , \quad (3.115)$$

где J_i , Ω_i – инерция и угловая скорость валов МР.

Так как все вращательные системы ВЭУ с МР имеют точную массу и скорость вращения от центральной точки до оси вращения, то инерционную величину определяем из систем уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{BK} = m_{BK} \cdot R_{BK}^2 \\ J_{P1} = m_{P1} \cdot R_{P1}^2 \\ J_{P2} = m_{P2} \cdot R_{P2}^2 \\ J_{\text{ЭГ}} = m_{\text{ЭГ}} \cdot R_{\text{ЭГ}}^2 \end{array} \right. , \quad (3.116)$$

Для определения момента инерции механизма с передаточным отношением необходимо учитывать коэффициент редукции в звеньях там, где выполняется трансмиссия.

Таким образом, суммарный момент инерции с придаточным отношением принимает вид:

$$J_{\Sigma} = J_{BK} + J_{P1} \frac{J_{P2} + J_{\text{ЭГ}} + m_{P2} \cdot R_{P2}^2}{i^2} \quad (3.117)$$

Усилие на движение вращающихся частей ВЭУ определяется из выражения:

$$F - F_{ci} = m_i \frac{dV_i}{dt}, \quad (3.118)$$

где F – сила сопротивления вращающихся частей ВЭУ, Н·м;

m_i – масса вращающихся частей, кг;

V_i – линейная скорость, в нашем случае скорость ветра в плоскости ВК, м/с.

Для анализа инерционного состояния электромеханических движений ВЭУ с МР в разомкнутой системе без влияния электрических нагрузок на зажимах ВГ необходимо определить суммарный момент инерции всей системы:

$$M_{ВЭУ с МР} = J_{ВК} \cdot \frac{d\Omega_{ВК}}{dt} + J_{P1} \cdot \frac{d\Omega_{P1}}{dt} + J_{P2} \cdot \frac{d\Omega_{P2}}{dt} + J_{ЭГ} \cdot \frac{d\Omega_{ЭГ}}{dt} - M_{MP} \quad (3.119)$$

Для создания вращательного движения ВК и ВГ расходуется определенное количество ветряного потока. Рассматривая ветряной поток как мощность для генерирования электроэнергии с учётом инерционных составляющих и массогабаритных размеров ВК, ВГ и из валов, определяем мощность, расходуемую для создания вращательного движения ВК и ВГ.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{F_{ветра} \cdot V_{ветра} \cdot 10^{-3}}{\eta_{ВК}} = \frac{M_{ВК} \cdot \omega_{ВК} \cdot 10^{-3}}{\eta_{ВК}}, \quad (3.120)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{F_{P2} \cdot V_{P2} \cdot 10^{-3}}{i_{MP} \cdot \eta_{MP}} = \frac{M_{P2} \cdot (\omega_{P2} \pm \omega_{ПЧ}) \cdot 10^{-3}}{i_{MP} \cdot \eta_{MP}}. \quad (3.121)$$

Для анализа инерционного состояния электромеханических движений ВЭУ с МР в замкнутой системе с учётом влияния электрических нагрузок на зажимах ВГ определяем суммарный момент инерции всей системы:

$$M_{ВЭУ с МР} - \frac{P_{э2}}{i \cdot \omega_{ВК} \cdot \eta_{MP}} = \left(J_{ВК} + J_{P1} + \frac{J_{P2} + J_{ЭГ} + P_{э2}}{i^2} \right) \frac{d\omega}{dt} \quad (3.122)$$

Момент инерции в системе генерирования ВЭУ с ПМР постоянен из-за постоянных массогабаритных размеров механических частей, таких как ВК, редуктор, ротора ВГ, жестко связанных между собой для расчёта инерционного состояния ВЭУ с ПМР (Рисунок 3.64, а). Необходимо рассматривать сумму момента инерции как едино приложенную массу на ротор ВГ.

Тогда момент инерции для ВЭУ с ПМР принимает вид:

$$M_{ВГ} - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad (3.123)$$

В системе генерирования ВЭУ с МР инерционная часть состоит из двух отдельных частей, т.е. из двух роторов, связанных между собой электромагнитными силами. Тогда момент инерции необходимо рассчитать

отдельно, на тихоходный ротор 7 действует момент инерции J_1 , на быстроходный ротор J_2 и ВГ $J_{ВГ}$.

Следовательно, момент инерции в ВЭУ с МР принимает вид:

$$\begin{cases} M_{BK} - M_C = (J_{BK} + J_{P1}) \frac{d\omega}{dt} \\ M_{ВГ} - M_C = \left(\frac{J_{P2} + J_{ВГ}}{i_{MP} \cdot \eta_{MP}} \right) \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (3.124)$$

Из выражения (3.124) отчетливо видно, что приложенный момент инерции M_{BK} действуют на тихоходный ротор МР, а момент инерции $M_{ВГ}$ на ротор ВГ.

По результатам моделирования выяснено, что момент инерции уменьшает угловую скорость вращения валов на всех звеньях системы. Кроме того, из-за не жёсткости механических систем на валах МР действуют два разных момента инерции J_1 и J_2 с разными угловыми скоростями. Учитывая такой характер системы, при моделировании ВЭУ с МР учтены сигналы датчиков, на всех валах, которые формируют сигнал с учётом моментов инерции, для точной стабилизации угловых скоростей и моментов выходного вала при разгоне при торможении и при установившихся режиме (Рисунки 3.65 и 3.66).

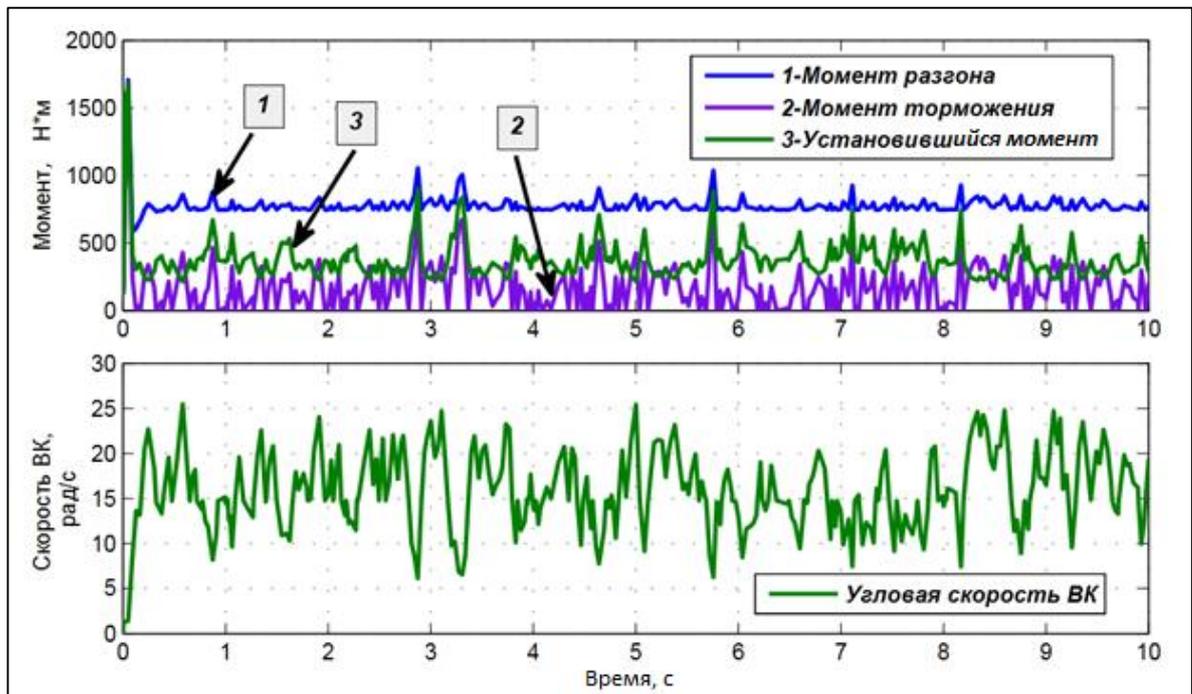


Рисунок 3.65 – Осциллограмма изменение момента, разгона и торможения при переменной угловой скорости ВК с учётом момента инерции

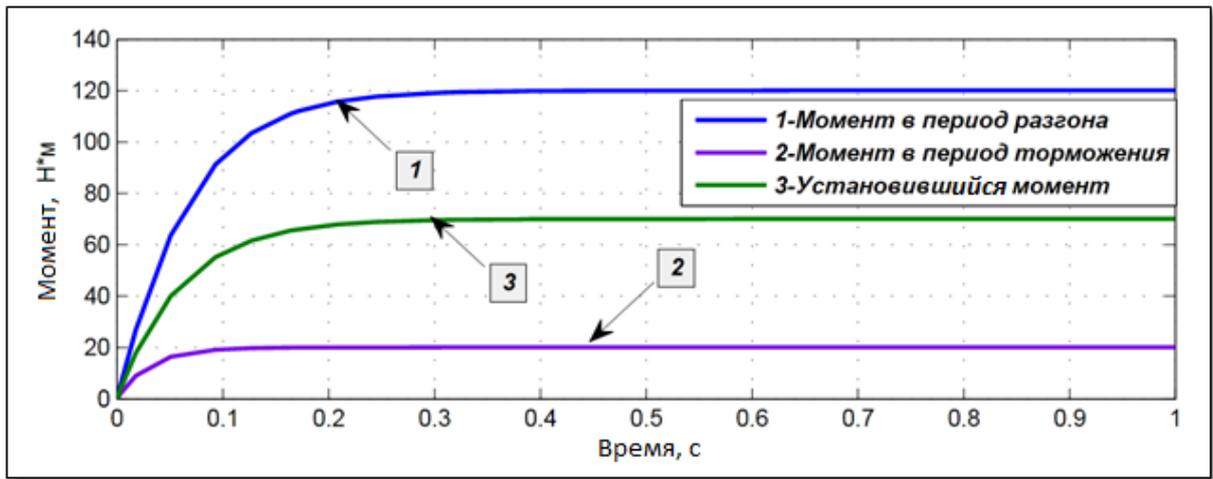


Рисунок 3.66 – Осциллограмма установившегося момента, разгона и торможения при стабилизации угловой скорости быстроходного вала с учётом момента инерции на всех валах

С учётом моментов инерции формирование функции сигнала управления ПЧ принимает вид:

$$\omega = f(J_i) \quad (3.125)$$

Как известно ПЧ реагирует на сигнал, поступающий при заданном диапазоне регулирования от регулятора скорости. Датчик скорости (тахогенератор, резолвер, датчик положения ротора) при изменении угловой скорости за счёт моментов инерции подаёт пропорциональное напряжение на РС. Тогда РС при возникновении инерционных сил подаёт точный сигнал на ПЧ для точного изменения частоты магнитного поля статора МР.

Коэффициент тахогенератора с учётом моментов инерции при разности скорости входного и выходного вала принимает вид:

$$k_{ТГ1} = \frac{U_{зД1}}{\Omega_1 \pm \Omega_{j1}(t)}, \quad (3.126)$$

$$k_{ТГ2} = \frac{U_{зД2}}{\Omega_2 \pm \Omega_{j2}(t)}. \quad (3.127)$$

С учётом выражения (3.126) и (3.127) разность коэффициента тахогенератора входного и выходного валов МР принимает вид:

$$\Delta k_{ТГ} = \frac{k_{ТГ1}}{k_{ТГ2}} = \frac{U_{зД1}}{U_{зД2}} = \frac{\Omega_1 \pm \Omega_{j1}(t)}{\Omega_2 \pm \Omega_{j2}(t)} = \pm \omega_{ПЧ} \quad (3.128)$$

Из вышеизложенных выражений можно сказать, что ПЧ корректирует частоту питания статора МР с учётом моментов инерции на всех звеньях системы управления, что устраняет колебательный процесс угловой скорости быстроходного вала, который, в свою очередь, жёстко подключен к ротору ВГ.

$$P_{BK} = \sum_{i=1}^n \Omega_{BK} \cdot (M_{BK} + M_{потерьBK}), \quad (3.129)$$

$$P_{BK} = \sum_{i=1}^n (\Omega_{BK} + \Omega_{CT}) \cdot (M_{номВГ} + M_{потерьВГ}), \quad (3.130)$$

$$\frac{dP_{MP}}{dt} = J_{ВГ} \frac{M_{ВГ} \cdot (\Omega_{P2} \pm \Omega_{CP})}{\eta_{ВГ}}. \quad (3.131)$$

Уравнения (3.126-3.131) являются базовыми в процессе регулирования и стабилизации скорости вращения быстроходного вала МР (Рисунок 3.67). Из них можно сделать выводы о режимах работы и контроле ВГ. Если работающую ВЭУ резко отключить от общей сети, т. е. снять с неё нагрузку в виде номинального момента $M_{ВГ}$, то в этом случае частота вращения ВК и ВГ ω начнёт резко возрастать из-за отсутствия тормозного момента нагрузки.

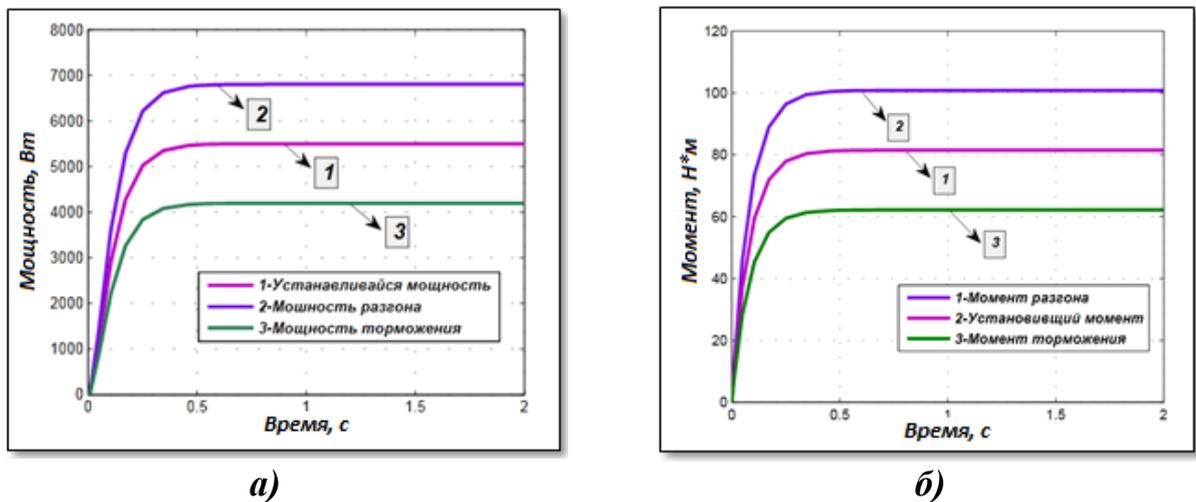


Рисунок 3.67 – Осциллограмма мощности и момента ветрогенератора ВЭУ с МР:

а) – мощность на валу ВГ с учётом момента инерций; б) – моменты на валу ВГ с учётом моментов инерций

Увеличение частоты вращения ВК и ВГ будет происходить до того момента, когда значение угловой частоты магнитного поля статора будет понижаться

равносильно изменению момента нагрузки на зажимах ВГ. В этом случае из-за понижения мощности на зажимах ВГ, часть полезной мощности рекупируется от статора к сети для стабилизации токов обмотки статора МР.

Большинство ВЭУ с изменяющимся углом поворота лопастей при резких изменениях скорости ветра разрушится от внезапных экстремальных нагрузок, и варьируемого значения механического (полезного) момента $M_{ВГ}$. Для устранения таких внезапных скачков мощности и момента на зажимах ВГ в системе ВЭУ с МР скорость вращения быстроходного вала регулируется с помощью высокоточных сигналов обратной связи по изменению момента и мощности приложенного на выходных зажимах ВГ, что устраняет внезапные аварийные ситуации. В основе метода контроля МР в зависимости от мощности и момента на зажимах ВГ лежит выражение (3.131), т.е. стабилизация угловой скорости выходного вала от мощности электроприёмников, подключённых к выходным зажимам ВГ. Предложенный метод стабилизации выходного вала и регулирования магнитного поля статора МР представляет собой замкнутую систему автоматического управления системы генерирования ВЭУ с МР.

3.11 Выводы по главе 3

1. Для рационального использования энергии ветра в ВЭУ целесообразно применить МР вместо трансмиссионного планетарного механического редуктора.

2. Учитывая конструкционную особенность режима работы МР, можно произвести синхронизацию ВЭУ в единую сеть для выработки дополнительной мощности и выравнивания графика нагрузки в часы максимума нагрузки.

