

Некоммерческое акционерное общество «Алматинский университет энергетики
и связи имени Гумарбека Даукеева»

УДК 621.313.12

На правах рукописи

АГИМОВ ТАЛГАТ НУРЛАНУЛЫ

**Разработка и исследование вентильного генератора с широким диапазоном
частоты вращения и стабильным напряжением для малых ветровых
электростанций**

8D07101 – Электроэнергетика (6D071800 – Электроэнергетика)
Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD)

Научный консультант:
кандидат технических наук,
ассоциированный профессор
Умбеткулов Е.К.

Зарубежный научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Шерьязов С.К.

Республика Казахстан
Алматы, 2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА МАЛЫХ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Анализ типа ветряных турбин для условий Казахстана.....	12
1.2 Анализ механической мощности, вырабатываемой ВВТ.....	15
1.3 Выбор типа электрогенераторов для ВВТ.....	22
1.4 Электроснабжение отдаленных объектов с применением ВГШД	27
Постановка цели и задач исследования.....	31
2 РАЗРАБОТКА ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ.....	32
2.1 Предпосылки создания ВГШД.....	32
2.2 Концепция функционирования ВГШД.....	33
2.3 Схемы соединения якорной обмотки ВГШД.....	35
2.4 Упрощенная схема соединения якорной обмотки ВГШД.....	40
2.5 Методика расчета параметров якорной обмотки ВГШД.....	41
Выводы по разделу.....	52
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВГШД. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	53
3.1 Физическая модель ВГШД и испытательный стенд.....	53
3.2 Методика проведения экспериментов.....	55
3.3 Исследование ВГШД на холостом ходу и анализ результатов.....	59
3.4 Исследование внешней и регулировочной характеристики ВГШД.....	68
3.5 Анализ результатов экспериментальных данных исследований.....	71
Выводы по разделу.....	76
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВГШД НА ИММИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ.....	77
4.1 Разработка имитационной модели в среде MatLab/Simulink.....	77
4.2 Исследование режима работы системы ВГШД.....	82
4.2.1 Допущения и границы применимости модели.....	82
4.2.2 Исходные данные.....	83
4.2.3 Изменение напряжения на холостом ходу.....	83
4.2.4 Внешняя характеристика ВГШД.....	86
4.2.4.1 Среднее выпрямленное напряжение на модели.....	86
4.2.4.2 Пульсация выпрямителя на модели.....	87
4.2.4.3 Результаты исследований ВГШД на имитационной модели.....	88
4.3 Схема автоматического регулирования тока возбуждения.....	90
4.4 Алгоритм управления режимов работы ВГШД.....	91
Выводы по разделу.....	92

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А Примеры внедрения ВВТ мощностью 2-5 кВт.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчеты рабочих характеристик ВВТ на Excel.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты аппроксимации экспериментальных данных на программе MatLab.....	103 108
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Программа на MatLab для расчета внешних характеристик ВГШД.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Протокол испытания ВГШД.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Техническое задание на разработку ВГШД.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Патенты на полезную модель.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ З Акты внедрения.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ И Список научных трудов, , опубликованных по теме диссертации	131

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В этой диссертационной работе применены следующие нормативные ссылки:

1. «Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», Высший аттестационный комитет. – Алматы: 2004 г., №377-3 ж.
2. ГОСТ 7.1 – 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВИЭ	- возобновляемые источники энергии
КИУМ	- коэффициент использования установленной мощности
АСЭ	- автономная системы электроснабжения
ВЭС	- ветровая электрическая станция
МВЭС	- малые ветровые электрические станции
ВВТ	- вертикальная ветряная турбина
ВРТБ	- вертикально роторная турбина Болотова
ЭМП	-электромеханический преобразователь
ВГШД	- вентильный генератор с широким диапазоном частоты вращения
СГ	- синхронный генератор
ВГ	- вентильный генератор
АБ	- аккумуляторная батарея
КПД	- коэффициент полезного действия
ЭДС	- электродействующая сила
АД	- асинхронный двигатель
КБ	- конденсаторные батареи

ВВЕДЕНИЕ

В Концепции перехода Казахстана к зеленой экономике в 2020-2030 годах планируется крупномасштабное внедрение новых возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и энергосберегающих технологий [1]. При этом отмечается, что наряду с мощными источниками энергии, будет уделяться должное внимание развитию малых ветровых электростанций (МВЭС) для многочисленных (более 240 тысяч) крестьянских и фермерских хозяйств и других отдаленных объектов, к которым не подведены линии электропередачи.

Учитывая устойчивую тенденцию к повышению тарифов на топливо и электроэнергию, научный и практический интерес представляет электроснабжение сельских автономных потребителей от ВИЭ, а именно: ветровых источников электроэнергии [2-4].

В последнее время, во многих странах, возрастает интерес к МВЭС вследствие стремления отдаленных потребителей к автономному энергоснабжению [5,6]. Тенденция развития малой ветроэнергетики также активно развивается в Казахстане. Растет активность во внедрении автономного энергоснабжения отдаленных объектов (фермерских хозяйств, тепличных комплексов, пастбищ и т.д.), расчетная электрическая нагрузка которых варьируется в пределах 3-5 кВт [7,8].

В Казахстане известны многие территории со средней годовой скоростью ветра 8–10 м/с, являющихся богатыми источниками ветровой энергии. При этом особенность ветрового режима заключается в непрерывном изменении направления и скорости ветра в течение десятков секунд от 2-3 м/с до штормовых 30-40 м/с [9]. В таких ветровых условиях наиболее эффективно использовать вертикальные ветряные турбины (ВВТ), которые имеют высокий пусковой момент, низкий уровень шума и не требуют дополнительной манипуляции для запуска при минимальной скорости ветра в 2-3 м/с [10-13]. Такие ВВТ совместно со своими электрогенераторами представляют собой МВЭС для отдаленных автономных объектов.

Казахстанские ученые предложили свои разработки, особенно малой мощности с вертикальной неподвижной осью. Установки Буктукова Н.С., А.В. Болотова, Ш.А. Ершина и другие могут работать при любом направлении ветра и скорости – от 3 до 60–80 м/с, все 300–330 дней в году [6,14,15].

Особенность ВВТ заключается в том, что они способны работать на более низких частотах вращения и практичны в эксплуатации. Его конструкция содержит меньше механизмов и компонентов, что повышает надежность работы их турбины [14,16,17].

Распространенные в Казахстане ВВТ оснащены электрогенераторами переменного тока (мощностью 2-5 кВт), которые работают в ограниченном диапазоне скорости ветра (примерно 5-12 м/с), из-за соблюдения паспортных (заводских) параметров по напряжению и частоте тока [12,13] (Приложение А).

Анализ существующих типов ветрогенераторов показал, что решить поставленную задачу путем создания электрогенератора с широким диапазоном

регулирования частоты вращения представляет определенные сложности. Чем шире диапазон регулирования индукции, тем больше объем, вес и стоимость электрогенератора, меньше его перегрузочная способность. При этом его внешняя характеристика становится мягче. Это вызвано ростом реакции якоря электрогенератора.

Следует отметить, что удельная стоимость ветроустановок повышается с уменьшением их мощности. Например, удельная стоимость ветроустановок до 3 кВт почти в 2-2,5 раза выше, чем удельная стоимость ветроустановок свыше 50 кВт [18]. Это соизмеримо с возможностью применением вентильных генераторов (ВГ) для расширения существующего диапазона частоты вращения электрогенераторов.

Основной принцип использования ВГ связан с «модуляцией и демодуляцией» вырабатываемой электроэнергии, то есть с преобразованием переменного тока в постоянный (АС-DC) с последующим инвертированием (DC-АС) обратно в переменный ток. В итоге на выходе получается качественный переменный ток заданного напряжения.

В существующих литературных источниках не уделялось должного внимания указанному способу расширения диапазона работы ветрогенератора при различной скорости ветра из-за несовершенства конструкции ВГ. Кроме того, такая система требовала определенных затрат на дополнительное оборудование (полупроводниковой техники, аккумуляторов, инверторов и т.п.), что ограничивало ее применение.

В настоящее время ситуация несколько изменилась вследствие бурного развития полупроводниковой техники и значительного снижения стоимости аккумуляторных батарей и инверторного оборудования. Например, цены на литий-ионные аккумуляторные модули/блоки с 2010 года снизились (в долларах США) на 89% [19].

Показателем эффективности использования МВЭС, как правило, принимается коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Для ветровых установок он варьируется от 20% до 40% и выше, в зависимости от ветрового потенциала местности и технологии изготовления их электрогенераторов [20 -22].

Использование резерва механической энергии ВВТ при различных скоростях ветра дает возможность повышать их КИУМ на основе разработки принципиально новых вентильных генераторов с широким диапазоном частоты вращения (ВГШД), способных поддерживать постоянство выходного напряжения при различных скоростях ветра.

В связи с изложенным, целью диссертационной работы является повышения эффективности ВВТ путем разработки вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения для стабилизации выходного напряжения.

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

- на основе анализа литературных источников и патентного поиска выявить новые способы эффективного использования мощности ВВТ для выработки электроэнергии;

- разработать новые схемы соединения и методику расчета якорной обмотки ВГШД для дискретной стабилизации вырабатываемого напряжения;

- разработать имитационную модель ВГШД в среде пакета программ MatLab/Simulink для теоретического исследования различных режимов работы;

- создать испытательный стенд и провести экспериментальные исследования по совместимости ВВТ и ВГШД при различных режимах работы;

- провести сравнение расчетных и экспериментальных данных и выработать рекомендации по эксплуатации ВГШД.

Рабочая гипотеза состоит в том, что разработка и применение ВГШД позволит эффективно использовать механическую энергию ВВТ при различной скорости ветра и увеличить ее КИУМ с 40% до 60%.

Объект исследования. Объектом исследования является МВЭС, оснащенная ВВТ и вентильным генератором с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением.

Материалы и методы исследований: Материалы для изготовления ВГШД – медные провода, диодные мосты для преобразования трехфазного переменного тока в постоянный ток и коммутирующие устройства для переключения групп параллельных ветвей якорной обмотки ВГШД.

Методы исследования: расчетно-аналитический, имитационное моделирование в среде пакета программ MatLab/Simulink, экспериментальные исследования опытного образца ВГШД и аппроксимация экспериментальных данных программой MatLab.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выявлен эффективный способ использования резерва механической мощности ВВТ для выработки электроэнергии на основе разработки и применения ВГШД;

- разработан ступенчато-плавной способ стабилизации напряжения ВГШД за счет переключения групп параллельных ветвей якорной обмотки и плавного регулирования тока возбуждения;

- получены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований по совместимости работы ВВТ и ВГШД в широком диапазоне изменения скорости вращения, определяющие совершенство конструкции и эффективность работы ВГШД.

- установлена зависимость выходного напряжения вентильного генератора от скорости ветра;

- разработаны основы автоматического управления параметрами якорной обмотки и током возбуждения.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что:

- разработанный и исследованный ВГШД может быть успешно использован на ВВТ и других типов ветряных турбин для автономного

электроснабжения отдаленных объектов, к которым не подведены линии электропередачи;

- ВВТ с ВГЩД позволяют заряжать аккумуляторные батареи, которые служат как источники питания для автономных потребителей отдаленных объектов, а также малого электротранспорта, дронов и беспилотных летательных аппаратов в труднодоступных районах;

- полученные результаты исследования будут полезны для создания ВГЩД силами небольших предприятий на базе новых, бывших в употреблении или списанных синхронных генераторов различных транспортных средств;

- материалы диссертации могут быть использованы в учебном процессе по дисциплинам, изучающим электрогенераторы с переменной частотой вращения (ветровые установки, гидроагрегаты и т.п.).

Достоверность работы. Достоверность полученных результатов в диссертационной работе обеспечивалась:

- использованием в экспериментах современных приборов с высокой точностью измерения напряжения, токов и температуры нагрева ветвей якорной обмотки ВГЩД (цифровой мультиметр UT181A с функцией true RMS, цифровые мультиметры UT33B+, цифровой тахометр UT371 UNI-T и цифровой осциллограф-мультиметр UTD1025 UNI-T).

- сравнительным анализом теоретических и экспериментальных исследований и документированием параметров внешних и регулировочных характеристик ВГЩД;

- выполнением по всем параметрам оценки погрешностей измерений.

Положения, вносимые на защиту:

- концепция эффективного использования механической мощности ВВТ для выработки электроэнергии на основе использования ВГЩД;

- схемы создания новых групп параллельных ветвей якорной обмотки ВГЩД и методика расчета их технических параметров;

- способ стабилизации напряжения ВГЩД за счет ступенчатого переключения групп параллельных ветвей якорной обмотки и плавного регулирования тока возбуждения;

- результаты теоретических и экспериментальных данных по стабилизации выходного напряжения ВГЩД при различной скорости вращения ВВТ;

- результаты разработки нового ВГЩД с улучшенными основными характеристиками, определяющими эффективность технических и экономических показателей.

Апробация результатов исследований:

- Агимов Т.Н. Моделирование вертикально осевого ветродвигателя результаты испытаний на физическом стенде / Материалы XIII Международной научно-технической конференции // «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование», приуроченной к 50-летию Алматинского университета энергетики и связи. 22–24 октября, Алматы, 2025.- С.208-220;

- Agimov T.N. To the Questions of Energy Efficiency of Autonomous Energy Sources //2018 14th International scientific technical conference on actual problems of

electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 proceedings APEIE – 2018 In 8 Volumes Volume 1 Part 5 Novosibirsk, October 2-6, 2018. P. 25-30.

- Агимов Т.Н., Умбеткулов Е.К. Вентильный электрогенератор с приводом от вала с различной частотой вращения / VI Международный научный конгресс // Scientific congress Agricultural machinery volume 1 «Agricultural machines. Research and testing. New machine designs» -Burgas, Bulgaria, 25.06 – 28.06.2018. – P.20-24.

- Агимов Т.Н., Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А. Жиілігі өзгерісті білігі бар жетегіндегі электр генератордың тиімділігін арттыру / V Международная научно – практическая конференция //Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения (17 марта 2017 г., Часть 2), Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана, 2017.- С190-194.

- Агимов Т.Н., Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А. Мобильные электростанции для электроснабжения маломощных объектов сельского хозяйства / Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов // Приоритетные направления развития АПК: глобальные вызовы и научно-технический потенциал. Казахский инженерно-технологический университет, Алматы, 2017.- С. 20-23.

- Агимов Т.Н., Бакенов К.А., Умбеткулов Е.К. Повышение эффективности электрогенератора с приводом от вала с переменной частотой вращения / Материалы международной научно-практической конференции // «Инновации в науке, образовании и производстве Казахстана». – Алматы: Евразийский технологический университет, 17-18 ноября 2016. Том I.- С. 165-169.

Публикации. По данной теме диссертации опубликованы: 2 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus, 5 статей в журналах, рекомендуемых КОКСНВО, 5 докладов в сборниках международных конференций. Получены 2 патента на полезную модель.

Личный вклад автора состоит: в проведении литературного обзора и патентного поиска по теме диссертации, выполнении теоретических исследований при разработке имитационного моделирования на Matlab Simulink, разработке испытательного стенда и проведении опытов, обработке результатов экспериментальных данных, публикации статей в научно-технических журналах, в подготовке патентов на полезную модель и апробации результатов исследования. При участии научного руководителя и зарубежного консультанта выявлены основные направления работы.

Объем и структура. Содержание диссертационной работы: введение, 4 раздела, заключение, список использованной литературы и приложения. Объем диссертации содержит 133 страниц, 43 рисунков и 11 таблиц.

Введение содержит выявленные проблемы по тематике исследования и актуальность выбранной темы. Проведен анализ литературных источников и патентный поиск. Представлены: постановка цели и задач исследования, научная новизна работы, практическая значимость, достоверность, личный вклад автора, статьи и апробация результатов исследования.

В первом разделе проведен краткий анализ ветрового потенциала Казахстана и перспективы применения различных ветряных турбин. Выявлены резервы механической мощности ВВТ, которые можно использовать для получения дополнительной электроэнергии. Приведены преимущества и недостатки существующих ветровых электрогенераторов. Обоснованы тип и мощности электрогенераторов для распространенных ВВТ. Показаны способы использования ВГЩД для электроснабжения отдаленных объектов.

Во втором разделе приведена концепция функционирования ВГЩД с учетом стабилизации выходного напряжения в заданных пределах при различных скоростях ветрового потока. Разработаны схемы соединения групп параллельных ветвей якорной обмотки, позволяющие ступенчато поддерживать выходное напряжение. Приведена упрощенная модель ВГЩД с уменьшенным количеством коммутирующих контактов групп параллельных ветвей за счет переключения диодных мостов на параллельное или последовательное соединения. Разработана методика расчета параметров ВГЩД, которая позволяет определить эффективные схемы перемотки якорной обмотки.

В третьем разделе представлены принципиальная электрическая схема и описание испытательного стенда с физическими моделями ВВТ и ВГЩД. Разработана методика проведения экспериментальных исследований. Показан общий вид элементов стенда и приведены электротехнические характеристики измерительных приборов.

По результатам экспериментальных исследований построены соответствующие графики. Проведена проверка совместимости ВВТ и ВГЩД при различных режимах работы. Показаны характеристики холостого хода при различной скорости вращения ВГЩД. Построены внешние и специальные регулировочные характеристики. Получены выводы по аппроксимации экспериментальных данных с использованием программы MatLab.

В четвертом разделе проведено имитационное моделирование ВГЩД с применением пакета программы Matlab/Simulink. Показаны основные допущения и границы применимости этой программы. Приведены характеристики изменения напряжения и тока возбуждения при различных режимах работы ВГЩД. Составлена схема автоматического регулирования тока возбуждения. Разработан алгоритм управления режимов работы ВГЩД.

Закключение включает в себя подробные результаты и выводы, которые свидетельствуют о высоком уровне исследования и его значимости при разработке ВГЩД для ветровых установок, способных поддерживать заданный уровень вырабатываемого напряжения при широком диапазоне изменения скорости ветрового потока.

Благодарность:

Данное исследование было проведено в рамках Проекта грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023-2025 годы (AP19679469 «Разработка вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением для малых ветровых электростанций»).

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА МАЛЫХ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ типа ветряных турбин для условий Казахстана

Ветер является случайным неуправляемым природным процессом. Характерными особенностями ветра как источника энергии заключаются в следующем: цикличность, связанная с Солнечной активностью и вращением Земли, зависимость от рельефа местности, непостоянство поступающей энергии, объясняемое изменчивостью скорости ветра. Это приводит к изменению мощности ветрового потока и мощности ветродвигателя в больших пределах: она равна нулю при штиле и превышает её расчетное значение при ураганах.

Темпы развития ветроэнергетики в первую очередь зависят от того, как быстро удастся снизить стоимость МВЭС и повысить ее надежность расширить диапазон рабочих скоростей ветра. Увеличение диапазона рабочих скоростей ветродвигателей с (1-2 м/с) до (30 м/с), значительно увеличит время работы ВЭС, разработка генераторов способных сохранить работоспособность во всем рабочем диапазоне скоростей ветров, без ограничения вырабатываемой мощности повысит производительность, что объясняется кубической зависимости мощности ветра от скорости ветра [13,23].

При разработке ветродвигателей нужно учитывать особенности ветра (средняя годовая скорость, наличие порывов и их амплитуда, характер розы ветров) в месте установки. Главными особенностями ветров в Казахстане являются политропный характер розы ветров и частые перепады его скорости от штиля до порывов свыше 25 м/с [5].

Отсюда вытекают критерии для разработки ветровой электрической станции (ВЭС), адаптированных ветрам Казахстана. Такие ВЭС должны надежно работать при политропной розе ветров и при широком диапазоне изменения скорости ветра, которая может превышать 25 м/с. Высокие скорости ветра (свыше 25 м/с) имеют малую повторяемость, относительно средней годовой скорости и близким к ней скоростям ветра. При этом среднегодовое удельное распределение энергии [23] показывает, что высокие скорости ветра с меньшей повторяемостью вносят большую долю энергии, чем средние и низкие скорости, обладающие большей повторяемостью. Получить способность работать при высоких скоростях ветра можно только комплексным решением вопросов усовершенствования конструкции ветродвигателя, оптимизации электромеханического преобразователя, разработки системы управления и выбором оптимального режима работы ВЭС. Система управления должна обеспечить согласованную работу всех узлов ВЭС (ветродвигателя, генератора и электроснабжение потребителя).

Одним из основных узлов любой ВЭС является ветродвигатель (ВД). Все известные конструкции ветродвигателей можно разделить на два типа: с горизонтальной и с вертикальной осями вращения [5,23]. Среди ветродвигателей с горизонтальной осью вращения более широкое применение нашли

пропеллерные ВД. Одной из важных особенностей ВД с горизонтальной осью вращения является необходимость его ориентации на поток ветра и регулирования частоты вращения. Узлы регулирования частоты вращения и ориентации на ветер усложняют конструкцию ветродвигателя и систему автоматики, что в свою очередь снижает надежность. Использование ВД с горизонтальной осью вращения в условиях ветров Казахстана приведет к снижению надежности и производительности [24-26].

Вертикальная ось вращения ветродвигателя позволяет воспринимать ветер с любой стороны без ориентировочных операций [24-26].

Привлекательной особенностью ВВТ является то, что он может работать на более низких частотах и более практичен в эксплуатации. Его конструкция содержит меньше механизмов и компонентов. Это повышает надежность работы ВВТ. Все это вместе взятое позволяет получить довольно высокую эффективность. С точки зрения экологичности ветрогенератор вертикального типа соответствует европейским стандартам. В основу работы ВВТ положен принцип магнитной левитации. Под воздействием скорости ветрового потока практически одновременно формируются импульсная и подъемная силы. Вместе с тем возникает тормозная сила как элемент противодействия основному направлению. Импульсные и подъемные силы воздействуют на лопасти ветроустановки и приводят их во вращение [17, 23, 24].

Следует отметить, что при выборе того или иного варианта электрического генератора для ВВТ необходимо учитывать несколько факторов, позволяющих добиться максимальной эффективности при выработке электроэнергии. Проведенный анализ литературных источников показывает, что ВВТ будут более практичными для территории Республики Казахстан. Вместе с тем, необходимо учитывать, что даже среди вертикальных ветроустановок имеются определенные различия, которые играют значительную роль при оптимизации режимов работы МВЭС.

Конструкция ВВТ позволяет расположить в основании электромеханическую часть, что снижает требования к прочности и жесткости опоры и не ограничивает массогабаритные показатели оборудования. Такое размещение электромеханической части в основании повышает удобство технического обслуживания и ремонта. Увеличение геометрических размеров элементов ветродвигателя идет равномерно, которое оказывает незначительное влияние на прочностные характеристики. Надо учитывать, что напряжения, возникающие под действием силы тяжести, увеличиваются пропорционально масштабу ветромеханической части. Возможность крепления лопастей в нескольких точках, способствует снижению конструкторских требований к прочности лопастей. Относительно простое изготовление лопастей по отношению к лопастям ветродвигателей с горизонтальной осью вращения способствует облегчению технологии производства.

Результаты исследований по повышению эффективности ВВТ изложены во многих литературных источниках [10-11, 27-29] и посвящены совершенствованию аэродинамических характеристик. На рисунке 1.1

приведена конструктивная схема ВВТ [29]. Она состоит из внешнего неподвижного диффузора и расположенного внутри него вращающегося ротора, лопадки которого, образуют активную и реактивную ступени турбины.

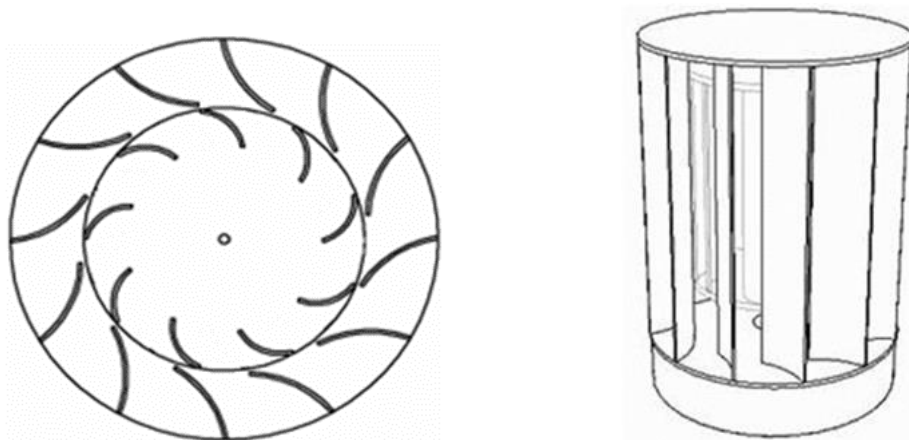


Рисунок 1.1 - Конструкция вертикальной ветряной турбины

Диффузор и ротор имеет лопадки, равномерно расположенные по его периметру, и имеют фиксированное положение [16,24-26]. Общей особенностью ВВТ с поперечным потоком является отсутствие механических устройств регулирования аэродинамического момента и частоты вращения. Мощность ветродвигателя изменяется пропорционально кубу скорости ветра [30], при этом частота вращения ветродвигателя тоже изменяется. По причине отсутствия элементов регулирования частоты вращения, она будет изменяться пропорционально скорости ветра. От соотношения скорости ветра и частоты вращения зависит коэффициент эффективности турбины. С одной стороны отсутствие элементов регулирования частоты вращения упрощает конструкцию, а с другой стороны усложняет процесс регулирования. При изменении скорости ветра от 3 до 24 м/с мощность ВВТ может вырасти в 512 раз, а частота вращения в 8 раз.

Следующим важным фактором, влияющим на производительность ветро-энергетической установки, является согласованность характеристик ВВТ с характеристиками генератора. Сложность разработки генератора, согласованного с ВВТ, заключается:

а) в поддержании постоянства выходного напряжения при изменении частоты вращения в 6-8 раз, которое обусловлено конструкцией ВВТ и поставленной задачей расширить диапазон рабочих скоростей ветра с 3-4 м/с до 24 м/с и выше;

б) в получении удовлетворительного значения коэффициента полезного действия (КПД) генератора в широком диапазоне изменения частоты вращения и генерируемой мощности в заданном диапазоне.

Особенно сложно одновременно поддерживать постоянство вырабатываемого напряжения и удовлетворительного КПД генератора не ниже

0,5 при низких скоростях ветра, когда мощность ветродвигателя низкая, а величина потерь в генераторе соизмерима с вырабатываемой мощностью.

1.2 Анализ механической мощности, вырабатываемой ВВТ

Высокий пусковой момент ВВТ с поперечным потоком дает преимущество при работе на малых скоростях ветра, а малое соотношение линейной скорости лопатки ротора относительно скорости ветра λ снижает шум при работе. В исследованиях авторов [13-17,23,31,32] выявило, что максимальный коэффициент эффективности турбины C_p достигается при определенной величине λ и скорость ветра не оказывает существенного влияния. Учитывая, что авторы вносили определенные изменения в конструкцию ВВТ путем изменения количества лопаток, соотношения между внешним и внутренним диаметром ротора и направляющего аппарата, изменением конструкции направляющего аппарата ими получен разброс максимальной величине C_p от 0,17 до 0,7, а коэффициента λ от 0,39 до 0,7. В трудах [5,10,12,33] приводиться оптимальное соотношение $\lambda_{opt}=0,48-0,55$. Поэтому в моделировании ВВТ используем оптимальный $\lambda_{opt}=0,5$ и $C_{pmax}=0,22$. Тогда зависимость момента ВТ от частоты вращения или λ примет линейный вид. На рисунке 1.2 приведены зависимости моментов T от соотношения λ для ВВТ и ротора из статьи [27], построенные в относительных единицах.

Крайние точки у зависимостей равны: первая точка с моментом $T=1$ при $\lambda=0$ соответствует моменту с максимальным значением с заторможенным ротором; точка с моментом $T=0$ при $\lambda=1$, соответствует вращению без нагрузки на валу с максимальной скоростью вращения ротора для данной скорости ветра.

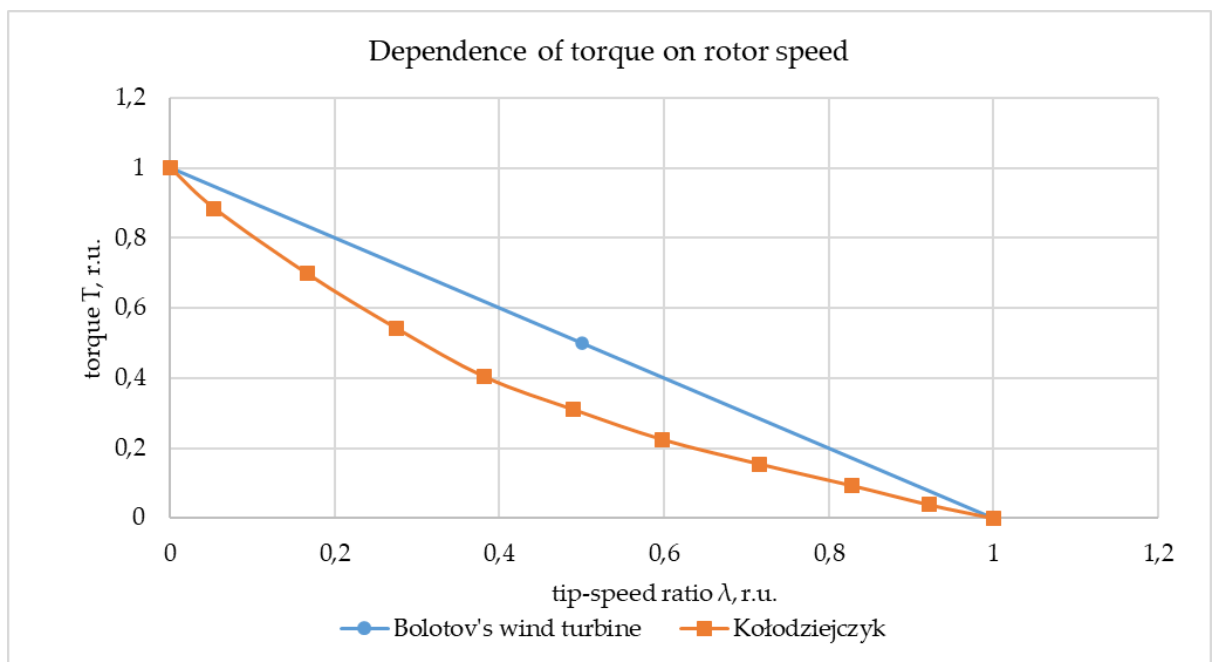


Рисунок 1.2 - Зависимости момента от частоты вращения

Промежуточные значения переменных зависимостей взяты из статей.

Цель исследования не включает изучение конструктивных особенностей и характеристик ВВТ. В исследовании используют результаты экспериментов других авторов. Изготовление аэродинамической трубы с регулированием скорости ветра в диапазоне от 3 до 22 м/с довольно сложная и дорогостоящая задача. Поэтому принято решение моделировать ветродвигатель с использованием электрического привода. Приведенные на рисунке 1.2 характеристики хорошо моделируются электроприводом постоянного тока. Механические характеристики ротора Kolodziejczyk с достаточной точностью моделируется двигателем постоянного тока смешанного возбуждения или последовательного возбуждения. Характеристика ВВТ имеет линейный характер и моделируется двигателем постоянного тока независимого возбуждения с подключением добавочного сопротивления к сопротивлению якорной обмотки и описывается простой зависимостью [34, 35]

$$T_{ru} = f(\lambda) = (1 - \lambda), \quad (1.1)$$

где $\lambda = \frac{\omega}{\omega_{ids}}$;

ω_{id} - угловая скорость ротора турбины на холостом ходу при скорости ветра v_i

Угловая скорость ротора ветряной турбины в зависимости от скорости ветра v_i

$$\omega_{id} = \frac{v_i * 60}{\pi * D_{ro}} * \frac{\pi}{30} = \frac{v_i * 2}{D_{ro}}. \quad (1.2)$$

Угловая скорость ротора ВВТ при оптимальном коэффициенте эффективности

$$\omega_{iopt} = \frac{v_i * 2}{D_{ro}} * \lambda_{opt}. \quad (1.3)$$

Пересчет момента из относительных величин в абсолютные величины производится по формуле [36]

$$T_i = \left(\frac{P_n}{\omega_n * \lambda_{opt}} \right) * (1 - \lambda_i), \quad (1.4)$$

где λ_i коэффициента заторможенности ротора, который изменяется от 0 до 1;

ω_n – номинальная угловая скорость вращения ротора при расчетной скорости ветра;

P_n – номинальная мощность генерируемой мощности при расчетной скорости ветра.

Расчетная мощность на валу ВГШД при v_i определяется общеизвестной формулой

$$P_{wti} = \frac{1.225}{2} * v_i^3 * D_n * H_n * C_p. \quad (1.5)$$

Оптимальный момент для каждой скорости ветра рассчитывается по формуле

$$T_{iopt} = P_{wti} / \omega_{iopt}. \quad (1.6)$$

Минимальная мощность двигателя для моделирования ветродвигателя определяется по формуле

$$P_d = P_{wti} * \eta_d, \quad (1.7)$$

где η_d – КПД приводного электродвигателя можно принять 0,85.

Для обоснования условий максимальной генерации электроэнергии от ВГШД при постоянстве напряжения и изменении угловой скорости создана физическая модель, приведенная на рисунке 1.3. Диаметр ротора этой модели принят $D_{ro}=175$ мм, диаметр направляющего аппарата - $D_n=228$ мм и высота $H_n=0,92$ м. Эффективность модели, с учетом КПД генератора, принято $C_p=0,22$, плотность воздуха составила $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$. На рисунке 1.3 в качестве ветрового потока использован вентилятор с концентрированно направленным потоком воздуха.



Рисунок 1.3 – Физическая модель ВВТ: 1 - источник ветрового потока (вентилятор); 2 – анемометр чашечный; 3 – модель ВГШД; 4 – нагрузка.

На рисунке 1.4 приведены сравнительные зависимости мощности ветряной турбины от скорости ветра без ограничения мощности и поддержанием работы во всем диапазоне изменения скорости ветра и характеристика турбины с ограничением мощности на уровне расчетного номинального значения.

Синим цветом приведена кривая мощности ВВТ в зависимости от скорости ветрового потока. Экспериментальные данные этой кривой и расчетные значения по формуле (1.5) практически сходятся и подтверждают пропорциональную кубическую зависимость мощности ВВТ от скорости ветра.

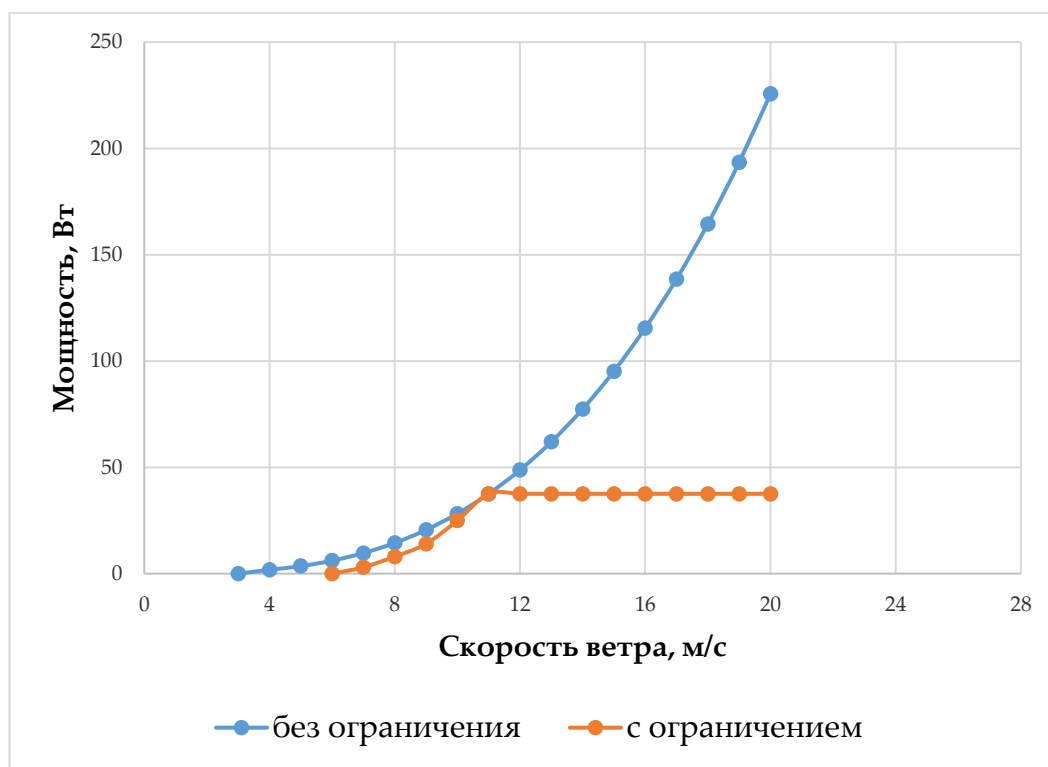


Рисунок 1.4 - Характеристики ВВТ с ограничением мощности и без ограничения.

На рисунке 1.4 красным цветом приведена выработка мощности с использованием электрогенераторов. Из рисунка 1.4 видно, что существующие электрогенераторы начинают вырабатывать электроэнергию со скорости ветра, примерно с 5 м/с. Далее кривая ограничивается (срезается) выработкой мощности согласно их расчетного номинального (паспортного) значения.