3. Моменты тихоходного и быстроходного вала МР тесно связаны с формированием электромагнитного момента статора. В случае отсутствия электромагнитного момента статора величина моментов тихоходного и быстроходного вала равняется нулю. Кроме того, моделирование угловых скоростей, моментов, ток и ЭДС статора показали, что эти величины постоянно изменяются в зависимости от скорости вращения тихоходного вала.

4. Моделирование ВЭУ с МР показало, что в системе генерирования имеет место рекуперация энергии во время увеличения скорости ветра и увеличение номинального значения скорости вращения тихоходного вала, что позволяет максимально использовать энергию ветра.

5. Разработанный алгоритм автоматизированной работы и порядок расчёта ВЭУ с МР позволяет максимально использовать энергии ветра для генерирования электроэнергии. Предложенный алгоритм автоматизированной работы ВЭУ с МР полностью описывает процесс генерирования электроэнергии в ВЭУ с МР. Система управление ВЭУ с МР с регуляторами скорости и преобразователем частоты, автоматический стабилизирует выходной вал с учётом инерционных сил ВК и вала ротора ВГ.

ГЛАВА 4 СИНХРОННАЯ РАБОТА ВЕТРОУСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ РЕДУКТОРОМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКА ЕЁ ОКУПАЕМОСТИ

4.1 Синхронная работа гидроаккумулирующей электростанции с ветроэлектростанцией

Для обеспечения электроэнергией жилых массивов, находящихся в горной, труднодоступной местности, с достаточно большим потоком ветра, целесообразно установить гидроаккумулирующую электростанцию (ГАЭС) с ветроагрегатом. Принцип работы такой системы заключается в том, что в трёхфазную шину присоединены две электрические системы (Рисунок 4.1 контур I, III), которые вырабатывают электрическую энергию и выдают потребителям электроэнергию (Рисунок 4.1 контур II, IV). В системе I ВК – ветроколесо, при сильном ветре вырабатывает электроэнергию для питания АД – асинхронного двигателя насосной станции (Рисунок 4.1 контур II) для откачивания воды и пополнения бассейнов в верхнем бьефе (ВБ). Таким образом, аккумулируется достаточное количество воды для выработки электроэнергии в ГАЭС. Во время отсутствия ветра в жилом массиве, ГАЭС работает в режиме ГЭС и при этом выравшивает суточный график электрических нагрузок потребителей электроэнергии.

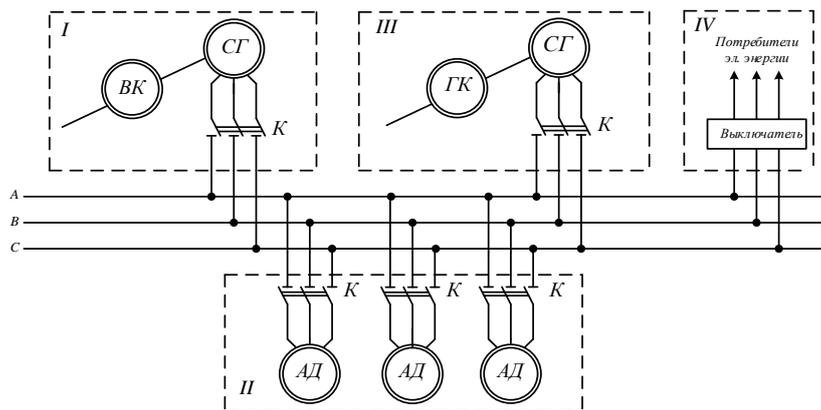


Рисунок 4.1 – Электрическая схема ГАЭС с ветроагрегатом: ВК – ветроколесо; СГ – синхронный генератор; АД – асинхронный двигатель; ГК – гидроколесо; М – мотор; К – контактор; I – схема соединения ветроагрегата; II – схема соединения насосной станции; III – схема миниГЭС; IV – схема соединения микроГЭС

Преимущество этой ГАЭС заключается в том, что она практически не потребляет электрическую энергию от сети и во время нехватки или в случае аварии в сети, потребители не остаются без электроэнергии. В схеме рассмотрено не только аккумулирование гидроресурсов, но и аккумулирование электроэнергии при помощи мощных аккумуляторов во время повышения мощности за счёт увеличения скорости ветра. Для создания такой электростанции с возобновляемым источником энергии необходимо создать математическую, имитационную модель, определить электрическую величину сети и выбрать надёжную систему защиты от перенапряжения и токов коротких замыканий.

4.2 Система электроснабжения насосной скважины с ветроагрегатом для водоснабжения жилых массивов

Для подачи воды из скважин для систем водоснабжения сельскохозяйственных районов и целей орошения широко применяются установки центробежного скважинного электронасосного агрегата типа ЭЦВ. Электроснабжение насосной скважины осуществляется ветроагрегатом, мощность которой составляет 75 кВт. На рисунках 4.2 и 4.3 приведены модель и система ветроагрегата питающий насосную скважину, с асинхронным двигателем, который откачивает воду из нижнего уровня в верхний.

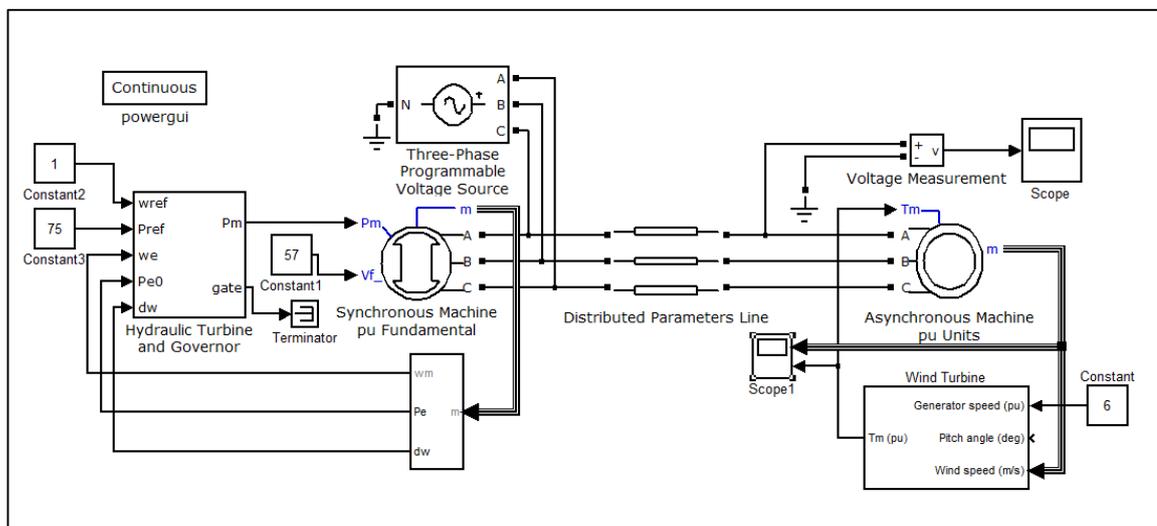


Рисунок 4.2 – Модель системы насосной установки с ВЭУ в программе Matlab Simulink

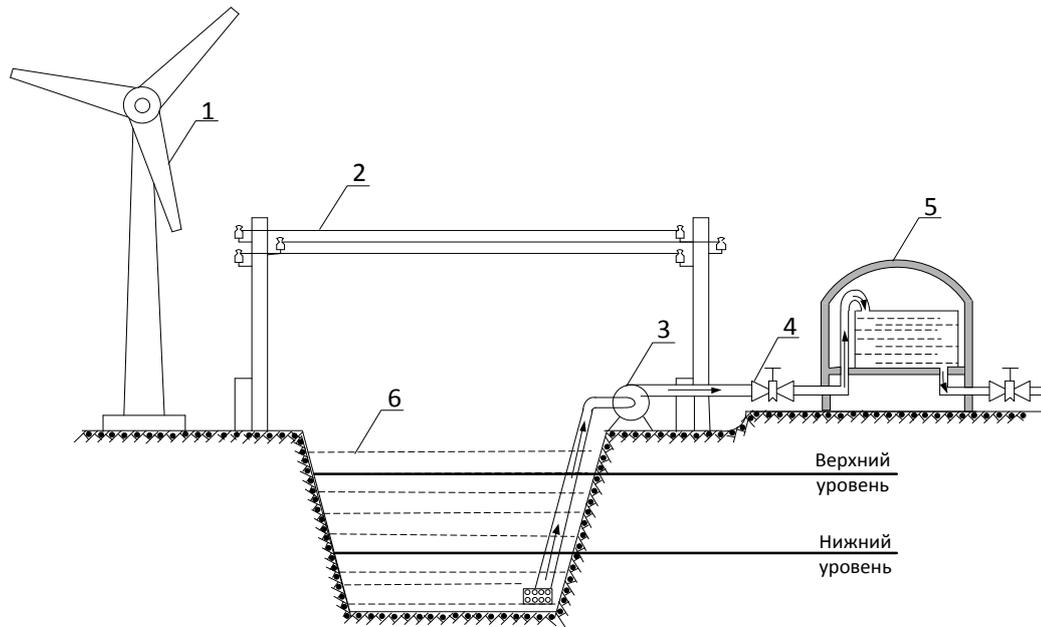


Рисунок 4.3 – Система насосной установки с ветроустановком:

1 – ВЭУ; 2 – ВЛЭП-380 В; 3 – насос для водоснабжения; 4 – задвижка воды;
5 – аккумулирующая ёмкость для воды; 6 – водоём

Ветроагрегат *1* в практике может находиться на определенном расстоянии от насосной станции, в зависимости от скорости ветра, но насосная станция устанавливается там, где необходимо произвести водоснабжение жилых массивов, что ставит задачу передачи электроэнергии ВЛЭП 2 или КЛЭП.

Для точной оценки выработки электроэнергии необходимо учитывать среднюю мощность ветроагрегата для определения мощности двигателя НС (Рисунок 4.4).

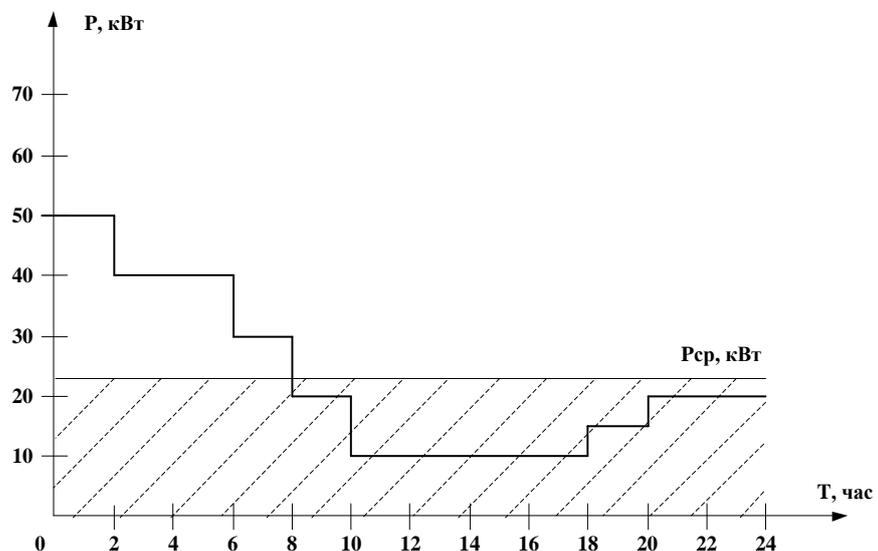


Рисунок 4.4 – Суточный график выработки мощности ветроагрегата

Расчет средней мощности по графикам нагрузки производится по следующему выражению [93]:

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum P \cdot t}{\sum t}, \quad (4.1)$$

где $\sum P \cdot t$ – суммарное количество вырабатываемой электроэнергии ветроагрегатом, кВт·час;

$\sum t$ – суммарное время выработки электроэнергии ветроагрегатом, час.

$$P_{\text{ср}} = \frac{550}{24} = 22,9 \text{ кВт}$$

Таким образом, средняя мощность вырабатываемой электроэнергии ветроагрегатом составляет 22,9 кВт.

Исходя из этих условий можно произвести расчет мощности и выбрать тип электродвигателя насосной скважины.

Промышленностью освоены различные типоразмеры электронасосных агрегатов мощностью двигателя от 2 до 65 кВт. Система насосной установки с ветроагрегатом состоит из асинхронного электродвигателя 3, аккумулирующего бака 5 для хранения (аккумулирования) воды во время отключения насоса в период отсутствия ветра и других устройств, смонтированных по схеме, обеспечивающей необходимое перемещение воды.

При расчете мощности двигателя для привода насоса следует учитывать возможное увеличение мощности на валу при отклонении режима от расчетного. Это обстоятельство требует некоторого запаса мощности двигателя и учитывается коэффициентом запаса мощности $k = 1,1 - 1,5$, чем крупнее насос, тем меньше коэффициент запаса мощности.

Мощность приводного двигателя определяют из выражения:

$$P_p^{\text{дв}} = \frac{k_3 \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot 1000}, \quad (4.2)$$

где k_3 – коэффициент запаса, равный 1,1 – 1,4;

γ – плотность перекачиваемой жидкости, Н/м³;

Q – производительность насоса, м³/с;

H – напор насоса, м;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи (при непосредственном соединении насоса с двигателем $\eta_{\text{п}} = 1$);

$\eta_{\text{н}}$ – КПД насоса (принимается для центробежных насосов с давлением свыше 39 000 Па, при КПД, равном 0,6-0,75).

Рассмотрим пример расчета мощности двигателя для насоса с производительностью 160 м³/час или 44,44 л/сек, напором 35 м, КПД двигателя 0,89 и насоса 0,98

$$P_p^{о\epsilon} = \frac{1,15 \cdot 9810 \cdot 160 \cdot 35}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,89 \cdot 0,98} = 20,12$$

Принимаем ближайшую стандартную мощность 22 кВт и выбираем тип асинхронного двигателя серии АИР 180S4 мощностью 22 кВт с номинальной частотой вращения 1500 оборотов в минуту, предназначенного для общепромышленного оборудования: насосов, вентиляторов и других устройств.

Как видно из расчета, насосная скважина может обеспечить водой сельскохозяйственные районы и небольшие жилые кварталы.

Напор является одним из главных показателей любого насоса, поэтому при расчёте напора воды необходимо учитывать высоту установки насоса и ёмкости для хранения воды, а также производительность насоса (Рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Диаграмма зависимости производительности насоса от мощности

4.3 Параллельная работа альтернативных электростанций

Устойчивость энергосистемы является одним из важнейших условий для потребителей электроэнергии. Развитие нетрадиционных возобновляемых электростанций, таких как ветроэлектростанции, микроГЭС и солнечные электростанции, в разных географических регионах требует синхронной и параллельной работы. Во многих случаях возобновляемые источники энергии (ветер, гидроресурсы и солнечная интенсивность) не встречаются вблизи друг друга, поэтому для синхронной работы таких электростанций необходимо создать сеть с собственными ПП для надежности электроснабжения различных потребителей.

На рисунке 4.6 рассмотрена модель синхронной работы ВЭС, микроГЭС и СЭС. В качестве потребителей в данной модели служат синхронный двигатель и активная трехфазная симметричная нагрузка.