ВВТ может вырабатывать механическую мощность со скорости 2-3 м/с и достигать максимальной выработки мощности до скорости ветра 22-24 м/с. На рисунке 1.4 видно, что мощность ВВТ при скорости ветра в 22 м/с составила 300 Вт. В работе моделируются режимы скоростей ветра от 4 м/с до 22 м/с.

Анализ рисунка 1.4 показывает, что существующие электрогенераторы не используют полностью мощность ВВТ. При этом резервы неиспользованной мощности можно заметить площадью между синей и красной кривых. То есть резервы мощности ВВТ можно заметить до скорости ветра 5 м/с и свыше скорости 12 м/с. В последнем случае традиционные электрогенераторы

ограничивают работу из-за соблюдения паспортных параметров напряжения и частоты тока.

На рисунке 1.5 приведено распределение энергии генерируемой турбиной на разных скоростях ветра. Распределение построена для региона со средней годовой скоростью 6,5 м/с. Это значение участка со средним потенциалом для Казахстана.

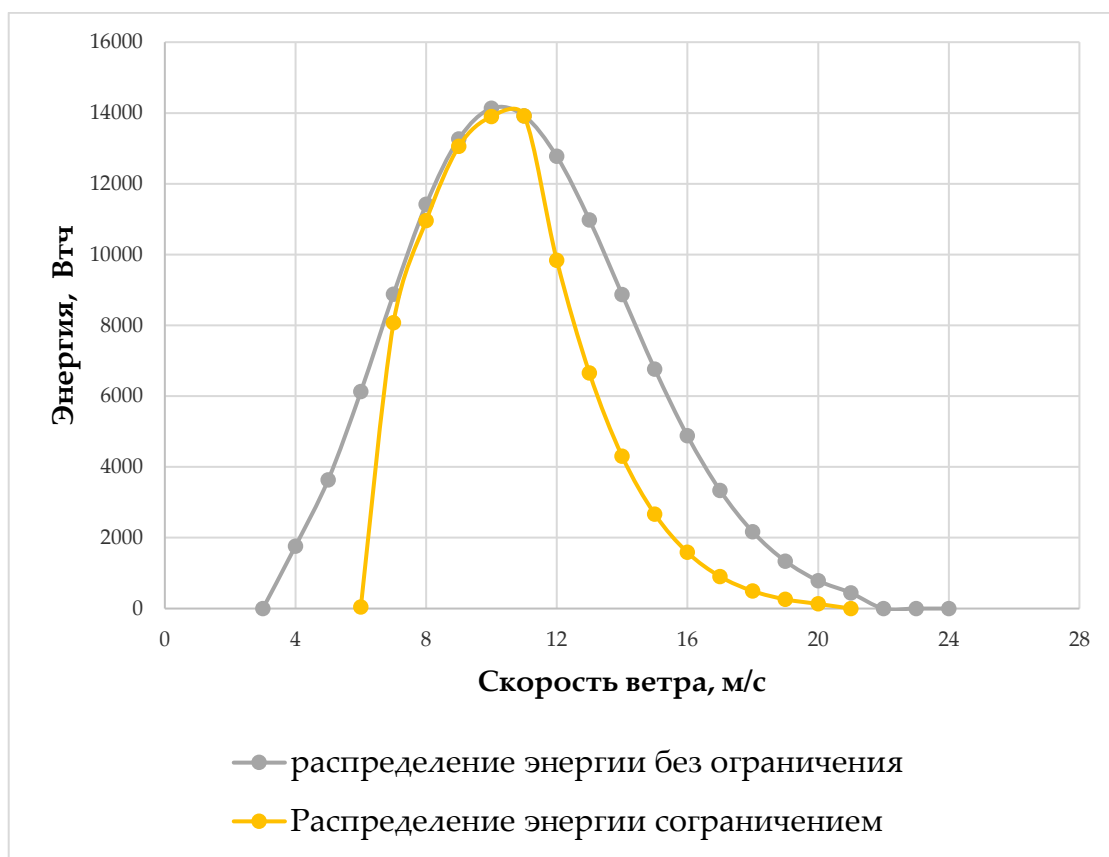


Рисунок 1.5 - Характеристики ВВТ с ограничением мощности и без ограничения.

На рисунке 1.5 серой кривой показана выработка механической энергии ВВТ в диапазоне скоростей ветрового потока от 2 до 24 м/с, а желтой – выработка электроэнергии традиционными методами. Использование резерва мощности ВВТ может увеличить выработку электроэнергии более чем на 20%.

Анализ рисунков 1.4 и 1.5 показывает возможность увеличения выработки электрической мощности за счет использования резервов мощности ВВТ. Такую возможность может использовать электрогенератор с широким диапазоном частоты вращения.

Рабочие характеристики, полученные на физической модели ВВТ, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Рабочие характеристики ВВТ [37]

v_i	м/с	4	7	10	13	21	22
P_{windi}	Вт	8	44	129	283	1191	1370
P_{wti}	Вт	2	10	28	62	262	301
n_{id}	об/мин	437	764	1091	1419	2292	2401
n_{opt}	об/мин	-	382	-	709	-	1200
ω_n	рад/с	23	40	57	74	120	126
P_0	Вт	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P_{30}	Вт	2	8	24	52	220	253
P_{40}	Вт	2	9	27	60	252	289
P_{50}	Вт	2	10	28	62	262	301
P_{70}	Вт	2	8	24	52	220	253
P_{80}	Вт	1	6	18	40	168	193
P_{90}	Вт	1	3	10	22	94	108
P_{100}	Вт	0	0	0	0	0	0
M_0	Нм	0,16	0,49	0,99	1,67	4,37	4,79
M_{30}	Нм	0,11	0,34	0,69	1,17	3,06	3,36
M_{40}	Нм	0,10	0,29	0,59	1,00	2,62	2,88
M_{50}	Нм	0,08	0,24	0,50	0,84	2,18	2,40
M_{70}	Нм	0,05	0,15	0,30	0,50	1,31	1,44
M_{80}	Нм	0,03	0,10	0,20	0,33	0,87	0,96
M_{90}	Нм	0,02	0,05	0,10	0,17	0,44	0,48
M_{100}	Нм	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ω_0	рад/сек	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ω_{30}	рад/сек	13,7	24,0	34,3	44,6	72,0	75,4
ω_{40}	рад/сек	18,3	32,0	45,7	59,4	96,0	100,6
ω_{50}	рад/сек	22,9	40,0	57,1	74,3	120,0	125,7
ω_{70}	рад/сек	32,0	56,0	80,0	104,0	168,0	176,0
ω_{80}	рад/сек	36,6	64,0	91,4	118,9	192,0	201,1
ω_{90}	рад/сек	41,1	72,0	102,9	133,7	216,0	226,3
ω_{100}	рад/сек	45,7	80,0	114,3	148,6	240,0	251,4

Примечание:

v_i - скорость ветра, м/с;

P_{windi} - мощность ВВТ, Вт;

n_{id} - расчетная частота вращения без учета торможения нагрузкой

n_{opt} - оптимальная частота вращения с нагрузкой

ω - угловая скорость, рад/с;

P_0 - P_{100} - мощность генератора при различной скорости вращения, Вт;

M – момент нагрузки, Нм

Генерация ВВТ без ограничения мощности генерирует энергии в год больше чем на 20%, а диапазон мощности генерации должен в десятки раз превышать расчетную. Этот вывод объясняет целесообразность разработки

генератора с широким диапазоном рабочих скоростей и мощности с поддержанием постоянства напряжения.

В таблице 1.1 расчетные данные для нескольких скоростей ветра v_i , расчетная мощность ветрового потока, поступающего на ветряную турбину P_{windi} , механическая мощность на валу ветряной турбины P_{wti} , частота вращения генератора на холостом ходу n_{id} , оптимальные частоты вращения для каждой скорости ветра n_{opt} , оптимальные угловые скорости генератора ω_{opt} , мощности, моменты и угловые скорости генератора P_i , T_i , ω_i при разной загруженности для каждой из скоростей ветра.

В модели для каждой скорости рассчитаны зависимости моментов и генерируемой мощности при разной загруженности, которая выражается изменением угловой скорости вращения $\omega_i = (0, 30, 40, 0,5, 70, 80, 90, 100) \%$ от угловой скорости на холостом ходе турбины. Для наглядности на рисунке 1.6 изображены характеристики ВВТ при скоростях ветра 7, 13 и 22 м/с.

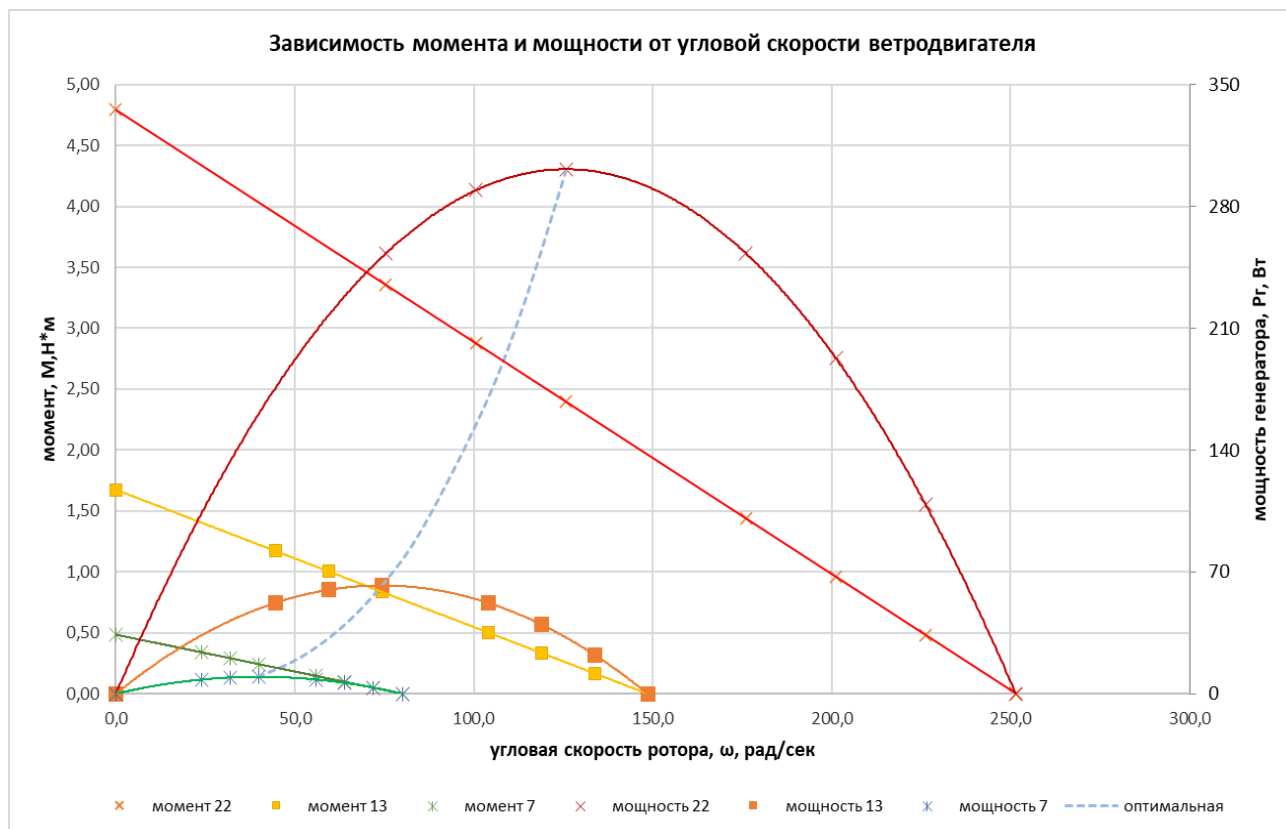


Рисунок 1.6 - Рабочие характеристики ветродвигателя ВВТ

Максимальная генерация возможна при условии обеспечения ВГШД постоянства напряжения в диапазоне изменения угловой скорости от 23 до 126 рад/сек и мощности от 2 до 300 Вт соответственно.

Из рисунка 1.6 видно, что оптимальная генерация при разных скоростях ветра достигается при условии, что рабочая частота вращения ВВТ и ВГШД будет изменяться пропорционально скорости ветра, а мощность пропорционально кубу скорости ветра (пунктирная линия), при этом генератор

должен обеспечить поддержание постоянства генерируемого напряжения и удовлетворительный КПД.

Подробности расчетов рабочих характеристик ветродвигателя ВВТ на Excel приведены в Приложении Б.

1.3 Выбор типа электрогенераторов для ВВТ

При переменной частоте вращения возникает вопрос обеспечения требуемого значения выходного напряжения генератора электроэнергии. На практике рекомендуются два основных решения: применение синхронизированных асинхронных генераторов и применение вентильных асинхронных и синхронных генераторов. Специалисты считают перспективным вариант с использованием вентильного синхронного генератора с автономным инвертором [38].

Синхронизированный асинхронный генератор представляет собой асинхронную машину с фазным ротором [39-41]. Исследование режимов работы машин этого типа в дизельных установках с переменной частотой вращения рассмотрены в работах [42]. Обмотка статора подключается к питающей сети или потребителю непосредственно, а фазная обмотка ротора подключают к преобразователю частоты.

Частота статорной обмотки зависит от скольжения, поэтому для поддержания постоянной частоты осуществляется плавным регулированием частоты тока в роторе. При снижении частоты вращения генератора, частота тока в роторе повышается. При повышенной частоте вращения увеличиваются потери в стали и обмотке ротора. Такие потери снижают КПД и ограничивают их использование [38,40,41].

В автономных системах получили распространение синхронные генераторы с когтеобразными полюсами, индукторные и реже асинхронные генераторы. Преимуществом таких генераторов является механическая надежность конструкции, низкие массогабаритные показатели, мягкая внешняя характеристика, возможность работы совместно с аккумуляторами и т.д. [43].

Результаты исследований [33] показали, что традиционные генераторы без дополнительных устройств не могут обеспечить поддержание величины выходного напряжения на требуемом уровне. Например, при снижении частоты вращения ниже 53-55 % обеспечить поддержание напряжения становится невозможным из-за насыщения магнитной цепи генератора. Кроме того, чем шире диапазон изменения частоты вращения, тем ниже КПД генератора.

Таким образом, актуальной задачей является разработка универсального генератора, способного поддерживать стабильное выходное напряжение с удовлетворительным КПД при широком диапазоне вращения его вала.

В настоящее время существуют ветрогенераторы с переменной скоростью вращения в широком диапазоне [44,45]. Однако они сложны в управлении, обладают высокой стоимостью и предназначены для работы на мощных ветровых электростанциях, подключенных к электроэнергетической системе.

В ВЭС, как правило, используются четыре схемы преобразования механической энергии в электрическую энергию [4,30,31,44,45]:

- первый тип состоит из синхронного генератора (СГ) с постоянной частотой вращения;
- второй тип состоит из асинхронного генератора с постоянной частотой вращения;
- третий тип состоит из асинхронного генератора двойного питания с переменной частотой вращения;
- четвертый тип состоит из СГ с выпрямителем и переменной частотой вращения.

Первый тип преобразования механической энергии с применением СГ применяется в схемах работы с централизованной системой электроснабжения [31]. Для обеспечения стабильной частоты напряжения мощность энергосистемы должна существенно превышать мощность ВЭС. Проблема определения соотношения между мощностью ВЭС и энергосистемы в настоящее время не поднимается, ввиду относительно малой суммарной мощности ветроэнергетических установок.

Из-за малой мощности СГ находится в синхронизме с системой при изменении скорости ветра. СГ имеет жесткую механическую характеристику, и при изменении скорости ветра изменение мощности будет происходить при постоянной частоте вращения. СГ ветроэлектростанции с прямым подключением к энергосистеме не может обеспечить оптимальный режим работы при всех рабочих скоростях ветра. Особые требования накладываются на систему управления. При снижении или длительном протекании скорости ветра ниже минимальной рабочей система управления должна вовремя отключить генератор от сети, чтобы предотвратить переход машины в двигательный режим.

Заниженное значение пусковой и переходной скорости ветра будет вызывать частые отключения из-за опасности перехода в двигательный режим. Завышенная скорость ветра позднее включение и потерю энергии.

При сильных и резких порывах существует опасность выпадения синхронной машины из синхронизма, а процедура повторного подключения ВЭС к сети является сложной [34].

Автономный режим СГ с прямым подключением к потребителю не возможен из-за отсутствия возможности поддержания удовлетворительного качества вырабатываемой электроэнергии (частоты и амплитуды напряжения) при изменении скорости ветра. Причина заключается в непредсказуемости ветра как источника энергии и относительно больших механических постоянных узлов ВЭС. Решение вопроса согласования синхронной машины в автономном режиме с ВЭС невозможно из-за конструктивных особенностей ветродвигателя.

Среди ВЭС средней и большой мощности широкое применение нашли второй тип преобразования механической энергии с использованием асинхронной машины (или асинхронного генератора) [46]. Причинами, объясняющими интерес к этому типу электрогенераторов являются относительно простые схемы подключения к сети и перевода из двигательного в

генераторный режим. Генераторный режим асинхронной машины возможен при условии, что частота вращения ротора n_2 будет превышать синхронную частоту вращения магнитного поля n_1 , которая определяется известным выражением

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_c}{p}, \quad (1.8)$$

где f_c - частота сети,

p - число пар полюсов.

Существует два способа возбуждения асинхронного генератора: подключением к трехфазной сети переменного тока и подключение конденсаторной батареи к обмотке статора. Первый способ применяется при параллельной работе с сетью, а второй для автономной работы ВЭС. Надо отметить, что в генераторном режиме асинхронная машина продолжает потреблять из сети реактивную энергию необходимую для создания вращающего магнитного потока. Величина потребляемой реактивной мощности составляет 20-30% от номинального значения мощности. Потребление реактивной мощности снижает коэффициент мощности сети [47].

Схема включения асинхронной машины для работы с сетью следующая: ротор асинхронной машины соединяется с валом ветродвигателя, как правило, через повышающий редуктор; статорная обмотка подключается к трехфазной сети переменного тока. Повышающий редуктор применяется для согласования асинхронного генератора с сетью и уменьшения его массы и габаритов, так как ветродвигатели средней и большой мощности имеют относительно низкую частоту вращения (50-200 об/мин). Уменьшение номинальной частоты вращения асинхронной машины повышает потребление реактивной мощности и снижает КПД [43,48].

Этим и объясняется широкое применение повышающего редуктора в системах с использованием асинхронной машины. В ВЭС с асинхронными машинами используют двигательный и генераторный режимы работы машины. В связи с тем, что у ветродвигателей пропеллерного типа средней и большой мощности низкий пусковой момент, которого недостаточно для пуска ветродвигателя, пуск в двигательном режиме делает возможным работу ВЭС с меньшей скорости ветра, что расширяет диапазона рабочих скоростей ветра.

При пуске ветродвигатель начинает разгоняться и увеличивать свою частоту вращения, а асинхронная машина продолжает ему помогать. По достижению асинхронной машиной частоты вращения превышающей синхронную частоту вращения магнитного поля, она переходит в генераторный режим без дополнительных переключений. Мощность, вырабатываемая генератором, увеличивается с ростом частоты вращения ветродвигателя до расчетного значения, после чего включается система регулирования, поддерживающая постоянство оборотов ветродвигателя. Использование системы регулирования оборотов (ограничение вырабатываемой мощности)

обусловлено необходимостью защиты ВЭС с пропеллерными ветродвигателями от разрушения и согласования характеристик генератора с характеристиками ветродвигателя. Причина разрушений при увеличении оборотов, прежде всего, заключается в больших центробежных силах, растущих при увеличении оборотов. Принцип работы ветродвигателя ВЭС не предусматривает регулирования оборотов, а асинхронная машина допускает изменения частоты вращения в узком диапазоне [49].

Анализ выявил, что ВЭС с асинхронной машиной и возбуждением от сети будет работать аналогично ВЭС с ограничением частоты вращения. Следовательно, производительность ВЭС снизится.

Недостаток этого способа заключается в снижении КПД генератора так, как у асинхронного генератора с более мягкой характеристикой уменьшается активная мощность, отдаваемая в сеть при сохранении потребляемой реактивной. К повышению производительности ветроэлектростанции эти мероприятия не приведут.

Особого рассмотрения требует режим работы асинхронного генератора питающего автономную нагрузку, где источником реактивной энергии служит конденсаторная батарея (КБ), а возбуждение генератора сопровождается процессом самовозбуждения.

Ротор асинхронной машины соединяется с ветродвигателем, статорная обмотка подключается к КБ и параллельно им подключается нагрузка.

Согласно классической трактовке, самовозбуждение генератора обусловлено потоком остаточного магнетизма ротора, который при вращении ротора наводит соответствующую электродвижущую силу в обмотке статора и служит толчком для начала процесса. На благополучное протекание процесса большое влияние оказывает правильность подбора емкостного сопротивления КБ [49].

При чисто активной нагрузке величина необходимой реактивной мощности составляет 20-30 % от номинальной мощности. В случае смешанной нагрузки реактивная энергия, поступающая от КБ должна покрывать реактивную мощность, потребляемую асинхронной машиной и нагрузкой, ее мощность может составлять до 100 %. Также необходимо иметь возможность ее регулирования для чего требуется использование дополнительного оборудования и удорожание системы [48].

Под кажущейся простотой скрывается проблема по реализации этой схемы, заключающаяся в разработке компактных регулируемых источников реактивной мощности.

Существует проблема по поддержанию величины и частоты напряжения при изменении нагрузки и скорости ветра (частоты вращения ротора), вызванная изменением скольжения [47]. Снижение напряжения при росте нагрузки вызвана ростом падения напряжения в нагрузке и уменьшением намагничивающего тока. Постоянство величины, и частоты напряжения можно добиться поддержанием постоянного скольжения, регулированием частоты вращения или регулированием магнитного потока, изменением подаваемой реактивной

мощности от КБ. Принцип работы ветродвигателя ВЭС не предусматривает регулирование частоты вращения, и она зависит от скорости ветра и нагрузки на валу. Для регулирования потока требуется КБ с регулируемой емкостью. В случае смешанной нагрузки и переменной частоте вращения резко возрастает требуемая емкость КБ [46, 49].

Учитывая, широкий диапазон изменения скорости вращения ветродвигателя ВЭС (от 100 до 600 об/мин), величина емкости КБ должна превысить емкость, потребляемую в номинальном режиме в несколько раз, что загрузит машину реактивным током и сделает дальнейшую работу невозможной. Увеличение массогабаритных показателей машины расширит рабочий диапазон частот вращения, но вместе увеличится и емкость конденсаторных батарей.

В современных ВВТ применяют третий и четвертый тип схем преобразования. Генераторы третьего типа может поддерживать оптимальное напряжение с сохранением удовлетворительного КПД при изменении диапазоне изменения частоты вращения в пределах $\pm 35\%$ от номинальной, что для ВВТ недостаточно [30, 33, 50].

Наиболее широкий рабочий диапазон изменения частоты вращения у генераторов четвертого типа. В связи с высокими темпами интеграции ВЭС и высокой сложностью интеграции их в энергетические системы преобладают исследования генераторов большой мощности [30, 33, 49-51]. Этот перечень очень большой. Несмотря на продолжающиеся развитие конструкции малых ветряных турбин и электромеханических преобразователей (ЭМП), исследованию режимов ВВТ малой мощности совместно со схемами электромеханических преобразователей уделяется недостаточный интерес. В тоже время в странах с малой плотностью и большой территорией, и в городах с высокими зданиями это направление имеет большой потенциал для внедрения. В генераторах с электромагнитным возбуждением диапазон изменения частоты вращения, при котором поддерживается постоянство напряжения ограничивается свойствами СГ. Перечисленные авторы рассматривают ветродвигатели или ЭМП на предмет рабочего оптимизации с расчетом регулирования. Не уделено должное внимание вопросу эффективности ветряной электроустановки с учетом изменения КПД электромеханического преобразователя.

На основе изложенного, можно сделать следующие выводы:

- существующие ЭМП не могут обеспечить стабильность выходного напряжения с сохранением высокого КПД при широком диапазоне изменения скорости ветра;
- для обеспечения эффективности режимов работы ВВТ нужно разработать принципиально новый электрогенератор, способный работать при широком диапазоне изменения частоты вращения от 100 до 1200 об/мин и мощности от 0,17 кВт до 10 кВт с сохранением удовлетворительного КПД.

Для небольших (или отдаленных) объектов наиболее приемлемым является вентильный генератор с широким диапазоном частоты вращения

(ВГШД), представляющий собой трехфазный синхронный генератор с электромагнитным индуктором [37,52].

В диссертации приведен анализ совместимости рабочих характеристик ВВТ и ВГШД, которая представляется конструкцией со схемой выполнения якорных обмоток с несколькими параллельными ветвями.

1.4 Электроснабжение отдаленных объектов с применением ВГШД

В автономных системах, из-за непредсказуемости выработки электроэнергии от ВИЭ, для поддержки принятой технологии производства с относительно небольшой (до нескольких кВт) мощности электропотребления наиболее предпочтительно применение синхронных генераторов совместно с аккумуляторными батареями (АКБ) [53-55].

Несовпадение графиков генерации электрической энергии от ВИЭ и графиков её потребления является причиной работы АКБ в режиме циклического заряда и разряда [56,57].

На рисунке 1.7 приведен вероятностный суточный график электрических нагрузок отдаленного сельскохозяйственного объекта [8,58,59].

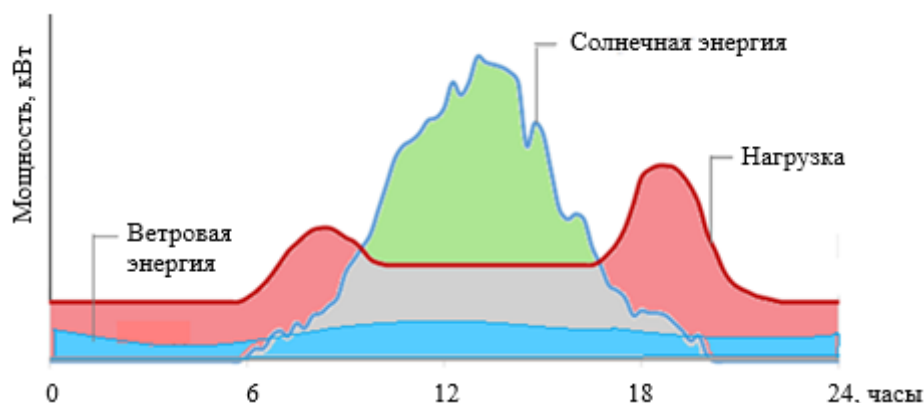


Рисунок 1.7 – Суточный график электрической нагрузки отдаленного молочно-товарной фермы

На этом графике выделяются два явных максимума нагрузки (утренний и вечерний), которые связаны, в основном, с процессами доения на молочно-товарных фермах. Для покрытия этих максимумов нагрузки могут использоваться солнечные и ветровые энергии, а при дефиците электроэнергии - АКБ. Отсюда возникает важность накапливания энергии на АКБ, то есть своевременная их зарядка или подзарядка. Эти процессы просто осуществлять днем от солнечных панелей. Вместе с тем из рисунка 1.7 видно что, АКБ может отдавать накопленную энергию вечернему процессу дойки коров, а к утру ее энергии не хватит для обеспечения утренней дойки. Отсюда, в автономной системе, единственной возможностью подзарядки АКБ в ночное время является использование ВГШД, который способен вырабатывать электроэнергию при различных скоростях ветра, в том числе при слабых ветровых потоках.

Схема работы ВГШД в автономной система приведена на рисунке 1.8.

Из рисунка 1.8 видно, что ВГШД выдает постоянный ток с заданным напряжением. В автономной системе, как правило, используются контроллеры заряда, основная функция которого заключается в защите АКБ от перезаряда и чрезмерного разряда [60]. АКБ заряжается и разряжается в зависимости от мощности и длительности технологических процессов.

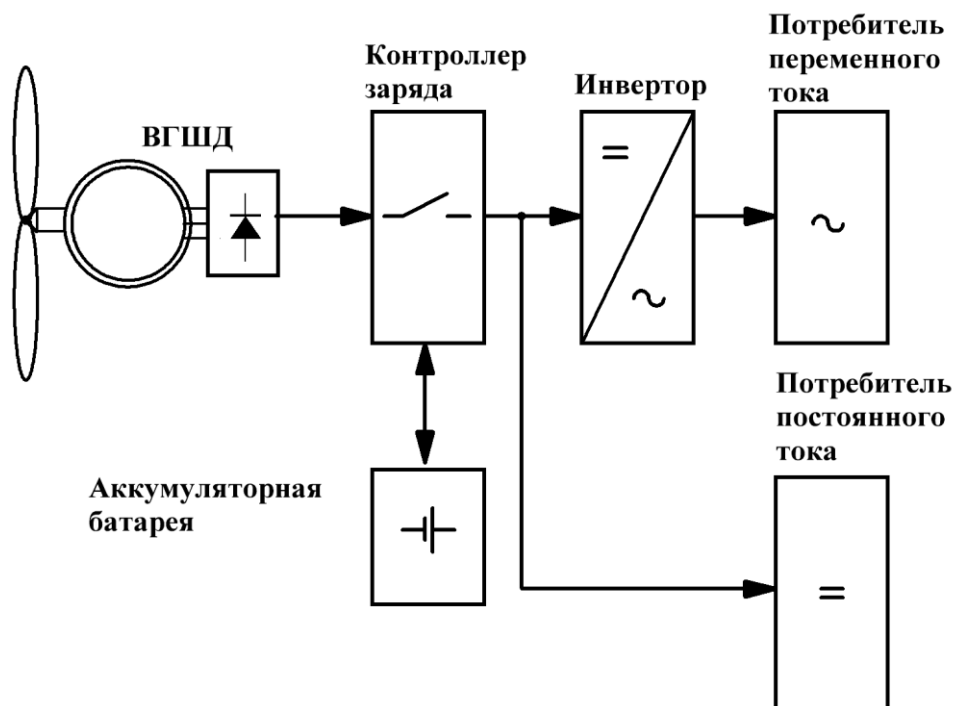


Рисунок 1.8 – Схема зарядки АКБ от ВГШД

С помощью инвертора потребители переменного тока могут получать электрическую энергию требуемого качества. В схеме рисунка 1.8 предусмотрено питание и потребителей постоянного тока. Последними могут быть отдельные сварочные аппараты, электроинструменты и т.п.

Согласно практических рекомендаций, напряжение на свинцово-кислотных батареях AGM без нагрузки должно составлять 25,2-25,6 В, а начальное напряжение зарядки 28-29 В [60,61]. Такое напряжение зарядки успешно поддерживает ВГШД путем переключения группы параллельных ветвей.

Мощность зарядного устройства, определяется по формуле, Вт [62,63]:

$$P_{\text{зар}} = U \cdot I_{\text{зар}} \quad (1.9)$$

где U – напряжение АКБ, В;

$I_{\text{зар}}$ - ток заряда, А

Ток заряда обычно задаётся через ёмкость АКБ, А [62,63]:

$$I_{\text{зар}} = k \cdot C \quad (1.10)$$

где C – ёмкость, А·ч;

k - коэффициент при нормальной зарядке (0,1...0,3) [62,63].

Тогда мощность зарядного устройства определяется по формуле, Вт:

$$P_{\text{зар}} = U \cdot k \cdot C \quad (1.11)$$

Практический интерес вызывает время работы электроприемников в автономной системе. Расчетная мощность отдаленных объектов находится в примерно в пределах 3...5 кВт и основные электроприемники (дойка, водяной насос и т.п.) имеют относительно кратковременный режим работы (1-2 часа) [7,8,58].

В таблице 1.2 для практических расчетов приведена зависимость мощности подключаемой нагрузки от емкости аккумуляторов при времени работы в автономной системе.

Таблица 1.2 - Зависимость мощности подключаемой нагрузки от емкости аккумуляторов [63].

Емкость аккумуляторов (напряжение)	Мощность подключаемой нагрузки / Время автономной работы (часы, минуты)						
	100Вт	300Вт	500 Вт	1 кВт	2 кВт	4 кВт	8 кВт
55 Ач (12 В)	5ч 40м	1ч 40м	50м	13м	3м	---	---
90 Ач (12 В)	9ч 30м	3ч	1ч 40м	45м	12м	3м	---
190 Ач (12 В)	21ч	6ч 10м	3ч 50м	1ч 40м	45м	13м	3м
190 Ач (24 В)	42ч	13ч	7ч 20м	3ч 50м	1ч 40м	50м	13м
380 Ач (24 В)	86ч	26ч	17ч	8ч 20м	4ч	1ч 50м	50м
570 Ач (24 В)	130ч	39ч	25ч 30м	12ч 30м	6ч	2ч 50м	1ч 50м
760 Ач (24 В)	172ч	52ч	34ч	17ч	8ч	4ч	2ч 50м
760 Ач (48 В)	350ч	172ч	52ч	34ч	17ч	8ч	4ч

Из таблицы 1.2 видно, что при емкости АКБ 190 А·ч в течении 1 часа и 40 минут можно подключать нагрузку мощностью 2 кВт, а в течении 50 минут – 4 кВт. А если при параллельном включении двух АКБ (190·2 = 380 А·ч) можно подключать, соответственно, 4 и 8 кВт нагрузки. Таким образом, высока вероятность резервировать процессы дойки коров (примерно 1,5-2 часа) и водоснабжения (0,5-1 часов) от двух АКБ емкостью 190 А·ч. При необходимости время работы технологических процессов в автономных системах можно сдвигать, что позволит уменьшить расчетную нагрузку потребителя.

Мощность ВГШД должна быть не меньше мощности, необходимой для заряда аккумулятора:

$$P_{\text{ВГШД}} \geq P_{\text{зар}} \quad (1.12)$$

где: $P_{\text{ВГШД}}$ - фактическая мощность ВГШД, Вт;

$P_{\text{зар}}$ - требуемая мощность для зарядки аккумуляторной батареи, Вт.

Подставляя формулу (1.11) в (1.12) получим

$$P_{\text{ВГШД}} \geq U \cdot k \cdot C \quad (1.13)$$

где: U - напряжение аккумуляторной батареи, В;

C - емкость аккумулятора, А·ч;

k - коэффициент зарядного тока (0.1 ÷ 0.3).

Тогда, для АКБ напряжением 24 В и емкостью 190 А·ч:

$$P_{\text{ВГШД}} \geq 24 \cdot 0.1 \cdot 190 = 456 \text{ Вт}$$

Следовательно, для нормального заряда аккумуляторной батареи емкостью 190 А·ч при напряжении 24 В мощность ВГШД должна быть не менее 456 Вт. Из условия (1.13) следует, что увеличение емкости аккумуляторной батареи приводит к пропорциональному увеличению требуемой мощности ветрогенератора. Поэтому выбор аккумуляторной батареи должен осуществляться совместно с выбором мощности ВГШД и с учетом среднегодовой скорости ветра в районе эксплуатации. При недостаточной мощности генератора время заряда аккумулятора существенно возрастает, что снижает эффективность автономной системы электроснабжения.

Снижение потребной мощности ВГШД, используемого в качестве зарядного устройства, можно добиться применением фотоэлектрических панелей для зарядки АКБ в дневное время. Такую комбинацию на ВВТ используют на практике (Приложение А).

На основе анализа использования ВГШД в качестве зарядного устройства можно сделать следующие выводы:

- применение ВГШД в системе «модуляции-демодуляции» позволяет повысить качество электроэнергии, снизить потребную мощность ВВТ и производить зарядку или подзарядку АКБ при различной скорости ветра;
- мощность ВГШД для зарядки АКБ прямо пропорциональна ее ёмкости;
- продолжительность и величина зарядного тока контролируются специальными контроллерами;
- выбор емкости АКБ зависит от мощности и длительности работы электроприемников.

На малых удаленных объектах востребованы такие компактные установки, как предлагаемые ВГШД, которые могут создаваться даже силами ремонтных мастерских на базе новых или бывших в употреблении автомобильных генераторов. На фоне большого количества, подлежащих утилизации автомобилей, исправные комплектующие поступают на рынок в итоге возникает избыток невостребованных исправных генераторов. Модернизация

автомобильного генератора и дальнейшее использование в ветряных установках до 5 кВт или автономных генераторах значительно снижает стоимость ВВТ.

Постановка цели и задач исследования

Анализ литературных источников и предварительные исследования показали, что ВВТ, при различной скорости ветрового потока, вырабатывает значительное количество механической энергии, которая не в полной мере используется для выработки электроэнергии. ВВТ может вырабатывать механическую мощность со скорости 2-3 м/с и достигать максимальной выработки мощности до скорости ветра 22-24 м/с.

Несмотря на продолжающиеся развитие конструкции малых ветряных турбин и электромеханических преобразователей (ЭМП), исследованию режимов ВВТ малой мощности совместно со схемами ЭМП уделяется недостаточное внимание. В тоже время в странах с малой плотностью населения и большой территорией это направление имеет большой потенциал для внедрения. В генераторах с электромагнитным возбуждением диапазон изменения частоты вращения ограничивается техническими требованиями.

Традиционные электрогенераторы без дополнительных устройств не могут обеспечить поддержание величины выходного напряжения на требуемом уровне. Например, при снижении частоты вращения ниже 53-55 % обеспечить поддержание напряжения становится невозможным из-за насыщения магнитной цепи генератора. Кроме того, чем шире диапазон изменения частоты вращения, тем ниже КПД генератора.

Проведенные расчеты определили значительный резерв неиспользуемой механической мощности ВВТ, особенно при слабых и сильных скоростях ветра. Такой резерв невозможно использовать традиционными электрогенераторами, которые ограничиваются работой согласно установленных паспортных данных (в первую очередь по напряжению и частоте вращения).

В соответствии с изложенным целью диссертационной работы является разработка нового вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением и исследование совместимости его работы с ВВТ.

Для достижения данной цели будут решаться следующие задачи:

- провести анализ литературных источников и патентный поиск конструкций различных электрогенераторов ВВТ в целях разработки нового ВГШД;
- разработать новые схемы соединения и методику расчета якорной обмотки ВГШД для стабилизации вырабатываемого напряжения;
- провести экспериментальные исследования на испытательном стенде и проверить совместимость работы ВВТ и ВГШД при различных режимах;
- разработать имитационную модель ВГШД в среде пакета программ MatLab/Simulink для теоретического исследования различных режимов работы;
- провести верификацию расчетных и экспериментальных данных и выработать рекомендации по эксплуатации ВГШД.

2 РАЗРАБОТКА ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

2.1 Предпосылки создания ВГШД

Особенностью МВЭС вертикального типа является то, что имеет низкую пусковую скорость ветра и не используют поворотные направляющие устройство, что упрощает конструкцию повышает надежность турбины [6].

Вместе с тем, существующие конструкции электрогенераторов ветряных электроустановок вертикально-роторного не обеспечивают стабильного напряжения при широком диапазоне изменения частоты вращения и поддержание удовлетворительного коэффициент полезного действия (КПД) в пределах 0,7-0,9.

Одним из факторов, позволяющих добиться максимальной эффективности выработки электроэнергии на МВЭС вертикального типа, является стабилизация вырабатываемого напряжения во всём диапазоне изменения скорости ветра и его частоты вращения.

Вопросы работы электростанций переменной скоростью вращения рассматривались в ряде литературных источниках [16,31,39,40 и др.]. Расширение диапазона изменения рабочих частот вращения достигается путем регулирования тока возбуждения, использованием генераторов двойного питания и вентильных генераторов с постоянными магнитами и регулируемые выпрямителями.

В ходе выполнения диссертационной работы проведен патентно-предметный поиск. Глубина поиска по источникам патентной и научно-технической информации принято 15 лет, исходя из потребности в информации для решения поставленных задач. Для составления патентной заявки на полезную модель, по разрабатываемому устройству, определены наиболее близкие аналоги KZ027094A4 H02N 1/00, от 14.06.2013 г., KZ003260U H02N 1/00 от 26.10.2018 г., RU0219734U1 H02P 9/00 от 02.08.2023 г., RU217709U1 F03D 7/00 от 13.04.2023 г.

В качестве электрогенератора для малых ветроустановок в [64] предлагался автомобильный вентильный генератор (ВГ), который включает в себя трехфазный синхронный генератор (СГ) с когтеобразным индуктором, содержащий выпрямитель, включающий две трехфазные самостоятельные обмотки якоря с разными сечениями и числом витков. При низкой частоте вращения генератора начинает работать обмотка с большим числом витков и меньшим сечением, при повышении частоты вращения в работу включается вторая обмотка с меньшим числом витков и большим сечением. Недостатком этого генератора является недостаточно широкий диапазон изменения частоты вращения и неравномерная загрузка обмоток якоря, а из-за разной кривизны внешней характеристики обмоток ухудшается коммутация вентилей, что снижает КПД генератора.

2.2 Концепция функционирования ВГШД

ВГШД состоит из синхронной машины с якорной обмотки из нескольких параллельных ветвей, каждая из которых подключена своему выпрямителю и образуют выпрямительный модуль [35,36,52]. Выпрямительные модули подключены к потребителю через диоды, а между положительными и отрицательными выводами выпрямительных модулей включены коммутирующие ключи. Они с диодами производят последовательное, последовательно-параллельное (смешанное) или параллельное подключение выпрямительных модулей между собой, что позволяет суммировать или делить выходное напряжение ВГШД в определенной пропорции. В зависимости от диапазона изменения частоты вращения можно подобрать любое количество ступеней.

Независимость выходной частоты тока от скорости ветра (частоты вращения) дает возможность обеспечить оптимальную загрузку ветродвигателя ВГШД при широком диапазоне изменении скорости ветра.

Концепция ВГШД поясняется формулой ЭДС генератора [35,36,52]:

$$\begin{aligned} E_{\Gamma} &= 4,44 \cdot f \cdot W_{\phi 1} \cdot \Phi = 4,44 \frac{p \cdot n}{60} W_{\phi 1} \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l \cdot B_{\delta} = 4,44 \frac{p \cdot \tau \cdot l \cdot \alpha}{60} W_{\phi 1} \cdot n \cdot \\ B_{\delta} &= K_{\Gamma} \cdot W_{\phi 1} \cdot n \cdot B_{\delta} \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $W_{\phi 1}$ - число эффективных витков в одной параллельной фазной ветви;

B_{δ} - индукция в воздушном зазоре;

n – частота вращения;

f – частота напряжения;

Φ – магнитный поток;

p – число пар полюсов;

l – длина сердечника статора;

α – коэффициент полюсного перекрытия;

τ – полюсное деление;

K_{Γ} - конструктивная постоянная генератора.

При малых скоростях ВГШД должна работать на малых частотах вращения, поэтому для поддержания напряжения нужно повысить индукцию в воздушном зазоре. При увеличении скорости ветра для поддержания напряжения при кубическом увеличении мощности приходится компенсировать реакцию якоря путем увеличения индукции. Диапазон регулирования индукции ограничен магнитными свойствами электротехнической стали статора и полюсов и может колеблется в диапазоне $\pm 50\%$ от номинального значения. ВГШД работает следующим образом: на малых скоростях ветра выпрямительные блоки подключаются последовательно, что равносильно увеличению $W_{\phi 1}$, по мере роста скорости ветра можно переключать выпрямительные модули параллельно или частично последовательно и частично параллельно.

При снижении частоты вращения группы ПВ (например, двух) включаются последовательно и общее напряжение на выходе определяется по формуле [35, 52]

$$U_{\Gamma} = U_1 + U_2 = 2W_{\phi 1}(K_{\Gamma} \cdot n \cdot B_{\delta}) \quad (2.2)$$

где U_1 и U_2 - напряжения на участках ПВ, B ; 2 - количество ПВ.

Выходное напряжение ВГ складывается из суммы напряжений на последовательно включенных группах ПВ.

Выражение можно переписать в следующем виде:

$$U_{\Gamma} = a \cdot W_{\phi 1} \cdot K_{\Gamma} \cdot n \cdot B_{\delta} \quad (2.3)$$

где a – число последовательно включенных групп ПВ.

Параллельное переключение необходимо для снижения размагничивающего влияния реакции якоря на высоких скоростях за счет снижения $W_{\phi 1}$. При повышении частоты вращения на валу ВГЩД коммутирующее устройство переключает группы ветвей на параллельную работу и выходное напряжение определяется по формуле [35,52]

$$U_{\Gamma} = U_1 = U_2 = K_{\Gamma} \cdot W_{\phi 1} \cdot n \cdot B_{\delta} \quad (2.4)$$

Таким образом, целевую функцию перемотки якорной обмотки ВГЩД можно представить в следующем виде:

$$U_{\Gamma} = f(a, W_{\phi 1}, K_{\Gamma}, n, B_{\delta}) \Rightarrow const$$

Переключение соединений групп параллельных ветвей якорной обмотки в зависимости от частоты вращения ВГЩД происходит ступенчато для стабилизации напряжения с заметными отклонениями и погрешностями. Эффективным является дополнительная стабилизация напряжения за счет плавного регулирования тока возбуждения ВГЩД на каждой ступени переключения групп ПВ.

В итоге при снижении частоты вращения последовательное подключение позволяет снизить необходимы для регулирования диапазон изменения индукции для поддержания напряжения. Эта концепция позволяет генератору поддерживать постоянное напряжение практически в любом диапазоне изменения частоты вращения, поддерживать КПД при существенном увеличении мощности.

2.3 Схемы соединения якорной обмотки ВГШД

Со временем появился ВГ [65], который включает в себя трехфазный СГ с электромагнитным индуктором, содержащий несколько вентильных блоков, у которого обмотка якоря выполнена « m » - фазной ($m=1,2,3,4\dots$) из « a »-параллельных ветвей ($a=2,3,4,5\dots$), и каждая ветвь подключена к своему выпрямителю, образуя вентильный блок, вентильные блоки подключены параллельно к общей сети постоянного тока, через полупроводниковые элементы, включенные в прямом направлении, кроме внешних выходов крайних блоков, подключенных к сети непосредственно, между отрицательными выходами предыдущих блоков и положительными выходами последующих блоков включены коммутирующие элементы, кроме внешних выходов крайних блоков. Недостаток такого ВГ заключается в большом количестве вентильных выпрямителей, необходимых для дискретного регулирования напряжения на стороне постоянного тока, при широком диапазоне изменения частоты вращения, что снижает КПД.

Предлагаемый ВГШД относится к ВГ, которые могут использоваться в качестве автономных источников энергии для электроснабжения удаленных объектах сельскохозяйственных потребителей. Механическая энергия к ним может подаваться от ветроагрегатов, гидроустановок и т.п. с переменной частотой вращения.

Задачей является создание надежного универсального генератора упрощенной конструкции с высоким КПД [66].

Для достижения технического результата ВГШД, включает в себя трехфазный СГ с электромагнитным индуктором, у которого обмотка якоря выполнена из « m » - фазных и « A » - параллельных ветвей (ПВ), согласно полезной модели, начало первой ПВ якорной обмотки имеют соединение «звезда», при этом начало последующих ПВ якорных обмоток соединены с нормально замкнутыми контактами соответствующего коммутирующего устройства и подключаются пофазно с концом предыдущей ПВ якорной обмотки через нормально разомкнутые контакты коммутирующего устройства, а концы всех ПВ якорных обмоток, через соответствующие нормально замкнутые контакты коммутирующего устройства, подключены параллельно к выпрямителю.

На рисунке 2.1 показана общая схема ВГШД, со всеми имеющимися контактами и вариантами переключения коммутирующих устройств, в режиме без нагрузки. Основными элементами схемы являются:

- A1, A2, A3, A4 – ПВ якорной обмотки;
- K2.1, K1, K2.2, K – коммутирующие устройства;
- B - трехфазный выпрямитель;
- AB - аккумуляторная батарея.

ПВ якорной обмотки A1, A2, A3, A4 генератора состоят из « n » параллельных и « m » фазных ветвей (в частном случае $n=4$, где $n \geq 2$ и $m \geq 2$), коммутирующих устройств K2.1, K1, K2.2, K и из одного трехфазного выпрямителя «B».

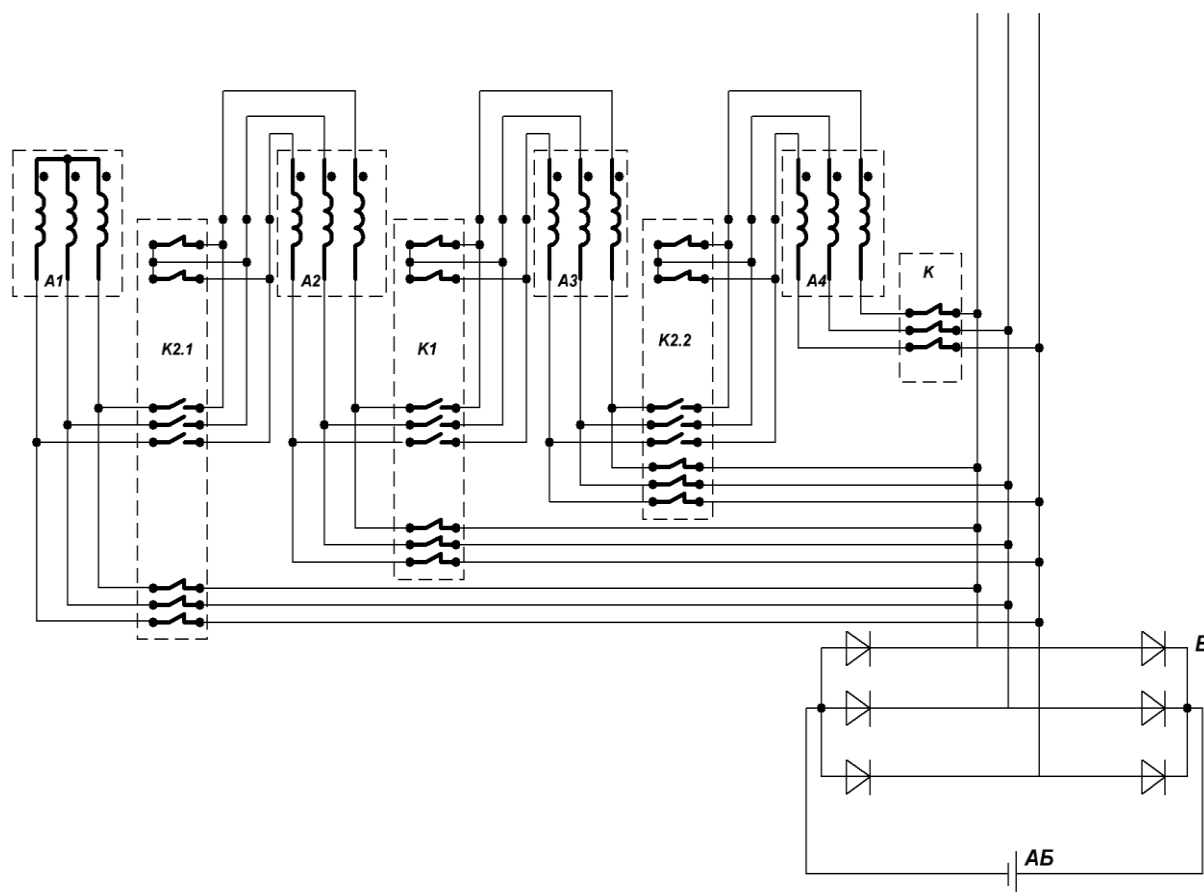


Рисунок 2.1 – Исходная схема параллельных ветвей якорной обмотки ВГШД

На рисунке 2.2 приведена схема переключения ПВ обмоток якоря в режиме нагрузки и без применения схемы «звезда».

Начало первой ПВ якорной обмотки А1 соединены вместе и образует соединение «звезда» (рисунок 2.2). Остальные ПВ якорных обмоток А2, А3, А4 соединены между собой и с первой параллельной ветвью А1 следующим образом: начало последующих ПВ якорных обмоток А2, А3, А4 подключается пофазно с концом предыдущей ПВ якорной обмотки А1 через нормально разомкнутые контакты коммутирующих устройств “К2.1, К1, К2.2”, а также начало остальных якорных обмоток А2, А3, А4 (кроме первой А1) параллельных ветвей соединены с нормально замкнутыми контактами “К2.1, К1, К2.2”, соответствующих коммутирующих устройств. Концы всех параллельных ветвей якорных обмоток А1, А2, А3, А4 через соответствующие нормально замкнутые контакты коммутирующих устройств К2.1, К1, К2.2, К параллельно подключены к выпрямителю В.

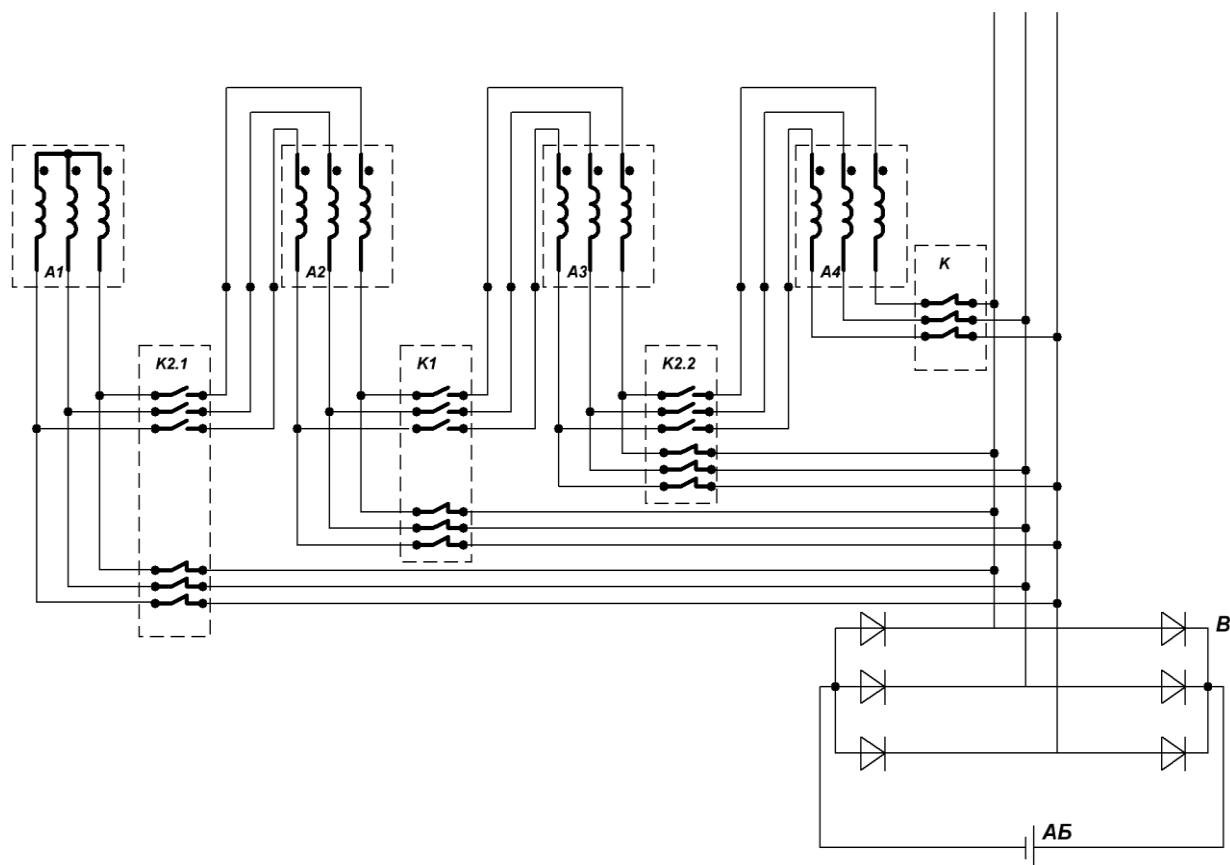


Рисунок 2.2 - Схема переключения обмоток якоря без применения схемы «звезда»

На рисунке 2.3 –показана схема переключения параллельных обмоток якоря на параллельное соединение за счет контактов коммутирующих устройств. Эта схема используется при высокой частоте вращения и с применением полностью схемы «звезда».

ВГШД работает следующим образом: при высокой частоте вращения нормально замкнутые контакты коммутирующих устройств K2.1, K1, K2.2, к которым подключены начало ПВ якорных обмоток A2, A3, A4 замкнуты, таким образом, что все эти ветви собраны схемой «звезда», нормально разомкнутые контакты K2.1, K1, K2.2, через которые соединены начало последующих ПВ якорных обмоток A2, A3, A4 с концами предыдущих ПВ якорных обмоток A1, A2, A3 разомкнуты, а нормально замкнутые контакты коммутирующих устройств через которые концы ПВ якорных обмоток A1, A2, A3, A4 замкнуты и соединены с выпрямителем. Таким образом, каждая ПВ якорных обмоток собрана по схеме «звезда» и параллельно подключена к выпрямителю.

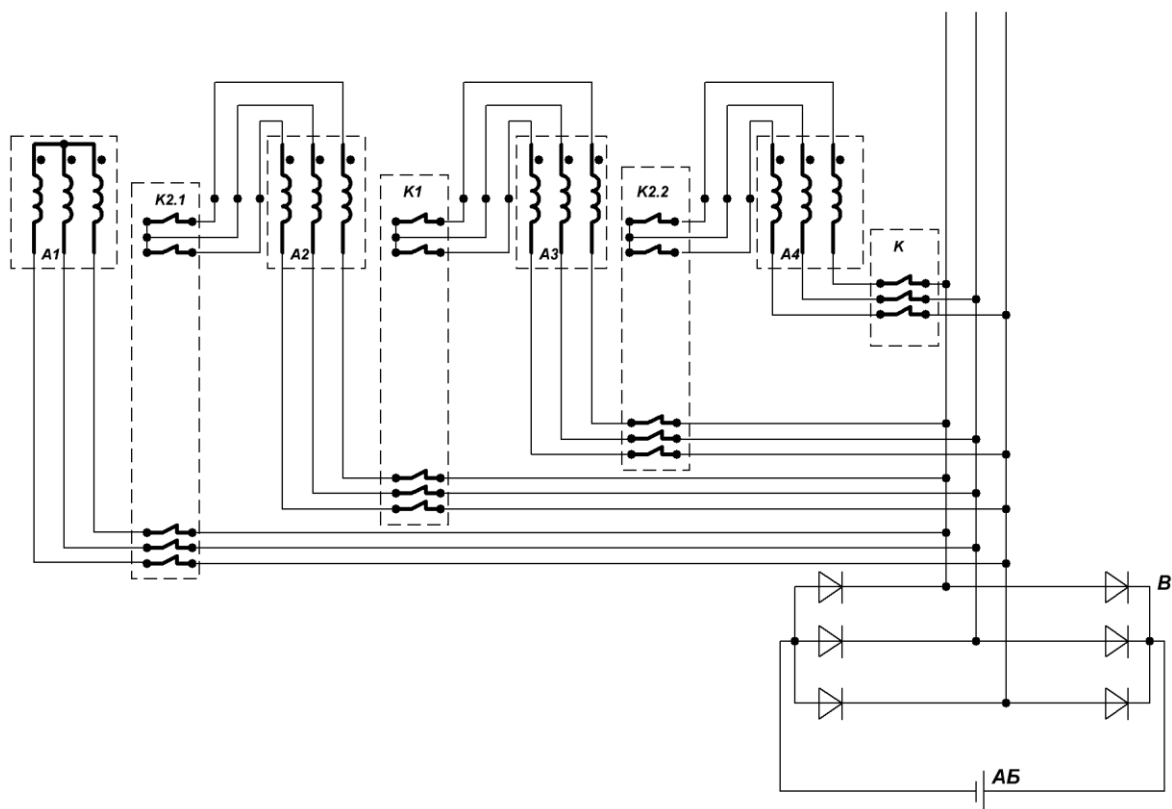


Рисунок 2.3 - Схема переключения обмоток якоря на параллельное при высокой частоте вращения и с применением схемы «звезда».

На рисунке 2.4 приведена схема переключения параллельных обмоток якоря на последовательно-параллельное, с контактами коммутирующих устройств, при снижении частоты вращения и с применением только две группы схемы звезда. В этом случае вступает в работу K2.1, K2.2., что проводить к отключению концов ПВ якорных обмоток A1 и A3 от выпрямителя В и к их соединению к началам последующих ПВ якорных обмоток A2 и A4 соответственно, с одновременной разборкой схемы «звезда» последующих ПВ якорных обмоток A2 и A4 (Рисунок 2.4). Таким образом параллельные ветвь A1 последовательно пофазно соединяется с ПВ якорных обмоток A2, а A3 аналогично соединяется с A4.

В итоге создаются две группы ПВ, каждая из которых соединена схемой «звезда» и состоит из двух последовательно включённых ПВ якорных обмоток A1 с A2 и A3 с A4, которые подключены к выпрямителю В, что приводит к суммированию напряжение последовательно соединенных ПВ и поддержанию напряжения при частоте вращения ниже расчетной, без использования дополнительных вентильных блоков.

На рисунке 2.5 показана схема переключения параллельных обмоток якоря на последовательное, с контактами коммутирующих устройств, при значительном снижении частоты вращения.

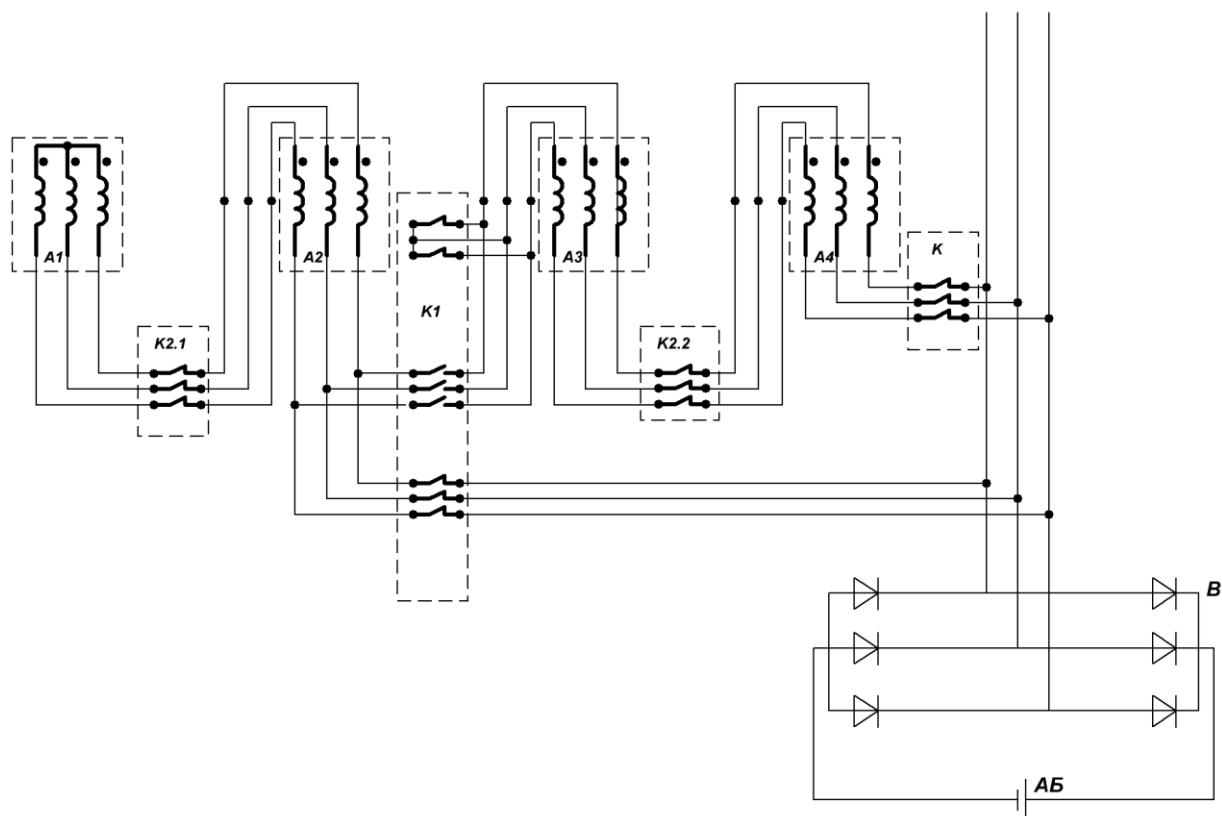


Рисунок 2.4 - Схема переключения обмоток якоря на последовательно-параллельное соединение при начальном снижении частоты вращения

При значительном снижении частоты вращения, в работу вступает коммутирующие устройства К1, что проводит к отключению концов ПВ якорной обмотки А2 от выпрямителя В и к их соединению к началам последующих параллельных ветвей якорной обмотки А3 с одновременной разборкой схемы «звезда» ПВ якорной обмотки А3 (Рисунок 2.5). Таким образом все параллельные ветви последовательно пофазно соединяется с выпрямителем В.

В итоге создаются одна группа, которая соединена схемой «звезда» и состоит из четырех последовательно включенных ПВ якорных обмоток А1, А2, А3, А4, которая подключена к выпрямителю В, что приводит к суммированию напряжение последовательно соединенных ПВ и поддержанию напряжения при частоте вращения значительно ниже расчетной. Такой случай может иметь место при слабых ветровых потоках.

Техническим результатом ВГШД является – надежность, простота конструкции, возможность регулировать постоянного напряжение ВГШД на стороне переменного тока до выпрямителя, возможность работы с переменной нагрузкой, возможность обеспечивать заданную величину напряжения при вращении разными источниками механической энергии с различной или переменной частотой вращения, повышение КПД [37, 52].

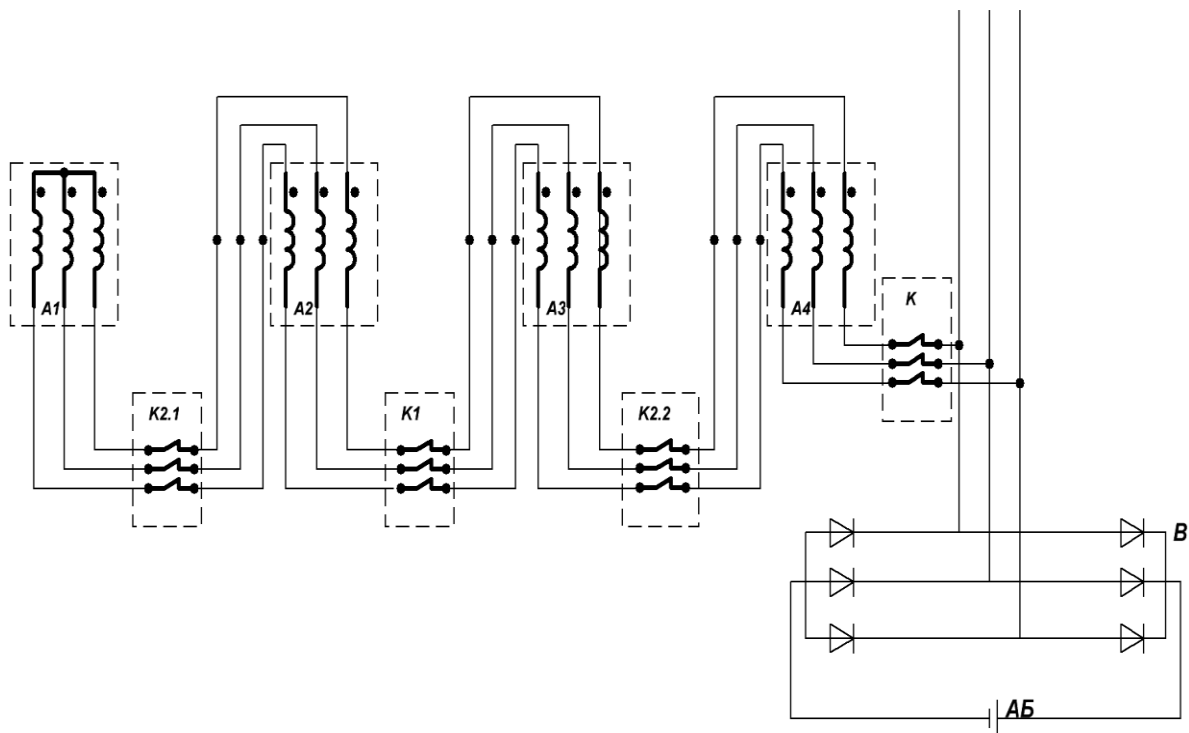


Рисунок 2.5 - Схема переключения обмоток якоря на последовательное соединение при дальнейшем снижении частоты вращения.

2.4 Упрощенная схема соединения якорной обмотки ВГШД

Схемы переключения ПВ якорной обмотки ВГШД при различных скоростях ветрового потока, приведенные на рисунках 2.1-2.5 содержат множество контактов и коммутирующих устройств, что усложняет управление ПВ и снижает надежность работы вентильного генератора.

В данной работе разработана упрощенная схема соединения ПВ якорной обмотки ВГШД [57, 67], которая приведена на рисунке 2.6.

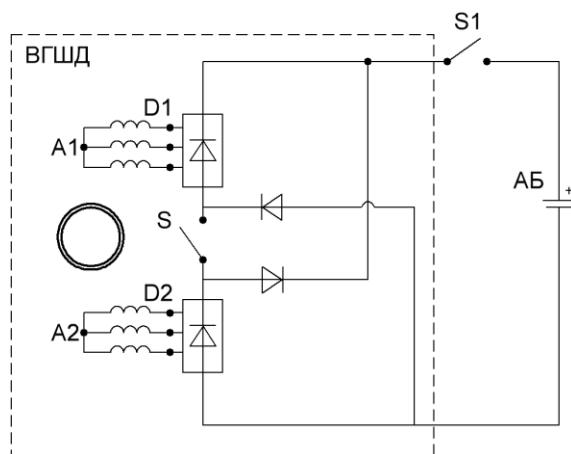


Рисунок 2.6 – Упрощенная схема соединения якорной обмотки ВГШД

На рисунке 2.6 ВГШД собран на основе трехфазного синхронного генератора с электромагнитным индуктором типа Г-286В со следующими основными техническими характеристиками:

- номинальная мощность 1,1 кВт;
- номинальное напряжение 24 В;
- номинальный ток 50 А;

Обмотка якоря ВГШД была перемотана на 2 трехфазные параллельные группы ветвей (А1 и А2), начала которых соединены вместе с образованием схемы соединения - «звезда». Трехфазный переменный ток преобразуется в диодных мостах (D1 и D2) в постоянный ток. С помощью переключателя S (вручную или автоматически), в зависимости от частоты вращения ВГШД, диодные мосты могут соединяться последовательно (при пониженной частоте вращения) или работать параллельно (при нормальной или повышенной частоте вращения).

Схема намотки проводов в пазы якоря ВГШД приведена на рисунке 2.7. Сердечник статора состоит из $Z=18$ пазов, ротор состоит из 12 когтеобразных полюсов.

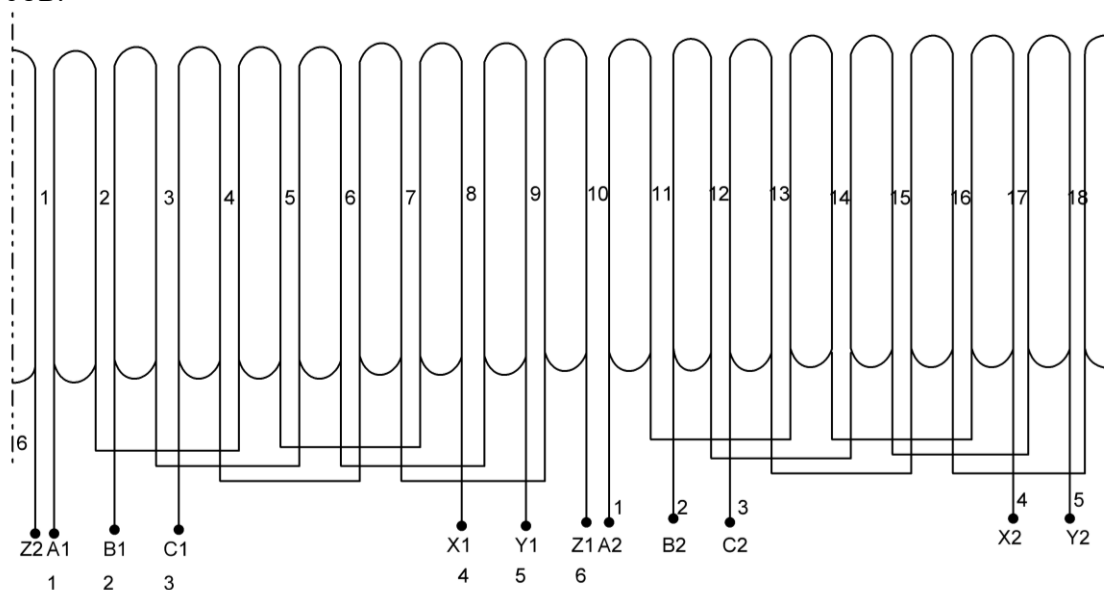


Рисунок 2.7 - Схема намотки якорной обмотки ВГШД.

Обмотку выполняли двухслойной. В одной катушке 75 витков, а в фазе 225 витков. Фазовые обмотки были соединены по схеме «звезда».