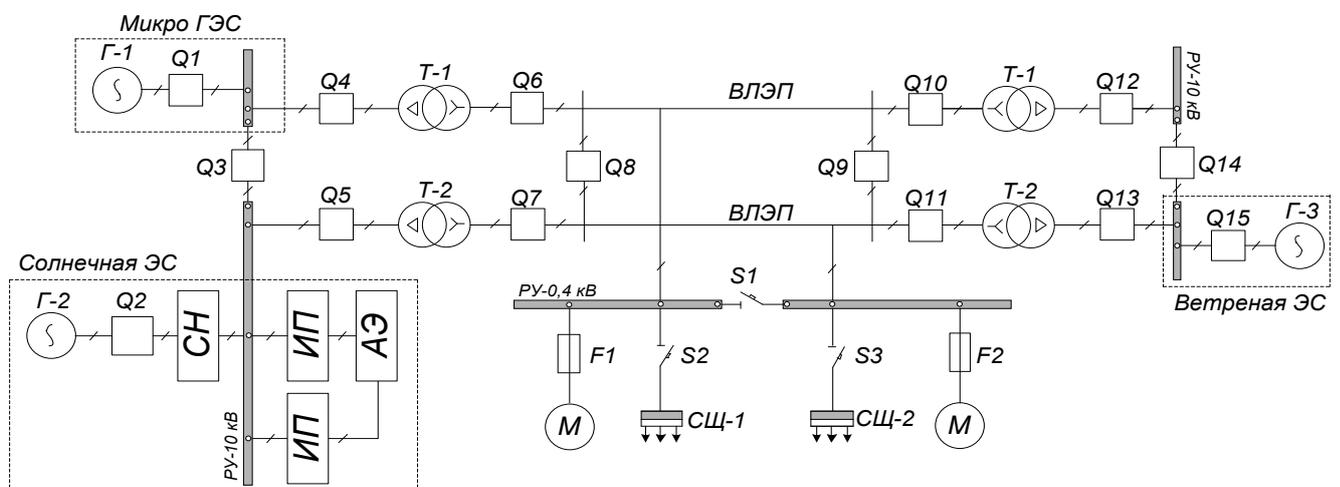


Рисунок 4.6 – Однолинейная схема синхронной работы ветроэлектростанции, микроГЭС и солнечной ЭС: *G* – генераторы электростанции; *T* – трансформаторы; *РУ* – распределительное устройство; *Q* – выключатели; *F* – предохранитель; *S* – автоматический выключатель; *M* – двигатель; *СИЩ* – силовой щит; *СН* – стабилизатор напряжения; *ИП* – инверторные преобразователи; *АЭ* – аккумуляторы электроэнергии; *ВЛЭП* – воздушные линии электропередачи

Для расчета мощности и бесперебойной выработки электроэнергии в данной сети необходимо определить время выработки мощности электростанции. По

графикам выработки мощности альтернативных электростанций можно определить устойчивость электроснабжения потребителей.

4.4 Синхронные генераторы с постоянным магнитом

В синхронных генераторах с постоянными магнитами направление магнитного поля возбуждения образуется с применением постоянных магнитов. Применение постоянных магнитов в качестве возбудителя направления магнитного поля исключает дополнительные потери на возбуждения в скользящих контактах. Кроме того, применение постоянных магнитов повышает КПД генератора и их обслуживание по сравнению с генераторами с обмоткой возбуждения и щёточными устройствами.

Наличие постоянных магнитов в любом типе машин может заменить обмотку возбуждения. В основном у синхронных генераторов постоянные магниты расположены на роторе в виде цилиндрических кольцеобразных магнитов, намагничиваемых в радиальном направлении, и образуют число пар полюсов. Теория электромагнитных процессов в синхронных генераторах с постоянными магнитами аналогична с теорией электромагнитного возбуждения, но при определении характеристики возбуждённости $\varepsilon = E/U$ строится с учётом расчёта индуктивных сопротивлений постоянных магнитов ротора.

Электрические машины с постоянными магнитами были изобретены еще на заре развития электромеханики, но широкое распространения получили в течение последних лет с развитием электромеханических систем [12]. Такие электрические машины по своим масса-габаритным размерам и эксплуатационным характеристикам успешно конкурируют с машинами с системой электромагнитного возбуждения. Кроме того, отсутствие обмотки возбуждения и щеточного механизма уменьшает потери мощности в режиме генерирования энергии, и их целесообразно использовать в ветроустановках различных мощностей.

4.5 Преобразование энергии в генераторном режиме синхронной машины

Рассматривая электрическую синхронную машину (СМ) как одно из основного оборудований ВЭУ с МР, преобразующих механическую энергию ветра в электрическую, зададим первоначальную мощность, приложенную к ротору СМ. Для системы генерирования ВЭУ с МР внешним моментом и внешней угловой скоростью ротора СМ являются момент и угловая скорость быстроходного вала МР:

$$P_{MP} = M_{MP2} \cdot \Omega_{MP2} = P_{BH} = M_{BH} \cdot \Omega_{BH}, \quad (4.3)$$

где P_{BH} – внешняя мощность, приложенная к ротору СМ, кВт.

При генерировании электроэнергии часть внешней мощности теряется в системе возбуждения, имеющей КПД в виде выделения тепла, трения, тем самым мощность в несколько раз уменьшается в статоре СГ.

Потери мощности на выделение тепла в обмотке возбуждения равны:

$$P_f = \eta_f \cdot \Omega \quad (4.4)$$

Тогда вращающий внешний момент приложенного к ротору СГ с учётом потерь в обмотку возбуждения равняется:

$$M_f = M_{BH} - \frac{P_f}{\eta_f \cdot \Omega} \quad (4.5)$$

При воздействии механического внешнего потока и момента на валу ротора СГ мощность потока определяется по выражению:

$$P_f = \frac{P_{BH} - P_f}{\eta_f} = M_{BH} \Omega \quad (4.6)$$

В общем случае во время генерирования электроэнергии в генераторе ВЭУ имеются различные потери мощности в виде тепла и механические потери в магнитопроводе.

Суммарные потери в генераторе составляют:

$$\sum P = \frac{P_f}{\eta_f} + P_T + P_{\sigma.m} + P_m + P_{\sigma 1} + P_{\sigma.x} + P_{\sigma.k} \quad (4.7)$$

Тогда КПД СГ в режиме генератора:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = 1 - \frac{\sum P}{P + \sum P} \quad (4.8)$$

В синхронных генераторах ВЭУ электромагнитная мощность, поступающая из ротора через воздушный зазор в статор с помощью результирующей ЭДС и тока обмотки статора, определяется по формуле:

$$P_{эм} = m_1 E_r I' \cos \beta_r', \quad (4.9)$$

$$I' = \sqrt{(I_m + I \cos \beta_r)^2 + (I \sin \beta_r)^2}, \quad (4.10)$$

$$\cos \beta_r' = \frac{I \cos \beta_r + I_m}{I'}. \quad (4.11)$$

С учётом электромагнитной мощности определим электромагнитный момент СГ:

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{m_1 p}{\sqrt{2}} \Psi_{rm} I' \cos \beta_r', \quad (4.12)$$

$$\Phi_m = \frac{2}{\pi} \tau \cdot l \cdot B_{\delta m1}. \quad (4.13)$$

Электродвижущая сила статора СМ, зависящая от угловой скорости вращения ротора:

$$E = \frac{p\Omega N\Phi}{2p} = 4fw\Phi \quad (4.14)$$

где $\Psi_{rm} = \frac{\sqrt{2}E_r}{p\Omega} = w_1 k_{o1} \Phi_{rm}$ – потокосцепление результирующего магнитного поля взаимной индукции обмотки статора с ротором, зависящее от угловой скорости ротора СМ.

По вышеприведённым формулам известно, что при постоянной скорости вращения ротора ВГ все электрические показатели на выходных зажимах генератора постоянные. Кроме того, при постоянном вращении ротора ВГ потокосцепление, магнитная индукция МДС и ЭДС в статоре становятся константой, что обеспечивает синхронную работу ВГ с сетью.

Как видно из рисунка 4.7, изменения напряжения на зажимах ВГ при изменении скорости вращения его ротора все электромеханические показатели главного генератора ВГ изменяются в течение всего времени работы.

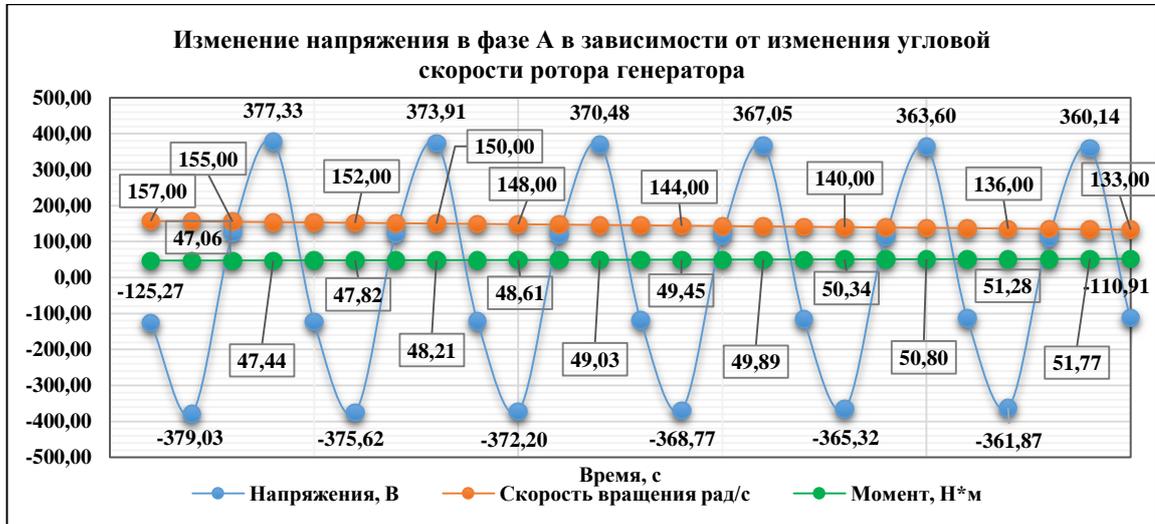


Рисунок 4.7 – Осциллограмма изменения напряжения на выходных зажимах ВГ в зависимости от скорости вращения ротора

Учитывая вышеизложенные формулы, применение МР как основного оборудования для стабилизации и рекуперации энергии в системе генерирования ВЭУ является целесообразным по сравнению с другими видами схем генерирования электроэнергии в ВЭУ.

4.6 Однолинейная схема ветроэнергетических установок с электромагнитным редуктором для электроснабжения жилого массива

Ветроэлектростанция (ВЭС) на сегодняшний день является альтернативным источником питания и служит для преобразования возобновляемых источников энергии. Как и многие другие источники энергии, ВЭС необходимо соединить в единую ЭС для повышения графика нагрузки.

Такие электростанции имеют общую сеть с другими источниками питания, такими как дизельные электростанции (ДЭС) ГЭС, СЭС, ТЭЦ и др. СШ1 подключены КУ, задача которых – выработать реактивную мощность для

поддержания напряжения на шинах и ИП с АБ для накопления энергии во время минимума нагрузки или для нужд потребителей постоянного тока [51].

В данной схеме (Рисунок 4.8) обеспечение синхронной, параллельной работы ВЭУ и других источников питания осуществляется за счёт использования балластного сопротивления (нагрузки) в качестве регулирования нагрузки. В качестве балластных сопротивлений используются электронагреватель для нагревания воды и электродвигатель для потребления излишков ветровой энергии.

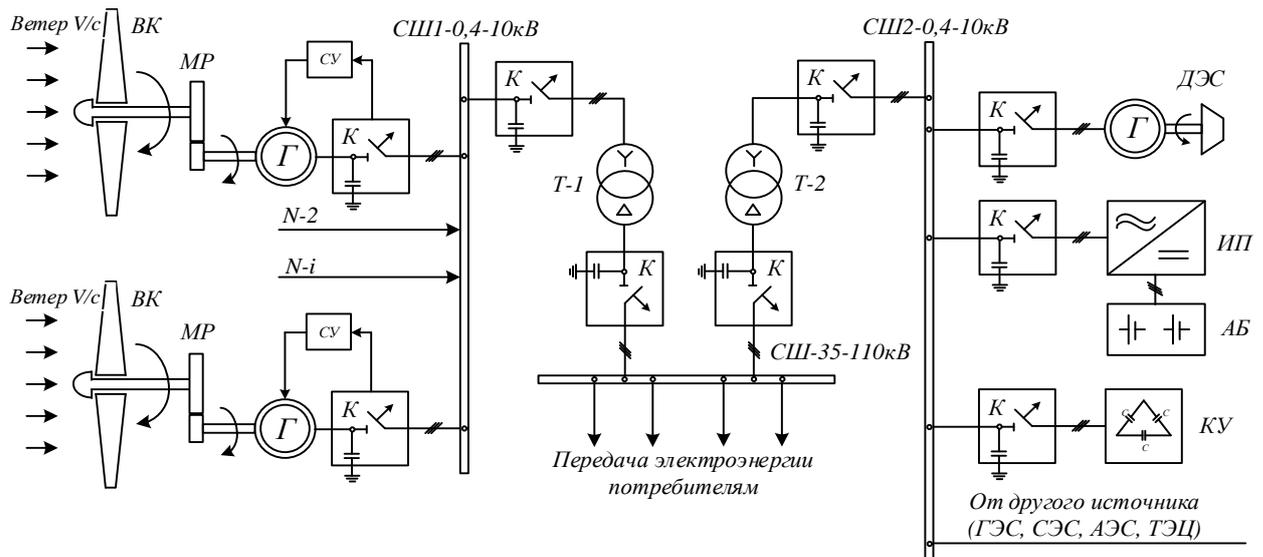


Рисунок 4.8 – Схема подключения ВЭУ в единую сеть с механическим редуктором:

ВК – ветроколесо, содержит «*N*» ВЭУ; *МР* – механический редуктор; *СУ* – система управления; *К* – коммутационный аппарат, содержащий пускорегулирующий аппарат и релейную защиту; *ДЭС* – дизельная электростанция, содержит «*N*» ДЭС; *ИП* – инверторный преобразователь; *АБ* – аккумуляторная батарея; *КУ* – компенсирующее устройство

Большим недостатком таких схем является то, что у них нет надёжных регуляторов напряжения и частоты тока, что не удовлетворяет потребности потребителей электроэнергии, чувствительных к изменению напряжения и частоты тока.

Одним из условий синхронной работы нескольких электростанций является параллельная работа источников питания и устойчивость всех электрических величин, таких как отклонение частоты сети (0,1-0,2 Гц), симметрия фаз, синусоидальность напряжения [51].

Благодаря конструкционным частям и характеристикам переходного процесса МР подключение ВЭУ в единую сеть становится возможным.

Учитывая схемы синхронизации ВЭУ (Рисунок 4.9) с различными источниками энергии, для электроснабжения жилых массивов целесообразно применить ВЭУ с МР, так как на выходном валу МР скорость вращения постоянна, независимо от переменной скорости ветра, что позволяет выработать электроэнергию, соответствующую всем нормам, предъявляемым к качеству электроэнергии для электроснабжения и синхронизации в единую сеть.

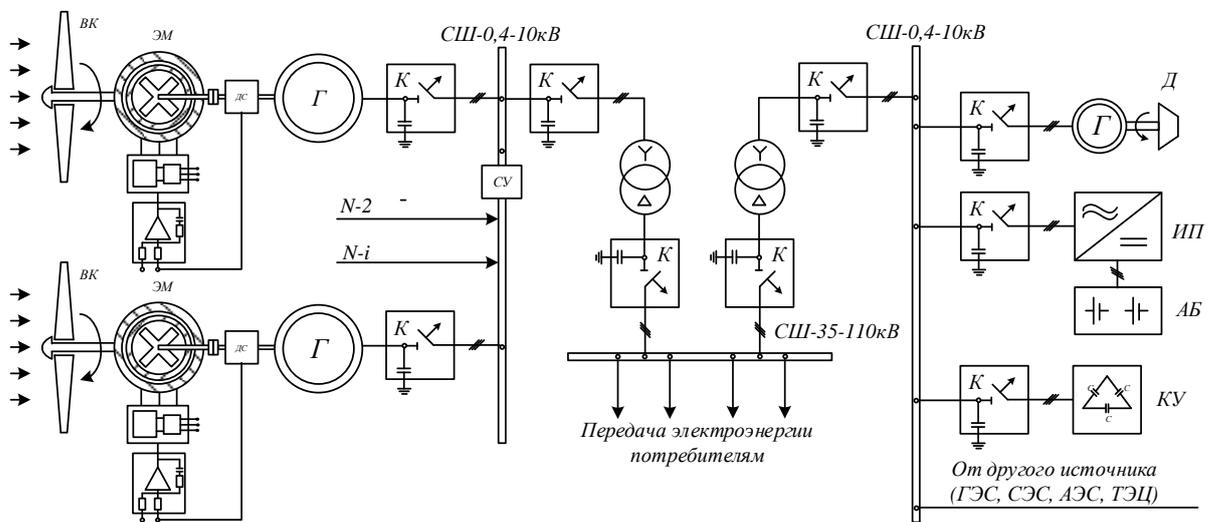


Рисунок 4.9 – Схема подключения ВЭУ в единую сеть с магнитным редуктором:

ВК – ветроколесо содержит «*N*» ВЭУ; *МР* – магнитный редуктор; *ПЧ* – преобразователь частоты; *ДС* – датчик скорости; *К* – коммутационный аппарат, содержащий пуска-регулирующий аппарат и релейную защиту; *ДЭС* – дизельная электростанция, содержит «*N*» *ДЭС*; *ИП* – инверторный преобразователь; *АБ* – аккумуляторная батарея;
КУ – компенсирующее устройство

На рисунке 4.10 показана модель синхронной работы ВЭУ с МР, микроГЭС и ДЭС в единой сети. Как видно из осциллограммы (Score 5) синхронной работы ВЭУ с МР с ГЭС и совместно с единой сетью (Рисунка 4.11), форма и частота напряжения на выходных зажимах ВГ отвечает всем требованиям, предъявляемым к качеству электроэнергии, что доказывает возможность параллельной работы ВЭУ с МР с различными электростанциями, подключенными к единой сети.