2.5 Методика расчета параметров якорной обмотки ВГШД

Исходные данные ВГШД:

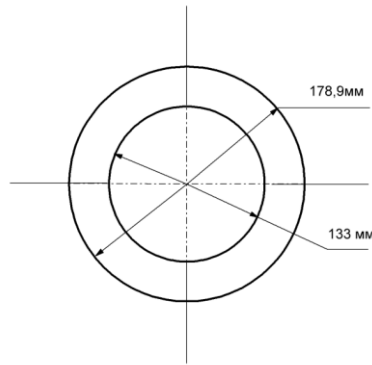
Генератор Г286В;

Номинальное напряжение 24В;

Номинальный ток 50 А;

Расчетная частота вращения n_p -1200об/мин;

Размеры статоры



2р	Uн, В	Z	Паз статора		
				h, мм	
12	24	18		16,75	

Зубцовое деление

$$t_1^I = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 133}{18} = 23,15 \text{ мм}$$

Ширина зубца 13,3 мм

$$t_1^{II} = t_1^{II} = \frac{\pi D^{II}}{Z} = \frac{\pi \cdot 166,5}{18} = 29 \text{ мм}$$

где $D^{II} = 133 + 2 \cdot 16,75 = 166,5 \text{ мм}$
ширина паза

$$e^I = t_1^I - e_Z = 23,15 - 13,3 = 9,75$$

$$e^{II} = t_1^{II} - e_Z = 29 - 13,3 = 15,7$$

Помосное деление

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_p}{2_p} = \frac{\pi \cdot 133}{12} = 34,82 \text{ мм}$$

$\alpha_\delta \approx 0,7$ принимаем

Тогда средняя ширина помосного когтя

$$e_{\text{кр}} = t_p \cdot 0,7 \approx 24,4$$

B_δ принимаем 0,2 Тл

Тогда $\Phi_{\delta} = 0,2 \cdot 0,7 \cdot 34,82 \cdot 10^{-3} \cdot 52 \cdot 10^{-3} = 0,253 \cdot 10^{-3}, B_{\delta}$

Количество витков в фазе параллельной ветви

$$W = \frac{E_{\phi 0}}{4,44 \cdot \Phi \cdot k_0 \cdot f} = \frac{22,2}{4,44 \cdot 0,253 \cdot 10^{-3} \cdot 0,866 \cdot 120} = 190 \text{ витков}$$

где E_{ϕ} -напряжение фазе

Требуемые выпрямленные напряжения х.х. $U_{d0} = 26 B$

напряжение под нагрузкой $U_{dn} = 24 B$

падение напряжения в фазах при параллельной включении 4 диода-последовательно $\Delta U_{\text{диод}} = 4 \cdot 0,8 B = 3,2 B$

$$U_{d.paa.x.x.} = U_{d0} + \Delta U_{\text{диод}} = 26 + 3,2 = 29,2 B \approx 30 B$$

$$E_{\phi} = \frac{U_{d.paa.x.x.}}{1,35} = \frac{30}{1,35} = 22,2 B$$

здесь 1,35 коэффициент схемы (соединение обмоток Δ)

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{6 \cdot 1200}{60} = 120 \text{ Гц}$$

$k_0 = 0,866$ при $q = 0,5$ (18 пазов и 12 полюсов)

Уточняем обмотку

Число катушек на фазу $N_{\text{катушка}}$ на фазу, обмотка двухслойная

$$N_{\phi} = \frac{Z \cdot 2}{m \cdot a} = 3 \text{ катушки}$$

Число витков фазе

$$W_{\text{фазусек}} = \frac{W}{3} \approx 63,3 \text{ выбираем } 75$$

Тогда $W = W_{\text{сек}} \cdot 3 = 75 \cdot 3 = 225$ число витков в фазе

В пару витков $W_{\text{II}} = 75 \cdot 2 = 150$ эл.провод в пазу

Уточняем поток

$$\Phi = \frac{E_{\phi 0}}{4,44 \cdot W \cdot k_0 \cdot f} = \frac{22,2}{4,44 \cdot 225 \cdot 0,866 \cdot 120} = 2,138 \cdot 10^{-3}$$

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}} = \frac{2,138 \cdot 10^{-3}}{6,7 \cdot 34,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,052} = 0,169 \text{ Тл}$$

Выбор проводов

Ширина паза в свечу

$$b_{ncв}^{II} = 15,7 - \Delta_{уз} \cdot 2 = 15,7 - 0,4 = 15,3$$

$$b_{ncв}^I = 9,85 - \Delta_{уз} \cdot 2 = 9,85 - 0,4 = 9,45$$

$$h_{св}^I = 16,75 - 2,8 - \Delta_{уз} \cdot 4 = 13,15 = 162,73 \text{ мм}^2$$

$$S_{св} = \frac{(15,3 + 9,45)}{2} \cdot 13,15$$

$$S_{II} = \frac{(15,3 + 9,85)}{2} \cdot 13,95$$

$$S_{пров} = \frac{S_{св} \cdot k_3}{W_{наз}} = \frac{162,73 \cdot 0,6}{150} = 0,65$$

$$d_{провиз} = \sqrt{\frac{S_{np} \cdot 4}{\tau}} \approx 0,91 \text{ выбираем ПЭТ } d_{II} = 0,8$$

$$d_{уз} = 0,864$$

$$S_{уз} = \frac{\pi \cdot d_{уз}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,864^2}{4} = 0,586 \text{ мм}^2$$

$$S_{\Gamma} = \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} = 0,503 \text{ мм}^2$$

$$k_3 = \frac{0,503 \cdot 150}{178,21} = \frac{75,4}{178,21} = 0,42$$

$$k_{3_{узол}} = \frac{0,586 \cdot 150}{178,21} = 0,49$$

Расчет магнитной цепи при холостом ходе.

$U_{d0} = 26 В$; $\Delta U_{\text{диод}}$ - падение напряжения в пазах

$\Delta U = 0,8 В$ падение напряжения в одном диоде,

$n_{\text{диод}}$ - число последовательных диодов

Если все ветви параллельны, тогда последовательных диодов - 5.

$$\Delta U_{\text{диод}} = 4 \cdot 0,8 = 3,2 В$$

$$U_{\text{расч}} = U_{d0} + \Delta U_{\text{д}} = 26 + 3,2 \approx 30 В$$

Фазное напряжение

$$U_{\phi 0} = \frac{U_{\text{расч}}}{1,35} = 22,2 В$$

где 1,35-коэффициент схемы выпрямления для $\Delta = 1,35$;

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi = \frac{E_{\phi 0}}{4,44 \cdot W \cdot k_0 \cdot f} = \frac{22}{4,44 \cdot 225 \cdot 0,866 \cdot 120} = 0,214 \cdot 10^{-3}$$

Если:

$$\Phi = \tau \cdot \alpha_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad \text{где} \quad \tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 133}{12} = 34,8$$

Тогда

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}} = \frac{0,214 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 34,8 \cdot 10^{-3} \cdot 52 \cdot 10^{-3}} = 0,169 Тл$$

Коэффициент воздушного зазора

$$k_{\delta} = \frac{t_1 + k_{\delta}}{e_{z1} + k_{\delta}} = \frac{23,2 + 10 \cdot 0,6}{13,3 + 10 \cdot 0,6} = \frac{29,2}{19,3} = 1,51$$

МДС в воздушном зазоре

$$I_{\delta} = 1,6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,169 \cdot 0,6 \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 245$$

Индукция в зубцах

$$B_z = B_\delta \cdot \frac{t_1}{\sigma_z \cdot k_c} = 0,169 \frac{23,2}{13,3 \cdot 0,95} = 0,31 Tл$$

Индукция в ярме

$$B_{\text{я}} = \frac{\Phi}{2h_a \cdot l \cdot k_c} = \frac{\tau \cdot l_\delta \cdot k_\delta \cdot B_\delta}{2h_a \cdot l \cdot k_c} = \frac{0,214 \cdot 10^{-3}}{2h_a \cdot 0,052 \cdot 0,95} = \frac{0,214 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 0,35 Tл$$

Индукция в основании когте

$$B_\kappa = \frac{k_\tau \cdot \Phi}{\sigma_\kappa \cdot l_\kappa} = \frac{1,3 \cdot 0,214 \cdot 10^{-3}}{18 \cdot 10^{-3} \cdot 28 \cdot 10^{-3}} = 0,55 Tл$$

МДС в зубцах ярма не учитываем т.к. малы индукции $k_\tau \approx 1,3$
Индукция мала поэтому МДС воздушного зазора

$$F_\delta \approx 1,05 \cdot F_\delta$$

$$F_u = 1,05 \cdot 245 = 257,3 A$$

Ток возбуждения холостого хода.

$$I_{\text{воз}} = \frac{F_u}{W_\delta} = \frac{257,3}{550} = 0,468 \approx 0,47 A$$

по паспорту $W_\delta = 550$ витков.

Номинальное напряжение (мосты в параллель) $U_n = 25 B$

Ток номинальный $I_{\text{ном}} = \frac{600}{25} = 24 A$

Где $P_n = 600 Bm$ один генератор $\frac{600}{2} = 300 Bm$

Ток одного моста

$$I_{Im} = \frac{24}{4} = 6 A \text{ с двух мостов до } 12 A$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = I_m^I \cdot 0,81 \cdot \frac{1}{1,73} = 5,6 \approx 6 A$$

Если $\Delta U_{\text{диод}} = 4 \cdot 0,8 = 3,2 B$

$$U_{\phi n} = \frac{U_n + \Delta U_{\text{диод}}}{1,35} = \frac{25 + 3,2}{1,35} = 20,9 \approx 21 B \quad (\text{переменное фазное})$$

Потери мощности в диодах

$$\Delta P_{\partial} = 4 \cdot \Delta U_{\text{диод}} \cdot I_m = 4 \cdot 3,2 \cdot 6 = 76,8 \approx 77 Bm$$

На один генератор

$$\Delta P_{\partial}^I = \frac{\Delta P_{\partial}}{2} = 38,5 Bm$$

Номинальный ток генератора

$$I_{\phi} = \frac{P_{\Gamma}^I + \Delta P_{\partial}^I}{3U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{300 + 38,5}{3 \cdot 21 \cdot 0,95} = 5,65 A$$

Ток параллельной ветви

$$I_{\phi \Pi} = \frac{I_{\phi}}{2} = 2,82 A$$

Плотность тока

$$\Delta I = \frac{2,82}{0,584} = \frac{I_{\phi \Pi}}{S_{np}} = 4,8 \approx 5 A$$

Расчет активного сопротивления обмоток

$l_{\text{л}}$ -длина лобовых частей (можно произвести расчет по методично в справочнику)

Длина активной части витка

Длина витка

$$l_{\text{с}} = \tau(l_{\text{л}} + l) = 2 \cdot (36 + 52) = 176 \text{ мм}$$

Длина провода фазы

$$L_{cp} = 2 \cdot (l_{\text{л}} + l) \cdot W = 2 \cdot (36 + 52) \cdot 225 = 39,6 \text{ м}$$

Сопротивление при 20°C

$$\tau_{I(20)} = \frac{1}{57} \cdot \frac{L_{cp}}{S_{\text{пров}} \cdot a} = \frac{1}{57} \cdot \frac{39,6}{0,584 \cdot 2} \approx 0,612 \text{ Ом} \quad (\text{сопротивление}$$

параллельной ветви 1,2 Ом)

при $t = 100^\circ\text{C}$

$$\tau_{I(100)} = k_2 \cdot \tau_{I(20)} = 1,32 \cdot 0,612 \approx 0,81$$

$$\text{где } k_2 = [1 + \alpha(100 - 20)] = 1 + 0,004 \cdot 80 = 1,32$$

Расчет индуктивного сопротивления

1. Магнитная проводимость пазового рассеяния

$$\lambda_{\Pi} = \frac{h_I}{3e_{\Pi}} \cdot k_{\beta} + \frac{h_2}{e_{\Pi}^I} \cdot k_{\beta}^I$$

$$k_{\beta} = 0,866 ; \quad k_{\beta}^I = 0,25(1 + 3_{\beta}) = 0,25 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{2}{3}\right) = 0,75$$

$$e_{\Pi}^I = 9,9 \quad e_{\Pi}^{II} = 15,7$$

$$\lambda_{\Pi} = \frac{13,95}{3 \cdot 9,9} \cdot 0,866 + \frac{2,8}{9,9} \cdot 0,75 \approx 0,68$$

2. Магнитная проводимость лобового рассеяния

$$\lambda_{\text{л}} = 0,34 \cdot \frac{q}{l} (l_{\text{л}} - 0,64\beta\tau) = 0,34 \frac{0,5}{52} \left(36 - 0,64 \frac{2}{3} \cdot 34,8\right) = 0,069 \approx 0,1$$

$$\text{где } q = \frac{Z}{2\pi m} = \frac{18}{12 \cdot 3} = 0,5$$

3. Магнитная проводимость дифференциального рассеяния

$$x_{\delta} = 0,03 \frac{\tau \cdot \alpha_{\delta}}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot q} = 0,03 \cdot \frac{34,8 \cdot 0,7}{0,6 \cdot 1,51 \cdot 0,5} = 1,6$$

Магнитная проводимость полей рассеяния обмотки статора

$$\sum \lambda = \lambda_{\sigma} + \lambda_{II} + \lambda_{\delta} = 0,68 + 0,1 + 1,61 \approx 2,4$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора

$$x_{\delta} = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{W}{100} \right)^2 \frac{l}{pq} \sum \lambda = 15,8 \frac{120}{100} \cdot \left(\frac{225}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,052}{6 \cdot 0,5} \cdot 2,4 = 3,94$$

Активное сопротивление в относительных единицах

$$\tau_{(20)}^* = \frac{\tau_{(20)}}{a} \cdot \frac{I_{\phi n}}{U_{нф}} = \frac{0,81}{2} \cdot \frac{5,65}{22,2} \approx 0,2$$

$$x_{\delta}^* = \frac{x_{\delta} \cdot I_{нф}}{U_{нф}} = 3,94 \cdot \frac{5,65}{22,2} = 1,06$$

Линейная нагрузка

$$A = \frac{n_{эф}}{t_1} \cdot \frac{I_{\phi}}{a} = \frac{150 \cdot 5,6}{2,32 \cdot 2} = 181 \text{ A / мм}^2$$

МДС реакция ротора

$$F_{au} = 0,9 \cdot m \frac{W_1 \cdot k_0}{p} \cdot I_{\phi} = 0,9 \cdot 3 \cdot \frac{225 \cdot 0,866}{16} \cdot 5,6 = 491 \text{ A}$$

$$x_{ad}^* = \frac{k_{ad} \cdot F_{au}}{F_{узо}} = \frac{0,82 \cdot 491}{265} = 1,51$$

$$x_{aq}^* = \frac{k_{aq} \cdot F_{au}}{F_{узо}} \cdot \frac{1 + k_{\delta}}{2} = \frac{0,5 \cdot 491}{265} \cdot \frac{1 + 1,51}{2} = 1,15$$

$$x_d^* = x_{ad} + x_{\delta}^* = 1,5 + 1,06 \approx 2,56$$

$$Z_a^* = 0,2$$

$$Z^* = \sqrt{2,56^2 + 0,2^2} \approx 2,6$$

$$I_k^* = \frac{1}{Z^*} = 0,38$$

$$I_{kd} = I_{dn} \cdot I_k^* = 12 \cdot 0,38 = 4,56$$

$$F_{au}^* = \frac{F_{au}}{F_{u3}} = \frac{491}{265} = 1,85$$

$$F_{ad}^* = \mu_d \cdot k_{ad} \cdot F_{au}^* \cdot \sin \varphi = 1 \cdot 0,82 \cdot 1,85 \cdot 0,95 = 1,44$$

$$\frac{E_{\text{наз}}}{E_{\text{оxx}}} = 1,66 = k_E$$

$$F_{\text{en}}^* = F_{\text{eo}} \cdot 1,66 + F_{\text{eo}} \cdot 1,44 = 3,13 \cdot F_{\text{eo}}$$

$$F_{\text{en}} = 2,65 \cdot 3,13 = 821 \text{ A}$$

$$I_{\text{en}} = \frac{F_{\text{en}}}{W_{\text{e}}} = \frac{821}{550} = 1,49 \text{ A}$$

При $U_0 = 30 \text{ В}$ $I_{dn} = 5,5 \text{ A}$

Пересчет на 25В

$$I_{H(25)} = I_{H(30)} \cdot \frac{U_{25}}{U_{30}} = 5,5 \text{ A} \cdot \frac{25}{30} = 4,58 \text{ A}$$

Расчет 4,56 А опыт 4,58А

Магнитная индукция в воздушном зазоре по продольной оси

$$B_{\delta Hd} = B_{\delta 0} \cdot 1,66 = 0,169 \cdot 1,66 = 0,28 \text{ Тл}$$

Максимальное значение индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta \text{max}} = B_{\delta 0} \cdot 1,75 = 0,169 \cdot 1,75 = 0,29 \text{ Тл}$$

Потери и КПД

Потери в стали

Максимальная индукция в зубцах статора

$$B_{ZH} = B_{Z0} \cdot 1,75 = 0,31 \cdot 1,75 = 0,54 \text{ Тл}$$

Магнитная индукция в ярме

$$B_{ZH} = B_{Z0} \cdot 1,75 = 0,35 \cdot 1,75 = 0,61 \text{ Тл}$$

Вес зубцов статора

$$m_Z = Z \cdot h_Z \cdot \epsilon_{Zcc} \cdot l \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 16,75 \cdot 10^{-3} \cdot 13,3 \cdot 10^{-3} \cdot 52 \cdot 10^{-3} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 1,63 \text{ кг}$$

где

$$\epsilon_{Zcc} = \frac{(15,7 + 9,9)}{2} = \frac{26,6}{2} = 13,3$$

Вес ярма

$$m_a = \pi D^I \cdot l \cdot h_a \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = \pi \cdot 172,7 \cdot 10^{-3} \cdot 52 \cdot 10^{-3} \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 1,36 \text{ кг}$$

где $D^I = D - h_a = 178,9 - 6,2 = 172,7 \text{ мм}$

Потери зубцах

$$P_Z = k_z \cdot P_{y0} \cdot B_Z^2 \cdot m_a = 1,8 \cdot 2,6 \cdot 0,54^2 \cdot 1,36 = 1,85 \text{ Вт}$$

Потери в ярме

$$P_a = k_a \cdot P_{y0} \cdot B_a^2 \cdot m_a = 1,8 \cdot 2,6 \cdot 0,61^2 \cdot 1,36 = 2,36 \text{ Вт}$$

Суммарные потери в стали

$$P_c = P_Z + P_a = 1,85 + 2,36 = 4,2 \text{ Вт}$$

Поверхностные потери стали

$$P_{cnos} \approx 50 \text{ Вт}$$

Потери в обмотках якоря

$$P_{\text{я}} = 3 \cdot I_{\phi}^2 \cdot \tau_{1(20)} = 3 \cdot 5,62^2 \cdot 0,61 = 57 \text{ Bm}$$

Потери механические

$$P_{\text{мех}} \approx 30 \text{ Bm}$$

Потери в обмотке возбуждения

$$I_{\text{в}} = 1,5 \text{ A} \quad P_{\text{в}} = 1,5^2 \cdot 3,7 = 8 \text{ Bm}$$

Итого потерь

$$\Delta P = P_{\text{снпо}} + P_{\text{я}} + P_{\text{в}} + P_{\text{мех}} = 50 + 57 + 8 + 30 = 145 \text{ Bm}$$

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{300}{300 + 145} = 0,67$$

Выводы по разделу

На основе анализа литературных источников и патентного поиска обоснована концепция функционирования ВГЩД и разработана схема перемотки его якорной обмотки с созданием групп параллельных ветвей.

В пилотном варианте ВГЩД предложен трехфазный синхронный генератор с электромагнитным индуктором, содержащий 4 группы параллельных ветвей, которые с помощью достаточно большого количества коммутирующих устройств могут соединяться параллельно, последовательно-параллельно или последовательно в зависимости от скорости вращения.

С целью уменьшения количества коммутирующих устройств разработана более упрощенная схема вариантов соединения групп параллельных ветвей на основе коммутации только диодных мостов. Это позволило не только сократить значительное количество контактных устройств, но применять для этих целей ограниченное число современных полупроводниковых контактных ключей.

Разработана методика расчета основных параметров ВГЩД, позволяющая рассчитать и применять эффективные способы перемотки якорной обмотки и для создания необходимых групп параллельных ветвей.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВГШД. МЕТОДИКА И РЕУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 Физическая модель ВГШД и испытательный стенд

В качестве экспериментального образца ВГШД использовался синхронный генератор (СГ) типа Г-286В от автобуса ЛАЗ-695 с основными техническими характеристиками:

- номинальное напряжение 24 В,
- номинальный ток 50 А,
- максимальный ток нагрузки 75А.

Обмотка якоря СГ была перемотана на 2 трехфазные параллельные группы (А1 и А2), начала которых соединены вместе с образованием схемы соединения - «звезда». На рисунке 3.1 приведен общий вид ВГШД и перемотанная обмотка якоря.



Рисунок 3.1 - Общий вид ВГШД (а) и перемотанной обмотки якоря (б)

Из рисунка 3.1 видно, что из статора выходят 6 концов 2-х трехфазных групп параллельных ветвей перемотанной обмотки якоря. Соединение начал этих групп в «звезду» находятся под изоляцией.

На рисунке 3.2 приведена принципиальная электрическая схема испытательного стенда ВГШД.

Ветряная турбина, приведенная на рисунке 3.2, представлена двигателем ПЗ2М смешанного возбуждения мощностью $P_{дн}=2,2$ кВт (М), с номинальной частотой вращения $n_n=1500$ об/мин.

Номинальный ток двигателя $I_{дн}=12,2$ А и номинальное напряжение $U_n=220$ В. В цепь якорной обмотки включено дополнительное сопротивление r_d . Дополнительное сопротивление снижает частоту вращения в два раза при номинальной нагрузке. Изменение напряжения якорной обмотки производится с помощью автотрансформатора АТ, подключенному к выпрямителю ВБ1. Таким образом моделируется работа ветряной турбины при изменении скорости ветра. Параллельная обмотка возбуждения ОВ1 питается через свой выпрямитель ВБ2.



Рисунок 3.3 – Общий вид испытательного стенда: ВГШД (1), приводной двигатель М (2), тахогенератор (3), реостат регулирования скорости вращения (4), автотрансформатор (5), активная нагрузка (6), измерительные приборы (7)

Вертикальное положение приводного двигателя М (сверху) и ВГШД (снизу) имитирует их реальное расположение на МВЭС вертикально-роторного типа. Питание двигателя М и системы возбуждения ВГШД осуществляется от электрической сети лаборатории.

Замеры параметров производились следующими измерительными приборами: портативный цифровой мультиметр UT181A с функцией true RMS, цифровые мультиметры UT33B+, цифровой тахометр UT371 UNI-T и осциллограф-мультиметр цифровой UTD1025 UNI-T. Нагрузка (6) изменялась переключением резисторов ключами К2, К3 и К4. Магазин резисторов состоит из сопротивлений 129 Ом, три сопротивления 96 Ом и одного сопротивления в 53 Ома.

3.2 Методика проведения экспериментов

Цель эксперимента: Изучить принцип работы ВГШД и определить его характеристики и эффективность преобразования механической энергии в электрическую.

Описание эксперимента:

1. Подключение оборудования:

- ВГШД соединен в нижней части, вертикально расположенного приводного двигателя М, и имитирует их реальное расположение на МВЭС вертикально-роторного типа (рисунок 3.3). Питание двигателя М осуществляется от электрической сети лаборатории.

- Вольтметры и амперметры подключены согласно принципиальной электрической схема испытательного стенда (рисунок 3.2).

- Нагрузка в виде резисторов (рисунок 3.2) подключается, чтобы наблюдать за изменением выходного напряжения ВГШД при различных режимах работы.

2. Измерение характеристик:

- При включении ВГШД начальные значения напряжения и тока измеряются, когда М находится на минимальной скорости.

- Постепенно увеличивая скорость вращения М фиксируется изменения в напряжении и токе.

- Для измерения оборотов М (ВВТ) используется цифровой тахометр UT371 UNI-T.

3. Изменение нагрузки:

- Изменяя сопротивление нагрузки можно увидеть, как оно влияет на выходные параметры ВГШД.

- Необходимо отметить максимальное значение мощности и величину выходного напряжения при разных уровнях сопротивления нагрузок.

4. Сбор данных эксперимента:

- Необходимо зафиксировать все данные, включая скорость вращения, напряжение, ток, мощность и сопротивление нагрузки.

- Измерения повторяются при различных режимах работы ВГШД и при разных типах нагрузки.

Специфика данной работы заключается в исследовании стандартных синхронных генераторов с разницей в том, что якорная обмотка ВГШД перемотана на группы параллельных ветвей по разработанной методике (Приложение В). При этом магнитная составляющая статора и ротора остаются неизменными.

Поэтому для анализа технических параметров ВГШД, основанного на стандартном синхронном генераторе, достаточно изучить и проанализировать следующие характеристики [34,50]:

- характеристику холостого хода;
- внешнюю характеристику;
- регулировочную характеристику.

Особенность исследования заключается в проверке совместимости работы ВГШД и ВВТ в лабораторных условиях. В качестве ВВТ использовался вертикально расположенный двигатель постоянного тока М. Совместное, близкое к реальному, расположение приводного двигателя М и ВГШД приведено на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Совместная работа ВВТ и ВГШД в лабораторных условиях

Вращение ВВТ и, соответственно, ВГШД осуществлялось с помощью автотрансформатора (АТ) марки РНО-250-5 с контролем величин тока амперметром и напряжения.

Частота вращения фиксировалась цифровым тахометром UT371 UNI-T приведенном на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 - Цифровой тахометр UT371 UNI-T

Основные характеристики тахометра UT371 UNI-T, который внесён в реестр Системы Измерения Республики Казахстан, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные характеристики тахометра UT371 UNI-T

Характеристики	Диапазон	Погрешность (Точность % + единиц младшего разряда)
Диапазон оборотов в минуту	10-99.999 об/мин. Разрешающая способность: 0.001 об/мин	$\pm(0.03\%)$
	100-999.99 об/мин. Разрешающая способность: 0.01 об/мин	$\pm(0.04\%+2)$
	1000-9999.9 об/мин. Разрешающая способность: 0.1 об/мин	$\pm(0.04\%+2)$
	10000-99999 об/мин. Разрешающая способность: 1 об/мин	$\pm(0.04\%+2)$

Выходное напряжение при различных режимах работы ВГШД контролировалось цифровым мультиметром UT181A с функцией true RMS, приведенным на рисунке 3.6.



Рисунок 3.5 – Цифровой мультиметр UT181A с функцией true RMS

Цифровой мультиметр UT181A предназначен для измерения постоянного и переменного тока, постоянного и переменного напряжения, а также сопротивления, ёмкости, частоты, температуры, проводимости, коэффициента заполнения (1/скважность), длительности импульса. Мультиметр оснащён функциями автоматического или ручного режима выбора диапазона измерений, измерения True RMS, тестирования диодов и проверки целостности цепи со звуковой индикацией. Для записи и обработки получаемой информации можно установить ПО на своем компьютере.

Прибор прошёл государственные испытания с целью утверждения типа и внесён в реестр средств измерений, допущенных к применению и импорту в Республике Казахстан.

Основные технические характеристики мультиметра UT181A приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Технические характеристики мультиметра UT181A

Характеристики	Диапазон	Точность
Постоянное напряжение (В)	60мВ/600мВ/6В/60В/600В/1000В	$\pm(0,03\%+5)$
Переменное напряжение (В)	60мВ/600мВ/6В/60В/600В/1000В	$\pm(0,3\%+30)$
Постоянный ток (А)	600мкА/6000мкА/60мА/600мА/10А	$\pm(0,08\%+20)$
Переменный ток (А)	600мкА/6000мкА/60мА/600мА/10А	$\pm(0,6\%+40)$
Сопротивление (Ом)	600Ом/6КОм/60КОм/600КОм/ 6МОм/60МОм	$\pm(0,05\%+2)$ / $\pm(2\%+10)$
Проводимость (нС)	60нС	$\pm(2\%+10)$
Емкость (Ф)	6нФ/60нФ/600нФ/6мкФ/60мкФ/ 600мкФ/6мФ/60мФ	$\pm(3\%+10)$
Частота (Гц)	10 Гц~60 МГц	$\pm(0,01\%+5)$
Температура (°С)	-40°С~1000°С	$\pm(1\%+30)$

В ходе экспериментальных исследований изучались характер изменения выходного напряжения в зависимости от тока возбуждения и скорости вращения вала ВВТ.

При решении технических задач важным представляется изучение характера и закономерности изменения выходного напряжения при дискретном (переключение ветвей якорной обмотки) и плавном (током возбуждения ВГШД) регулировании. Для достижения этих целей вполне достаточно провести аппроксимацию экспериментальных кривых с использованием метода наименьших квадратов.

3.3 Исследование ВГШД на холостом ходу и анализ результатов

Традиционная характеристика холостого отражает зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при поддержании постоянной частоты вращения без подключения нагрузки генератора.

Кривая холостого хода синхронного генератора - это зависимость:

$$U_0 = f(I_B) \quad (3.1)$$

где:

U_0 - линейное (или фазное) напряжение статора при холостом ходе,

I_B - ток возбуждения генератора.

В нашем исследовании проводится анализ совместимости характеристик генератора с ветряной турбины при широком диапазоне изменения скорости ветра. Поэтому в исследовании мы используем традиционную характеристику холостого хода на частотах вращения 1200 и 600 об/мин и «специальную» характеристику холостого хода при переменной частоте вращения.

Специальная характеристика холостого хода отражает зависимость тока возбуждения от частоты вращения при поддержании постоянства напряжения. Эта характеристика дает возможность оценить диапазон изменения частоты вращения, в котором он поддерживает постоянство напряжения. На рисунке 4.1 приведена экспериментальная $U_d=f(I_{vg})$ и расчетная $U_{dras}=f(I_{vras})$ характеристика холостого хода на частоте вращения 1200 об/мин, выпрямительные модули подключены параллельно.

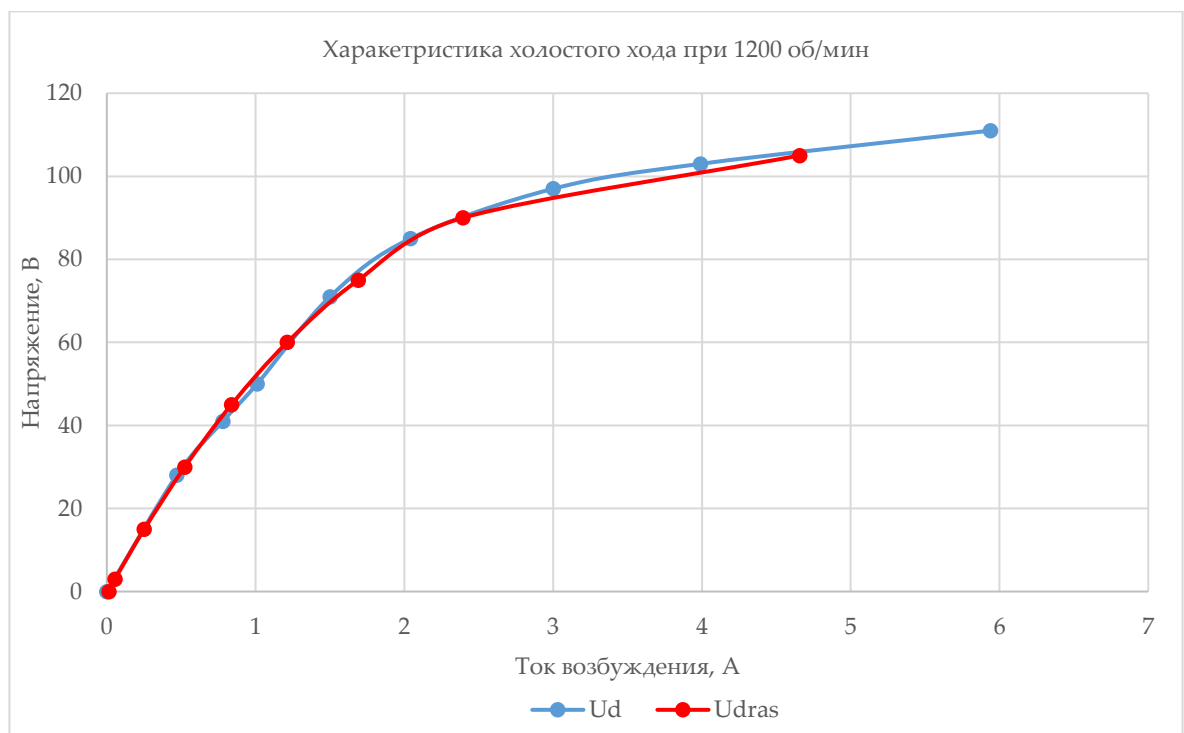


Рисунок 3.6 - Характеристика холостого хода ВГШД

Расчетная характеристика получена на математической модели ветряной турбины и генератора, написанной в среде Excel. Незначительные отклонения между экспериментальными и расчетными данными подтвердили адекватность математической модели. Результаты измерений в Таблице 3.3. Как видно из таблицы 3.3 результирующее напряжение на выводах генератора при параллельном подключении равно U_{dpar} , а при последовательном подключении равно сумме напряжений U_{dcon} . На рисунке 3.6 суммарное напряжение с последовательным и параллельным подключением выпрямительных модулей не показано. По результатам этого опыта следует, что схема с параллельно-последовательным переключением выпрямительных модулей работает.

Количество выпрямительных модулей подбирается в зависимости от требуемого диапазона изменения рабочей частоты вращения.

Таблица 3.3 - Характеристика холостого хода при частоте вращения 1200 об/мин

I_{vg}, A	U_{d1}, V	U_{d2}, V	U_{dpar}, V	U_{dcon}, V	I_{vras}, A	U_{dras}, V
0	0	0	0	0	0,0	0
0,47	28	28	28	56	0,1	3
0,78	41	41	41	82	0,3	15
1,01	50	50	50	100	0,5	30
1,50	71	71	71	144	0,8	45
2,04	85	85	85	170	1,2	60
3,00	97	97	97	194	1,7	75
3,99	103	103	103	203	2,4	90
5,91	111	111	111	222	4,7	105

При проведении экспериментальных исследований, предварительно, были сняты характеристики холостого хода (ХХ) экспериментального образца ВГШД, приведенного на рисунке 3.6. Экспериментальные данные ХХ при различной скорости вращения и тока возбуждения ВГШД приведены на рисунках 3.7-3.10.

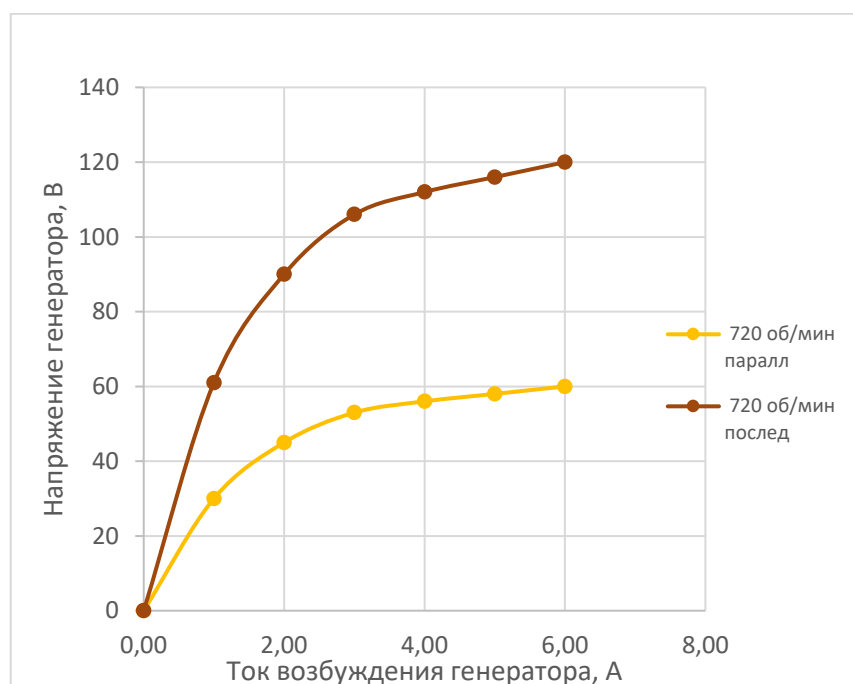


Рисунок 3.7- Характеристика холостого хода СГ

Начальные опыты проводились в режиме холостого хода СГ. На основе экспериментальных данных, на рисунке 3.7 приведена характеристика холостого хода при последовательном и параллельном переключении групп параллельных

ветвей при частоте вращения 720 об/мин. Ток возбуждения изменялся от 0 до 6 А.

Из рисунка 3.7 видно, что переключение групп ветвей дает возможность увеличить или уменьшить величину выходного напряжения ВГ. Так, переключение двух групп ветвей (А1 и А2) с параллельного соединения на последовательное увеличивает напряжения СГ примерно в два раза. И наоборот. Для наглядности графиков частота вращения СГ придерживалась постоянной, равной 720 об/мин.

На рисунке 3.8 приведены характеристики холостого хода при параллельном соединении групп параллельных ветвей якорной обмотки при частотах вращения 96, 235, 373 и 720 об/мин.

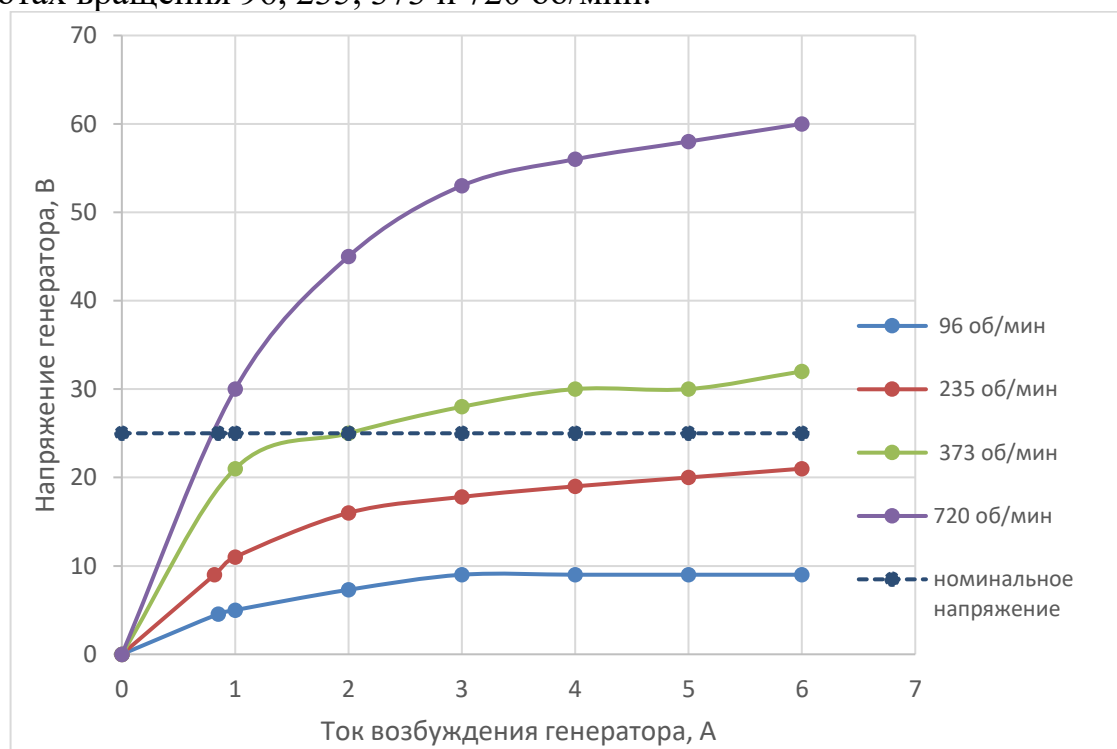


Рисунок 3.8 – Зависимость напряжения СГ от тока возбуждения при параллельном соединении групп параллельных ветвей якорной обмотки

Из рисунка 3.8 видно, что при параллельном включении групп параллельных ветвей поддержание номинального напряжения, при частоте вращения 235 об/мин и менее, невозможно. Поэтому на рисунке 3.9 приведены характеристики холостого хода при последовательном включении параллельных ветвей якорной обмотки. Скорости вращения придерживались аналогично предыдущему эксперименту (96, 235, 373 и 720 об/мин).

При последовательном включении параллельных ветвей якорной обмотки и аналогичных скоростях вращения (96, 235, 373 и 720 об/мин) для поддержания постоянства напряжения достаточно небольшого диапазона регулирования тока возбуждения в пределах 0,5-2 ампер.

Минимальная частота вращения, при которой поддерживается номинальное напряжение, составила 170 об/мин, а ток возбуждения - 3 А.

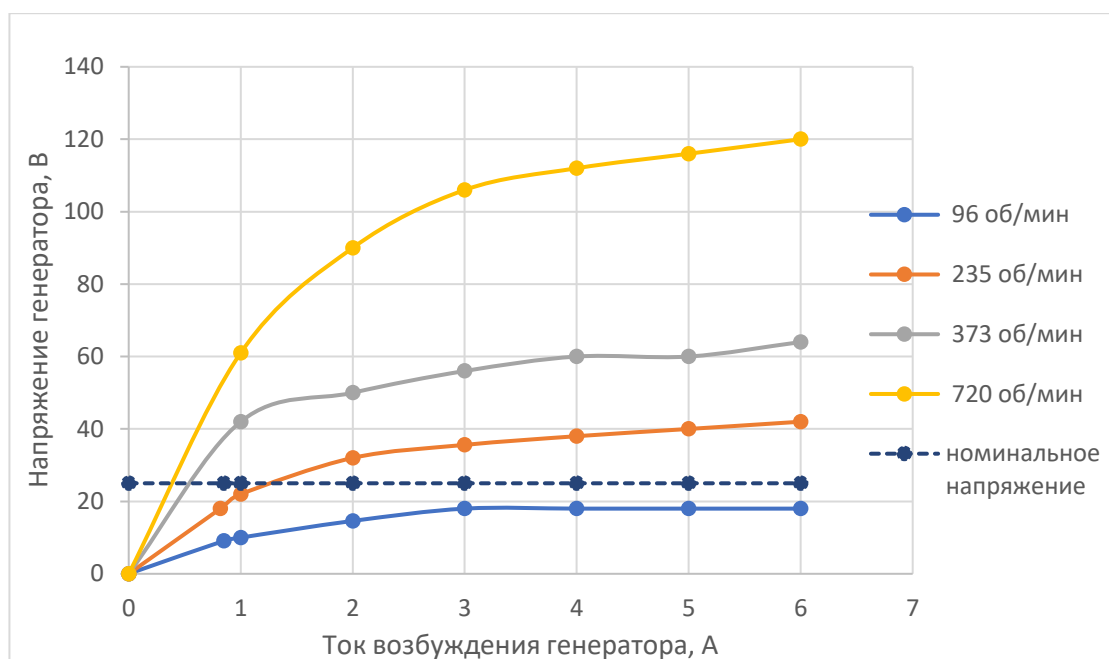


Рисунок 3.9 – Зависимость напряжения СГ от тока возбуждения при последовательном соединении групп параллельных ветвей якорной обмотки

Из рисунка 3.9 следует, что насыщение магнитной цепи достигает при токе возбуждения, равном примерно 2 ампера, то есть последовательное включение групп параллельных ветвей позволяет стабилизировать напряжение СГ в более широком диапазоне изменения частоты вращения.

Эксперименты по стабилизации напряжения проводились не только на основе переключения групп ветвей якорной обмотки на последовательное или параллельное соединения в зависимости от частоты вращения СГ, но и за счет изменения тока возбуждения, позволяющего дополнительно стабилизировать выходное напряжение на каждой ступени соединения групп параллельных ветвей.

На рисунке 3.10 изображены расчётные I_{vr1} , I_{vr2} и экспериментальные I_{vexp1} , I_{vexp2} «специальные» характеристики холостого хода при изменении угловой скорости вращения от 42 до 135 рад/сек, что соответствует оптимальным угловым скоростям вращения, выбранной ветряной турбины на скоростях ветра от 7,3 до 22 м/с. В опытах снимались значения в четырех точках, поэтому в таблице заполнены четыре ячейки в строке I_{vexp1} .

В модели не производился расчет для промежуточной скорости ветра 12,8 м/с, поэтому вместо расчетного значения тока в этой ячейке стоит прочерк. Согласно графику при снижении угловой скорости ниже 80 рад/сек наблюдается нелинейное увеличение тока возбуждения. Изменение угловой скорости в три раза привело к увеличению тока возбуждения в пять раз, что объясняется ростом насыщения магнитной цепи. Характеристика I_{vr2} соответствует характеристике холостого хода при последовательном включении выпрямительных модулей.

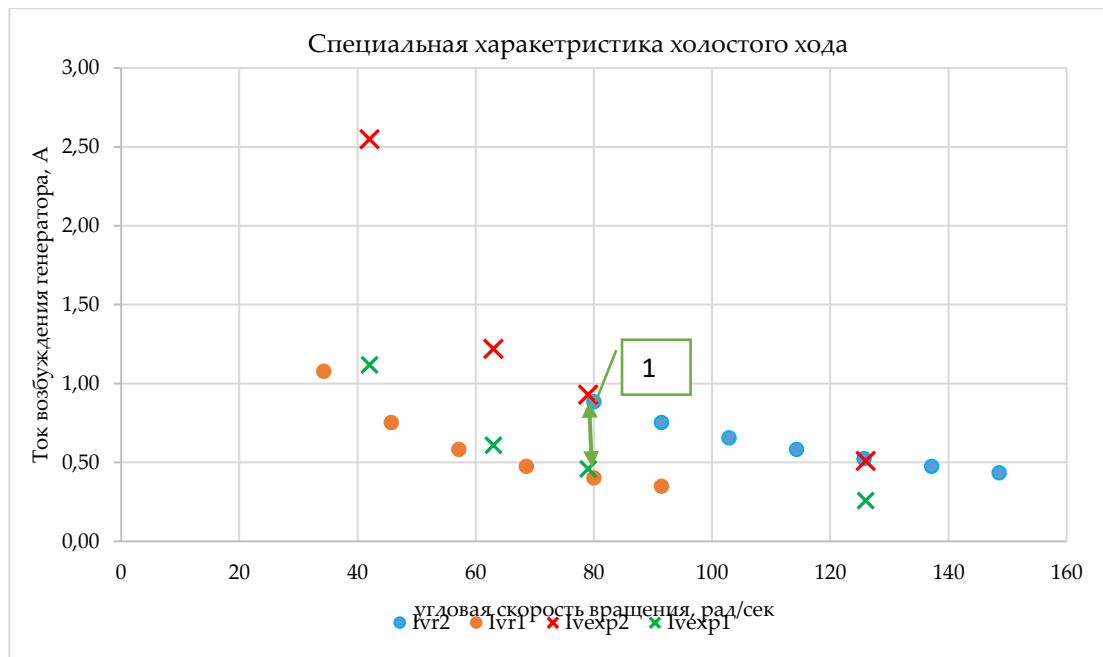


Рисунок 3.10 - Специальная характеристика холостого хода при изменении угловой скорости вращения

Последовательное подключение в точке 1 суммирует напряжение двух выпрямительных модулей, соответственно для поддержания номинального напряжения генератора достаточно на каждом выпрямительном модуле поддерживать меньшее в два раза напряжение, что снижает требуемый ток возбуждения.

Когда из-за высокого значения тока возбуждения насыщается магнитная цепь, достаточно переключить выпрямительные модули последовательно. Графики на рисунке 3.10 и таблицы 3.4 показывают удовлетворительную сходимость расчетных данных с экспериментальными.

Таблица 3.4 - Специальная характеристика холостого хода при изменении угловой скорости вращения

V_{wind} , m/sec	3,7	5,5	7,3	9,2	11	12,8	13,7	14,7	16,5	18,3	22
n_{opt} , rot/sec	200	300	400	500	600	700	750	800	900	1000	1200
ω_{opt} , rad/sec	21	31	42	52	63	73	79	84	94	105	126
U_g , V	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
I_{vexp1} , A	-	-	2,55	-	1,22	-	0,93	-	-	-	0,51
I_{vr1} , A	-	-	2,39	1,58	1,21	0,99	-	0,84	0,73	0,64	0,52
I_{vexp2} , A	-	-	1,12	-	0,61	-	0,46	-	-	-	0,26
I_{vr2} , A	2,4	1,21	0,84	0,64	0,52	0,44	-	0,38	0,34	0,3	0,25

Экспериментальные точки XX дают разбросанные значения $U_0(I_B)$. Поэтому для решения электротехнических задач целесообразно получить плавную аппроксимирующую кривую, отражающую физический смысл:

- линейный рост при малых I_B ;
- насыщение при больших I_B .

Для упрощения анализа экспериментальных данных часто используют аппроксимацию, который представляет собой математический метод замены сложных или неизвестных зависимостей более простыми моделями, которые достаточно точно отражают исходные данные. Используется, чтобы выявить общую тенденцию или построить прогнозную модель.

Наиболее распространенными методами аппроксимации являются: линейная, полиномиальная, экспоненциальная и логарифмическая. В основе аппроксимации, как правило, заложен метод наименьших квадратов, минимизирующий отклонение между реальными и расчётными значениями.

В данной работе аппроксимация кривой холостого хода выполнена графическим методом, программой MatLab, с учётом физического характера намагничивания магнитной системы ВГШД.

В Приложении В (на рисунках 1В– 3В) приведены графики аппроксимации экспериментальных данных (при частоте вращения 600 об/мин) линейным, логарифмическим и полиномиальными функциями, соответственно.

Результаты аппроксимации приведены в таблице 3.5. Качество аппроксимации оценивалось по коэффициенту детерминации R^2 . Считается, что чем выше этот коэффициент, тем он лучше аппроксимирует показатели эксперимента.

Таблица 3.5 – Сводная таблица аппроксимации при частоте вращения 600 об/мин

I_{vg}, A	U_d	Линейная функция	Погрешность	Логарифмическая функция	Погрешность	Полиномиальная функция	Погрешность
0,1	0,1	14,43216	0,99773	4,98	0,22307	0,105121	0,05121
0,47	14	17,61475	0,82622	17,27	0,20521	13,14856	-0,06082
0,78	20	20,28125	0,62385	24,56	0,01387	20,25361	0,01268
1,01	24	22,25962	0,64502	28,27	-0,07819	24,88377	0,03682
1,5	34	26,4744	0,83272	33,96	-0,018426	33,08664	-0,02686
2,04	40	31,11926	0,91164	38,38	-0,28538	39,81659	-0,00459
3	46	39,3768	0,85486	43,93	-0,16820	47,0651	0,02315
3,99	51	47,89238	0,93668	48,03	-0,06489	50,33924	-0,01296

По полученным экспериментальным данным, приведенным в таблице 4.3, можно сделать следующий вывод:

1) Линейная функция: $U = 8.6016 I_B + 13.572$. Средняя погрешность составила примерно 0,853, что плохо аппроксимирует данные эксперимента из-за магнитного насыщения генератора.

2) Логарифмическая функция: $U = 14.349 \ln(I_B) + 28.13$ Средняя погрешность составила примерно 0,041, что при малых токах даёт физически странное поведение (при $I_B < 1$ логарифм резко уходит вниз).

3) Полином 3-й степени: $U = 0.4413 I_B^3 - 6.161 I_B^2 + 30.093 I_B +$

0,32, средняя погрешность составила примерно 0,0023 и лучше всего совпадает с экспериментом в заданном диапазоне изменения тока возбуждения.

Коэффициенты детерминации составили:

- Полином 3-й степени: $R^2 \approx 0.9985$
- Логарифмическая: $R^2 \approx 0.9656$
- Линейная: $R^2 \approx 0.813$

Таким образом, полином 3-й степени оказался лучшим для аппроксимации экспериментальных данных в заданном диапазоне.

На рисунке 3.11, для сравнения приведены кривые холостого хода ВГШД до перемотки якорной обмотки и после. В последнем случае, параллельные ветви, полученные после перемотки якорной обмотки ВГШД, соединены параллельно.

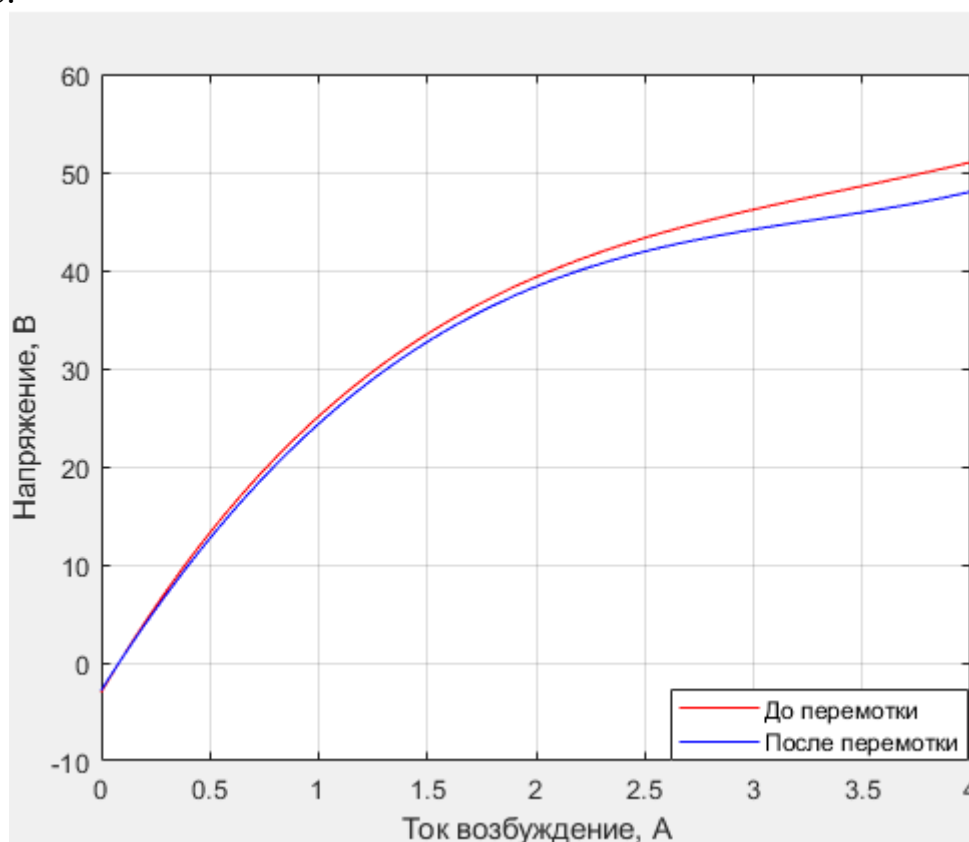


Рисунок 3.11 – Сравнение кривых холостого хода ВГШД до перемотки (красная кривая) и после перемотки (синяя кривая) при частоте вращения 600 об/мин

Из рисунка 3.11 видно, что до значения тока возбуждения $I_v = 1$ А, кривые практически совпадают и значения напряжения и тока возбуждения ВГШД изменяются по линейной зависимости. В дальнейшем эти кривые незначительно расходятся из-за разницы магнитного насыщения якорных обмоток. Естественно, заводское исполнение перемотки и ручная (экспериментальная) перемотка якорной обмотки ВГШД вносит некоторые изменения в магнитное насыщение.

Учитывая, что рабочие диапазоны кривых холостого хода находятся в зоне номинального напряжения генератора, практически совпадают между собой и характеризуются линейной зависимостью, можно принять, что отклонения в зоне насыщения не оказывают существенного влияния на эффективность работы ВГШД.

Следует отметить, что полином нельзя бездумно экстраполировать за пределы измерений - вне диапазона он может дать неадекватные значения или перегибы. В этом можно убедиться на рисунке 3.11.

Аналогично проведенным выше исследованиям, на рисунках 4В-6В (Приложение В) и сводной таблице 3.6 приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных при частоте вращения 1200 об/мин.

Таблица 3.6 – Сводная таблица аппроксимации при частоте вращения 1200 об/мин

I_{vg}, A	U_d, B	Линейная функция	Погрешность	Логарифмическая функция	Погрешность	Полиномиальная функция	Погрешность
0,1	0,1	21,4278	0,9989	10,31	0,855073	0,106262	0,058931
0,47	28	30,72146	0,7356	35,77	-0,19323	25,24909	-0,10895
0,78	41	38,50804	0,1672	50,85	-0,31095	42,10011	0,026131
1,01	50	44,28518	0,6429	58,55	-0,11466	52,81911	0,053373
1,50	71	56,593	0,6296	70,33	0,050965	71,13536	0,001903
2,04	85	70,15672	0,7041	79,48	0,384614	85,24774	0,002906
3,00	97	94,27	0,1522	90,97	0,493886	98,9187	0,019397
3,99	103	119,13682	0,9382	99,46	0,599733	104,9315	0,018407

Из данных таблицы 3.6, можно сделать вывод:

1) Линейная функция: $U = 25.118 I_B + 18.916$, средняя погрешность составила примерно 0,7711. Как и при 600 об/мин эта функция плохо аппроксимирует данные эксперимента из-за магнитного насыщения генератора.

2) Логарифмическая функция: $U = 29.776 \ln(I_B) + 58.253$, средняя погрешность составила примерно 0,06070. Этот показатель лучше, чем при линейной аппроксимации. Вместе с тем, этот показатель, на малых токах, даёт сильные отклонения.

3) Полином 3-й степени: $U = 1.5023 I_B^3 - 17.754 I_B^2 + 74.251 I_B - 6.1192$, средняя погрешность составила примерно 0,03625. Эта функция также (как 600 об/мин) лучше совпадает с экспериментом в заданном диапазоне изменения тока возбуждения.

Коэффициенты детерминации составили:

- Полином 3-й степени: $R^2 \approx 0.9981$

- Логарифмическая: $R^2 \approx 0.9536$

- Линейная: $R^2 \approx 0.8675$

Таким образом, полином 3-й степени оказался лучшим для аппроксимации

экспериментальных данных в заданном диапазоне тока возбуждения при частоте вращения 1200 об/мин.

На рисунке 3.12 приведены сравнительные кривые холостого хода ВГШД до перемотки якорной обмотки и после. При этом параллельные ветви, полученные после перемотки якорной обмотки ВГШД, соединены параллельно. Частота вращения поддерживалась в пределах 1200 об/мин.

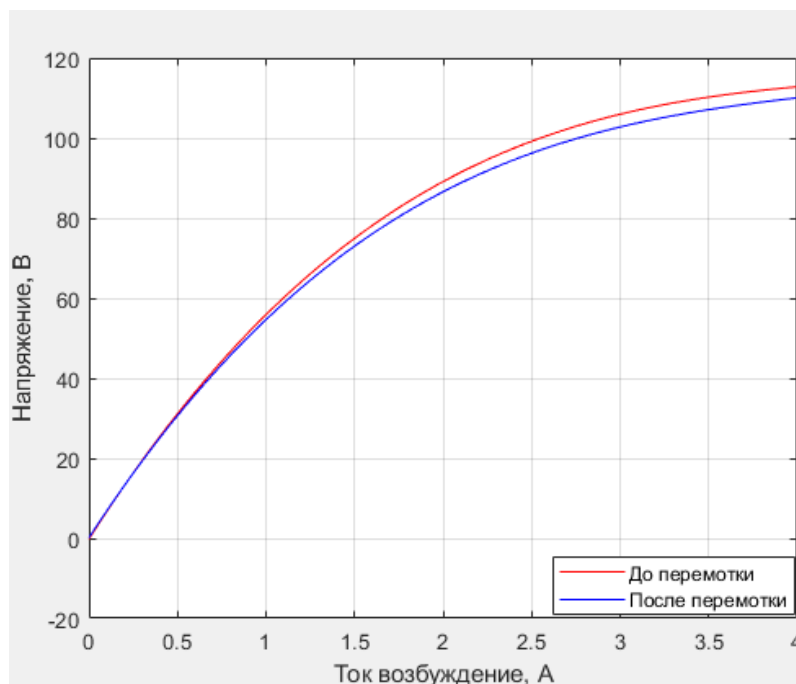


Рисунок 3.12 – Сравнение кривых холостого хода ВГШД до перемотки (красная кривая) и после перемотки (синяя кривая) при частоте вращения 1200 об/мин

Из рисунка 3.12 видно, что до значения тока возбуждения $I_b = 0,5\text{ А}$, кривые практически совпадают и значения напряжения и тока возбуждения ВГШД изменяются по линейной зависимости.

Аналогично рисунку 3.11 кривые незначительно расходятся из-за разницы магнитного насыщения якорных обмоток. Однако эти расхождения меньше чем из-за повышения частоты вращения.

Рабочие диапазоны кривых холостого хода находятся в зоне номинального напряжения генератора, практически совпадают между собой и характеризуются линейной зависимостью. Поэтому можно допустить, что отклонения в зоне насыщения не оказывают существенного влияния на эффективность работы ВГШД.

3.4 Исследование внешней и регулировочной характеристики ВГШД

Внешние характеристики отражают зависимость напряжения генератора при постоянных частоте вращения и токе возбуждения, и изменении нагрузки. На рисунке 3.13 приведена внешняя характеристика ВГШД.

Внешняя характеристика ВГЩД получена для угловой скорости в 63 рад/сек, току возбуждения 0,47 А, включению выпрямительных модулей параллельно и последовательно.

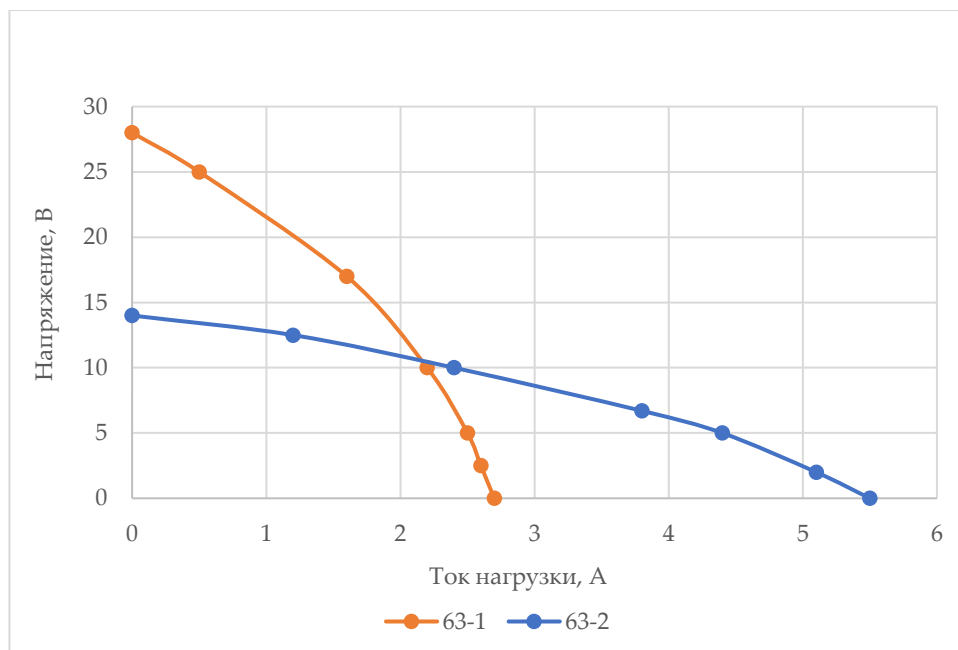


Рисунок 3.13 - Внешняя характеристика ВГЩД

Кривая 63-1 соответствует последовательному включению, а кривая 63-2 параллельному включению выпрямительных модулей. Наблюдаем увеличение напряжения при последовательном включении и снижение тока короткого замыкания. В таблице 3.7 представлены результаты снятия внешней характеристики.

Таблица 3.7 - Внешняя характеристика при $\omega_{iopt} = 63$ рад/сек, $I_v = 0,47$ А.

I_{g1} , А	0	0,5	1,6	2,2	2,5	2,6	2,7
U_{d1} , В	28	25	17	10	5	2,5	0
I_{g2} , А	0	1,2	2,4	3,8	4,4	5,1	5,5
U_{d2} , В	14	12,5	17	10	5	2,5	0

Традиционная регулировочная характеристика отражает зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при поддержании постоянной величины напряжения и постоянной угловой скорости. Однако по этой характеристике нельзя оценить согласованности характеристик ВГЩД с характеристикой ВТ. В данной работе предлагается другой подход к снятию регулировочной характеристики. Условно ее назвали «специальная» регулировочная характеристика, приведенная на рисунке 3.14.

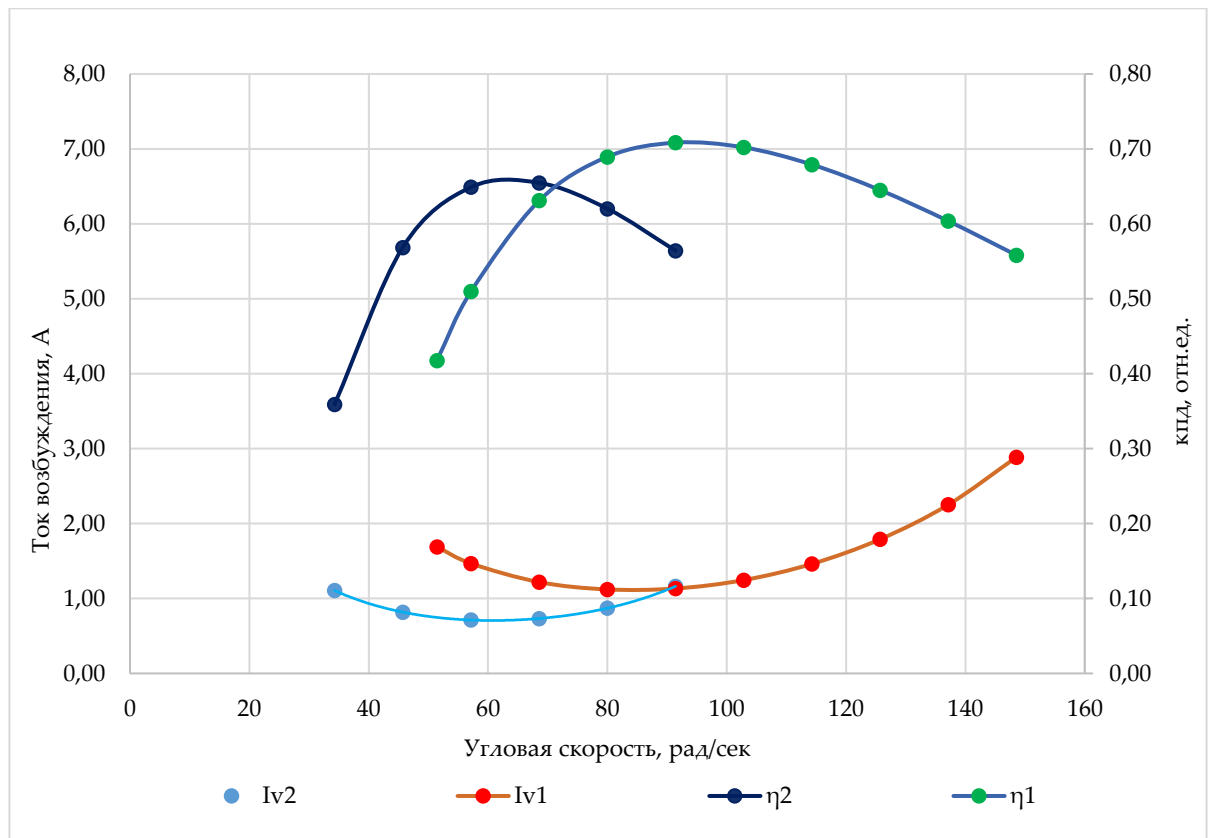


Рисунок 3.14 - «Специальная» регулировочная характеристика

Под этим термином «специальная» подразумевается регулировочная характеристика, отражающая зависимость тока возбуждения от угловой скорости вращения и мощности при поддержании постоянного напряжения. Она совмещает в себе частные случаи регулировочных характеристик ВГШД, но по одной точке на каждой угловой скорости. Величина тока нагрузки соответствует оптимальному току при данной угловой скорости. При построении этой характеристики подразумевается, что расчетные угловые скорости вращения ω_{iopt} соответствующие мощности P_{wtiopt} выбираются согласно пунктирной кривой на рисунке 3.14. Результаты расчетов приведены в таблице 3.8.

Она дает возможность по диапазону изменения тока возбуждения оценить возможность оценки оптимального режима при всех заданных скоростях ветра. Совмещение с зависимостью КПД при заданных режимах можно оценить эффективность ВГШД.

На графиках изображены зависимости тока возбуждения I_{v2} с параллельным включением и I_{v1} с последовательным включением выпрямительных модулей от изменения угловой скорости вращения ω_{iopt} . В модели под оптимальной угловой скоростью подразумевается, что мощность генератора P_{wtiopt} оптимальная для данной скорости ветра. На графике значения мощности не приведены.

Полные значения всех показателей приведены в таблице 3.8. Кривая I_{v2} при снижении угловой скорости ниже 60 рад/сек (скорости ветра 11 м/с) начинает нелинейно расти, что объясняется нелинейной характеристикой магнитной цепи

генератора. Коэффициент полезного действия принимает значения ниже 50 %, что неприемлемо.

Таблица 3.8 - «Специальная» регулировочная характеристика при изменении скорости ветра от 3,7 до 23.8 м/с.

Параллельное включение									
$V_{wind},$ m/sec	23,8	22	18,3	16,5	14,5	12,8	11	9,2	7,3
P_{wtiopt}, Wt	381	300	174	127	89	60	38	22	11
U_d, V	25	25	25	25	25	25	25	25	25
ω_{iopt}	136	126	105	94	84	73	63	52	42
I_{v1}, A	1,87	1,55	1,15	1,07	1,06	1,13	1,3	1,64	2,43
η_1	0,67	0,69	0,73	0,73	0,70	0,67	0,58	0,42	0,22
Последовательное включение									
$V_{wind},$ m/sec	16,5	14,5	12,8	11	9,2	7,3	5,4	3,7	
P_{wtiopt}, Wt	127	89	60	38	22	11	5	1	
U_d, V	25	25	25	25	25	25	25	25	
ω_{iopt}	94	84	73	63	52	42	31	21	
I_{v2}, A	1,09	0,85	0,72	0,68	0,73	0,88	1,23	2,41	
η_1	0,58	0,61	0,62	0,61	0,59	0,48	0,28	0,05	

Переключение на последовательное включение выпрямительных модулей дает возможность поддерживать постоянное напряжение и удовлетворительное КПД при более широком диапазоне изменения угловой скорости. Однако из-за низкого расчетного КПД автомобильного генератора, малой мощности генератора и высокой расчетной угловой скорости в 126 рад/сек потери, несмотря на снижение, стали соизмеримы с полезной мощностью.

Специальная регулировочная характеристика ВГШД, выполненная в среде пакета программ MatLab/Simulink приведена в Приложении В.

3.5 Анализ результатов экспериментальных исследований

Испытания опытного образца ВГШД на физической модели показали, достаточную точность расчета режимов на математической модели с результатами испытаний характеристики холостого хода и внешних характеристик. Результаты экспериментов зафиксированы Протоколом испытаний ВГШД (Приложение Д). В дальнейшем анализе нас интересует диапазон изменения оптимальной угловой скорости, при которой сохраняется удовлетворительный КПД генератора выше 50 % и токи возбуждения ниже 5 ампер. В исследовании используется заводская обмотка возбуждения, которая имеет ограничения по максимальной величине тока 5 Ампер. На совмещенных регулировочных характеристиках с зависимостями КПД можно оценить диапазон угловых скоростей, на котором поддерживается оптимальный режим ветряной турбины. В итоге с двумя ПВ якорной обмотки мы имеем два

генератора с различными параметрами и рассчитанными на разные режимы. В известных решениях с генераторами с несколькими обмотками [29,31,65] каждая обмотка рассчитана на определенный режим и ее оптимальная загрузка обеспечивается в определенном диапазоне изменения угловой скорости. Остальные обмотки находятся в режиме холостого хода или частичной загрузки. Они загружаются не равномерно. Откуда следует, что такие решения требуют увеличения массогабаритных показателей. В предложенном варианте с многоуровневым выпрямителем все обмотки работают одновременно, и загрузка идет одинаковая.

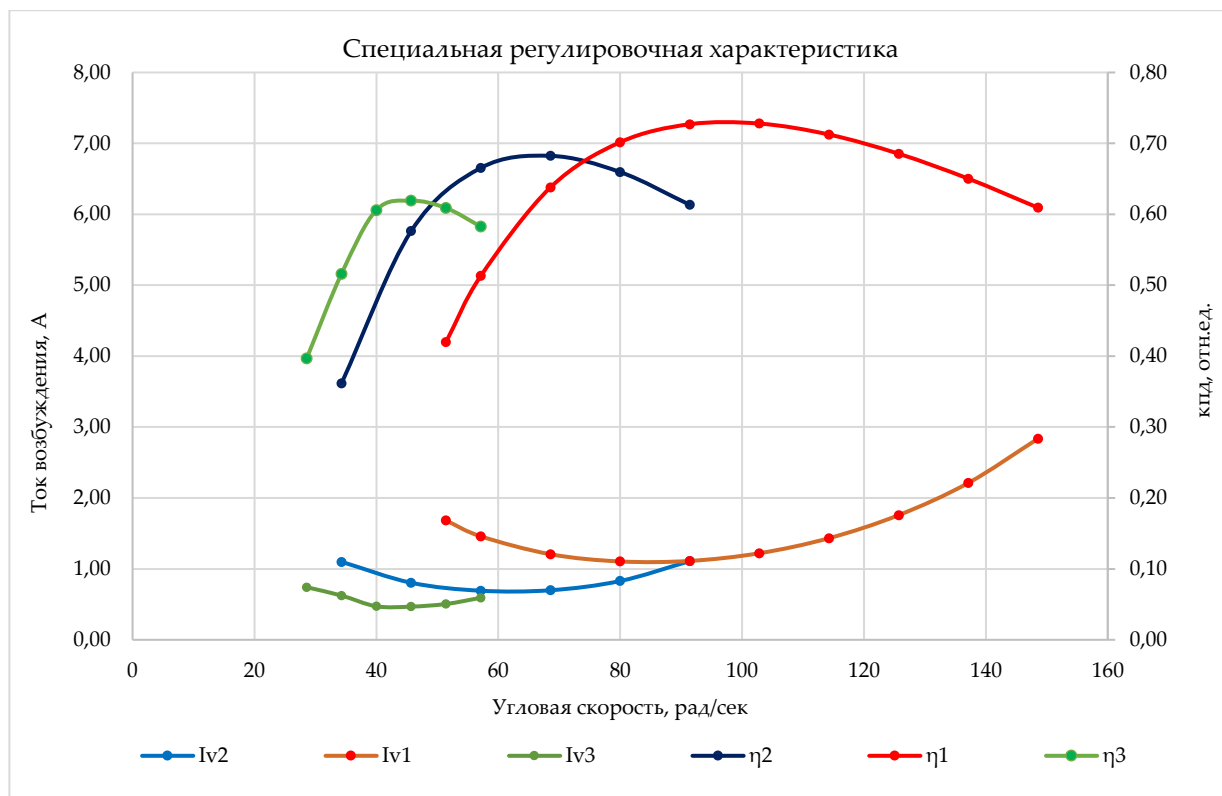
Параллельное переключение вентиляльных модулей снижает сопротивление якорной обмотки, что снижает потери и увеличивает пропускную способность обмоток в ней при увеличении мощности. Таким образом ток ВГШД распределяется между ПВ, сопротивление изменяется квадрату количества ветвей. На низких скоростях ВГШД включил все ветви последовательно, то активное сопротивление якорной обмотки максимально, а ток минимальный. На средних скоростях переключаем две ветви последовательно, полученные пары параллельно. Сопротивление обмотки уменьшится в четыре раза, а ток перейдет на средние тока. На высокой скорости ветра все четыре ветви включают параллельно, что снизит сопротивление обмотки в 16 раз по отношению к первой ступени, а токи увеличатся до максимальных значений. С точки зрения поддержания напряжения переключение выпрямительных блоков с параллельного на последовательное равносильно пропорциональному увеличению витков в якорной обмотке на малых скоростях ветра. На высоких скоростях ветра частота вращения высокая и для поддержания напряжения достаточно меньшее количество витков в якорной обмотке. Выбранная концепция ступенчатого выпрямителя адаптирует генератора под изменения скорости ветра и мощности. Поэтому массогабаритные размеры не увеличиваются.