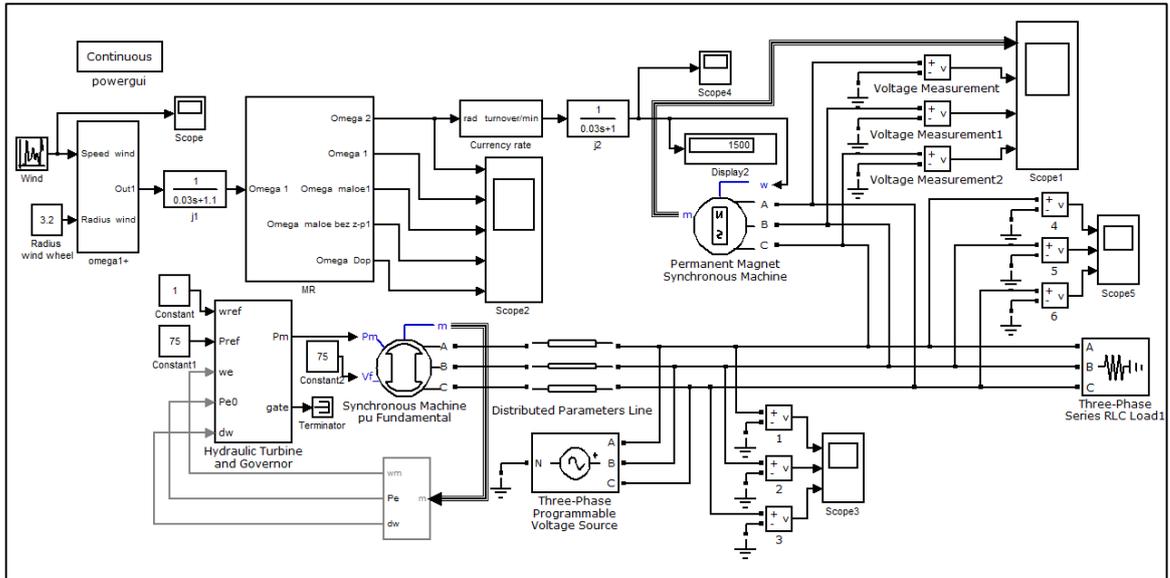


Рисунок 4.10 – Модель синхронной работы ВЭУ с МР, СЭС и ГЭС совместно с единой сетью

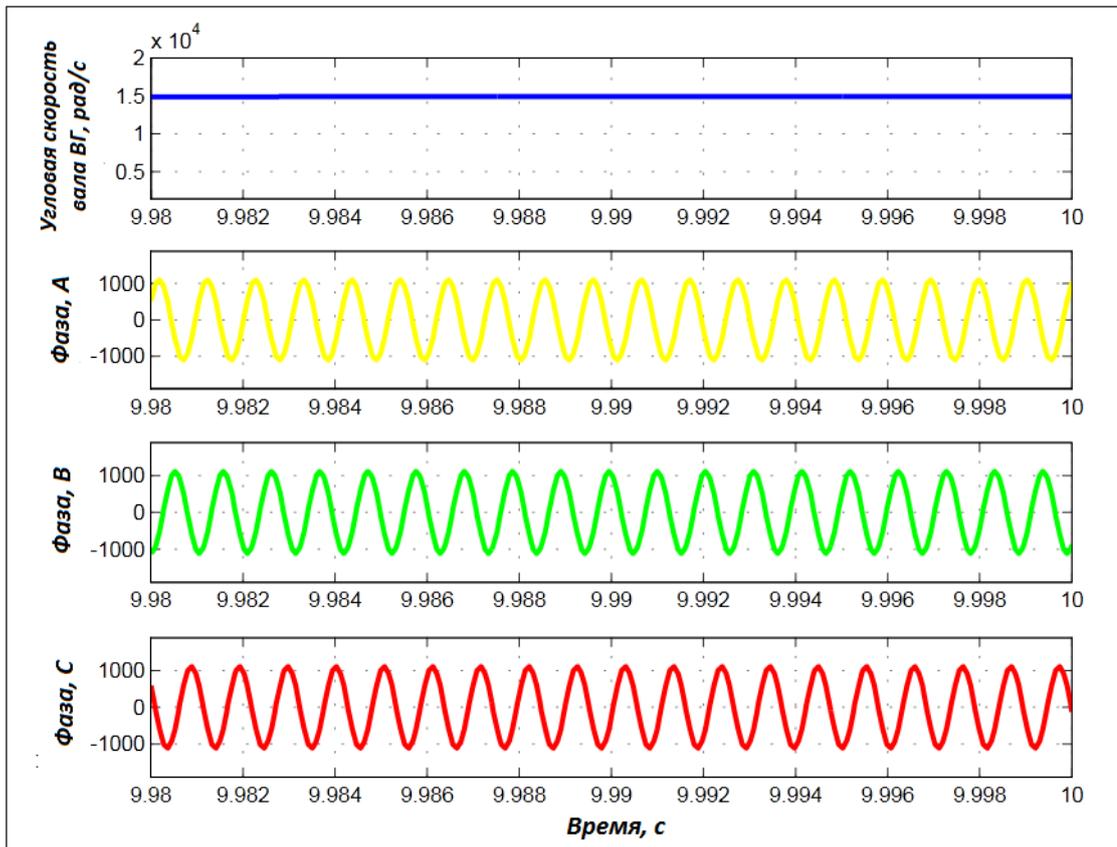


Рисунок 4.11 – Осциллограмма (Scope 5) синхронной работы ВЭС с МР, СЭС и ГЭС совместно с единой сетью, выходное напряжение ВГ 1000 В

Так как скорость ветра и солнечная радиация переменные величины то на программе Matlab Simulink моделируем график выработки мощности различных источников питания и ВЭУ с МР, присоединённых к единой сети (Рисунок 4.12).

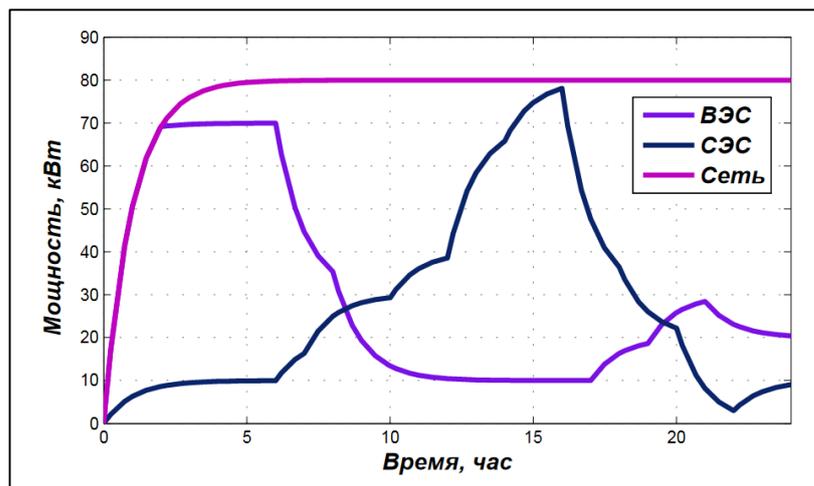


Рисунок 4.12 – Моделирование графика выработки мощности различных источников питания, присоединённых к единой сети

4.7 Техника безопасности при эксплуатации ветроэнергетических установок

При сооружении маломощных и мощных ветроэнергетических установок (ВЭУ) необходимо учитывать обеспечение следующих мер техники безопасности:

- пожарная безопасность;
- электробезопасность;
- механическая устойчивость ВЭУ.

Пожарная безопасность. Пожары в ветроэнергетических установках происходят относительно редко, однако их последствия разрушительны для ветряных агрегатов или приводят к перерыву электрической энергии, а также к значительным материальным затратам.

Причинами пожара в ВЭУ могут быть короткое замыкание в обмотках генератора, увеличение скорости ветра и возрастание оборота винта генератора ВЭУ, удары молнии, неселективное действие защитных аппаратов, технические ошибки или неисправности генераторов. Во всех случаях горят смазочные материалы, масла, бумажная изоляция обмоток генераторов, изоляция проводов на выходе генератора [28, 53]. Все перечисленные пожароопасные материалы находятся в генераторе на высоте более 20-30 метров, например, высота современных ВЭУ мощностью до 5 МВт достигает 130 м; при мощности 150 - 200

кВт их высота составляет не менее 30 м, что более распространено в жилых кварталах. Тушение пожара при таких высотах очень проблематично, так как во многих ситуациях струя воды не достигает до самого конца агрегата, и тушение пожара становится затруднительным. Удар молнии в ВЭУ не часто приводит к пожару, иногда повреждается лопасть или нарушается режим работы генератора, в результате чего происходит скачок напряжения на выходе генератора. Для ремонта и замены одного ВЭУ требуется от 2 до 9 месяцев, а это потеря электроэнергии для потребителя. Частота ударов молнии зависит от географического месторасположения ВЭУ, его площади и размеров лопастей. Для защиты ВЭУ от ударов молнии необходимо заземлить все основные токопроводящие части, а именно гондола, корпус генератора от кончиков лопасти до конца башни, где установлено заземляющее устройство (ЗУ). Согласно ПУЭ сопротивление ЗУ не должно превышать $R_{з.у.ВЭУ} \leq 4$ Ом. На каждом ВЭУ необходимо устанавливать насосы для тушения пожара, при этом мощность насоса должна быть достаточна для того, чтобы струя воды достигла кончиков лопастей ВЭУ. Следует устанавливать пожарные лестницы внутри башни (опора ВЭУ) для пожарных служб, разработать схему автоматического пожаротушения из водяных, пенных, песочно-порошковых огнетушителей прямо внутри основного агрегата ВЭУ для оперативного тушения пожара.

Человеческий фактор также имеет место при возникновении пожаров на ВЭУ. В основном он проявляется от невнимательности эксплуатационного персонала при профилактических ремонтах и осмотрах. При осмотре ВЭУ персонал должен обратить внимание на разлив масла внутри агрегата, оболочку кабелей из пластика, резины, состояние подшипников, тугость вращения вала, проверять механизмы на наличие искрения или воспламеняющегося материала. Применение телекоммуникационных следящих систем, дистанционно связанных с персональным компьютером в диспетчерской, может значительно снизить риск ущерба, вызванного ошибкой персонала или поломкой компонента ВЭУ (Рисунок 4.13).

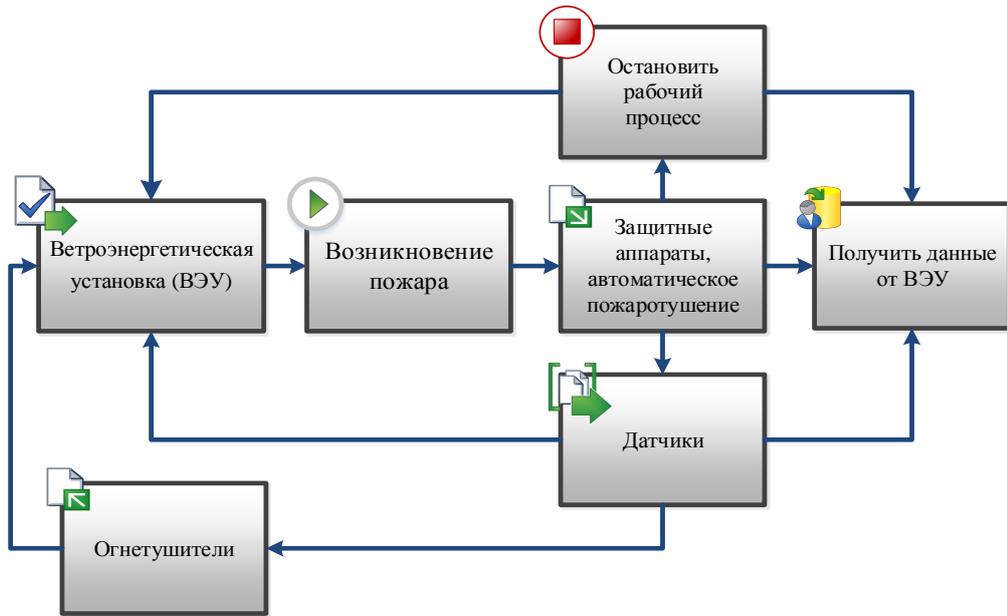


Рисунок 4.13 – Структурная схема системы пожаротушения ветроэнергетических установок

Подобные системы обычно отслеживают температуру масла и воды, отсутствие газа (дым) в критических местах, уровень вибрации, изменение уровня шума, режим работы ВЭУ. Очевидно, что многие производители ВЭУ поставляют свою продукцию в дальние страны, где для её ремонта приходится вызывать специалиста. В обеспечении пожарной безопасности ВЭУ обучение обслуживающего персонала играет большую роль. Не зная правила техники безопасности, режим работы установки, обслуживающий персонал не может обеспечить безопасность ВЭУ. Поэтому перед эксплуатацией ВЭУ необходимо ознакомить персонал с технической документацией и обучить правилам пожарной безопасности установки.

Электробезопасность. В ВЭУ большой мощности необходимо учитывать ток утечки генератора в корпус, что часто происходит во время пробоя изоляции несущих кабелей или обмоток генератора. Ток утечки опасен тем, что во время осмотра или планового ремонта ВЭУ персонал может попадать под напряжение. Во избежание этого необходимо установить устройство защитного отключения (УЗО) или специальные дифференциальные автоматы от токов утечки. Можно

применить различные датчики для определения токов утечки и параметров изоляции генератора.

Механическая безопасность и устойчивость ВЭУ. Механическая безопасность и устойчивость являются важнейшими требованиями в ВЭУ. Во время установки ВЭУ необходимо определить среднюю, максимальную и минимальную скорость ветра, для того чтобы ветроагрегат не падал, не вибрировал и не наклонился при сильном ветре в течение всего периода эксплуатации. При установке ВЭУ в жилых массивах необходимо учитывать расстояние L , м ВЭУ от жилого дома или объекта, высоту ВЭУ h , м и r , м радиус окружности ВЭУ.

Одно из важнейших критериев устойчивости ВЭУ – это условие когда максимальная сила ветра должна быть меньше, чем силы устойчивости ветроагрегата $F_{ветра} \leq F_{ВЭУ}$ (Рисунок 4.14).

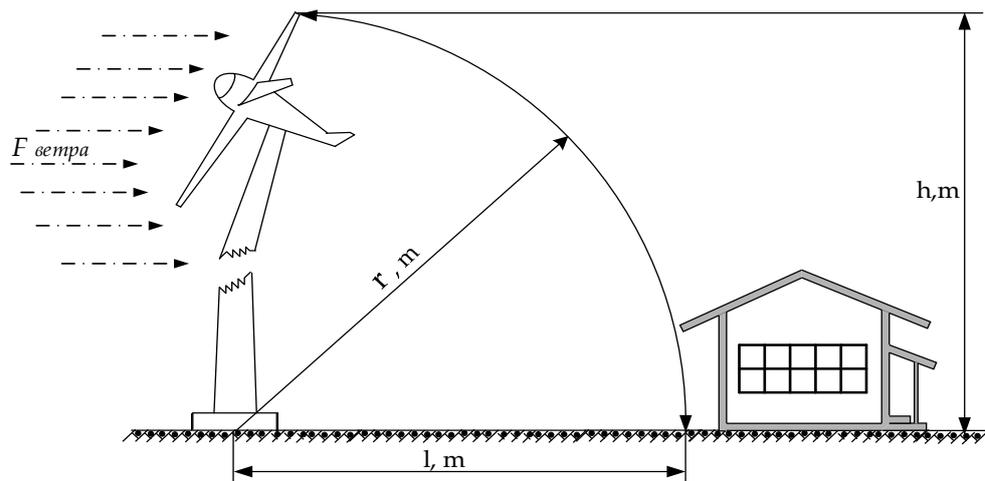


Рисунок 4.14 – Минимальное расстояние установки ВЭУ от жилого дома:

L – минимальное расстояния ВЭУ до жилого дома; h – высота ВЭУ; r – радиус падения ВЭУ при сильном ветре

Рассматривая все перечисленные правила техники безопасности, можно сделать вывод о том, что при сооружении ВЭУ необходимо точно моделировать скорость ветра, уточнить электрические величины при максимальном ветре и моделировать устойчивость ВЭУ при вибрации и механических нагрузках.