Мы исследуем возможность использования готовых конструкций генераторов с переметкой якорной обмотки, поэтому в выбор режима входят следующие вопросы:

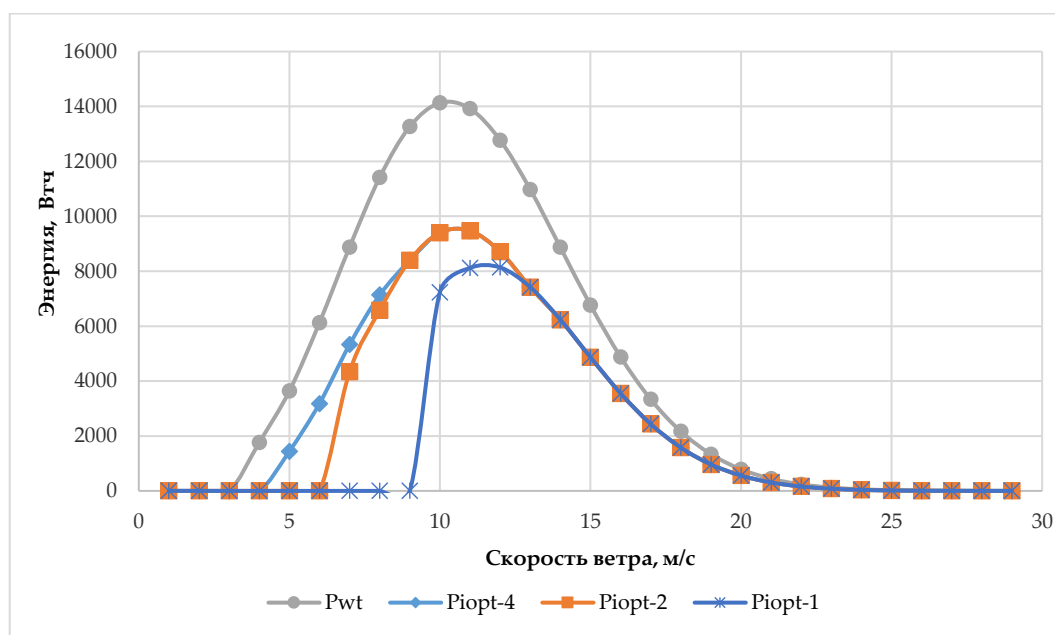
- выбор расчетной скорости ветра,
- выбор сечения провода,
- выбор количества ПВ.

Из рисунка 3.14 следует, что при одной обмотке КПД генератора будет изменяться согласно кривой η_1 или η_2 , что недостаточно. Две ПВ расширяют до угловой скоростью 43-45 рад/сек (7,5-8 м/с). Для наглядности и оценки эффективности применения ступенчатого выпрямителя на рисунке 3.15 приведены результаты моделирования генератора с четырьмя ПВ.

Из рисунка 3.15а следует увеличение параллельных ветвей до с 2 до 4 добавляет еще одну степень выпрямителю. Дополнительная ступень расширяет рабочий диапазон скоростей вращения с удовлетворительным кпд. Минимальная скорость при 32-34 рад/сек (5,5-6 м/с), вместо 42 рад/сек.



а) Регулировочные характеристики и зависимости КПД



б) производительность ВГШД с разным количеством параллельных ветвей

Рисунок 3.15 - Производительность ВГШД с номинальной мощностью 300 Вт и скоростью ветра 22 м/с.

Расширение диапазона рабочих скоростей, при которых поддерживается оптимальная нагрузка WT и удовлетворительный КПД повышает годовую выработку электроэнергии. На рисунке 3.15б изображены кривые распределения

годовой генерации по скоростям ветра при четырех, двух и одной параллельной ветвей P1opt-4, P1opt-2, P1opt-1 соответственно.

Суммарная генерация составила 81 296, 75 128 и 51 719 Вт·ч для четырех, двух и одной параллельных ветвей соответственно. Ступенчатый выпрямитель на базе автомобильного генератора с высокой линейной нагрузкой и относительно невысоким КПД 0,7-0,8 в сочетании с малой мощностью 600-750 Вт дал прирост производительности ветряной турбины свыше 45 % при двух ветвях, и свыше 56 % при четырех ветвях. Позволил производить генерацию электроэнергии потребителю при скоростях ветра от 6 до 27 и более м/с.

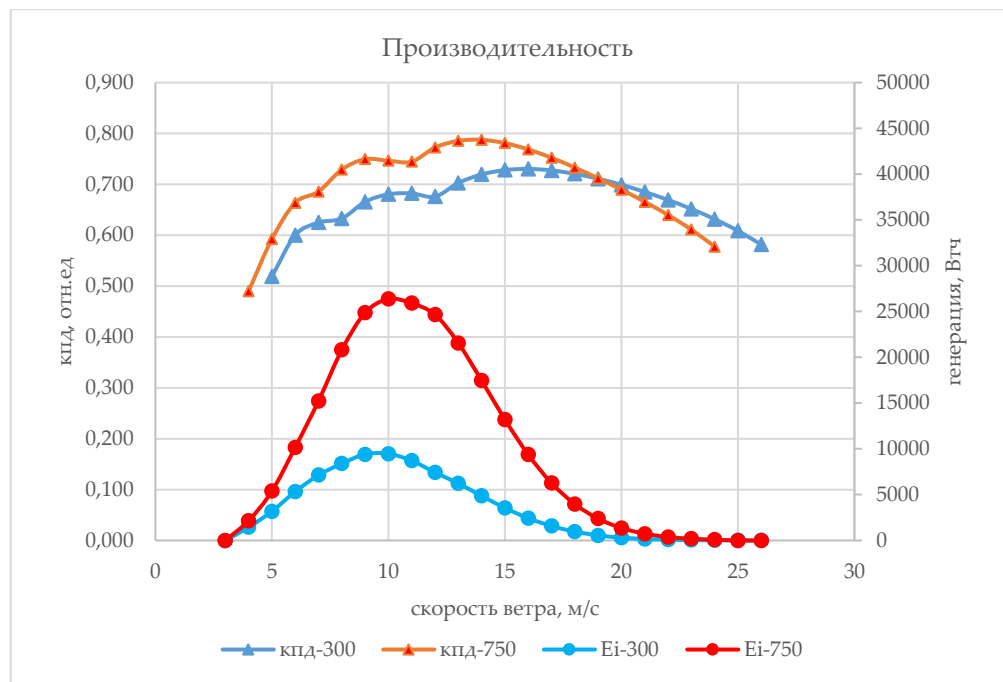
Моделирование генератора с четырьмя параллельными ветвями и под расчетную мощность по техническому паспорту на мощности в 750 Вт с проводом якорной обмотки 0.9 мм и частотой вращения 1200 об/мин (22 м/с) показало существенный прирост годовой генерации с 81 296 до 232 512 Вт·ч. В то же время максимальная скорость ветра ограничивается 24 м/с. «Специальная регулировочная характеристика с кривыми КПД генераторов приведены на рисунке 3.16а. Минимальная скорость составляет 5 м/с.

Применение ступенчатого выпрямителя в автомобильных генераторах в ветровых условиях Казахстана существенно повышает генерацию ветряных установок малого масштаба. В случае применения этого же генератора в ветряной установке большей мощности. Например, применение с ветряком мощностью близкой паспортной номинальной мощности в 566 Вт на частоте вращения 599 об/мин при скорости ветра 16 м/с.

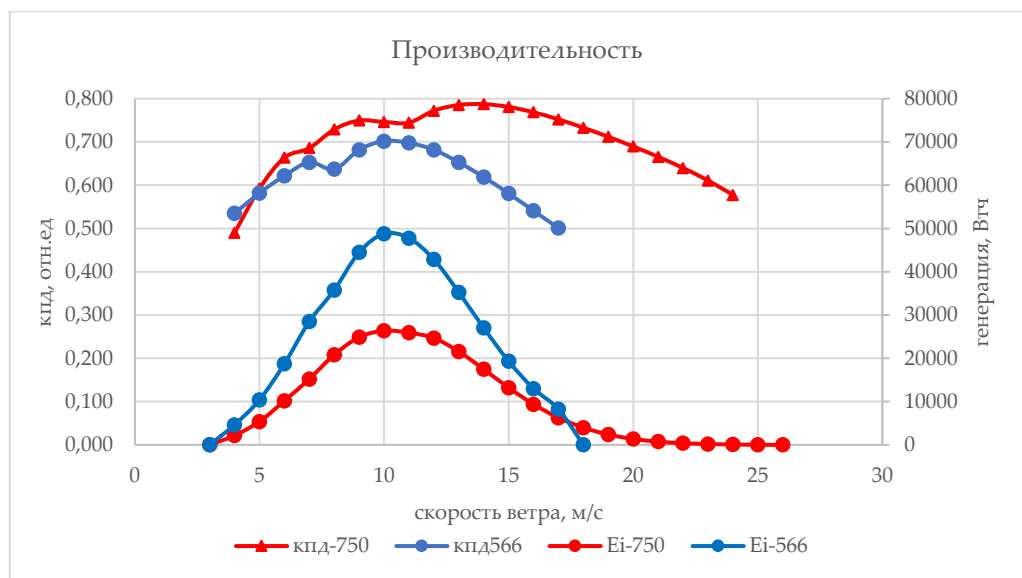
Для сравнения на рисунке 3.16б приведены «Специальные» регулировочные характеристики генератора, рассчитанного на 1200 об/мин и мощностью 750 Вт при скорости ветра 22 м/с и генератора рассчитанного на 566 Вт с частотой вращения 599 об/мин. Из рисунка 4.16б следует, что генератор с меньшей расчетной частотой вращения не способен поддерживать удовлетворительный КПД выше скорости ветра в 18 м/с. В целом во всем рабочем диапазоне изменения скоростей ветра КПД генератора на 599 об/мин ниже, чем у СГСВ на 1200 об/мин. Уже диапазон скоростей ветра, в котором поддерживается оптимальная загрузка ветряной турбины и удовлетворительный КПД.

Из-за увеличения мощности, несмотря на узкий диапазон рабочих скоростей ветра, повышается годовая производительность. Как правило, на вертикально осевых турбинах малой мощности отсутствует автоматическое отключение при высоких скоростях ветра, что вынуждает отключать WT при скоростях ветра, превышающих максимальную. Поэтому существуют риски связанные с раскручиванием турбины и перегревом генератора.

Установка на 1200 об/мин продолжает генерацию до скоростей ветра 22 м/с. Однако в районах с относительно ограниченными скоростями ветра есть возможность использовать автомобильный генератор на установках с большей мощности.



а)



б)

Рисунок 3.16 - «Специальная» регулировочная характеристика

Испытания подтвердили работоспособность ВГШД. Анализ вариаций исполнения якорной обмотки показал, что выбор расчетной мощности и частоты вращения надо выбирать близкой к паспортным данным. Из-за кубической зависимости мощности ветряной турбины от скорости ветра существует большой разброс по мощности на минимальных и максимальных скоростях ветра. Если в месте установки большая доля годового распределения скоростей ветра приходится на низкие и средние скорости рекомендуется рассчитывать генератор на средние ветра и соответствующие частоты вращения. При этом

надо понимать, что генератор не сможет обеспечить оптимальный режим ветряной турбине на скоростях ветра, превышающих средние скорости ветра, но из-за увеличения мощности ветряной установки его генерация будет выше, чем у генератора, рассчитанного на скорости выше среднего значения. Средний КПД генератора будет на средние скорости тоже будет ниже, чем у генератора, рассчитанного на скорости превышающие средние значения.

В предшествующих исследованиях проводился анализ эффективности генератора со ступенчатым выпрямителем. Они показали, что на ветряных установках выше средней мощности в десятки киловатт и выше мощность на малых скоростях ветра будет достаточной, чтобы поддержать удовлетворительный КПД.

В дальнейшем планируется провести оценку влияние последовательного и параллельного включения вентильных модулей в генераторе на режим коммутации диодов в выпрямителях, провести оценку режимов генератора в случае не симметрии параллельных ветвей, вызванных некачественным выполнением или неисправностями в процессе работ.

Выводы по разделу.

Разработан экспериментальный образец ВГШД, обмотка якоря которого перемотана на 2 трехфазные параллельные группы ветвей (А1 и А2). Выработанный на этом генераторе трехфазный переменный ток преобразуется в диодных мостах (D1 и D2) в постоянный ток. С помощью переключателя S (вручную или автоматически) диодные мосты могут соединяться последовательно (при пониженной частоте вращения) или параллельно (при нормальной или повышенной частоте вращения).

Собрана принципиальная схема испытаний ВГШД при различных режимах работы. Представлены электротехнические характеристики элементов испытательного стенда и используемых электроизмерительных приборов. Разработана методика проведения экспериментов.

По результатам экспериментальных исследований построены специальные графики холостого хода, а также регулировочные и внешние характеристики ВГШД. Проведена аппроксимация экспериментальных данных с использованием программы MatLab. Полученные результаты с достаточной точностью совпали с аналитическими расчетами.

Установлено, что предлагаемый ВГШД способен поддерживать относительно стабильный уровень выходного напряжения в пределах 3-22 м/с скорости ветра на ВВТ. При этом, на малых оборотах ВГШД, группы ветвей якорной обмотки целесообразно переключать на последовательное соединение, а при увеличении частоты вращения - на параллельное.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВГШД НА ИММИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

4.1 Разработка имитационной модели в среде MatLab/Simulink

Для исследования синхронных генераторов в различных режимах часто используется компьютерная (имитационная) модель [68]. В данной работе поставленная задача для ВГШД также реализована в наглядном и эффективном средстве визуального программирования моделей – в пакете Simulink программы MATLAB [68, 69].

ВГШД, предназначенный для работы с ветровой установкой, имеет на статоре две группы параллельных ветвей. Эти группы параллельных ветвей могут соединяться между собой параллельно или последовательно в зависимости от скорости вращения вала. При каждом случае ВГШД превращается в самостоятельные синхронные генераторы.

В блоке *Synchronous Machine SI Fundamental* схема замещения параметры машины задаются в системе синхронной машины (рисунок 4.1) в системе координат, связанной с ротором (q - d оси), использованная при создании модели. Все параметры ротора и его переменные приведены к статору. Индексы переменных и параметров обозначают следующее [68, 69]:

d, q — проекции переменных на оси d и q ;

R, s — параметры ротора и статора;

L, m — параметры индуктивности рассеяния и цепи намагничивания,

f, k — переменные цепи возбуждения и демпферной обмотки.

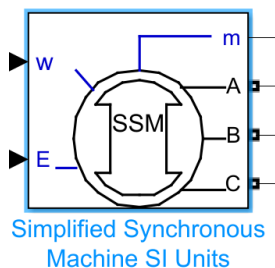


Рисунок 4.1- Пиктограмма синхронной машины

Учитывая особенности работы ВГШД при изменении скорости вращения, на рисунке 4.2 в ее имитационной модели представлены два самостоятельных синхронных генератора. Каждый из этих отличается своими характеристиками, которые определяются способами соединений параллельных ветвей их якорных обмоток. Вырабатываемое напряжение переменного тока каждой группы параллельных ветвей выпрямляются на диодных блоках и суммарное напряжение постоянного тока подается на нагрузку.

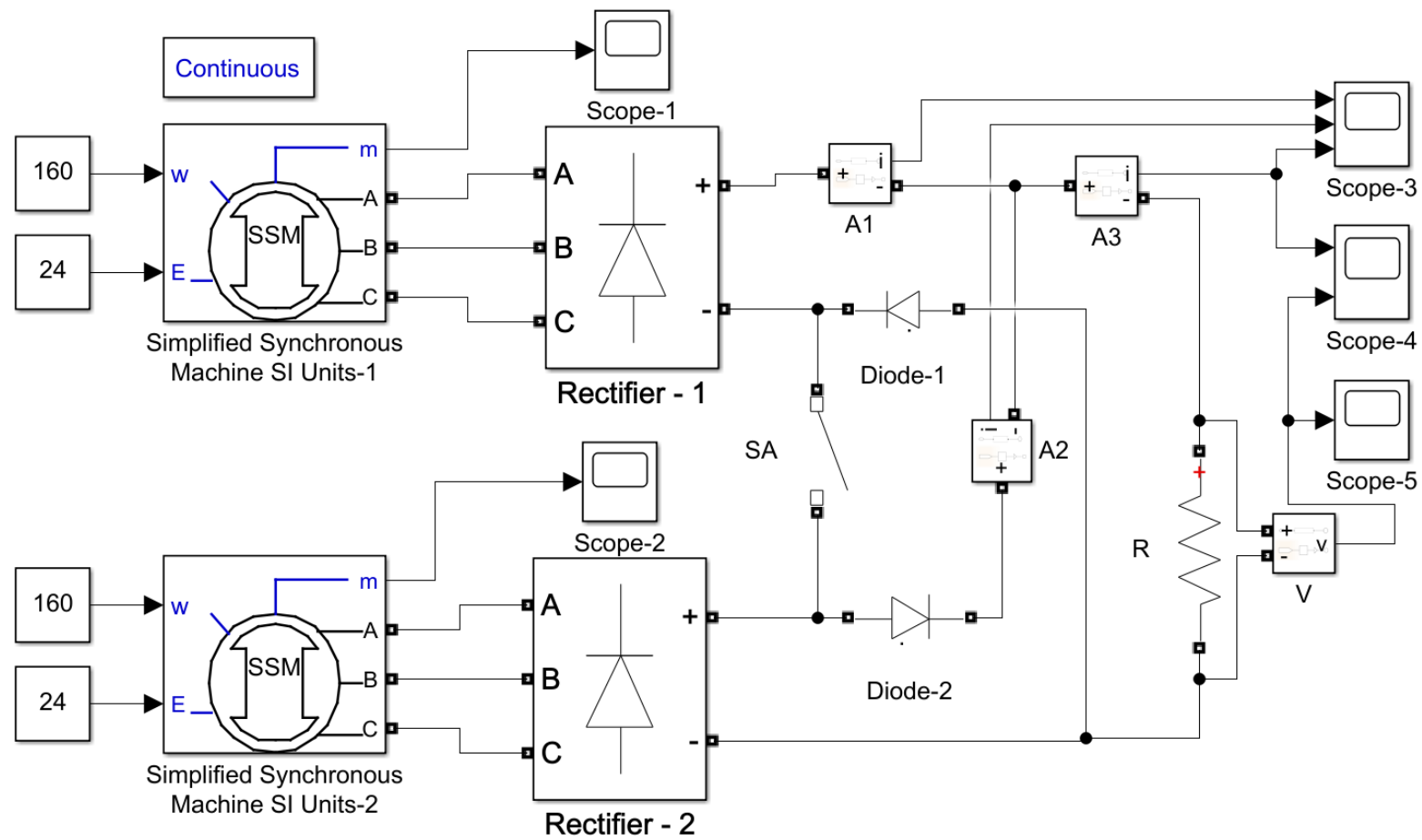
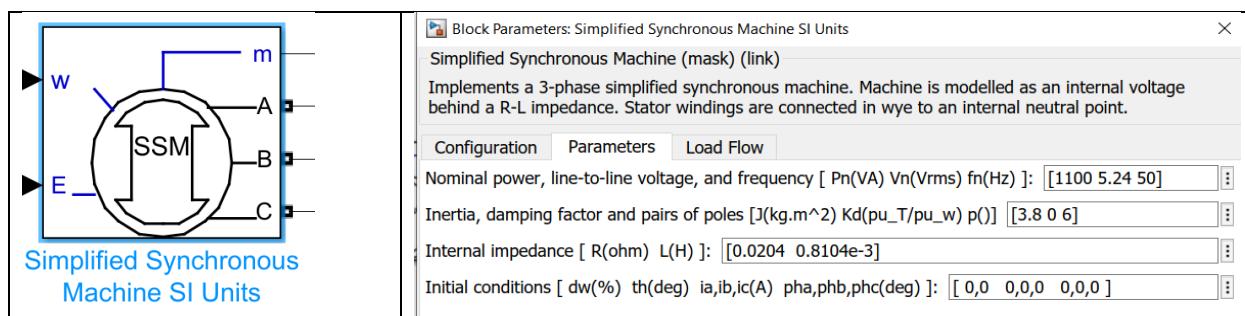
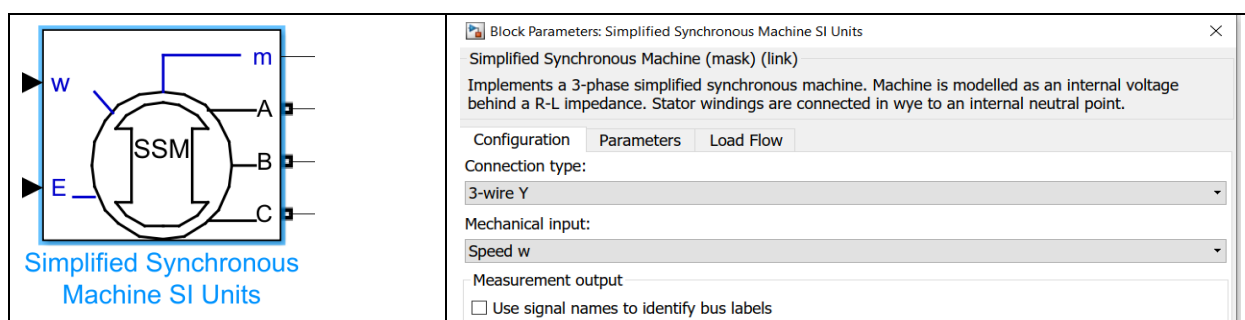


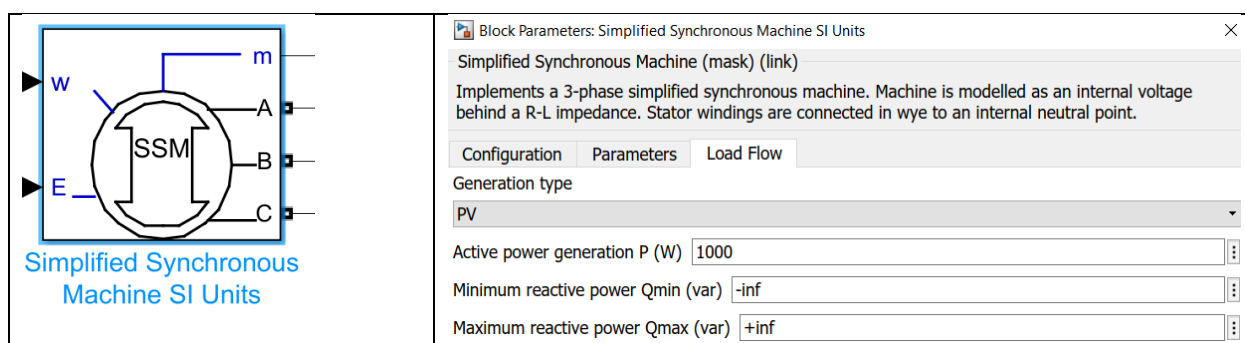
Рисунок 4.2 - Имитационная модель ВГЩД на MatLab/Simulink



а) параметры мощности и напряжения



в) параметры скорости вращения



с) параметры нагрузки

Рисунок 4.3 - Параметры ВГЩД при экспериментальных исследованиях

Генератору подсоединены блоки *Constant* (рисунок 4.3) для генерации выходных сигналов. Блок *Constant* генерирует действительный или комплексный сигнал с постоянным значением. Этот блок используется для обеспечения ввода постоянного сигнала. Блок генерирует скалярный, векторный или матричный выходной сигнал в зависимости от: размерности параметра *Constant value*.

Для запуска имитационной модели на панели инструментов Simulink нажимаем *Simulation-Start*. При этом модель запускается, и на дисплеях отображаются текущие значения параметров ВГЩД.

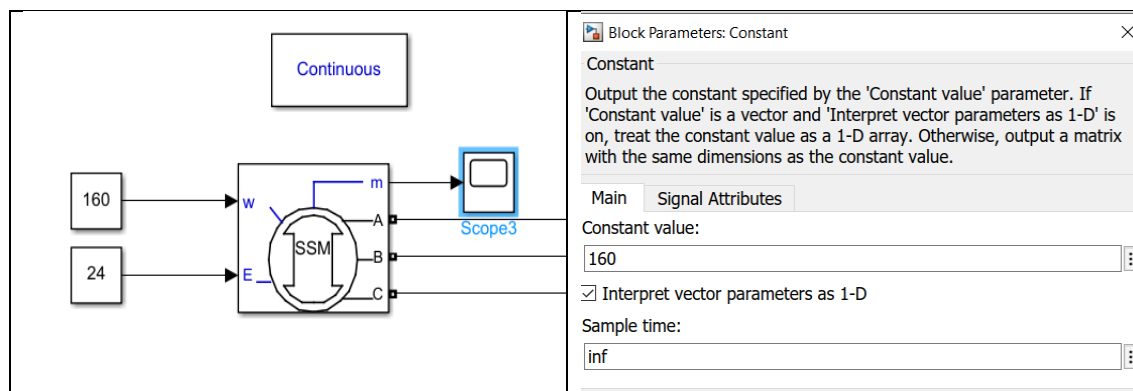


Рисунок 4.4 - Блок Constant с параметрами (160 рад/сек и 24В).

Измерительная часть модели осуществляется блоком-подсистемой *Subsystem* (рисунок 4.4). Блоки *subsystem* идентичны друг другу. В блоках *Subsystem* замеряются линейные выходные напряжения агрегатов между фазами с помощью блока *Voltage Measurement*, затем выводятся на осциллограф *Scope 3*.

Осциллограмма токов в фазах А, В и С приведена на рисунке 4.5

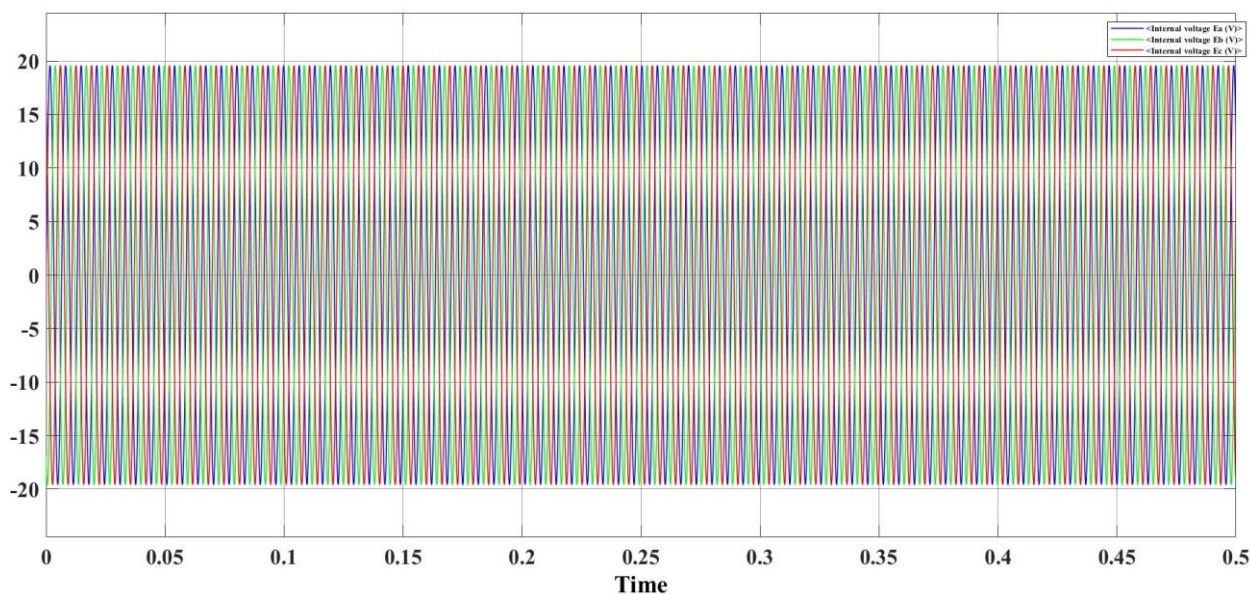


Рисунок 4.5 - Осциллограмма токов и напряжения (фазах А, В, С)

Для проведения экспериментов на модели ток возбуждения генератора менялся от нуля до её номинального значения. Для этого на модели дважды нажимаем на блок устанавливающий значения тока возбуждения синхронного генератора и вводим это значения [70].

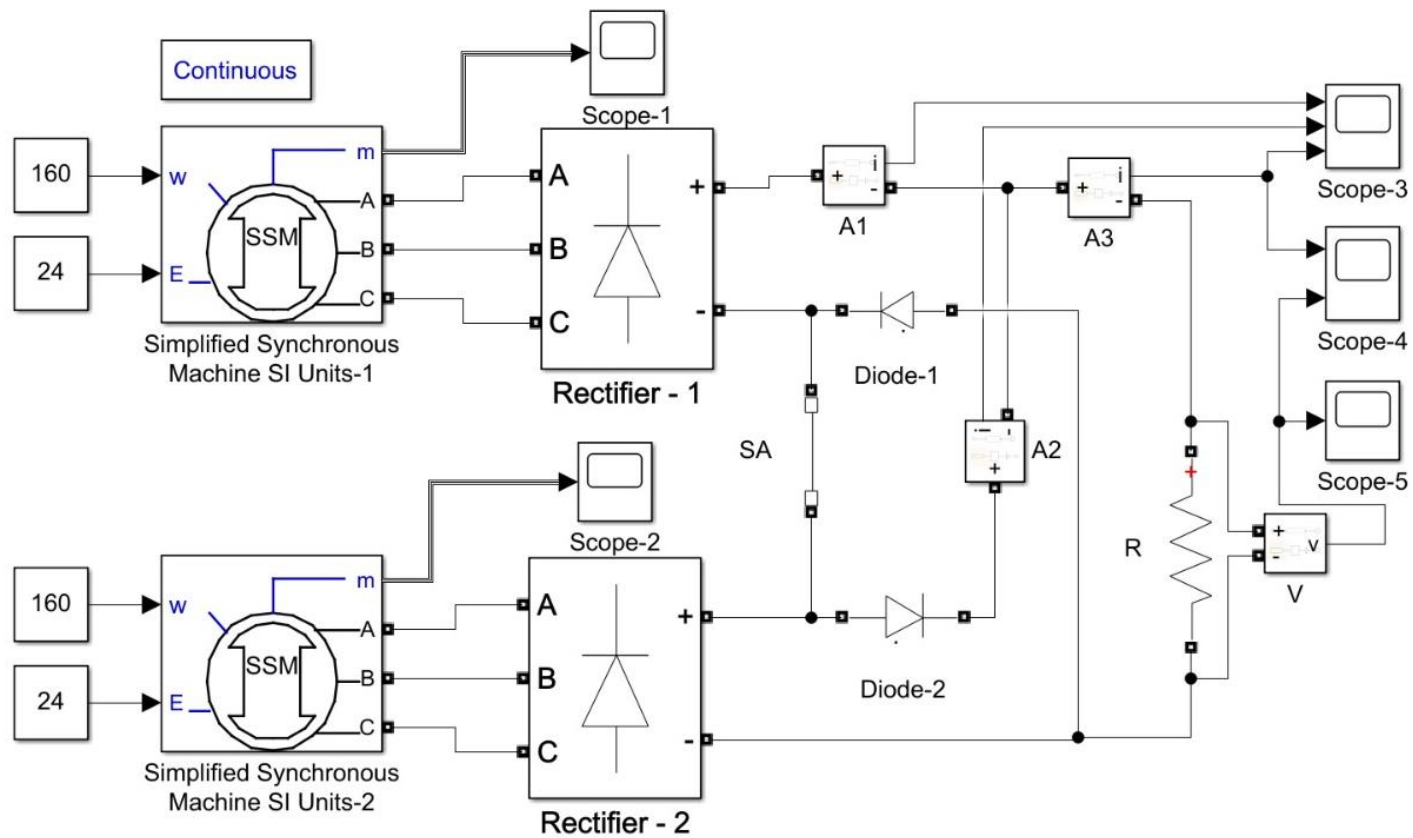


Рисунок 4.6 - Переключение параллельных ветвей якорной обмотки ВГЩД на последовательное соединение

Для проведения экспериментов на модели ток возбуждения генератора менялся от нуля до её номинального значения. Для этого на модели дважды нажимаем на блок устанавливающий значения тока возбуждения синхронного генератора и вводим это значения [70].

В качестве нагрузки использованы активные сопротивления, которые приведены на модели. Значения сопротивления нагрузки устанавливается дважды нажатием на пиктограмму блока резистора и в диалоговом окне записываются значения сопротивления нагрузки в Ом.

При проведении экспериментов на компьютерной модели задаются значения тока возбуждения и сопротивления нагрузки. Для пуска модели на панели инструментов Simulink нажимаем на Simulation-Start. При этом модель запускается, и на дисплеях отображаются текущие значения параметров генератора. Полученные значения этих параметров заносим в таблицу. В результате получим данные для построения графиков экспериментальных характеристик.

Имитационное моделирование ВГЩД проведено на основе пакета MatLab Simulink. При разработке модель-симулятора использована среда моделирования Simulink/Simscape Electrical. Все компоненты системы моделируются с использованием специализированных блоков библиотеки Specialized Power Systems.

4.2 Исследование режимов работы ВГЩД

4.2.1 Допущения и границы применимости модели

Модель учитывает только активное сопротивление обмотки якоря, поэтому характеристика получается строго линейной. Синхронное реактивное сопротивление и реакция якоря не включены: их значения не приводятся в исходных данных, а оценка по геометрии магнитной цепи дает физически недостоверный результат. Учет реактивного сопротивления сделал бы характеристику вогнутой вниз, то есть наклон нарастал бы с ростом тока.

Насыщение магнитной цепи не учитывается. Принято, что магнитный поток строго пропорционален току возбуждения во всем диапазоне до верхнего ограничения. При токах возбуждения выше номинального это допущение завышает ЭДС.

Ток нагрузки считается медленно меняющимся по сравнению с периодом пульсации. Частота пульсации равна 720 Гц, а развертка тока выполняется вручную, поэтому на каждую ступень нагрузочного реостата приходится тысячи периодов. На графике отображается меньшее их число, чтобы колебание оставалось различимым.

Допущения и границы применимости модели приведены в программе имитационной модели ВГЩД (Приложение Г).

4.2.2 Исходные данные

Исходные данные ВГШД приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные параметры ВГШД.

Параметры	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Номинальная скорость вращения	n	1200	об/мин
Напряжение холостого хода выпрямителя	Ud0	26	В
Число полюсов	2p	6	—
Конструктивный коэффициент ЭДС	ke	250	В*с/Вб
Номинальный магнитный поток	Phi_nom	2.14e-04	Вб
Ток возбуждения холостого хода	If0	0.47	А
Верхнее ограничение тока возбуждения	If_max	3	А
Удельное сопротивление меди	rho20	1/57	Ом*мм ² /м
Длина фазы обмотки якоря	l_ph	39.6	м
Сечение провода	s_pr	0.584	мм ²
Число пульсаций выпрямителя	m	6	—

4.2.3 Изменение напряжения на холостом ходу

В имитационной модели ВГШД (рисунок 4.2) генератор описывается апериодическим звеном первого порядка с электромагнитной постоянной времени $\tau_{\text{ген}} = 0,05$ с:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{\text{ген}}(t) - U(t)}{\tau_{\text{ген}}} \quad (4.1)$$

ЭДС генератора определяется через магнитный поток и угловую скорость:

$$U_{\text{ген}}(t) = k_e \cdot \Phi(t) \cdot \omega(t), \quad \omega(t) = \frac{2\pi \cdot n(t)}{60} \quad (4.2)$$

Магнитный поток линейно зависит от тока возбуждения через коэффициент k_f :

$$\Phi(t) = k_f \cdot I_f(t), \quad k_f = \frac{\Phi_n}{I_{f0}} = \frac{2,14 \cdot 10^{-4}}{0,47} = 4,553 \cdot 10^{-4} \text{ Вб/А}$$

Конструктивный коэффициент $k_e = 250$ В*с/Вб. Численное интегрирование выполняется явным методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,001$ с (6001 шаг за 6 с моделирования).

Изменение напряжения генератора $U(t)$ на имитационной модели (рисунок 4.2) в зависимости от времени приведено на рисунке 4.8.

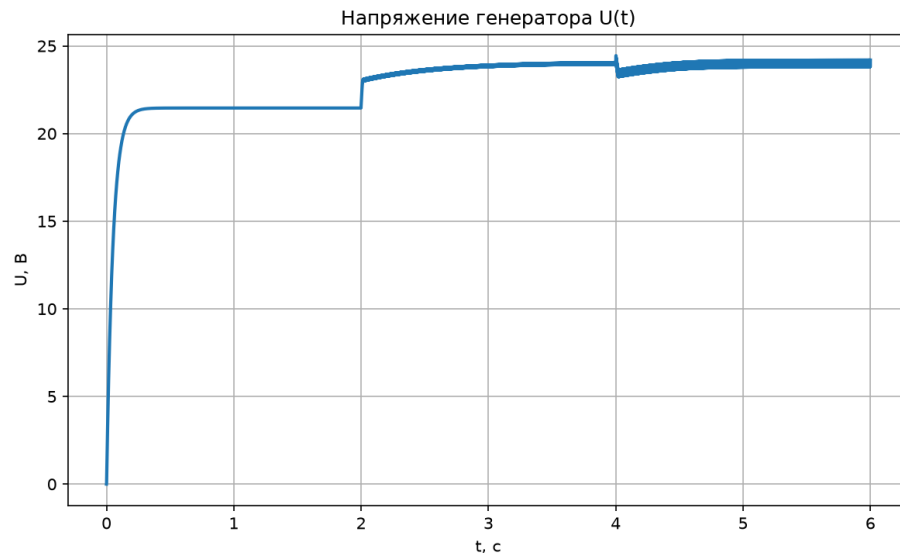


Рисунок 4.7 – Изменение напряжения генератора $U(t)$ на имитационной модели в зависимости от времени

На начальном участке (0-0,3 с) напряжение нарастает от 0 В по экспоненте с постоянной $\tau_{\text{ген}} = 0,05$ с. На интервале $t = 0..2$ с напряжение стабилизируется на уровне 21,46 В, не достигая уставки 24 В. Причина: при $n = 600$ об/мин максимально достижимая ЭДС генератора при полном токе возбуждения $I_f = 3$ А составляет ровно 21,46 В, поэтому регулятор удерживает насыщение в течение всего этого интервала.

При $t = 2$ с скачок скорости до 800 об/мин увеличивает потолок ЭДС, и напряжение аperiodически возрастает до 24,04 В к $t = 4$ с – без перерегулирования, что подтверждает эффективность anti-windup.

При $t = 4$ с переход к 1200 об/мин вызывает кратковременный выброс до 24,44 В, после чего напряжение стабилизируется вблизи уставки. Финальное значение $U(6) = 24,19$ В, статическая ошибка – 0,79%.

Результаты расчетов на MatLab Simulink приведены на рисунке 4.8.

При изменении частоты вращения изменяется выходное напряжение ВГШД. Эта зависимость приведена на рисунке 4.9.

На рисунке 4.9 видно, прямолинейная зависимость напряжения от скорости вращения.

Напряжение растет от 6 В при $n = 300$ об/мин до 24 В при $n = 1200$ об/мин по линейному закону $U(n) = 24 \cdot n / 1200$. Характеристика отражает допущение модели о пропорциональности ЭДС и скорости при постоянном магнитном потоке. Насыщение магнитной цепи не учтено.

```

===== Г286В: статический расчет =====
Phi_delta = 2.083457e-04 Вб
B_delta   = 0.1644 Тл
B_z       = 0.3020 Тл
B_j       = 0.3401 Тл
F_delta   = 118.52 А
F_chain    = 124.44 А
If_xx     = 0.2263 А
If_nom     = 1.4927 А
Ra20      = 1.1896 Ом
Ra100     = 1.5703 Ом
P_loss    = 149.2 Вт
eta       = 0.6679 (66.79 %)
Phi_k (рассеяние когтей) = 3.916898e-04 Вб
Phi_c (рассеяние пазов) = 4.198165e-04 Вб
Phi_vt (полный поток)   = 4.302338e-04 Вб

===== Г286В: динамическая модель АРВ =====
ПИД: Kp=3.00, Ki=10.00, Kd=0.0100
U_max   = 24.4445 В
U(t_end) = 24.1902 В
If(t_end) = 0.3555 А
Статическая ошибка = 0.793 %

```

Рисунок 4.8 – Результаты расчетов скрипта

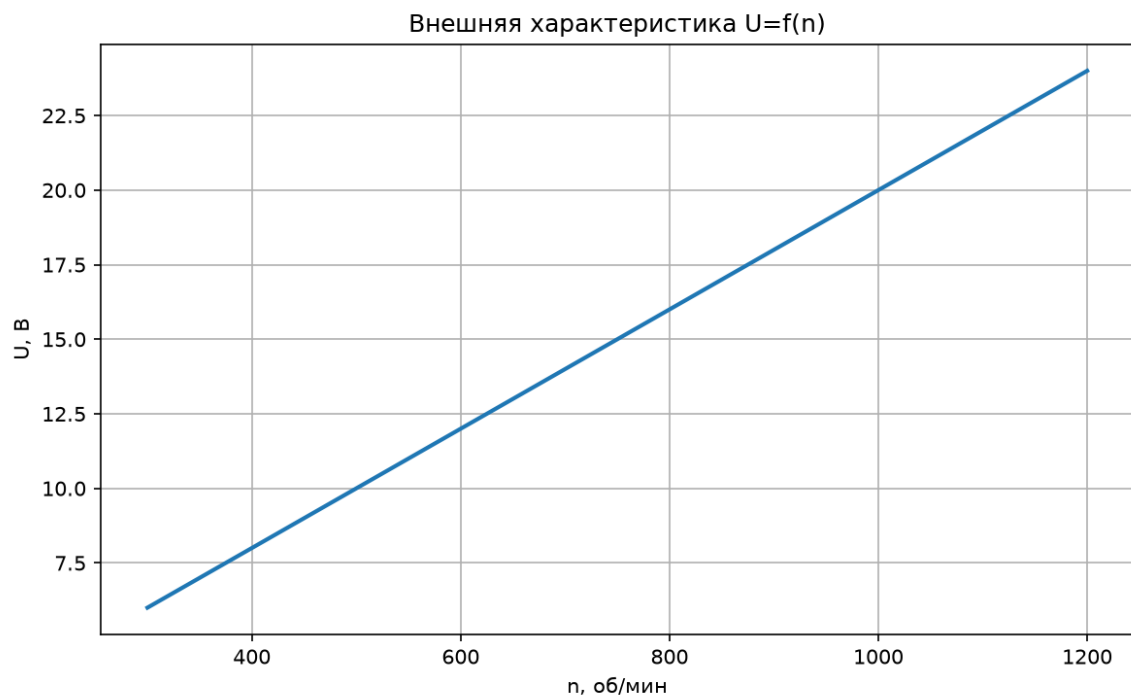


Рисунок 4.9 – Зависимость напряжения от скорости вращения $U = f(n)$

При уменьшении скорости вращения ВГШД снижается напряжение на выходе генератора. Если группы параллельных ветвей ВГШД соединить между собой последовательно и согласовано, то ЭДС индуцированные в обмотках суммируется. В результате выходное напряжение генератора при одинаковых

параметрах и числе витков обмоток удвоится. Для выполнения этой операции ключ, приведенный на рисунке 4.6 замыкается.

При этом происходит последовательное соединение обмоток и выходное напряжение увеличивается два раза. Этому случаю соответствуют график, приведенный на рисунке 4.10.

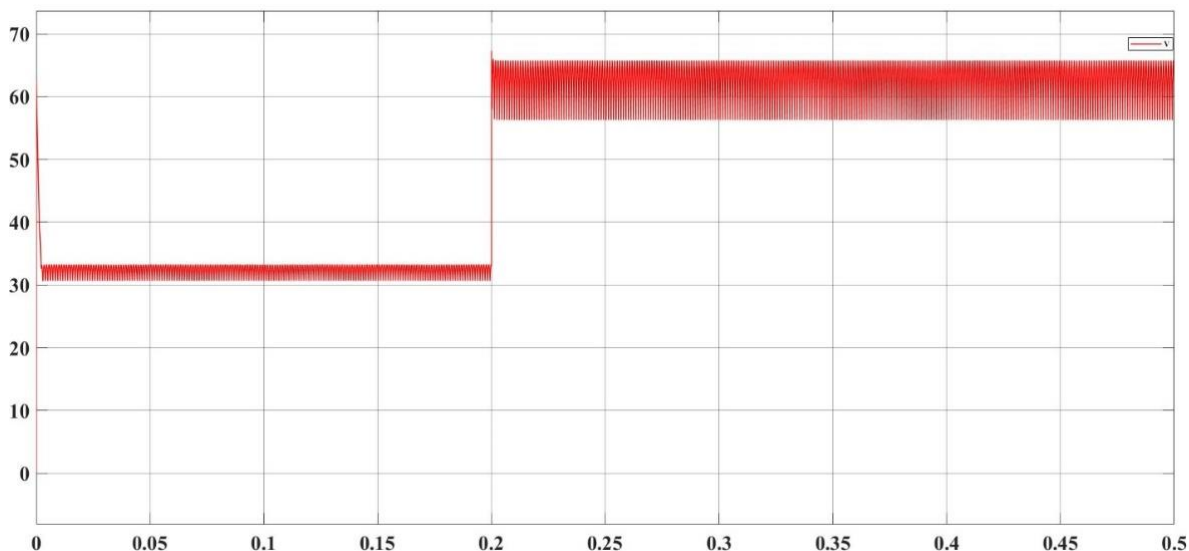


Рисунок 4.10 – Напряжение на ВГДШ при параллельном и последовательном соединении групп параллельных ветвей якорной обмотки

4.2.4 Внешняя характеристика ВГШД

Внешняя характеристика показывает, как изменяется выпрямленное напряжение генератора при увеличении тока нагрузки и неизменной скорости вращения. Расчет выполняется для вентильного генератора Г286В, то есть синхронной машины с трехфазным диодным мостом на выходе.

Испытание состоит из двух прогонов, различающихся током возбуждения. В первом прогоне возбуждение установлено так, чтобы напряжение холостого хода равнялось паспортному значению.

Ток нагрузки увеличивается от нуля ступенями нагрузочного реостата. Во втором прогоне возбуждение форсируется до верхнего ограничения, а шкала тока продолжается без сброса. Из-за этого в точке переключения напряжение возрастает скачком.

Рассчитываются две величины. Первая – среднее выпрямленное напряжение под нагрузкой, то есть показание вольтметра постоянного тока. Вторая – мгновенное напряжение на выходе моста до сглаживания, которое периодически пульсирует. Исходные данные приведены в таблице 4.1.

4.2.4.1 Среднее выпрямленное напряжение на модели

Сопротивление обмотки якоря при 20 градусах вычисляется по длине и сечению провода, а при рабочей температуре 100 градусов возрастает с коэффициентом 1,32:

$$R_{a20} = \frac{\rho_{20} l_{ph}}{s_{pr}} = 1.1896 \, \Omega$$

$$R_{a100} = 1.32 R_{a20} = 1.5703 \, \Omega$$

ЭДС на стороне постоянного тока пропорциональна магнитному потоку и угловой скорости вращения. Магнитный поток связан с током возбуждения коэффициентом k_f , поэтому при неизменной скорости ЭДС линейна по току возбуждения:

$$k_f = \frac{\Phi_{nom}}{I_{f0}} = 4.5532e - 04 \, \text{Wb/A}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$E_0 = k_e k_f I_f \omega = 14.3043 I_f$$

Множитель при токе возбуждения равен 14.3043 В на каждый ампер возбуждения. Отсюда находится возбуждение первого прогона: оно выбрано из условия, что напряжение холостого хода равно паспортному U_{d0} :

$$I_{f1} = \frac{U_{d0}}{k_e k_f \omega} = 1.8176 \, \text{A}$$

Второй прогон идет на предельном возбуждении $I_{f_max} = 3.0 \, \text{A}$. Соответствующие значения ЭДС составляют 26.0000 В и 42.9128 В, то есть переключение возбуждения увеличивает напряжение в 1.65 раза.

Под нагрузкой напряжение уменьшается на падении на активном сопротивлении обмотки якоря:

$$U(I) = E_0 - R_{a100} I$$

Расчет по этой формуле дает следующие граничные значения. В первом прогоне напряжение падает с 26.00 В при холостом ходе до 13.44 В при токе 8 А. После переключения возбуждения напряжение скачком возрастает до 30.35 В и далее снижается до 22.50 В при токе 13 А.

4.2.4.2 Пульсация выпрямителя на модели

Мгновенное напряжение на выходе моста до сглаживания не постоянно. Между соседними коммутациями диодов на выход проходит вершина той линейной ЭДС, которая в данный момент максимальна, поэтому форма напряжения представляет собой отрезок косинусоиды:

$$u(\theta) = V_{pk} \cos \theta, \quad -\frac{\pi}{m} \leq \theta \leq \frac{\pi}{m}$$

Это детерминированное периодическое колебание, а не разброс измерений. Верхняя огибающая пульсации равна амплитуде, нижняя соответствует моменту коммутации:

$$V_{min} = V_{pk} \cos\left(\frac{\pi}{m}\right)$$

Среднее значение за период, то есть показание вольтметра постоянного тока, получается интегрированием этой формы:

$$U_{avg} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} V_{pk} \cos \theta d\theta = V_{pk} \frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)$$

Для шестипульсной схемы этот коэффициент равен 0.95493. Среднее значение пульсации обязано совпадать с ЭДС при нулевом токе нагрузки, поэтому амплитуда пульсации не задается произвольно, а вычисляется обращением полученного соотношения:

$$V_{pk} = \frac{E_0}{\frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)}$$

Результат проверен независимым путем. Через принятую в расчете константу выпрямителя, связывающую выпрямленное напряжение с действующим линейным, амплитуда равна $\sqrt{2} \cdot E_0 / 1,35$. Два вывода расходятся на 0,04 процента, что подтверждает согласованность модели.

Численно огибающие пульсации составляют от 23.58 В до 27.23 В в первом прогоне и от 38.92 В до 44.94 В во втором. Размах пульсации в обоих случаях равен 13.40 процента от среднего, так как он определяется только числом пульсаций схемы. Частота пульсации равна 720 Гц и одинакова в обоих прогонах, поскольку скорость вращения не меняется.

4.2.4.3 Результаты исследований ВГШД на имитационной модели

На рисунке 4.11 показаны величины напряжений ВГШД по внешней характеристике, полученные по имитационной модели в соответствии с изменением токовой нагрузки (I_a).

Как показано на рисунке 4.11, среднее напряжение убывает линейно, поскольку падение на активном сопротивлении пропорционально току. При токе 8 А происходит переключение группы ветвей якорной обмотки на последовательное соединение. При этом напряжение поднимает кривую скачком. Кривая на этом же участке не разрывается: ток нагрузки в момент переключения не меняется, а огибающие пульсации проходят все промежуточные значения, так как ток возбуждения изменяется не мгновенно из-за индуктивности обмотки.

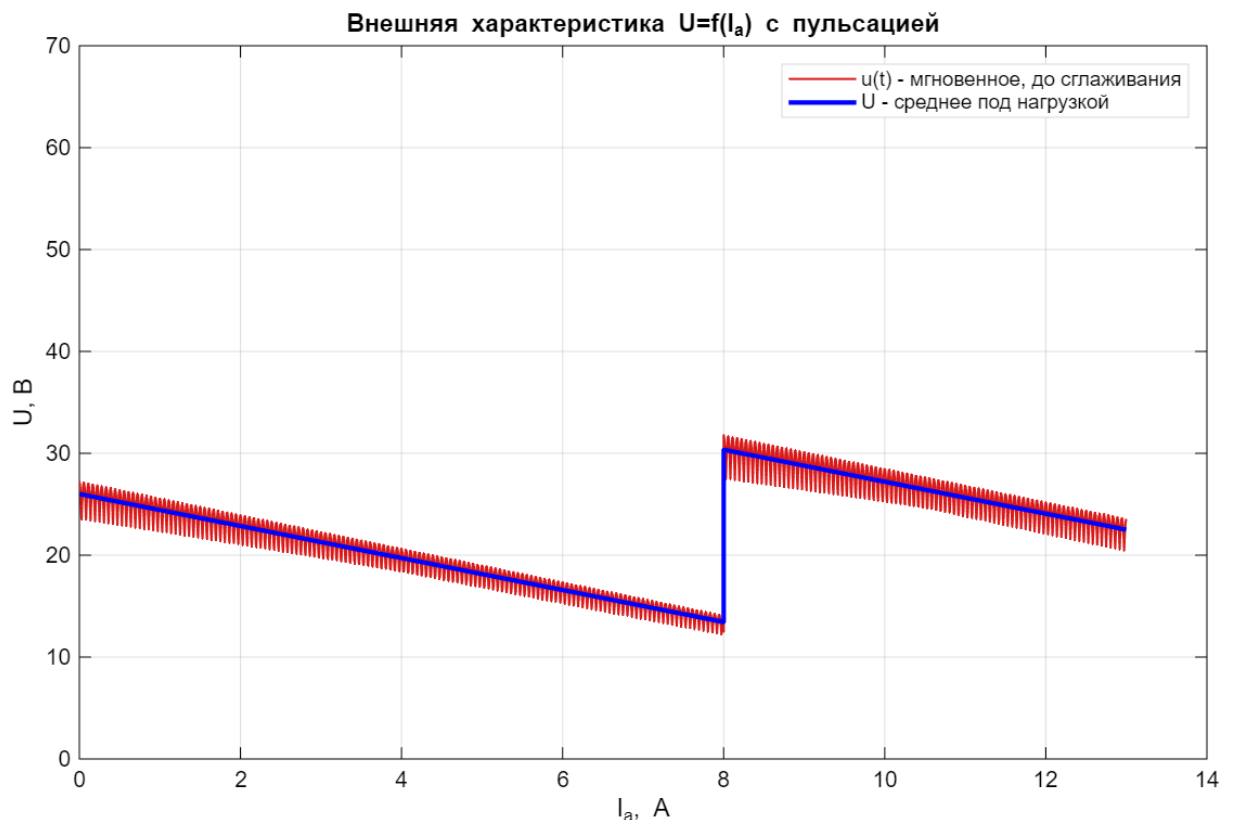


Рисунок 4.11 – Внешняя характеристика по среднему напряжению

Наклон характеристики напряжения равен сопротивлению обмотки якоря при рабочей температуре, то есть 1.5703 В на каждый ампер тока нагрузки, и одинаков в обоих прогонах, поскольку сопротивление от возбуждения не зависит.

Листинг кода для получения данных графиков показан в приложении А настоящего документа.

На рисунке 4.12 приведена примерная характеристика изменения тока возбуждения в зависимости от нагрузки с учетом переключения группы параллельных ветвей якорной обмотки на последовательное соединение.

Из рисунка 4.12 видно, что с увеличением нагрузки ток возбуждения увеличивается с учетом поддержания напряжения в заданном режиме. Такое увеличение происходит до отметки тока 8 А. В этой точке группа параллельных ветвей якорной обмотки соединяются последовательно и напряжение резко увеличивается, соответственно ток возбуждения заметно снижается. Дальнейшее увеличение тока возбуждения связано с увеличением нагрузки.

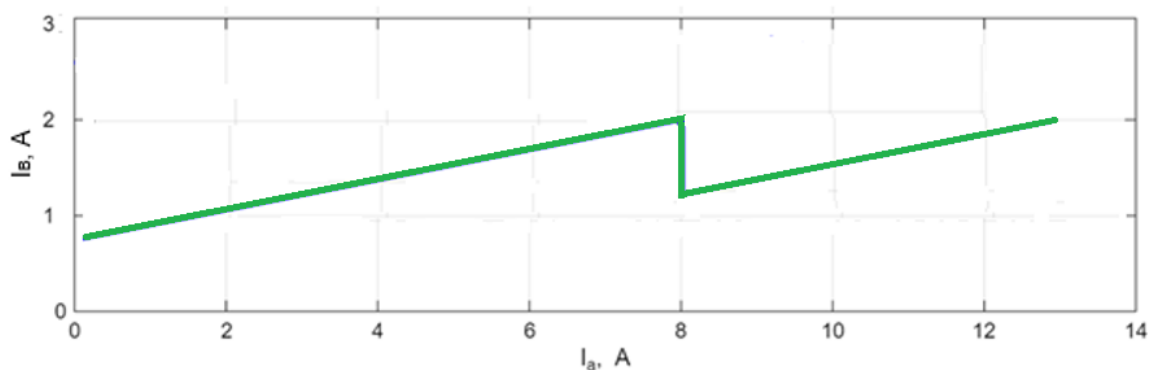


Рисунок 4.12 – Изменение тока возбуждения на внешней характеристике ВГШД

Следует отметить, что принятые допущения в данной имитационной модели позволяют получить характеристики тока возбуждения близкой к прямолинейной зависимости.

4.3 Схема автоматического регулирования тока возбуждения

Неотъемлемой частью синхронных генераторов является технические средства для регулирования тока возбуждения. Регулируемый источник постоянного тока для питания обмотки возбуждения называют системой возбуждения (СВ).

Для нормальной работы синхронных генераторов ток возбуждения должен регулироваться по определенному закону, который реализуется с помощью устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [70].

На рисунке 4.12 приведена схема автоматического регулирования тока возбуждения в зависимости от значения напряжения на выводе ВГШД или частоты его вращения, которая зависит от скорости ветра.

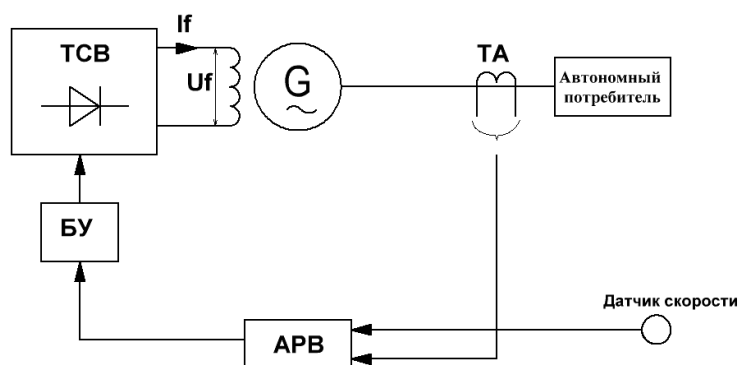


Рисунок 4.12 - Схема автоматического регулирования тока возбуждения ВГШД в зависимости от скорости ветра

АРВ является многофункциональным устройством и с его помощью решаются задача: поддержание напряжения на выводах генератора и

обеспечения изменения напряжения по определенному закону в зависимости от скорости ветра для локального и стабильного энергообеспечения нужд хозяйств отдаленных от централизованного электроснабжения.

4.4 Алгоритм управления режимов работы ВГШД

На рисунке 4.13 приведен упрощенный алгоритм управления работой ВГШД.

Данный алгоритм предназначен для стабилизации выходного напряжения генератора при изменении частоты вращения ВГШД при различных режимах его работы.

В процессе работы ВГШД непрерывно контролируются следующие основные параметры:

- выходное напряжение;
- частота вращения ротора;
- ток возбуждения.

Дополнительным регулирующим воздействием является изменение схемы соединения групп ветвей якорной обмотки ВГШД.

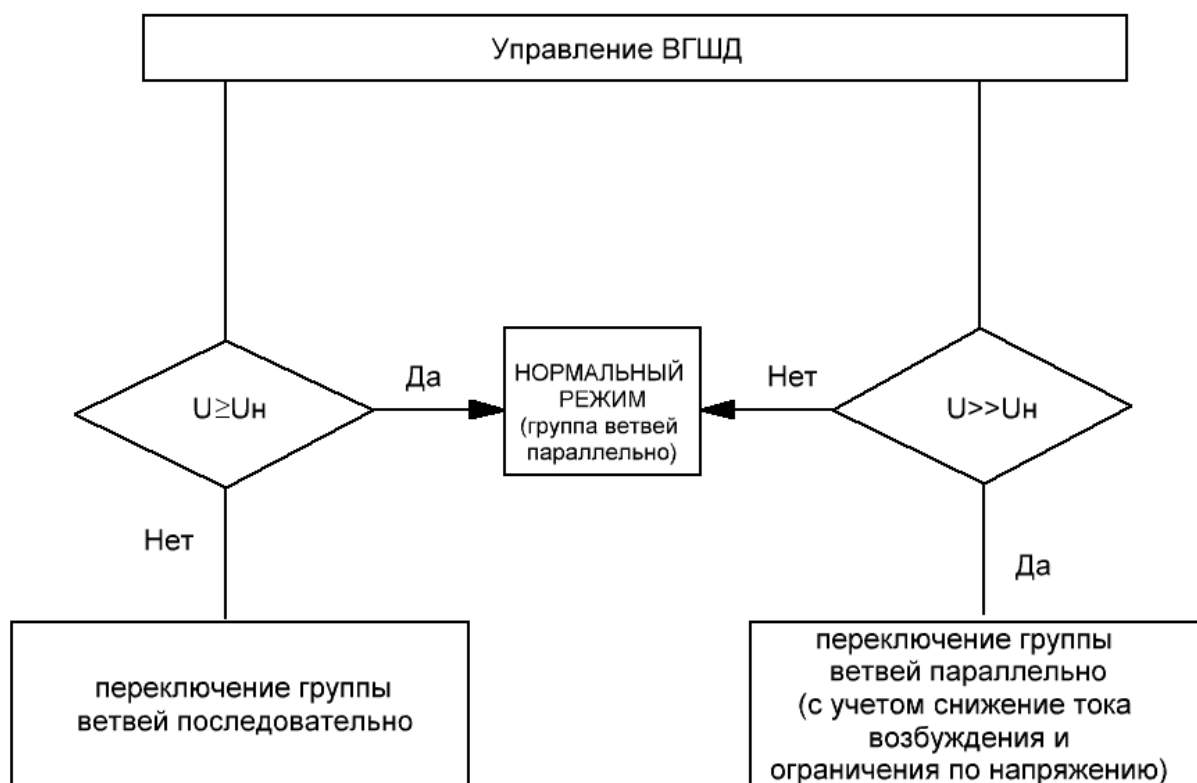


Рисунок 4.13 Алгоритм управления ВГШД

При малой частоте вращения используется режим, обеспечивающий повышение выходного напряжения за счет последовательного соединения этих

групп ветвей. При увеличении частоты вращения осуществляется переход к параллельному соединению групп ветвей, позволяющему увеличить вырабатываемую мощность.

В алгоритме предусмотрен контроль предельных значений напряжения, тока, частоты вращения и температуры силовых элементов. При выходе контролируемых параметров за установленные пределы выполняются соответствующие защитные действия: ограничение тока возбуждения и мощности, изменение схемы соединения обмоток либо отключение нагрузки.

Таким образом, разработанный алгоритм объединяет регулирование возбуждения, переключение параллельных ветвей и защиту ВГШД. Это обеспечивает поддержание требуемого выходного напряжения и устойчивую работу генератора при изменении скорости ветра и нагрузки.

Выводы по разделу.

Разработана имитационная модель ВГШД на основе пакета MatLab Simulink. При разработке модель-симулятора использована среда моделирования Simulink/Simscape Electrical. Все компоненты системы моделируются с использованием специализированных блоков библиотеки Specialized Power Systems.

Учитывая особенности работы ВГШД при изменении скорости вращения, на имитационной модели представлены два самостоятельных синхронных генератора. Каждый из этих генераторов отличается своими характеристиками, которые определяются способами соединений параллельных ветвей их якорных обмоток. Вырабатываемое напряжение переменного тока каждой группы параллельных ветвей выпрямляются на диодных блоках и на нагрузку в соответствии со схемой соединения групп параллельных ветвей.

При получении характеристик изменения напряжения внесены в программу на MatLab допущения и границы применимости модели. Кривые изменения напряжения и тока возбуждения при переключении группы параллельных ветвей рассчитаны по среднему значению.

Программа на MatLab для расчета внешних характеристик ВГШД приведена в Приложении Г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Казахстане прослеживается тенденция развития малой ветроэнергетики, что подтверждается растущим объемом заявок от потенциальных потребителей на размещение малых ветровых электростанций непосредственно на фермерских хозяйствах, отдаленных на значительные расстояния от населенных пунктов. Установлено, что для автономного электроснабжения таких объектов рекомендуется применять МВЭС вертикально-роторного типа, способных работать при широком диапазоне изменения скорости ветра и любых их направлениях.

Расчетно-аналитическими методами обоснована концепция повышения КИУМ ВВТ на основе выработки дополнительной электроэнергии.

Одним из главных элементов МВЭС является электромеханический преобразователь механической энергии в электрическую энергию. От степени согласованности его энергетических характеристик с энергетическими характеристиками ветродвигателя зависит производительность ветроэлектростанции. Поэтому, одним из требований, предъявляемых к таким преобразователям, является обеспечение постоянства выходного напряжения при переменной частоте их вращения.

На основании теоретических и экспериментальных исследований в данной работе разработан ВГШД, способный выдавать относительно стабильное напряжение при широком диапазоне изменения частоты вращения за счет переключения вновь созданных групп параллельных ветвей якорной обмотки. Приведены схемы перемотки ветвей в пазах якоря генератора и методика их расчета.

Собрана физическая модель ВГШД и принципиальная схема ее испытаний при различных режимах работы. Даны характеристики элементов испытательного стенда и используемых электроизмерительных приборов.

Разработаны математические модели ветродвигателя и ВГШД с учетом перемотки якорной обмотки. Проведено имитационное моделирование ВГШД на основе пакета MatLab Simulink. При разработке модель-симулятора использована среда моделирования Simulink/Simscape Electrical. Все компоненты системы моделируются с использованием специализированных блоков библиотеки Specialized Power Systems.

По результатам экспериментальных исследований построены специальные графики холостого хода, а также регулировочные и внешние характеристики ВГШД. Разработана программа на MatLab для расчета внешних характеристик ВГШД.

Проведенные исследования показали, что стабилизацию выходного напряжения ВГШД, при изменении частоты вращения в широком диапазоне, можно осуществлять двумя взаимосвязанными способами: переключением групп параллельных ветвей якорной обмотки на последовательное или параллельное соединение в зависимости от частоты вращения и регулированием тока возбуждения на заданной ступени соединения. Первый

способ представляет собой дискретный (ступенчатый) шаг регулирования напряжения, а второй – более плавный способ стабилизации напряжения за счет регулирования тока возбуждения в сравнительно малых пределах. Последнее позволяет исключить перегрев обмоток якоря и магнитопровода.

Установлено, что при снижении частоты вращения ВГШД группы ветвей якорной обмотки целесообразно переключать на последовательное соединение, а при увеличении частоты вращения – на параллельное. При этом напряжение на ступени последовательного соединения может значительно увеличиться и обеспечить его стабилизацию при малых скоростях ветра.

Результаты экспериментов подтвердили правильность теоретических выводов и реальную работоспособность ВГШД по стабилизации вырабатываемого напряжения при широком диапазоне изменения скорости ветровых потоков. Полученные экспериментальные данные имеют интерес с научной и практической точки зрения, что подтверждается полученными патентами (Приложение Ж) и опубликованными научными статьями в рецензируемых зарубежных и отечественных изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК.

Следует отметить, что в качестве ВГШД можно использовать новые или бывшие в употреблении синхронные генераторы, что повышает уровень ее коммерциализации.

Предложенные технологии создания ВГШД и его конструкторская документация могут успешно применяться на отдаленных объектах сельского хозяйства и других отраслей экономики, где не подведены линии электропередачи от крупных энергосистем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Концепция по переходу Республики Казахстан к «зеленой экономике»: Указ Президента Республики Казахстан от 30 мая 2013 года № 577.
- 2 Концепция развития сельских территорий Республики Казахстан на 2023-2027 годы // Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 г. № 27.
- 3 Кешуов С.А., Байсенова Г.С., Молдыбаева Н.И. Синтез структуры систем автономного энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии / Вестник АУЭС, №51., Алматы, 2020.- С.27-40. <https://vestnik.aues.kz/index.php/none/article/view/208/52>
- 4 Шерьязов С.К., Исенов С.С., Искаков Р.М., Кайдар А.Б. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений / ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021.- Т. 23. № 5. С. 24-33. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-24-33.
- 5 Болотов А.В. Использование энергии ветра, перспективы ветроэнергетики Казахстана и мировые тенденции // Вестник Алматинского института энергетики и связи. - Алматы, 1999.-№3 - С.53-63.
- 6 Дюсебаев И.М., Аскарлов Е.С., Жанкельды А.Ж. Исследование направлений развития совершенствования конструкции ветровых установок с вертикальной осью вращения ветрового колеса // Вестник КазАТК. – Алматы, 2020. –№1(112). – С. 241–247.
- 7 Воронин С.М., Украинцев М.М. Автономные системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии для сельских объектов //Вестник аграрной науки Дона.2022, Т.15 №4(60). С.82-94;
- 8 И.Т. Алдибеков, К.Т. Тергемес, С.К. Шерьязов, А.Р. Карасаева. Обоснование состава и параметров автономной электростанции для фермерских хозяйств Алматинской области / Вестник АУЭС. 2(57), 2022, С. 32-47 <https://vestnik.aues.kz/index.php/none/article/view/541/157>
- 9 А. М. Каримов, В. О. Чередов, Ш. Д. Абуова. Оценка ветрового потенциала в пределах Республики Казахстан для выработки электроэнергии // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. – Алматы, 2016. – вып. 1, №359,- С. 40 - 49.
- 10 Shigemitsu T., Fukutomi J., Toyohara Y. Performance and Flow Condition of Cross-Flow Wind Turbine with a Symmetrical Casing Having Side Boards // International Journal of Fluid Machinery and Systems.- Vol. 9, No. 2, April-June 2016.- С.169-174.
- 11 Shigemitsu T., Fukutomi J., Takeyamas Y. Study on Performance Improvement of Cross-Flow Wind Turbine with Symmetrical Casing. Vol. 4, No. 3, 2009. (490-501 cnh.)
- 12 Болотов А.В. Энергия великой степи-энергия для всех // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. - Алматы, 2016.- № 2 (60).- С.47-55.

- 13 Болотов А.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Алматы: Алматинский университет энергетики и связи. 2004.- 79 с.
- 14 Dyussebayev I.M. Methodological basis for the application of wind generators in geology // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. series of geology and technical sciences. – 2022. – № 451. – P.115-125.
- 15 N.S. Buktukov, B.ZH. Buktukov, & G.ZH. Moldabayeva. (2019). EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SELF-REGULATING WIND POWER PLANTS. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences, (4), 5–9. <https://journals.nauka-nanrk.kz/reports-science/article/view/1581>
- 16 Andreas Wibowoa, Dominicus Danardono Dwi Prija Tjahjana, Budi Santosoc, Marcelinus Risky Clinton Situmorangd. Study of Turbine and Guide Vanes Integration to Enhance the Performance of Cross flow Vertical Axis Wind Turbine // AIP Conference Proceedings 1931, 030043 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5024102>.
- 17 Y. C. Lim, W. T. Chong, F. B. Hsiao. Performance Investigation and Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine with the Omni-Direction-Guide-VaneAIP // Conference Proceedings 1931, 030045 (2018); Published Online: 09 February 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5024104>.
- 18 Шеръязов С.К., Тергемес Т.К., Джаканова Г.Т. Ветроэлектрическая станция в системе сельского электроснабжения / Международная научно-техническая конференция //Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование: электронный сборник научных статей по материалам конференции: Казань: КГЭУ, 2023. – Т. 1. – С.609-612 с.
- 19 BloombergNEF. (2020, December 16). Battery pack prices cited below \$100/kWh for the first time in 2020, while market average sits at \$137/kWh. BloombergNEF.
- 20 Chen, G.; Ji, Z. A Review of Solar and Wind Energy Resource Projection Based on the Earth System Model. Sustainability 2024, 16, 3339. <https://doi.org/10.3390/su16083339>
- 21 Dongre B., Pateriya R.K. Adaptive filter-based power curve modeling to estimate wind turbine power output Wind Eng. (2019), 10.1177/0309524X19868427.
- 22 Al-Abed Allah MY. Feasibility Analysis of Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems in Dhahran and Bisha, Saudi Arabia. Journal of Ecological Engineering. 2024;25(9):260–271. doi:10.12911/22998993/191435.
- 23 Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. - 280 с.
- 24 Болотов А.В., Никитина Е.В. К обоснованию выбора принципиальной схемы ВЭС. //Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: Сборник научных трудов 2-й межд. науч.-тех. конф.- Алматы, - 2000.- С.145-146.
- 25 Басин О.Г., Никитина Е.В., Уткин Л.А. Сравнительный анализ ветроэлектростанций пропеллерного и виндоторного типов // Энергетика,

телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: Сборник трудов 1-й межд. науч.-тех. конф. -Алматы, 1998. - С.158-159.

26 Уткин Л.А., Приходько В.Р. Технические характеристики ветроэнергетических станций //Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 5-й межд. науч.-тех. конф. - Алматы, 2006. - С.180-185.

27 Kurniawati D.M., Danardono D., Tjahjana D.P., Santosoc B. Experimental investigation on performance of crossflow wind turbine as effect of blades number. <https://doi.org/10.1063/1.5024104>.

28 Tareq A. Ismaeel, Sattar Aljabair, Omar A. Abdulrazzaq, Yasir A. Abood. Energy recovery of moving vehicles' wakes in highways by vertical axis wind turbines. FME Transactions.VOL. 48, No 3, 2020.563 <https://www.researchgate.net/publication/342121815>

29 Патент RU2352809C1 Российская Федерация. Ветроэнергетический агрегат Болотова / Болотов А. В., Болотов С. А., Болотов Н. С. опубл. 2009-04-20. <https://patents.google.com/patent/RU2352809C1>.