4.8 Определение экономической эффективности производства электроэнергии на ветроустановке с магнитным редуктором

Определение экономической эффективности ВЭУ во многом зависит от количества выработанной электроэнергии в электростанциях [14]. Эффективность работы электростанции оценивается коэффициентом использования установленной мощности $K_{узм}$. Это отношение фактической годовой выработки генерируемой электроэнергии в данной электростанции (в нашем случае ВЭУ) к максимально возможной выработке энергии в зависимости от энергоресурса.

Таким образом коэффициент использования установленной мощности можно представить следующим образом:

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

В современных ВЭУ, подключенных к единой электрической системе, коэффициент использования установленной мощности ($K_{узм}$) составляет от 0,15 до 0,30. Коэффициент использования установленной мощности ВЭУ зависит от следующих факторов [14]:

- частый ремонт электростанции;
- график нагрузки потребляемой мощности в течение суток;
- наличие ветра и её максимальная мощность в течение всего времени эксплуатации.

Все перечисленные факторы и показатели можно привести к следующему выражению, т.е. определить число часов максимума использования мощности ветрового потока [14]:

$$T_{\max \text{ ВЭУ}}^{\text{мо}} = K_{узм} \cdot T = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{N_{\text{уст}}}, \quad (4.15)$$

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

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

Для технико-экономического расчета ВЭУ большую роль играет количество выработанной энергии ВЭУ в течение всего периода ее эксплуатации.

Количество вырабатываемой электроэнергии ВЭУ за год:

$$\mathcal{E}_{год} = N_{уст} \cdot K_{цум} \cdot T, \quad (4.16)$$

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

Из выражения (4.16) видно, что количество выработанной энергии зависит от градации скорости ветра, среднегодовой и среднеквадратичной скорости ветра и числа часов работы ВЭУ. Как показывают расчёты, чем больше показатель среднегодовой скорости ветра в местах установки ВЭУ, тем выше показатель коэффициента использования установленной мощности. Поэтому для повышения энергетического показателя ВЭУ необходимо точно анализировать географическую местность на наличие или отсутствие ветрового ресурса.

4.9 Определение срока окупаемости ветроустановки с магнитным редуктором

Срок окупаемости капитальных вложений на сооружение электростанции является одним из главных факторов экономической эффективности.

Для определения срока окупаемости берем за основу известную формулу [14]:

$$T_{ок} = \frac{\sum Z}{\sum D} = \frac{K}{D} \quad (4.17)$$

где $\sum Z$ – суммарные затраты на строительство ВЭУ с МР, рубль,

$\sum D$ – суммарный доход от производства электроэнергии с учётом налога, рубль.

Размер капиталовложения на строительство ВЭУ с МР определяется по формуле:

$$K = n_{уст} \cdot C_{уд} \cdot N_{уст}, \quad (4.18)$$

$$K_{ВЭС} = \sum C_{оборуд\ ВЭС} \cdot n_{уст}, \quad (4.19)$$

где $\sum C_{оборуд\ ВЭС}$ – сумма цены на приобретение оборудования ВЭУ, рубль;

$n_{уст}$ – число установок, шт.

Доход от эксплуатации ВЭУ с МР:

$$D = \mathcal{E}_{год} \cdot C_{ээ}, \quad (4.20)$$

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

$C_{ээ}$ – цена электроэнергии на 1 кВт·час.

Годовые эксплуатационные издержки на строительство ВЭУ с МР определяются по выражению:

$$I = \Delta\mathcal{E} + Z_p + A, \quad (4.21)$$

где $\Delta\mathcal{E}$ – потери электроэнергии на ВЭУ с МР, кВт·час;

Z_p – затраты на обслуживание и ремонт ВЭУ с МР, рубль;

A – амортизационные отчисления, рубль.

$$A = K \cdot K_{ам.отчис} \quad (4.22)$$

где $K_{ам.отчис}$ – коэффициент амортизационных отчислений (в электроэнергетике $K_{ам.отчис} = 0,16$).

На доходность сооружения традиционных электростанций, таких как ТЭЦ, негативно влияет расход на приобретение органического топлива, транспортировку, переработку и постоянно изменяющаяся цена на первичные энергоносители. Кроме того, из-за увеличения нужд на органическое топливо истощаются его запасы, поэтому перед энергетиками ставится задача исследования и поиска всё более новых и дешёвых энергоресурсов, что приводит к дополнительному капиталовложению и удорожанию себестоимости выпускаемой электроэнергии. В ветроэнергетике капиталовложения на энергоресурсы в основном уходят на исследование и определение географических зон ветровых

потоков. Поэтому капиталовложения на добычу, переработку и транспортировку по сравнению с традиционными энергоресурсами в ветроэнергетике не учитываем.

Доход от строительства ВЭУ определяем через количество выработанной электроэнергии в зависимости от градации скорости ветра.

Первоначальная стоимость на строительство любой энергетической станции определяется её сметой.

Смета или сметно-финансовый расчет – это документ, определяющий предел допустимых затрат на строительство энергетических станций [14].

Для составления сметы на строительство ВЭУ с МР необходимо определить капиталовложения на основное оборудование ВЭУ с МР, таких как генератор, редуктор, ветроколесо и т.д. Отдельную часть сметы составляют дополнительные капиталовложения на ремонтно-монтажные работы при сооружении ВЭУ с МР, таких как, строительство башни, на покупку проводов и кабелей, а также расходы на заработную плату и на строительные-монтажные работы. В таблице 4.1 приведены основные капиталовложения на строительство ВЭС с МР.

Таблица 4.1 – Основные капиталовложения на строительство ВЭС с МР⁹

№	Наименование оборудования	Марка	Количество, длина	Цена, рубль	Сумма, рубль	Сумма, сомони
Цена основного оборудования ВЭУ с МР						
1	Синхронный генератор с постоянными магнитами для ВЭУ	ALLRUN	1	30000	30000	4440
2	Ветроколесо	3,2X3	1	12000	12000	1776
3	Магнитный редуктор	МР	1	30000	30000	4440
4	Тахогенератор	ТМГ-30ПУ3, ТМГ-30ПТ3	2	5000	10000	1480
5	Преобразователь частоты	ESO25-04-0090А, 380В, 9А, 4кВ	2	12000	24000	3552
6	Основной корпус (машинное отделение)	Алюминиевый с покраской	1	15000	15000	2220

⁹ Все цены на электрооборудование выявлены среднестатистическим методом, с учётом цен разных производителей.

№	Наименование оборудования	Марка	Количество, длина	Цена, рубль	Сумма, рубль	Сумма, сомони
7	Стояк (опора ВЭУ)	Железный с покраской	1	90000	90000	13320
8	Провод от выхода генератора до главного РУ	АСБ	50	250	12500	1850
9	Соединительные провода	АВВГ	20	100	2000	296
10	Сумма				225500	33374
Дополнительные капиталовложения на сооружение ВЭУ с МР						
№	Дополнительные затраты	Срок выполнения работы, месяц	Зарплата рабочих, рубль	Сумма, рубль	Сумма, сомони	
1	И _{зп} – затраты на зарплату строительно-монтажных работ	1	20000	20000	2960	
2	Иэ.с.м – затраты на эксплуатации строительно-монтажных машин	1	15000	15000	2220	
3	Инакл – накладные расходы	1	2000	2000	296	
4	Ипр – прочие расходы	1	1000	1000	148	
5	Сумма	4	38000	38000	5624	
6	Затраты	-	-	263500	38998	
7	Доход	-	-	59350,19	8783,828	

Капиталовложение на строительство по составленной заранее смете или сметную стоимость определяем по формуле:

$$K_{смет} = K_{об} + K_{СМР} + K_{пр} + D_{СМР} + D_{с}, \quad (4.23)$$

где $K_{об}$ – стоимость оборудования в смете, рубль;

$K_{СМР}$ – стоимость строительно-монтажных работ, рубль;

$K_{пр}$ – прочие капиталовложения, рубль;

$D_{СМР}$ – доход организации, которая выполнила строительно-монтажные работы, рубль;

$D_{с}$ – доход организации, которая выполнила работы по сооружению ВЭУ, рубль.

Все высокотехнологичное оборудование, как правило, изготавливают в странах с развитыми промышленными предприятиями. В случае, если электростанцию необходимо установить далеко от завода-изготовителя, в смете

необходимо учитывать единовременный расход на транспортировку основного оборудования. Как правило, ВЭУ устанавливаются с учётом географических условий и в местах, где среднегодовая скорость ветра достаточна для генерирования энергии. С учетом таких условий во всех технико-экономических расчётах на строительство ВЭУ необходимо учитывать расходы на транспортировку оборудования.

Стоимость оборудования ВЭУ с МР с учетом оптовой цены и транспортировки рассчитывается по формуле [14]:

$$K_{об} = C_o + C_{mp}, \quad (4.24)$$

где C_o – оптовая цена на оборудование, рубль;

C_{mp} – цена транспортировки, рубль.

С учётом дохода, а доход у нас прибыл за счёт выработки электроэнергии в ВЭУ с МР, определяем срок окупаемости [14]:

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

Срок окупаемости ВЭУ с МР по результатам расчёта составляет 4,44 года, что эффективно в условиях нехватки электроэнергии. Кроме того, при массовом выпуске МР себестоимость МР и оборудования ВЭУ с МР значительно снижается и соответственно снижается её срок окупаемости.

4.10 Выводы по главе 4

1. Моделирование показало, что при синхронизации ВЭУ с единой сетью напряжение и частота на выходных зажимах ВГ отвечают стандартным требованиям, предъявляемым к качеству электроэнергии.

2. Рассмотренная система генерирования электроэнергии ВЭУ с МР при синхронизации в единую сеть, позволяет выравнивать график электрической нагрузки.

3. В качестве ВГ в системе ВЭУ с МР целесообразно применить синхронные генераторы с постоянным магнитом (СГПМ), так как у этих генераторов отсутствует внешняя система возбуждения, т.е. внешний дополнительный источник электроэнергии. В СГПМ на роторе установлены магниты, при вращении которых генерируется электроэнергия. Данная конструкция практически не требует частого обслуживания, так как не имеет в своем составе щеток скольжения и может длительное время работать без обслуживания.

4. Расчёт экономической эффективности применения ВЭУ с МР показал, что срок окупаемости зависит от градации скорости ветра и с учётом дополнительных затрат на территории Республики Таджикистан составляет 4,44 лет. Такой результат экономической эффективности и срока окупаемости капиталовложения обусловлен тем, что МР, ПЧ и РС на основе ПИД регуляторов на сегодняшний день являются высокотехнологичным оборудованием и стоят достаточно дорого, но при массовом выпуске системы ВЭУ с МР цена и срок окупаемости снижаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная математическая, компьютерная модель имитации работы системы ветроустановки с магнитным редуктором описывает процесс стабилизации выходных электрических параметров ветрогенератора. Кроме того, использование магнитного редуктора в качестве стабилизирующего устройства способствует полной оптимизации режима работы всей системы генерирования электроэнергии на ветроустановках.

2. Алгоритм автоматизированной работы и регулирования электромеханических частей ветроустановки с магнитным редуктором включает в себя функцию выявления требуемого уровня скорости магнитного поля статора в пределах диапазона регулирования, с учётом минимума и максимума значения тока и напряжения статора магнитного редуктора, поддержания установленной скорости быстроходного ротора, а также при изменении мощности на зажимах ветрогенератора.

3. Магнитный редуктор в качестве стабилизирующего устройства на ветроустановке работает как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. В режиме двигателя на статор магнитного редуктора напряжение подаётся с помощью преобразователя частоты, а в режиме двигателя с его же помощью избыточная мощность, в целях стабилизации скорости вращения ротора ветрогенератора, рекуперуется от статора в сеть.

4. Предложенные схема и алгоритм управления энергией статора магнитного редуктора ветроустановки максимально использует мощность ветра при его резком увеличении.

5. Конструкционная особенность и режим 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 эффективно для системы энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адрианов, В. Н. Ветроэлектрические станции / В. Н. Адрианов, Д. Н. Быстрицкий, К. П. Вашкевич, В. Р. Секторов. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 320 с.
2. Алексеева, М. М. Машинные генераторы повышенной частоты / М. М. Алексеева. – Л.: Энергия, 1967. – 344 с.
3. Анисимов В. А. Тиристорные пусковые устройства в электроприводах переменного тока / А. О. Горнов, В. В. Москаленко // Привод и управление. – 2002. №1. – С. 32-34.
4. Аракелян, А. К. Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод. В 2 кн. Кн. 1: Вентильные электрические машины / А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 455 с.: ил.
5. Афанасьев, А. А. Одноступенчатый магнитный редуктор с трехфазной обмоткой статора и внутренним ротором с короткозамкнутой обмоткой / А. А. Афанасьев // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №. 1. – С. 22-26.
Афанасьев, А. А. Расчет магнитного мультипликатора / А. А. Афанасьев // Электричество. – 2013. – №. 9. – С. 42 - 48.
6. Афанасьев, А. А. Численное математическое моделирование одноступенчатого магнитного редуктора / А. А. Афанасьев, В. В. Ефимов, В. М. Никитин // Электричество. – 2014. – №. 4. – С. 62-68.
7. Афанасьев, А. А. Расчёт мультипликатора / А. А. Афанасьев // Электричество. – 2013. – № 9. – С. 42-48.
8. Афанасьев, А. А. Функциональные режимы совмещенного исполнения электрической машины и магнитного редуктора с короткозамкнутым ротором / А. А. Афанасьев // Электричество. – 2015. – № 12. – С. 51-58.
9. Афанасьев, А. А. Численное математическое моделирование одноступенчатого магнитного редуктора / А. А. Афанасьев, В. В. Ефимов, В. М. Никитин // Электричество. – 2014. – № 4. – С. 62-68.
10. Афанасьев, А. А. Электрическая машина с реактивным редуктором / А. А. Афанасьев, В. В. Ефимов // Электричество. – 2015. – № 8. – С. 27-33.

11. Афанасьев, А.А., Чихняев, В.А. Патент на изобретение № 2590929 (РФ), МПК F03D 7/00. Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэнергетической установки. Опубликовано: 10.07.2016 Бюл. № 19.
12. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галатеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 324 с.
13. Баранов, Н. Н. Нетрадиционные возобновляемые источники и методы преобразования их энергии / Н.Н. Баранов. – М.: МЭИ, 2011. – 215 с.
14. Басова, Т. Ф. Экономика и управление в энергетике: учеб. пособие для студ. сред. проф. учеб. заведений / Т.Ф. Басова, Н.Н. Кожевников, Э. Г. Леонова и др.; под ред. Н. Н. Кожевникова. – М.: ИЦ «Академия», 2003. – 384 с.
15. Башарин, А. В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода / А.В. Башарин, Ф. Н. Голубев, В. Г. Кепперман. – Л.: Энергия, 1971. – 440 с.
16. Башарин, А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
17. Безруких, П. П. Ветроэнергетика: справочное и методическое пособие / П.П. Безруких. – М.: ИД «Энергия». 2010. – 320 с.
18. Безруких, П. П. Использование энергии ветра / П. П. Безруких. – М.: Колос, 2008. – С. 9-158.
19. Безруких, П. П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / П. П. Безруких, Д. С. Стребков // Малая энергетика. – 2005. – №1–2(2–3). – С. 6-12.
20. Бесконтактная магнитная муфта редуктор: пат. 268811 СССР: МПК7 F 16 D /, Л. А. Борисов, Л. М. Периков, В. В. Яропольский. – заявл. 29.11.1968.
21. Бесконтактная магнитная муфта-редуктор: пат. 544070 СССР: МПК7 H 02 K 49/10 / Е. П. Абрамцев. – заявл. 09.06.1975.
22. Браславский, И. Я. Анализ энергопотребления в управляемых переходных режимах систем ТПН-АД. Электроприводы переменного тока / А. В. Костылев, Д. П. Степанюк // Труды Междунар. тринадцатой науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – С. 241-244.

23. Вайнтруб, О. Ш. Системы управления электроприводами с синхронными двигателями с тиристорным возбуждением и автоматическим регулированием возбуждения. – Автоматизированный электропривод / О. Ш. Вайнтруб, Б. Р. Гендельман. и др. // Материалы всесоюз. Конфере. по автоматизированному электроприводу. – М.: Энергия, 1980. – С. 180-186.

24. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

25. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия. – 1974. – С. 840.

26. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование систем в MATLAB – 6.0: учеб. пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – С. 320.

27. Горячев, В. Я. Элементы электроэнергетических систем в среде MatLAB – Simulink – Sim Power Systems: учеб. -метод. пособие / В. Я. Горячев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. – С. 240.

28. ГОСТ Р 54435-2011. Возобновляемая энергетика. Сооружение ветроэлектростанции. Требования безопасности. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 36 с.

29. Дементьев, Ю. Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 224 с.

30. Дьяков, В. И. Типовые расчеты по электрооборудованию: практ. пособие. – 7-е изд., перераб. и доп / В. И. Дьяков. – М.: Высш. шк., 1991. – 160 с.

31. Елистратов, В. В. Проектирование и эксплуатация установок нетрадиционной и возобновляемой энергетики, ветроэлектрические установки: учеб. пособие / В. В. Елистратов, А. А. Панфилов. – Л.: Изд-во Ленингр. политех. ун-та, 2011. – 144 с.

32. Иваново-Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах. – 3-е изд. стереотип / А. В. Иваново-Смоленский. – М.: Изд-во «МЭИ», 2006. – 532 с.

33. Иванов-Смоленский, А.В. Применение конформного преобразования в электромагнитных расчётах электрических машин. Аналитические методы / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин. – М.: Изд-во «МЭИ», 1980. – 85 с.

34. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.

35. Ислотов, И. И. Реверсивный режим работы магнитного редуктора / И. И. Ислотов // «Электромехатроника и управление»: материалы XIII Междунар. науч-техн. Конф. студентов, аспирантов и молодых учёных; – Иванов. гос. энергетич. университет им. В.И. Ленина. – Иваново, 2018. – С. 6.

36. Ислотов, И. И. Стабилизация напряжения и частоты электрогенератора ветроэнергетической установки с помощью магнитного редуктора / А. А. Афанасьев, И. И. Ислотов, В. А. Чихняев, А. М. Дмитренко // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 14–25.

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

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

39. 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. конф., г. Хабаровск, 19-20 ноября 2015 г. / под ред. И. В. Игнатенко, О. А. Малышевой. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 135-138.

40. 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. – Вып. 12. – Чебоксары: Изд-во Чуваш, – ун-та, 2017. – С. 64-69.

41. 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. посв. юбилею кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий». – Уфа: Уфимский гос. ун-т; нефтяной тех. ун. – 2014. – С. 94-95.

42. Ислотов, И. И. Рекуперативный режим работы магнитного редуктора в системе генерирования ветроустановки / И. И. Ислотов // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности; материалы I международной научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 166-171.

43. Ислотов, И. И. Рекуперация энергий в статоре магнитного редуктора как один из факторов энергосбережения в системе генерирования ветроустановки / И. И. Ислотов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. Материалы XIV Республиканской конференции молодых специалистов «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – № 1. – С. 70-73.

44. Ислотов, И. И. Синхронная работа ветроэлектростанций с гидроаккумулирующей станции / И. И. Ислотов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики: Материалы X Республиканской науч.-техни. конф. молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 109-112.

45. Ислотов, И. И. Статистический метод определения скорости ветра для рационального выбора основных оборудования ВЭУ / И. И. Ислотов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: III Международная (VI Всероссийская) научно-техническая конференция. Том 1: Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. – Уфа: УГНТУ. – 2017. – С. 192-198.

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

47. Ислотов, И. И. Функциональная схема стабилизации скорости вращения ветроэнергетической установки с использованием электромагнитного редуктора / И. И. Ислотов // Вестник ПИТГУ имени академика М. Осими. Научно-технический журнал. – 2016. – №1(1). – С. 109-113.

48. Ислотов, И. И. Регулируемый магнитный редуктор / А.А. Афанасьев, В.С. Генин, И.И. Ислотов, А.Г. Калинин, Д.А. Токмаков // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 55-59.

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

50. Ислотов, И. И. Результаты моделирования схемы генерирования электроэнергии ветроэлектроустановкой с магнитным редуктором / И. И. Ислотов // «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем»; материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 324-326.

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

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

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

54. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат; 1985. – 560 с.
55. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
56. Корн, Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
57. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
58. Кузьмин, А. В. Расчеты деталей машин: Справочное пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. / А. В. Кузьмин, И. Н. Чернин, Б. С. Козинцов. – Минск: Выш. шк., 1986. – 400 с.: ил.
59. Лопухина, Е. М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики / Е. М. Лопухина. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
60. Лосюк, Ю. А. Нетрадиционные источники энергии: учеб. Пособие / Ю. А. Лосюк, В. В. Кузьмин. – М.: УП «Технопринт», 2005 – 234 с. ISBN 985-464-542-8
61. Магнитная муфта-редуктор: пат. 1113869 СССР: МПК7 Н 02 К 49/10 / Г. К. Антонова, Е. Н. Ивашов, М. И. Некрасов. – заявл. 01.07.1983.
62. Магнитная муфта-редуктор: пат. 1449737 СССР: МПК7 F 16 D 27/01 / В. А. Яковлев, А. Ф. Герасимов. – заявл. 19.05.1987.
63. Магнитная передача: пат. 1429245 СССР: МПК7 Н 02 К 49/10 / В. А. Яковлев, А. Ф. Герасимов. – заявл. 23.03.1987.
64. Магнитная передача: пат. 280142 СССР / Р. Ю. Бансевичус. – заявл. 12.05.1968.
65. Магнитный редуктор: пат. 2369955 Российская Федерация: МПК7 Н 02 К 51/10 / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева. – заявл. 11.04.2008.
66. Магнитный редуктор: пат. 2545166 Российская Федерация: МПК7 Н 02 К 51/10 / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов, Д. О. Ефремов; заявитель и

патентообладатель Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева. – заявл. 20.08.2013.

67. Магнитный редуктор: пат. 699621 СССР: МПК7 Н 02 К 49/10 / Ганзбург, Л. Б. [и др.]. – заявл. 01.06.1978.

68. Москаленко, В. В. Автоматизированный электропривод: учебник для вузов / В. В. Москаленко. – М.: Энергоатомиздат; 1986. – 416 с.

69. Мыльников, Л.А. Моделирование микропроцессорных систем автоматического управления и электрических цепей в системе Simulink: учеб. пособие / Л.А. Мыльников. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 119 с.

70. Онищенко, Г. Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г. Б. Онищенко. – М.: РАСХН-2001. – 520 с.

71. Осетров, В. Г. Разработка и исследование магнитных планетарных редукторов / В. Г. Осетров, В. Б. Федоров, Е. С. Слащев / Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2014. – № 151. – С. 122-126.

72. Осетров, В. MAGNITNYY PLANETARNYY REDUKTOR TИPA 2K-N / В. Г. Осетров, И. В. Бузмаков // Intellekt. Sist. Proizv. – 2008. – № 2. – С. 91-94.

73. Павлов, Г. М. Автоматизация энергетических систем: учеб. пособие / Г. М. Павлов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976. – 240 с.

74. Поздеев, А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А. Д. Поздеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.

75. Правила устройства электроустановок. Шестое издание с изменениями, исправлениями и дополнениями, принятыми Главгосэнергонадзором РФ в период с 01.01.92 по 01.01.99. – СПб.: ДЕАН, 1999 – 928 с.

76. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др.; под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

77. Резно де Д. Ветроэнергетика / Д. де Резно: Пер. с англ.; В 39 под ред. Я.И. Шефтера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с. ил.

78. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова, Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.

79. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под. ред. Л. Г. Мамякянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 240 с.

80. Твайдел, Дж. Возобновляемые источники энергии: пер. с англ / Дж. Твайделл, А. Уэйр / В. А. Коробкова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 195–242.

81. Терёхин, В.Б. Моделирование систем электроприводов в Simulink (Matlab 7.0.1): учеб. пособие / В. Б. Терёхин; Национальный исследовательский Томский политех. ун., – Томск: Изд-во Томск. политех. ун. – 2010. – 292 с.

82. Толмачев, В. Н. Эффективное использование энергии ветра в системах автономного энергообеспечения / В. Н. Толмачев, А. В. Орлов, В. А. Булат. – СПб: ВИТУ, 2002. – 203 с.

83. Удалов С. Н. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография / С. Н. Удалов, В. З Манусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.

84. Усынин, Ю. С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / Ю. С. Усынин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

85. Фатеев, Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки. Государственное издательство сельскохозяйственной литературы / Е.М. Фатеев. – М.:1957. – 532 с.

86. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

87. Чернышев А. Ю. Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным. Современные техники и технологии. СТТ 2001, том 2 / А. Ю. Чернышев, С. В. Ланграф // Труды VII Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 512 с.

88. Чернышев, И.А. Синтез параметров регуляторов системы тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель. – Электромеханические преобразователи энергии / И. А. Чернышев, А. Ю. Чернышев. Томск: ТПУ, 2005. – С. 237–240.

89. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
90. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
91. Шубенко, В.А. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением / В.А. Шубенко, И.Я. Браславский. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.
92. Шуйский, В.П. Расчёт электрических машин (пер. с нем.) / В.П. Шуйский. – М.: Энергия, 1968. – 732 с.
93. Электротехнический справочник: в 3 т. – Т. 3. Э 45: в 2 кн. – Кн. 1: Производство и распределение электрической энергии / (Под общ. ред. профессоров МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др.). – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.: ил.
94. Atallah K. Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear / K. Atallah, S. D. Calverley, D. Howe. // IEE Proceedings-Electric Power Applications. – 2004. – Т. 151. – №. 2. – С. 135-143.
95. Carta, J. A. review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands / J. A. Carta, P. Ramirez, S. A Velazquez // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Т. 13. – №. 5. – С. 933-955.
96. Celik, A. N. A simplified model for estimating the monthly performance of autonomous wind energy systems with battery storage / A. N. Celik // Renewable Energy. – 2003. – Т. 28. – №. 4. – С. 561-572.
97. Chinchilla, M. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid / M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. C. Burgos // IEEE Transactions on energy conversion. – 2006. – Т. 21. – №. 1. – С. 130- 135.
98. Currie, C. H., Caldwell, O. M. Offset frequency converter for phase /amplitude data measurement receivers: пат. 5230097 США. – 1993. – С. 30- 35.
99. Frank, N. W., Toliyat, H. A. Analysis of the concentric planetary magnetic gear with strengthened stator and interior permanent magnet inner rotor / N. W. Frank, H. A.

Toliyat // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Т. 47. – №. 4. – С. 1652-1660.

100. Garcia-Sanz, M., Houpis, C. H. Wind energy systems: control engineering design. – CRC press, 2012. – 335 с.

101. Gord, J. C. Low power current to frequency converter circuit for use in implantable sensors: пат. 5917346 США. – 1999. – 435 с.

102. Ho, S. L., Niu, S., Fu, W. N. Transient analysis of a magnetic gear integrated brushless permanent magnet machine using circuit-field-motion coupled time-stepping finite element method // IEEE transactions on magnetics. – 2010. – Т. 46. – №. 6. – С. 2074-2077.

103. Jiabin Wang, Kais Atallah, Carvley S.D. A Magnetic Continuously Variable Transmission Device // IEEE Transactions on magnetics. 2011, Vol. 47, № 10. P. 2815-2818.

104. Jian Linni, Chau K.T., Yu Gong a.o. Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Topologies // IEEE Transactions on magnetics. 2009, Vol. 45, № 10. P. 4526-4529.

105. Johnson, G. L. Wind energy systems. – Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1985. – С. 147-149.

106. Magnetic Gearing Arrangement: пат. 3301091 США / Reese, G. A. заявл. – 05.07.1963.

107. Magnetic gears: пат. US3382386 США / Schlaeppli, H. P. – заявл. 23.12.1964.

108. Molokanov O. et al. Analyses and experimental validation of coaxial magnetic planetary gear // Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2014 18th International Symposium on. – IEEE, 2014. – С. 1-4.

109. Molokanov O. et al. Dynamic model of coaxial magnetic planetary gear // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2015 18th International Conference on. – IEEE, 2015. – С. 944-948.

110. Nelson, V. C. Wind energy: renewable energy and the environment. – CRC press, 2013. – 412 с.

111. Patel, Mukind, R., 1942. Wind and Solar power systems CRC Press, Boca Roton, London, New York, Washington, D.C, 1999. – 433 c.
112. Ragheb, A., Ragheb, M. Wind turbine gearbox technologies // Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC), 2010 1st International. – IEEE, 2010. – C.1-8.
113. Rode, J. E. Magnetic gear and gear train configuration: пат. 5569967 США. – 1996. – 623 с.
114. Stiebler, M. Wind energy systems for electric power generation. – Springer Science & Business Media, 2008. – 215 с.
115. Tsurumoto, K., Kikuchi, S. A new magnetic gear using permanent magnet // IEEE Transactions on Magnetics. – 1987. – T. 23. – №. 5. – C. 3622-3624.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчёт конструкционных характеристик ветроустановки с горизонтальной осью вращения

Таблица П. А. 1 – Расчёт конструкционных характеристики ветроустановки с горизонтальной осью вращения

Месяц	Радиус ветроко леса R, м	Диаметр ветроко леса D, м	Удельная плотность воздуха ρ , кг/м ³	$V_{\text{ср}}$, м/с	F, м ²	Высота установки ВЭУ, Н, м	Показатель увеличения скорости ветра в зависимости от высоты V, м/с	Скорость ветра с учетом высоты V, м/с	Скорость ветра в плоскости ВК V, м/с	Коэффициент опред. разности скорости ветра,	Коэффициент торможения C_p
Январь	3,20	13,70	1,23	5,30	32,15	21,00	2,65	14,05	9,83	0,30	0,59
Февраль	3,20	13,70	1,23	5,50	32,15	21,00	2,75	15,13	10,59	0,30	0,59
Март	3,20	13,70	1,23	5,60	32,15	21,00	2,80	15,68	10,98	0,30	0,59
Апрель	3,20	13,70	1,23	4,80	32,15	21,00	2,40	11,52	8,06	0,30	0,59
Май	3,20	13,70	1,23	4,20	32,15	21,00	2,10	8,82	6,17	0,30	0,59
Июнь	3,20	13,70	1,23	4,00	32,15	21,00	2,00	8,00	5,60	0,30	0,59
Июль	3,20	13,70	1,23	4,40	32,15	21,00	2,20	9,68	6,78	0,30	0,59
Август	3,20	13,70	1,23	4,40	32,15	21,00	2,20	9,68	6,78	0,30	0,59
Сентябрь	3,20	13,70	1,23	4,00	32,15	21,00	2,00	8,00	5,60	0,30	0,59
Октябрь	3,20	13,70	1,23	3,80	32,15	21,00	1,90	7,22	5,05	0,30	0,59
Ноябрь	3,20	13,70	1,23	4,60	32,15	21,00	2,30	10,58	7,41	0,30	0,59
Декабрь	3,20	13,70	1,23	4,80	32,15	21,00	2,40	11,52	8,06	0,30	0,59
Итого											

Продолжение таблицы П. А. 1

Месяц	P_1 , кВт	P_2 , кВт	$KПД = P_1/P_2$	$Z_{рас}$	$Z_{опт}$	C_p	$M_{вк},$ $H^*_{м}$	Средне годовая выработка электроэнергии W , $МВт \cdot час \cdot год$	$\Omega_{вк},$ рад/с
Январь	18,72	11,00	0,59	2,13	4,19	0,28	1682,41	5098,82	62,49
Февраль	23,37	13,74	0,59	1,84	4,19	0,32	2262,70	6367,82	58,03
Март	26,04	15,31	0,59	1,71	4,19	0,34	2613,54	7094,84	55,98
Апрель	10,33	6,07	0,59	3,16	4,19	0,19	761,47	2813,60	76,19
Май	4,63	2,73	0,59	5,40	4,19	0,11	261,65	1262,73	99,51
Июнь	3,46	2,03	0,59	6,56	4,19	0,09	177,09	942,27	109,71
Июль	6,13	3,60	0,59	4,48	4,19	0,13	379,62	1669,28	90,67
Август	6,13	3,60	0,59	4,48	4,19	0,13	379,62	1669,28	90,67
Сентябрь	3,46	2,03	0,59	6,56	4,19	0,09	177,09	942,27	109,71
Октябрь	2,54	1,49	0,59	8,06	4,19	0,07	117,49	692,65	121,57
Ноябрь	8,00	4,70	0,59	3,75	4,19	0,16	541,74	2179,52	82,96
Декабрь	10,33	6,07	0,59	3,16	4,19	0,19	761,47	2813,60	76,19
Итого	123,13	72,40	0,59					2795,56	

Окончание таблицы П. А. 1

Месяц	Скорость ветра V, м	Оборот ветроколеса, об/мин	Угловая скорость ветроколеса, рад/с	Скорость вращения выходного вала МР, рад/с	Выходная частота преобразователя, рад/с	Частота статора МР, рад/с	Угловая скорость выходного вала МР, рад/с	Частота управления ПЧ типа ПИ	Частота статора МР с учётом ПИД регулятора
Январь	9,83	234,83	24,58	98,32	234,74	37,38	157,00	12,62	50,00
Февраль	10,59	252,89	26,47	105,88	204,50	32,56	157,00	17,44	50,00
Март	10,98	262,17	27,44	109,76	188,96	30,09	157,00	19,91	50,00
Апрель	8,06	192,61	20,16	80,64	305,44	48,64	157,00	1,36	50,00
Май	6,17	147,47	15,44	61,74	381,04	60,68	157,00	-10,68	50,00
Июнь	5,60	133,76	14,00	56,00	404,00	64,33	157,00	-14,33	50,00
Июль	6,78	161,85	16,94	67,76	356,96	56,84	157,00	-6,84	50,00
Август	6,78	161,85	16,94	67,76	356,96	56,84	157,00	-6,84	50,00
Сентябрь	5,60	133,76	14,00	56,00	404,00	64,33	157,00	-14,33	50,00
Октябрь	5,05	120,72	12,64	50,54	425,84	67,81	157,00	-17,81	50,00
Ноябрь	7,41	176,89	18,52	74,06	331,76	52,83	157,00	-2,83	50,00
Декабрь	8,06	192,61	20,16	80,64	305,44	48,64	157,00	1,36	50,00
Итого									

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты аналитического расчёта энергетических характеристик двухступенчатого регулируемого магнитного редуктора

Таблица П. Б. 1 - Результаты аналитического расчёта энергетических характеристик двухступенчатого регулируемого магнитного редуктора

Ω_1 , рад/с	P	z	Ω_2 , рад/с	$P_{ном}$	ω_n , рад/с	M_n , Н•м	M_1 , Н•м	M_2 , Н•м	$M_{эл}$, Н•м	$\omega_{пч}$, рад/с	f , Гц	$\Omega_{1верх}$, рад/с	$\Omega_{1вниз}$, рад/с	$\Delta\Omega$, %
2,28	20	23	17,48	55000	314	17,52	-2412,28	314,65	2097,64	10,49	1,67	20,98	13,98	40
4,28			32,81				-1285,05	167,61	1117,43	19,69	3,14	39,38	26,25	
6,28			48,15				-875,80	114,23	761,56	28,89	4,60	57,78	38,52	
8,28			63,48				-664,25	86,64	577,61	38,09	6,06	76,18	50,78	
10,28			78,81				-535,02	69,79	465,23	47,29	7,53	94,58	63,05	
12,28			94,15				-447,88	58,42	389,46	56,49	8,99	112,98	75,32	
14,28			109,48				-385,15	50,24	334,92	65,69	10,46	131,38	87,58	
16,28			124,81				-337,84	44,07	293,77	74,89	11,92	149,78	99,85	
18,28			140,15				-300,88	39,24	261,63	84,09	13,39	168,18	112,12	
20,28			155,48				-271,20	35,37	235,83	93,29	14,85	186,58	124,38	

ПРИЛОЖЕНИЕ В. График изменения скорости вращения магнитного редуктора при разной скорости тихоходного вала магнитного редуктора

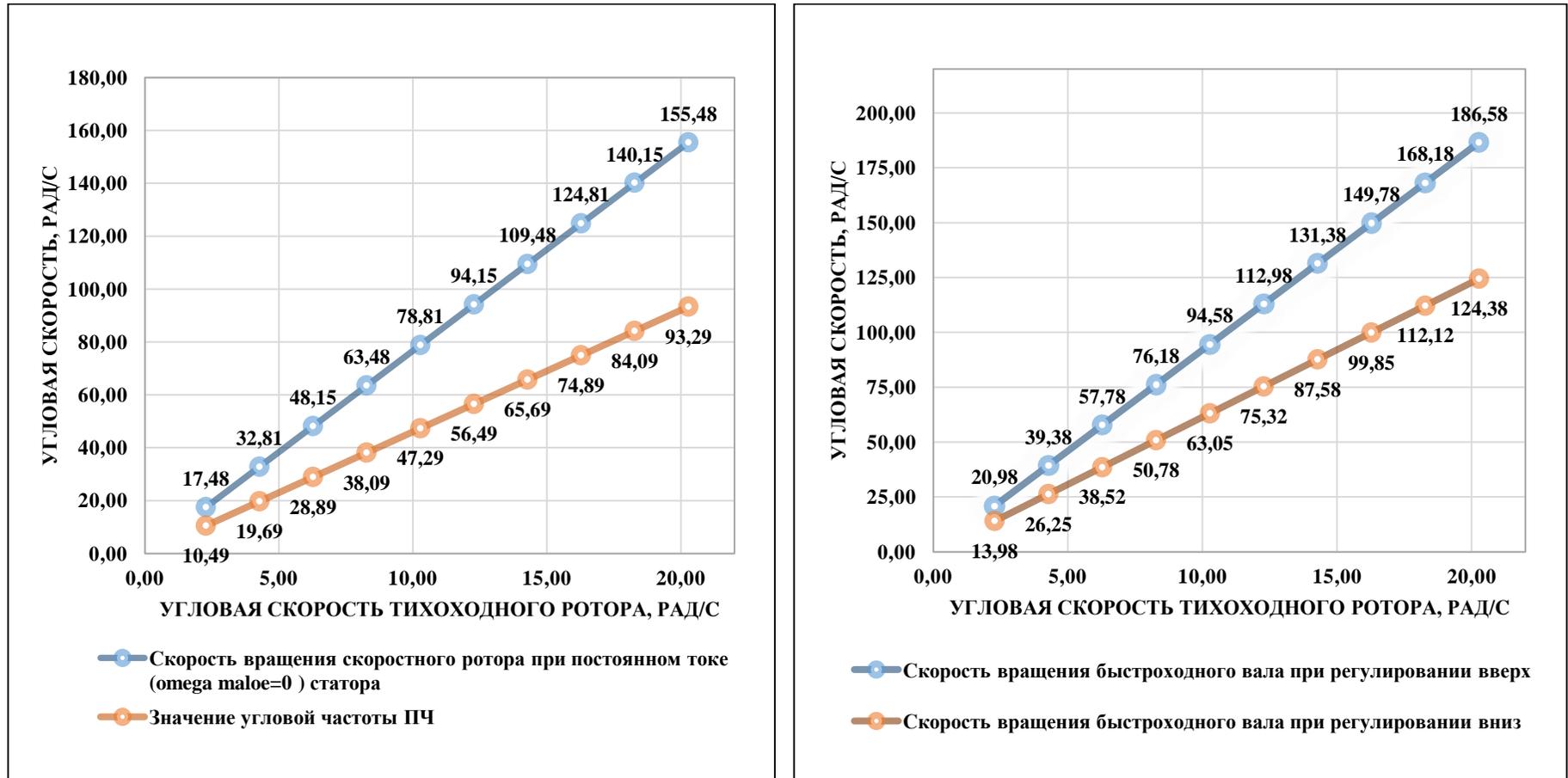


Рисунок П. В. 1 – График изменения скорости вращения магнитного редуктора при разных скорости тихоходного вала

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Аналитический расчёт графика угловых характеристик ветроустановки с магнитным редуктором
в течение одного месяца

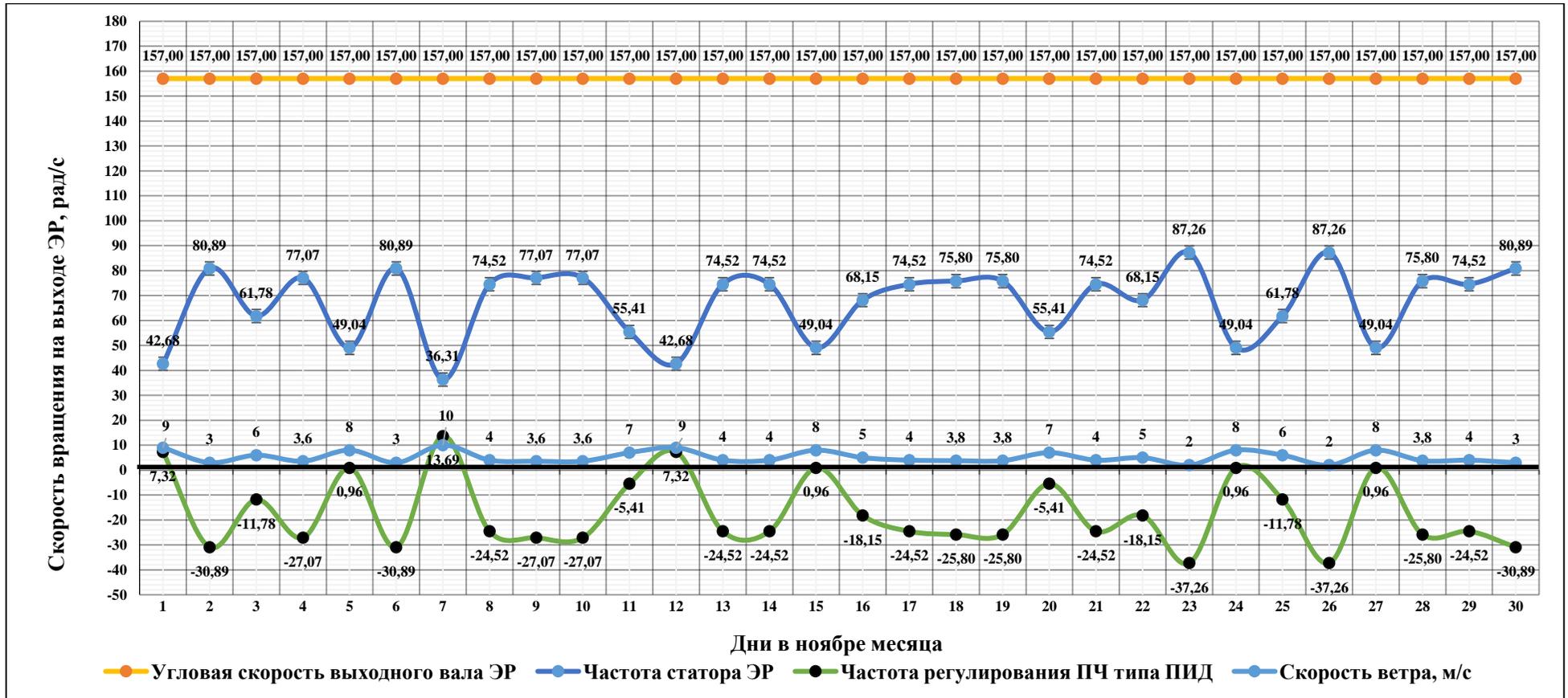


Рисунок П. Г. 1 – Аналитический расчёт угловых характеристик ВЭУ с МР в течение одного месяца

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Геометрические размеры и параметры магнитной системы
магнитного редуктора

1. Быстроходный (внутренний) ротор с неодим-железо-боровыми магнитами выполняется на базе ротора вентильного двигателя Чебоксарского электроаппаратного завода 6ДВМ 300, имеющего следующие данные:

$D_2 = 122$ мм – наружный диаметр; $l_2 = 150$ мм – активная длина; $h_{маг} = 5$ мм – высота магнитов.

2. Статорный сердечник магнитного редуктора (МР) взят от асинхронного электродвигателя 4А132 М 6 мощностью 5,5 кВт ($U_{фн} = 220$ В; $I_n = 12,25$ А; $2p = 6$; $P_{\Sigma 1} = 526$ Вт – электрические потери в обмотке статора; $M_n = 54,3$ Нм, $M_{max} = 135,8$ Нм – номинальный и максимальный моменты), который имеет [2]:

$D_n = 225$ мм – наружный диаметр; $D_i = 158$ мм – диаметр расточки; $l_1 = 160$ – активная длина; $z_1 = 54$ – число пазов.

3. Модулятор (тихоходный ротор МР):

$D_{нар} = 157$ мм – наружный диаметр; $D_{вн} = 125$ мм – внутренний диаметр; $z = 23$ – число стержней модулятора; $t_{нар} = \pi D_{нар} / z = 21,4$ мм, $t_{вн} = \pi D_{вн} / z = 17,1$ мм – зубцовые шаги модулятора соответственно по наружному и внутреннему диаметрам; $\delta_1 = 0,5$ мм – наружный воздушный зазор модулятора (между модулятором и статором); $\delta_2 = 6,5$ мм – внутренний немагнитный зазор модулятора (между модулятором и ярмом быстроходного ротора при высоте магнитов $h_m = 5$ мм); $b_{3м} = t_{вн} / 2 \approx 8,5$ мм – ширина зубца модулятора; $h_{3м} = (D_{нар} - D_{вн}) / 2 = 16$ мм – высота зубца модулятора; $b_{пнар} = t_{нар} - b_{3м} = 21,4 - 8,5 = 12,9$ мм, $b_{пвн} = t_{вн} - b_{3м} = 17,1 - 8,5 = 8,6$ мм – соответственно ширина пазов модулятора по его наружному и внутреннему диаметрам.

$\Lambda'_0 = 71,3$ м⁻¹, $\Lambda'_m = 104$ м⁻¹ – соответственно постоянная составляющая и амплитуда переменной удельной магнитной проводимости.

Обмотка статора. Трехфазная зубцовая обмотка статора, имеющая число пар полюсов $p_1 = 21$, состоит из 54 катушек, число которых равно числу зубцов $z_1 = 54$ статорного сердечника. Обмотка имеет число пазов на полюс и фазу $q = 3/7$.

$w = Nk_p w_k / a = 6 \cdot 3 \cdot 90 / 1 = 1620$ – число витков в фазе; $N = 6$ – число катушек в симметричной группе; $k_p = 3$ – число симметричных групп в фазе; $w_k = 90$ – число витков в катушке; $a = 1$ – число параллельных ветвей в фазе; $k_{w1} = k_{y1} k_{p1} = 0,9397 \cdot 0,8312 = 0,7811$ – обмоточный коэффициент [1]; $k_{y1} = 0,9397$, $k_{p1} = 0,8312$ коэффициенты укорочения и распределения.

$r=0,43$ Ом – активное сопротивление; $x_{\sigma}=7,4$ Ом – индуктивное сопротивление рассеяния на частоте $f=50$ Гц (в пазу находятся катушечные стороны, принадлежащие разным фазам). $E_0=98,3$ В; $x_a=1,77$ Ом – ЭДС холостого хода и индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки статора на частоте 50 Гц.

Параметры МР при моделировании и аналитическом расчёте. $p_1=17$ – число пар полюсов обмотки статора; $p_2=2$ – число пар полюсов магнитов быстроходного ротора; $\tau_l=0,014$ м – полюсное деления статора; $l=0,2$ м – активная длина МР; $\Lambda''_{m1}=72,2 \cdot 10^{-5}$ Гн/м² – амплитуда магнитной проводимости тихоходного ротора (модулятора); $\Lambda'_0=12,01 \cdot 10^{-5}$ Гн/м² – постоянная составляющая сквозной удельной магнитной проводимости двух воздушных зазоров; $h_m=7,3 \cdot 10^{-3}$ м – высота магнитов быстроходного ротора; $H_{cb}=800 \cdot 10^3$ А/м – коэрцитивная сила магнитов быстроходного ротора; $w_l=720$ – число витков фазы обмотки статора МР; $k_{wl}=0,825$ – обмоточный коэффициент обмотки статора МР; $r=15$ Ом – активное сопротивления фазы обмотки статора МР.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Результаты аналитического расчёта кругового графика стабилизации электромеханических параметров магнитного редуктора

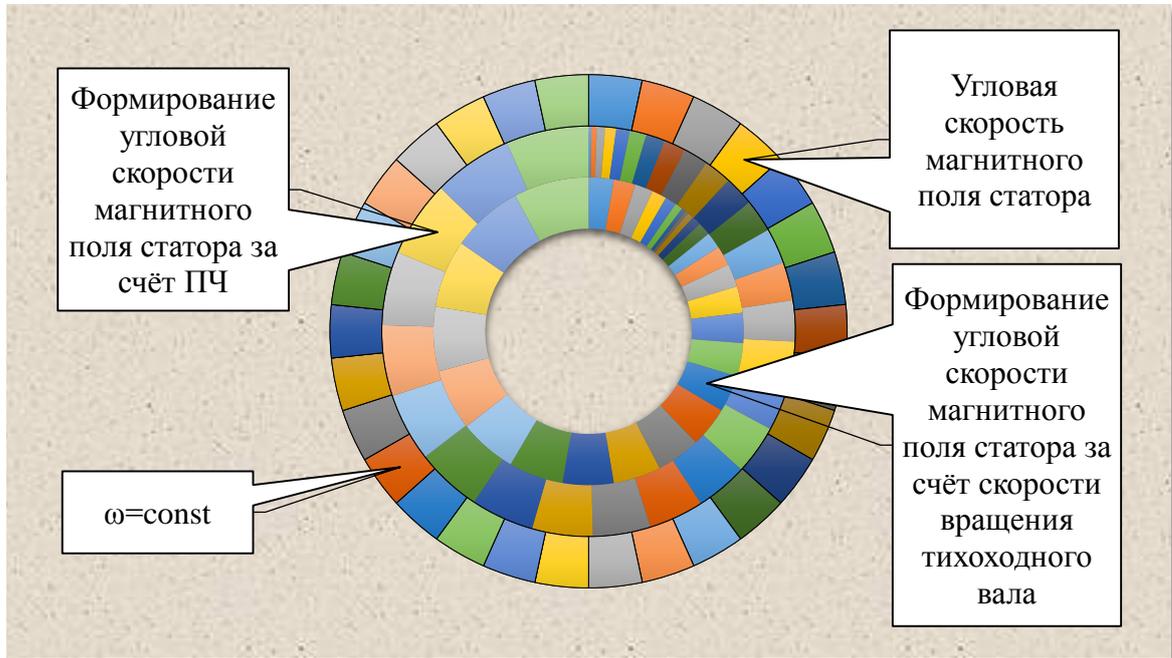


Рисунок П. Е. 1 – Аналитический расчёт кругового графика формирования угловой скорости магнитного поля статора МР

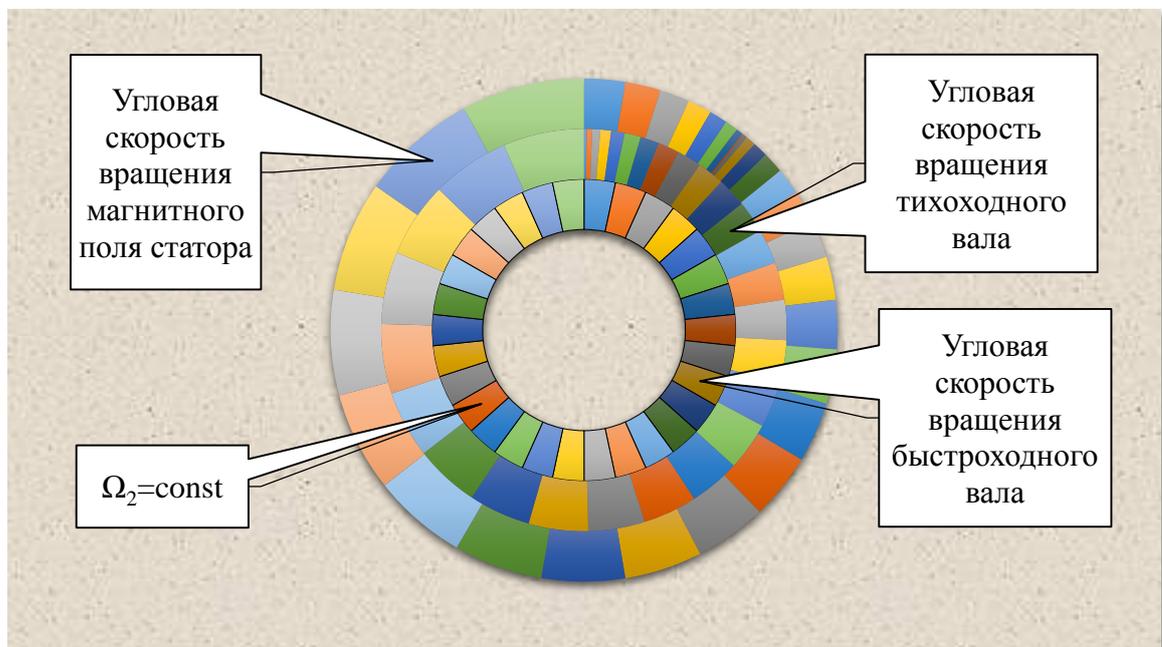


Рисунок П. Е. 2 – Аналитический расчёт кругового графика формирования угловых скоростей МР

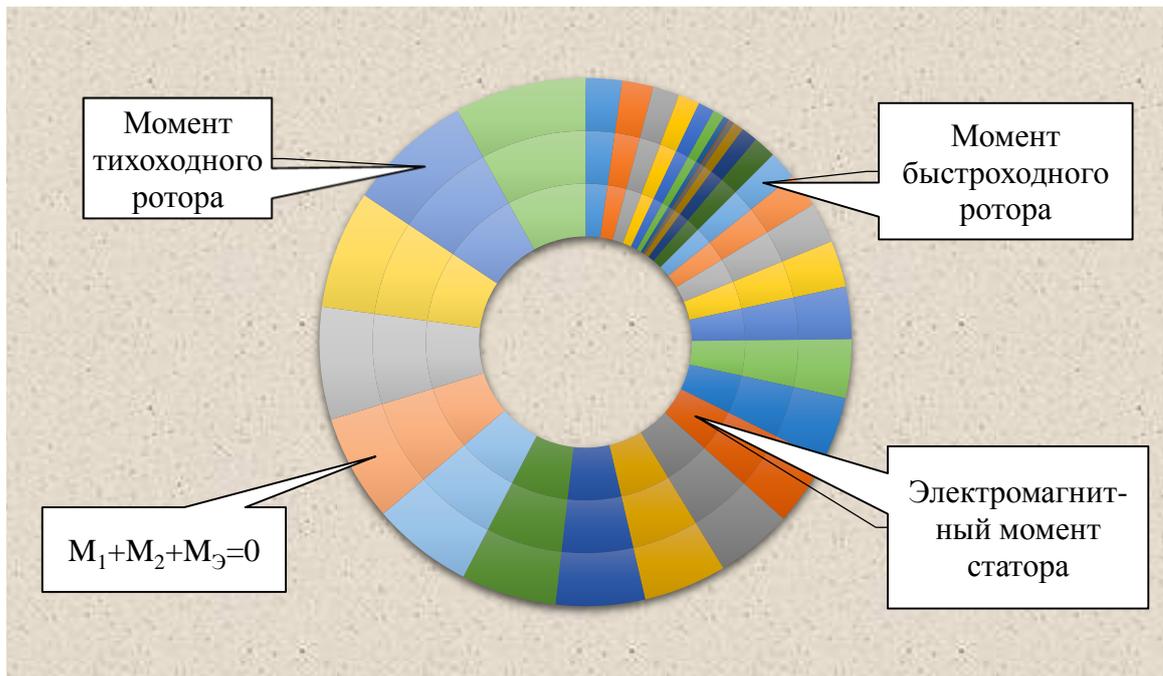


Рисунок П. Е. 3 – Аналитический расчёт кругового графика формирования моментов МР

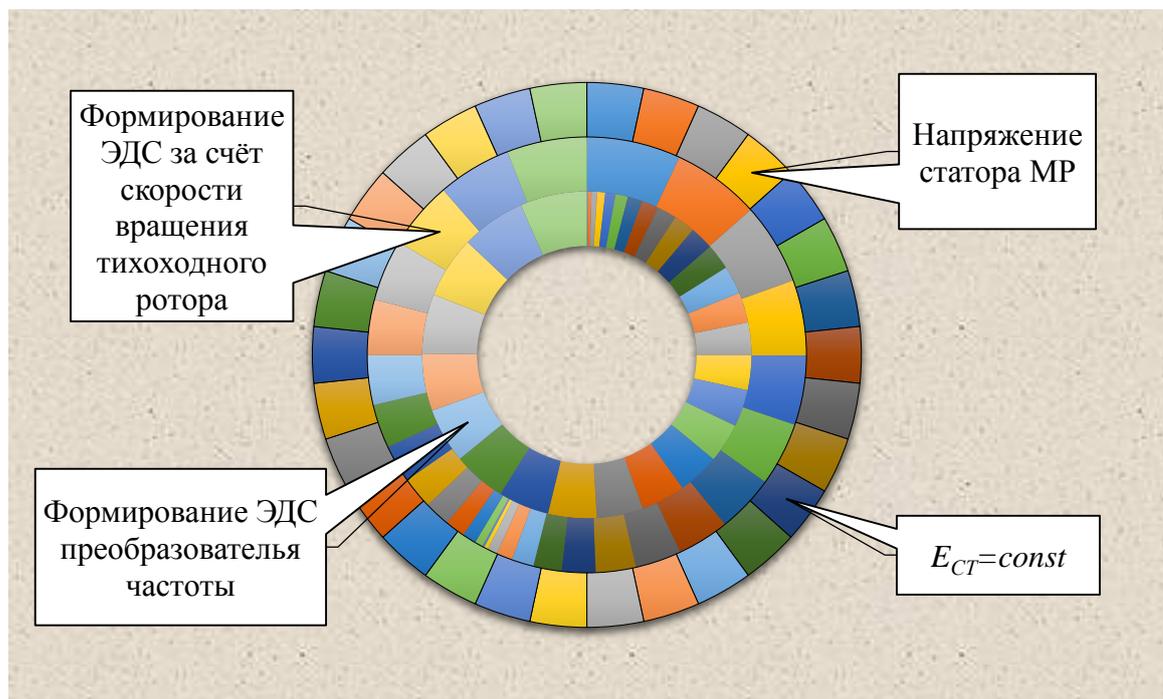


Рисунок П. Е. 4 – Аналитический расчёт кругового графика формирования ЭДС статора МР

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. ЭВМ программа автоматизированного расчёта моментов и угловых скоростей магнитного редуктора

UserForm9

Автоматизированный калькулятор для расчёта моментов и угловых характеристик магнитного редуктора

Z	23	Мэл	953470.63
p	20	Рпч, %	20
O1	2.28	Отч	10.48
Рн	2500000	f	1.74
Oст	314	Оверх	20.97
Мн	7961.78	Овниз	13.98
M1	-1096491.22	O2	17.48
M2	143020.59	O2, %	39,5

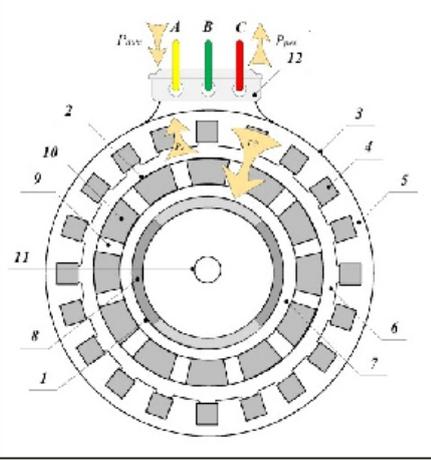


Рисунок 1 - Схема разреза магнитного редуктора: 1 - быстроходный ротор; 2 - тихоходный ротор; 3 - статор; 4 - обмотки статора; 5 - магнитопровод статора; 6 - воздушный зазор между статором и тихоходного ротора; 7 - воздушный зазор между роторами; 8 - постоянные магниты тихоходного ротора; 9 - немагнитная сталь тихоходного ротора; 10 - шихтованные ферромагнитные стержни тихоходного ротора; 11 - вал быстроходного ротора; 12 - выходная фаза обмотки статора.

```

Private Sub CommandButton11_Click()
    TextBox11 = Val(TextBox10 * 0.2) * Val(TextBox4) / Val(TextBox9)
End Sub
Private Sub CommandButton12_Click()
    TextBox12 = Val(TextBox11) / Val(2 * pi)
End Sub
Private Sub CommandButton13_Click()
    TextBox13 = ((Val(TextBox1) / (Val(TextBox1) - Val(TextBox2))) * Val(TextBox3)) + ((Val(TextBox11) / (Val(TextBox1) - Val(TextBox2))))
End Sub
Private Sub CommandButton14_Click()
    TextBox14 = ((Val(TextBox1) / (Val(TextBox1) - Val(TextBox2))) * Val(TextBox3)) - ((Val(TextBox11) / (Val(TextBox1) - Val(TextBox2))))
End Sub
Private Sub CommandButton15_Click()
    TextBox15 = ((Val(TextBox1) / (Val(TextBox1) - Val(TextBox2))) * Val(TextBox3))
End Sub
Private Sub CommandButton16_Click()
    TextBox16 = (Val(TextBox13 - TextBox14) / Val(TextBox15)) * Val(100)
End Sub
Private Sub CommandButton6_Click()
    TextBox6 = Val(TextBox4) / Val(TextBox5)
End Sub
Private Sub CommandButton7_Click()
    TextBox7 = -Val(TextBox6) * (Val(TextBox5) / Val(TextBox3))
End Sub
Private Sub CommandButton8_Click()
    TextBox8 = -Val(TextBox7) * ((Val(TextBox1) - Val(TextBox2)) / Val(TextBox1))
End Sub
Private Sub CommandButton9_Click()
    TextBox9 = Val(TextBox8) * (Val(TextBox2) / ((Val(TextBox1) - Val(TextBox2)))) End Sub

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акты внедрения научных результатов



ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
 ДОНИШКАДАИ ПОЛИТЕХНИКИИ
 ДОНИШГОҶИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН

ба номи академик М.С. Осимӣ

735700 Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хучанд, кӯчаи Ленин 226

тел.: (+992 3422) 60454, 64537, факс: (9923422)60454

e-mail: director@kbtut.tj www.kbtut.tj

Исх. № 002

от «03» 01 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор



Худжандского политехнического института
 Таджикского технического университета
 имени академика М.С. Осими
 к.т.н. Саиди Дилафруз Раббизода

«03» января 2018 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Настоящий акт составлен в том, что разработанные в диссертационной работе Исломова Ильёсходжи Икромходжаевича:

- алгоритм автоматизированного управления магнитным редуктором ветроустановки и рекуперацией энергии от статора магнитного редуктора;
 - схема генерирования электроэнергии ветроустановкой с магнитным редуктором и способ стабилизации выходных электрических параметров ветрогенератора для повышения коэффициента использования энергии ветра;
 - способ управления и математическая модель ветроустановки с магнитным редуктором;
 - способ рекуперации избыточной мощности в электрическую сеть через статический преобразователь частоты от статора магнитного редуктора
- используются в учебном процессе при подготовки бакалавров по курсу «Возобновляемые источники энергии» и магистрантов по курсу «Энергосбережение в системах электроснабжения» по направлению электроэнергетики и электротехники в Худжандском политехническом институте Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, начиная с 2017-2018 учебного года.

Заместитель директора
 по учебной работе, к.ф.-м.н., доцент

Х.Т. Максудов

ШИРКАТИ САҲОМИИ
ХОЛДИНГИИ КУШОДАИ
«БАРҚИ ТОҶИК»
ШАБАКАҲОИ БАРҚИИ
СУҒД



OPEN STOCK
HOLDING COMPANY
«BARQI TOJIK»
SOGDIAN'S ELECTRIC
NETWORKS

735750 шаҳри Гулистон, кӯчаи Истиклол 113; 735750 city Guliston, Istiklol street 113;
суратхисоби 20202972750500004823 дар филиали ЧСК «Ориёнбанк»-и ш. Гулистон РМБ: 350101369 с/м: 20402972413691;
РМА: 560002461; суратхисоби 20202972900333231000; БДА «Амонатбанк» ш. Гулистон РМБ: 350101626; с/м 20402972316264;
☎ (83443) 2-48-01 (кабулгоҳ); (83443) 2-26-54 факс/fax: @mail.ru

Исх. № 9/465 от «05» 09 2018 г.



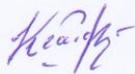
«УТВЕРЖДАЮ»
Директор
Согдийских электрических сетей
ОАХК «Барқи Тоҷик»
Т.М. Атамов
«05» 09 2018 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Настоящий акт составлен в том, что разработанная модель генерирования электроэнергии в ветроустановках с магнитным редуктором в диссертационной работе **Исломов Ильёсходжы Икромходжаевича**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, обсуждена на заседании технического совета и принята к внедрению в перспективном плане реализации ветроустановок с магнитным редуктором на территории Согдийской области Республики Таджикистан с целью обеспечения электроэнергией горных селений.

Применение модели генерирования с помощью ветроустановок с магнитным редуктором, в отличии от других схем генерирования, существенно эффективен с точки зрения максимального использования энергии потока ветра в горных условиях.

Несмотря на высокотехнологичность принятой схемы генерирования, срок окупаемости установки намного меньше, чем другие существующие схемы.

Главный инженер		Ш.А. Хошимов
Секретарь технического совета		Р.К. Юнусов