30 Gasch R., Twele J. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Second Edition // Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012. DOI 10.1007/978-3-642-22938-1.

31 Бакенов К.А. Электромеханический преобразователь для ветроэлектроустановки: Диссертация на соискание степени кандидата технических наук 05.09.01 / АУЭС. Алматы, 2010. - 139 с.

32 Osuji Christopher Uche & Onwughalu Mark Anthony Kenechi. Renewable Energy Solution of Wind Turbine Using Doubly-Fed Induction Generator for Energy Efficiency and Reliability. International Journal of Advanced Studies in Engineering and Sci-entific Inventions. Volume 5, Number1 June, 2024. DOI: 10.48028/ijprds/ijasesi.v5.i1.13.

33 M. A. Hannan, Ali Q. Al-Shetwi, M. S. Mollik, Pin Jern Ker , M. Mannan, M. Mansor, Hussein M. K. Al-Masri, T. M. Indra Mahlia. Review: Wind Energy Conversions, Controls, and Applications: A Review for Sustainable Technologies and Directions. Sustainability 2023, 15, 3986. <https://doi.org/10.3390/su15053986>.

34 Tadakazu Tanino, Ryo Yoshihara and Takeshi Miyaguni. A Study on a Casing Consisting of Three Flow Deflectors for Performance Improvement of Cross-Flow Wind Turbine. Energies 2022, 15(16), 6093; <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/6093>

35 Agimov T., Umbetkulov Y., Bakenov K., Nekrasov A., Ongar B. Development of a valve generator with a variable frequency of rotation // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan / Series of geology and technology sciences. –Almaty, 2019.-Volume 3, Number 435. – p.180–188. DOI: 10.32014/2019.2518-170X.84, /<http://geolog-technical.kz/images/pdf/g20193/180-188.pdf>

36 T. Agimov, K.Bakenov, Yer. Umbetkulov, A.Soltanayev, Sh.Rashidov, G.Manapova. Performance enhancement of a cross-flow turbine using a

synchronous generator with a multistage rectifier / Clean Energy Science and Technology. 2025; 3(4): 517. doi.org/10.18686/cest517.4

37 Т.Н. Агимов, К.А. Бакенов, Е.К. Умбеткулов, А.М. Солтанаев. Повышение коэффициента использования установленной мощности вертикальной ветряной турбины / Вестник АУЭС - Алматы: №2(73). 2026.- С.44 -55.

38 Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Режимы работы синхронного генератора инверторной дизельной электростанции. ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия.

39 Герасимов А., Толмачев В., Уткин К. Дизель электростанции. Работа при переменной частоте вращения дизеля // Новости электротехники. Санкт-Петербург. 1 (103) 2017.

40 Обухов С.Г., Плотников ИА. Экспериментальное исследование дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. - 2015. Т.326 №6. – С.95-102 .

41 Завалишин В.В. Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установкой с переменной частотой вращения дизеля // Вестник СГТУ. – 2010. -№3 (46). – С.128-136.

42 Tajuddin Waris, Variable Speed Constant Frequency Diesel Power Conversion System Using Doubly Fed Induction Generator (DFIG) PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference · July 2008 pp:2728-2734

43 Обухов С.Г., Сипайлов Н.Ю., Плотников И.А., Сипайлов А.Г. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе инверторной дизельной электростанции // Известие высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. №5. – С.41-45.

44 Wang, R., Qin, S., Bao, W., Hou, A., Ying, Y., Ding, L., 2023. Configuration and control strategy for an integrated system of wind turbine generator and supercapacitor to provide frequency support. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 154, 109456. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109456>

45 Mustafa Ergin Şahin, Frede Blaabjerg, Ariya Sangwongwanich, A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments, Energies, 2022, 15(3), 674; <https://doi.org/10.3390/en15030674>

46 Башкиров В.М., Сидельковский В.С. Энергетические характеристики воздушного потока и регулирования ветроэнергетических агрегатов. //Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 5-ой межд. науч.-тех. конф.- Алматы, 2006. - С.195-198.

47 Костырев М.Л. Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. -М.: Энергоатомиздат, 1993. - 159 с.

48 Хватов С.В., Титов В.Г., Поскробков А.А, Цыпкайкин В.Ф. – Асинхронные вентильные нагрузочные установки.-М.: Энергоатомиздат, 1986.-144 с.

49 Болотов А.В., Русанов В.В. Особенности электроснабжения современных объектов с использованием ветроэлектростанций (общие

проблемы). //Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: Сборник научных трудов 2-й межд. науч.-тех. конф.- Алматы, 2000. - С.148-150.

50 M. Godoy Simoes, Felix A. Farret. Alternative energy systems: Design and Analysis with Induction Generators. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742. (452 стр.)

51 Ashraf K., Abdelaal, Mohamed A., El-Hameed. Strengthening Low-Voltage Ride Through Competency of Doubly Fed Induction Generator Driven by Wind Turbine Using Super-Twisting Sliding Mode Control. Energies 2025, 18, 1954.

52 К.А. Бакенов, Е.К. Умбеткулов, Т.Н. Агимов, Ш.У. Рашидов. Стабилизация напряжения вентильного генератора при широком диапазоне изменения частоты вращения // Вестник АУЭС.- Алматы, 2024. - №3(66).- С.25-36. <https://vestnik.aues.kz/index.php/none/article/view/1052/274>

53 Куницкая О. А., Помигуев А. В., Афоничев Д. Н., Григорьев В. И., Дмитриева И. Н., Григорьев Г. В. Альтернативные источники энергии для автономного энергоснабжения удаленных объектов сельского хозяйства и лесного комплекса. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022;15(1):71-81. DOI: https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_71

54 Titkov V. V., Bekbayev A. B., Munsyzbai T. M., Shakenov K. B. Construction of autonomous buildings with wind power plants. Magazine of Civil Engineering. 2018;4(80):171-180. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.80.15>

55 Васильев И. А., Кольниченко Г. И., Тарлаков Я. В., Сиротов А. В. Возобновляемые источники энергии в автономных источниках электроснабжения. Лесной вестник. 2020;24(4):91-97. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-91-97>

56 Tsgoev R., Isaev T. Energy Efficiency of Wind Electical Plant Models Localized in the Russian Federation on the Repeatability Function of Wind Speed. Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, Sochi, 16-20 May 2022. Sochi, 2022. pp. 176-180. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787268>

57 Бороденков Е. В., Слисаренко С. Ю., Литвин В. И. Применение ветроэнергетической установки с аккумулярованием энергии для автономного энергоснабжения объектов сельского хозяйства. Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации: мат-лы Международ. научн.-практ. конф., Балашиха, 19 мая 2022 года. Балашиха: Российский государственный аграрный заочный университет, 2022. С. 99-103. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49046859&pff=1>

58 Воронин, С.М. Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на возобновляемых источниках энергии: монография / С.М. Воронин. – Зеленоград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2010. – 304 с.

59 Эрк, А.Ф. Методы повышения надежности энергообеспечения крестьянских (фермерских) хозяйств / А.Ф. Эрк, В.Н. Судаченко//Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – №88. – С. 53–59.

60 S. Harrington, J. Dunlop, Battery charge controller characteristics in photovoltaic systems, aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, Volume: 7, Issue: 8, p, 15 – 21, 1992.

61 Как правильно заряжать аккумулятор в циклическом режиме. <https://wybor-battery.kz/blog/stati/kak-pravilno-zaryazhat-akkumulyator-v-ciklicheskom-rezhime>

62 Lead Acid Battery Voltage Chart - Nature's Generator.- Jan 24, 2023 <https://naturesgenerator.com/blogs/news/lead-acid-battery-voltage-chart?srsId=AfmBOoq1fyd3B6U9E4vevWAs2Jd2tqIhbqTt8BbRXDAtlzpzGBuLuuNb>

63 Об аккумуляторных батареях <https://dealanenergo.ru/Statiy/o-akkumulyatornykh-batareyakh?ysclid=movofitlni413125088>

64 Василевский В.И., Купеев Ю.А. Автомобильные генераторы. – 2-е. изд. перераб. и допол. - М.: Транспорт, 1978. – 158 с.

65 Патент РК №8086. Вентильный генератор. /Новокшенов В.С., Болотов А.В., Ганага Е.Ф., Бакенов К.А.: опубл. 15.12.03, Бюл.№12. – 5с. ил.

66 Универсальный генератор / Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А., Агимов Т.Н. - Патент на полезную модель РК.- №3260 от 17.10.2018.

67 Трехфазный синхронный генератор ветроустановки для зарядки аккумуляторов / Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А., Агимов Т.Н., Рашидов Ш.У., Солтанаев А.М. - Патент на полезную модель РК.- №9750 от 05.09.2024.

68 И.В. Черных Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – С.172-175.

69 Файзиев М.М., Курбанов Н.А., Имомназаров А.Б., Бобоназаров Б.С., Бекишев А.Е. Моделирование неявнополюсного синхронного генератора в Matlab. – М.: Вестник науки и образования 2017 №5(29) Том1, С.10-14

70 Автоматическое управление энергетическими системами в нормальных и аварийных режимах: учебное пособие. Часть 1/ Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, И.М. Кац: Томский политехнический университет.-Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013.- 111с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Рисунок 1А – ВВТ (ВРТБ, 2 кВт)
для питания объекта «Кожаказган»



Рисунок 2А - ВВТ (ВРТБ, 2,5 кВт)
на площадке ТОО «Машзавод»



Рисунок 3А - Джунгарские ворота, ВВТ (ВРТБ-
3 кВт) для АО «Транстелеком» в г.Достык.



Рисунок 4А – Два ВВТ (ВРТБ) по 5 кВт
для резервного питания объекта «Лесной
кордон», Акмолинской области

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчеты рабочих характеристик ветродвигателя ВВТ на Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	Диаметр ротора	Dro	0,175 m																					
2	Диаметр направляющего	Dn	0,228 m																					
3	Высота ВД	Hn	0,54 m																					
4	коэффициент торможения	ktor	0,5																					
5	плотность воздуха	ro	1,225 кг/м3																					
6	кпд	kpd	0,34																					
7	Скорость ветра	V	m/s	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
8	Теоретическая мощность ветра	Pwind	Wt	2	5	9	16	26	39	55	75	100	130	165	206	254	308	370	439	516	602	697	801	
9	Расчетная мощность ВД	Pwg	Wt	1	2	3	6	9	13	19	26	34	44	56	70	86	105	126	149	175	205	237	272	
10	частота вращения хх	nhh	ob/min	327	437	546	655	764	873	982	1091	1200	1310	1419	1528	1637	1746	1855	1964	2074	2183	2292	2401	
11	частота вращения нагрузке	nn	ob/min	164	218	273	327	382	437	491	546	600	655	709	764	819	873	928	982	1037	1091	1146	1200	
12	Момент	wn	rad/s	17	23	29	34	40	46	51	57	63	69	74	80	86	91	97	103	109	114	120	126	
13		n0	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	
14		n03	0,3	0	1	2	4	6	8	12	17	22	29	36	45	56	68	81	97	114	133	154	177	
15		n04	0,4	1	1	3	5	8	12	17	23	31	40	50	63	77	94	113	134	157	183	212	244	
16		nn	0,55	1	2	3	5	9	13	18	25	34	44	56	69	85	104	124	148	174	203	235	270	
17		n07	0,7	1	1	3	5	7	11	16	21	29	37	47	59	73	88	106	125	147	172	199	229	
18		n08	0,8	0	1	2	4	6	8	12	16	22	28	36	45	55	67	80	95	112	131	152	174	
19		n09	0,9	0	1	1	2	3	5	7	9	12	16	20	25	31	38	45	54	63	74	85	98	
20		n1	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
21		M0	0,01	0,08	0,14	0,22	0,32	0,44	0,57	0,72	0,89	1,08	1,28	1,50	1,74	2,00	2,28	2,57	2,88	3,21	3,56	3,92	4,31	
22		M03	0,30	0,06	0,11	0,17	0,24	0,33	0,43	0,55	0,68	0,82	0,98	1,15	1,33	1,53	1,74	1,96	2,20	2,45	2,72	2,99	3,29	
23		M04	0,40	0,05	0,09	0,15	0,21	0,29	0,38	0,48	0,59	0,71	0,85	1,00	1,15	1,32	1,51	1,70	1,91	2,13	2,36	2,60	2,85	
24		Mn	0,55	0,04	0,07	0,11	0,16	0,21	0,28	0,35	0,44	0,53	0,63	0,74	0,86	0,98	1,12	1,26	1,41	1,58	1,75	1,92	2,11	
25		M07	0,70	0,02	0,04	0,07	0,09	0,13	0,17	0,21	0,26	0,32	0,38	0,45	0,52	0,59	0,68	0,76	0,85	0,95	1,06	1,16	1,28	
26		M08	0,80	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,14	0,17	0,20	0,23	0,27	0,31	0,35	0,40	0,44	0,50	0,55	0,61	0,66	
27		M09	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
28		M1	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
29		M0	0,01	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	
30		M03	0,3	10,3	13,7	17,1	20,6	24,0	27,4	30,9	34,3	37,7	41,1	44,6	48,0	51,4	54,9	58,3	61,7	65,1	68,6	72,0	75,4	
31		M04	0,4	13,7	18,3	22,9	27,4	32,0	36,6	41,1	45,7	50,3	54,9	59,4	64,0	68,6	73,1	77,7	82,3	86,9	91,4	96,0	100,6	
32		Mn	0,55	18,9	25,1	31,4	37,7	44,0	50,3	56,6	62,9	69,1	75,4	81,7	88,0	94,3	100,6	106,9	113,1	119,4	125,7	132,0	138,3	
33		M07	0,7	24,0	32,0	40,0	48,0	56,0	64,0	72,0	80,0	88,0	96,0	104,0	112,0	120,0	128,0	136,0	144,0	152,0	160,0	168,0	176,0	
34		M08	0,8	27,4	36,6	45,7	54,9	64,0	73,1	82,3	91,4	100,6	109,7	118,9	128,0	137,1	146,3	155,4	164,6	173,7	182,9	192,0	201,1	
35		M09	0,9	30,9	41,1	51,4	61,7	72,0	82,3	92,6	102,9	113,1	123,4	133,7	144,0	154,3	164,6	174,9	185,1	195,4	205,7	216,0	226,3	
36		M1	1	34,3	45,7	57,1	68,6	80,0	91,4	102,9	114,3	125,7	137,1	148,6	160,0	171,4	182,9	194,3	205,7	217,1	228,6	240,0	251,4	

```

function [s1,v1]=krnam(s,v)
i=0;
for s=0:0.01:6;
i=i+1;
v1(i)=8.6016*s;
s1(i)=s
v(i)=v1(i)+13.572;
x(i)=[s1(i)];
y(i)=[v(i)];
end
x1=[0.1; 0.47; 0.78; 1.01; 1.5; 2.04; 3; 3.99; 5.91];
y1=[0.1; 14; 20; 24; 34; 40; 46; 51; 54];
plot(x,y,'b');
hold on
plot(x1,y1,'ro');
grid;
legend('Линейная', 'Эксперимент');
ylabel('Напряжение, В');
xlabel('Ток возбуждение, А');

```

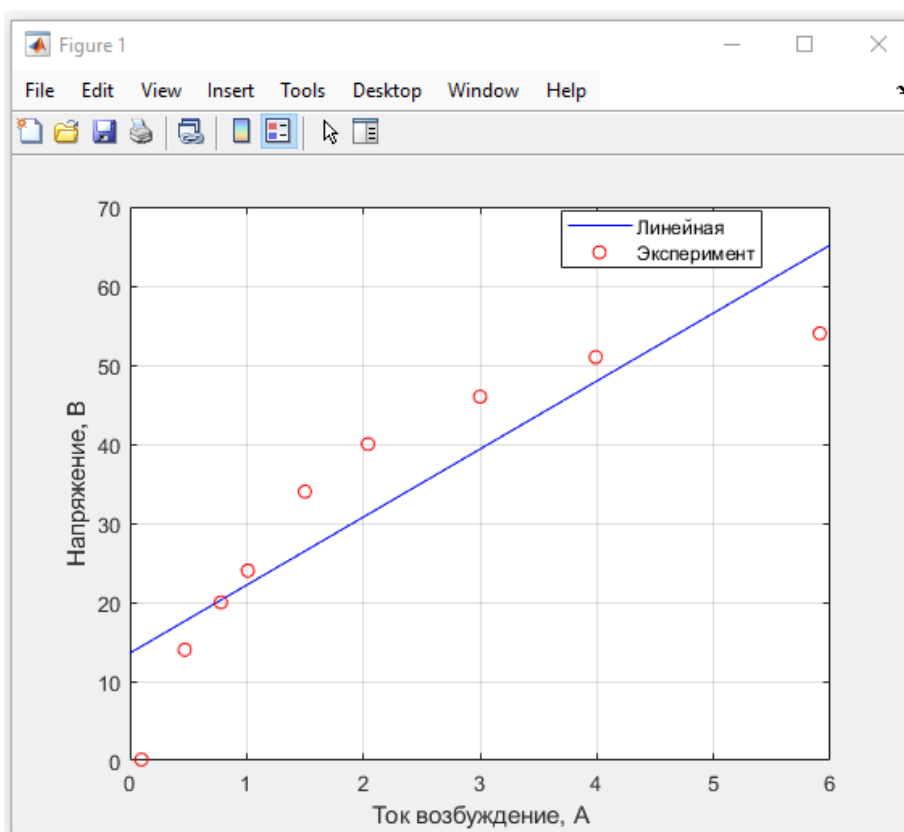


Рисунок 1В – Аппроксимация экспериментальных данных зависимости напряжения ВГШД от тока возбуждения (при частоте вращения 600 об/мин) линейной функцией

```

function [s1,v1]=krnam(s,v);
i=0;
for s=0.14:0.01:6;
i=i+1;
v1(i)=14.379*log(s);
s1(i)=s;
v(i)=v1(i)+28.13;
x(i)=[s1(i)];
y(i)=[abs(v(i))];
end
x1=[0.1; 0.47; 0.78; 1.01; 1.5; 2.04; 3; 3.99; 5.91];
y1=[0.1; 14; 20; 24; 34; 40; 46; 51; 54];
plot(x,y);
hold on
plot(x1,y1,'rh');
grid;
legend('Логарифмическая', 'Эксперимент');
ylabel('Напряжение, В');
xlabel('Ток возбуждение, А');

```

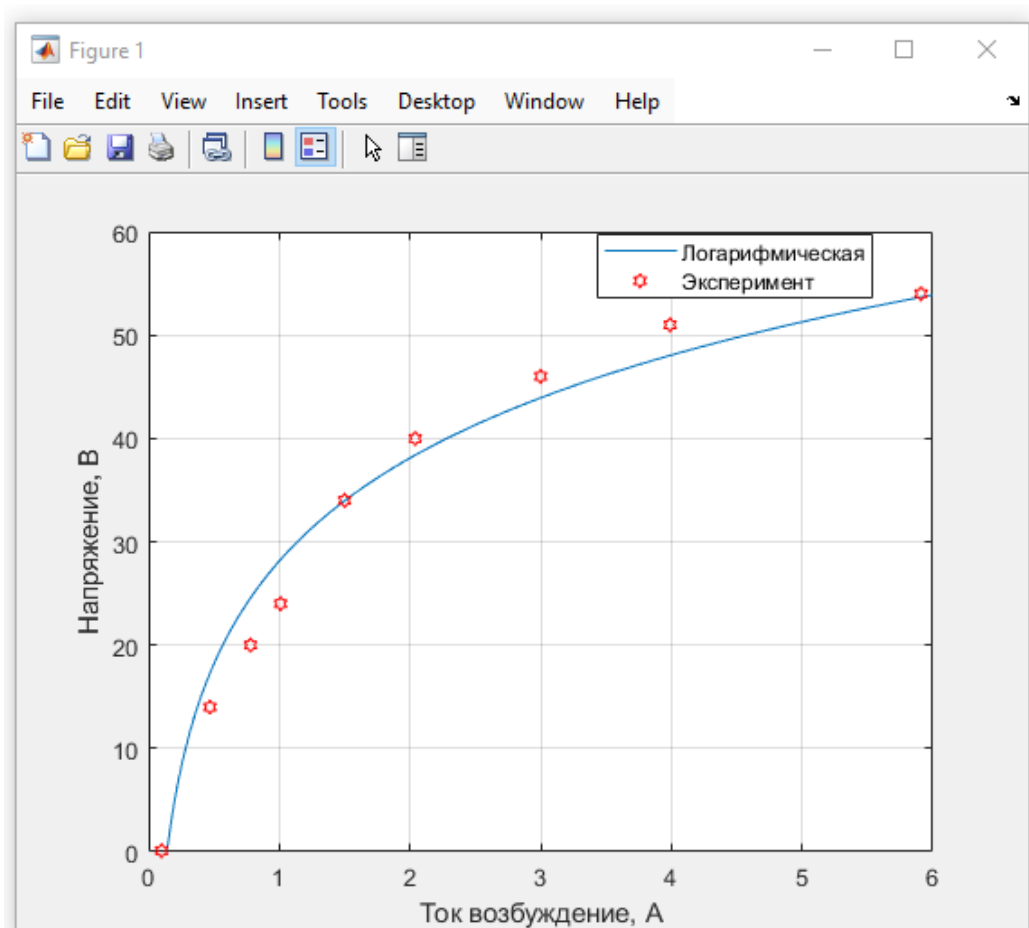


Рисунок 2В – Аппроксимация экспериментальных данных зависимости напряжения ВГЩД от тока возбуждения (при частоте вращения 600 об/мин) логарифмической функцией

```

function [s1,v1]=krnam(s,v)
i=0;
for s=0:0.01:6;
i=i+1;
v1(i)=0.4413*s.^3;
v2(i)=6.161*s.^2;
v3(i)=30.093*s;
s1(i)=s
v(i)=v1(i)-v2(i)+v3(i)+0.32;
x(i)=[s1(i)];
y(i)=[v(i)];
end
x1=[0.1; 0.47; 0.78; 1.01; 1.5; 2.04; 3; 3.99; 5.91];
y1=[0.1; 14; 20; 24; 34; 40; 46; 51; 54];
plot(x,y,'b');
hold on
plot(x1,y1,'mo');
grid;
legend('Полиномиальная', 'Эксперимент');
ylabel('Напряжение, В');
xlabel('Ток возбуждение, А');

```

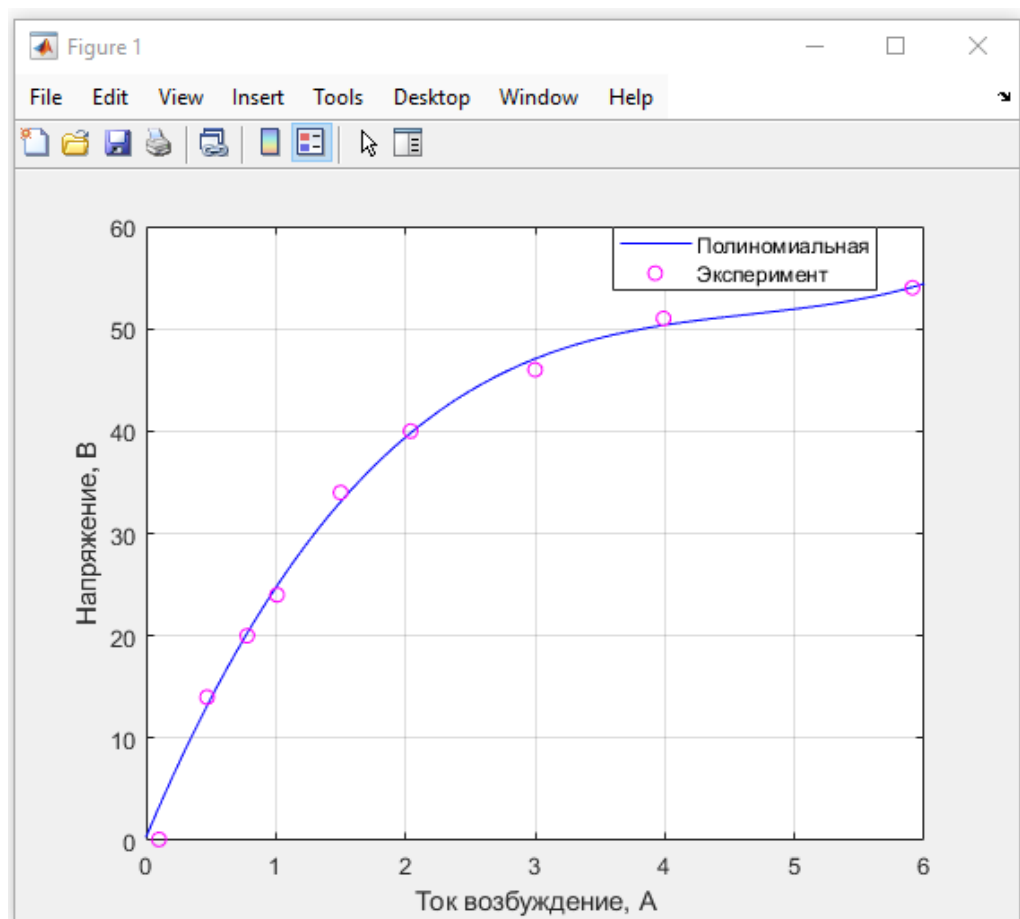


Рисунок 3В – Аппроксимация экспериментальных данных зависимости напряжения ВГЩД от тока возбуждения (при частоте вращения 600 об/мин) полиномиальной функцией

```

function [s1,v1]=krnam(s,v);
i=0;
for s=0:0.01:4;
i=i+1;
v1(i)=25.118*s;
s1(i)=s;
v(i)=v1(i)+18.916;
x(i)=[s1(i)];
y(i)=[v(i)];
end
x1=[0.1; 0.47; 0.78; 1.01; 1.5; 2.04; 3; 3.99];
y1=[0.1; 28; 41; 50; 71; 85; 97; 103];
plot(x,y,'b');
hold on
plot(x1,y1,'ro');
legend('Линейная', 'Эксперимент');
grid;
ylabel('Напряжение, В');
xlabel('Ток возбуждение, А');

```

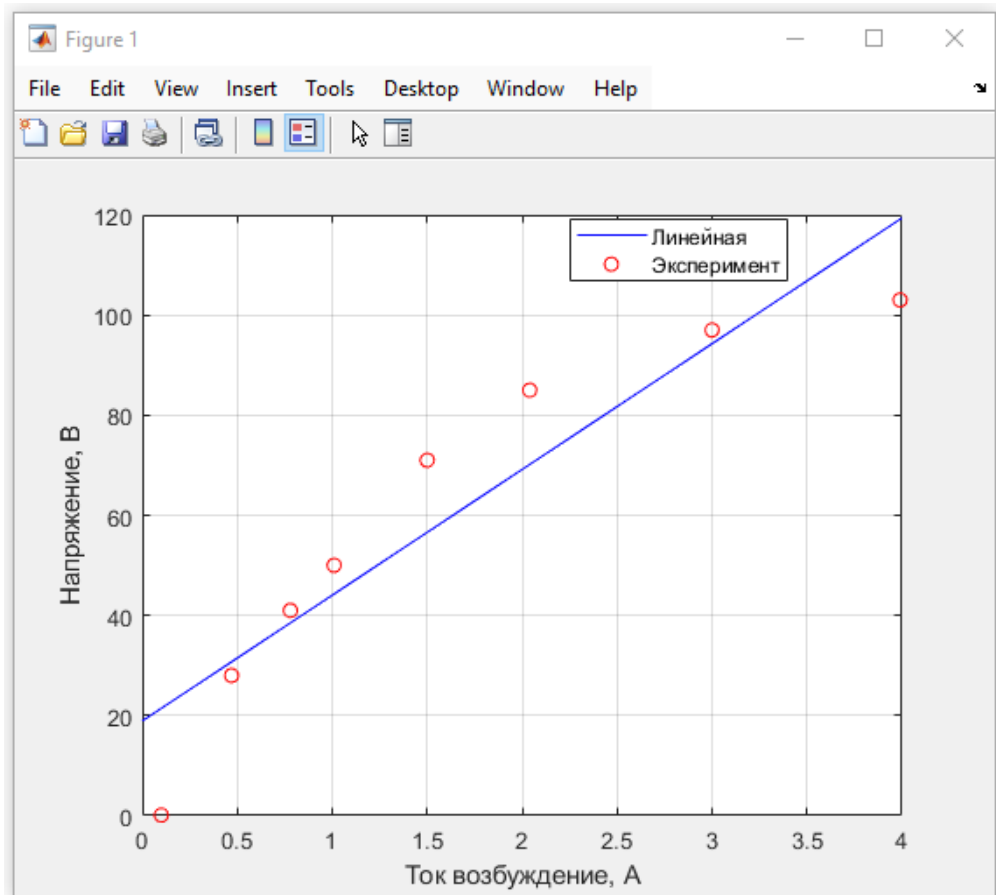


Рисунок 4В – Аппроксимация экспериментальных данных зависимости напряжения ВГЩД от тока возбуждения (при частоте вращения 1200 об/мин) линейной функцией

```

function [s1,v1]=krnam(s,v);
i=0;
for s=0.14:0.01:4;
i=i+1;
v1(i)=29.776*log(s);
s1(i)=s
v(i)=v1(i)+58.253;
x(i)=[s1(i)];
y(i)=[abs(v(i))];
end
x1=[0.1; 0.47; 0.78; 1.01; 1.5; 2.04; 3; 3.99];
y1=[0.1; 28; 41; 50; 71; 85; 97; 103];
plot(x,y);
hold on
plot(x1,y1,'ro');
legend('Логарифмическая', 'Эксперимент');
grid;
ylabel('Напряжение, В');
xlabel('Ток возбуждение, А');

```

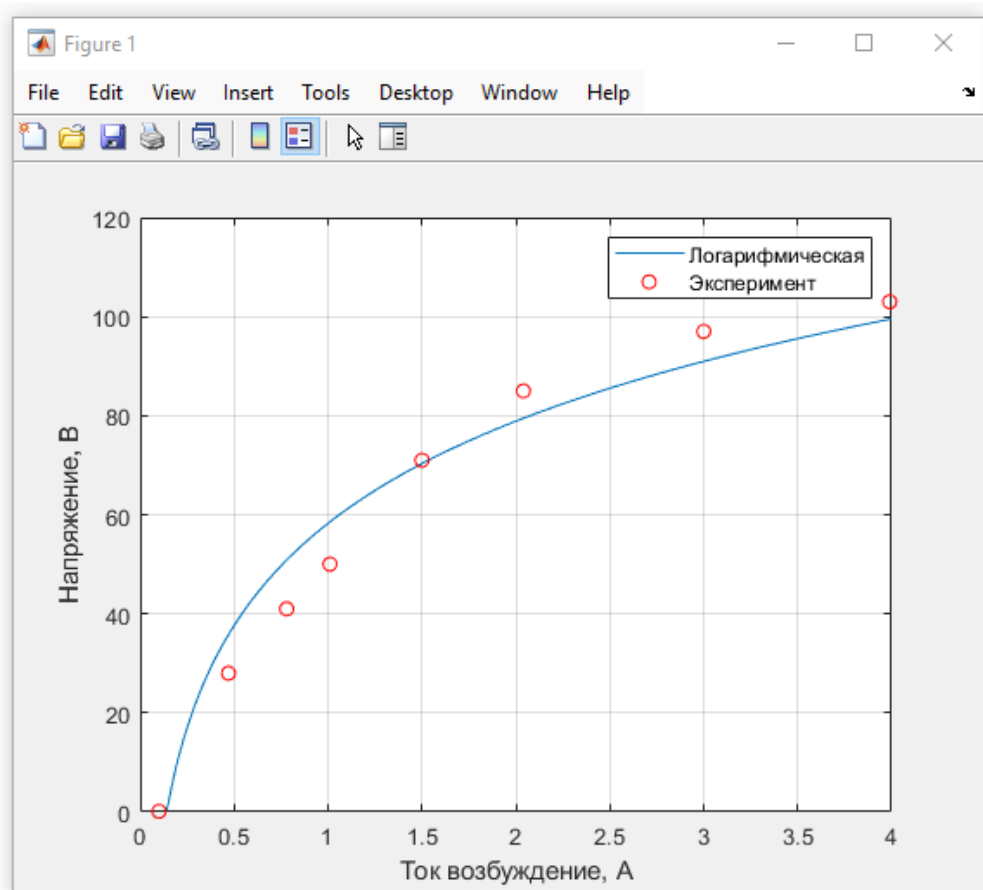


Рисунок 5В – Аппроксимация экспериментальных данных зависимости напряжения ВГЩД от тока возбуждения (при частоте вращения 1200 об/мин) логарифмической функцией

```

function [s1,v1]=krnam(s,v)
i=0;
for s=0:0.01:4;
i=i+1;
v1(i)=1.5023*s.^3;
v2(i)=17.754*s.^2;
v3(i)=74.251*s;
s1(i)=s
v(i)=v1(i)-v2(i)+v3(i)-6.1192;
x(i)=[s1(i)];
y(i)=[v(i)];
end
x1=[0.1; 0.47; 0.78; 1.01; 1.5; 2.04; 3; 3.99];
y1=[0.1; 28; 41; 50; 71; 85; 97; 103];
plot(x,y,'b');
hold on
plot(x1,y1,'ro');
legend('Полиномиальная', 'Эксперимент');
grid;
ylabel('Напряжение, В');
xlabel('Ток возбуждение, А');

```

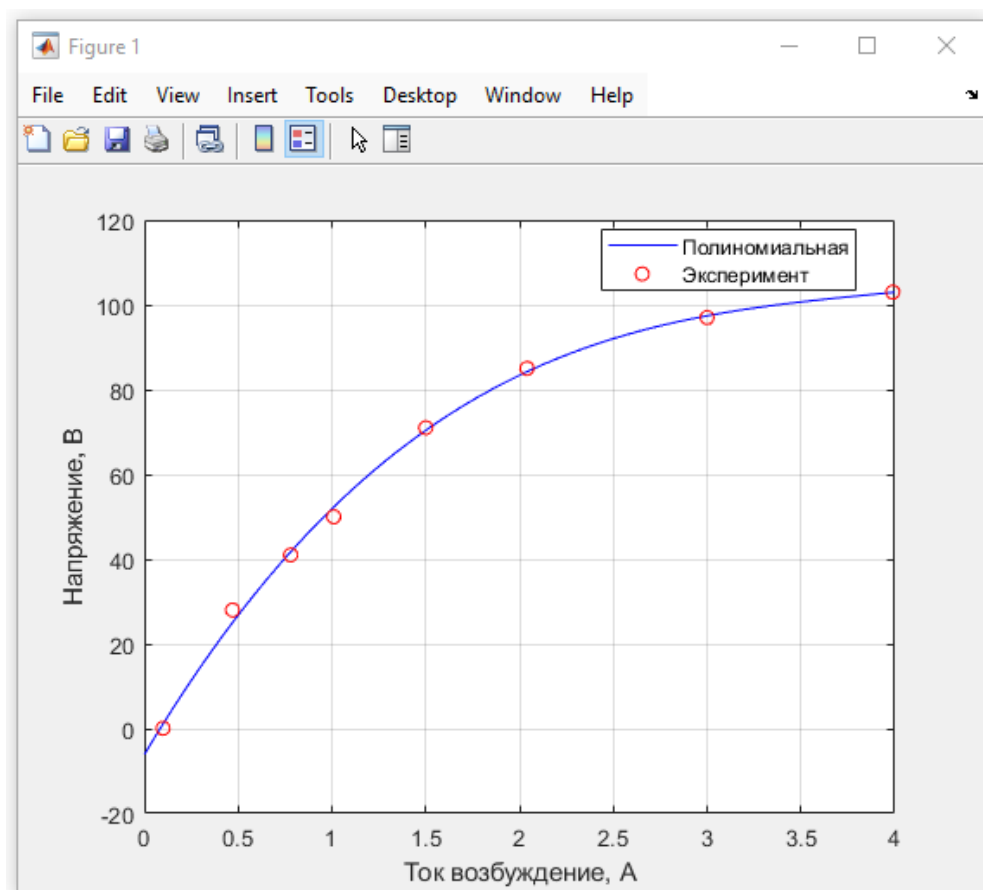


Рисунок 6В – Аппроксимация экспериментальных данных зависимости напряжения ВГЩД от тока возбуждения (при частоте вращения 1200 об/мин) полиномиальной функцией

```

function [s1,v1]=krnam(s,v)
x=[34; 46; 57; 69; 80; 91];
y=[1.11; 0.82; 0.71; 0.73; 0.87; 1.16]
x1=[51.42857; 57.14286; 68.57143; 80; 91.42857; 102.8571; 114.2857;
    125.7143; 137.1429; 148.5714];
y1=[4.17; 5.10; 6.31; 6.89; 7.08; 7.02; 6.79; 6.45; 6.04; 5.58];
v=[34; 46; 57; 69; 80; 91];
u=[3.591; 5.686; 6.489; 6.547; 6.202; 5.642];
v1=[51; 57; 69; 80; 91; 103; 114; 126; 137; 149];
u1=[1.69; 1.47; 1.22; 1.12; 1.13; 1.25; 1.46; 1.79; 2.25; 2.89];
plot(x,y,'bo-');
hold on
plot(x1,y1,'ro-');
plot(v,u,'go-');
plot(v1,u1,'mo-');
grid;
title('Специальная регулировочная характеристика');
ylabel('Ток возбуждение, А');
xlabel('Угловая скорость вращения, рад/с');

```

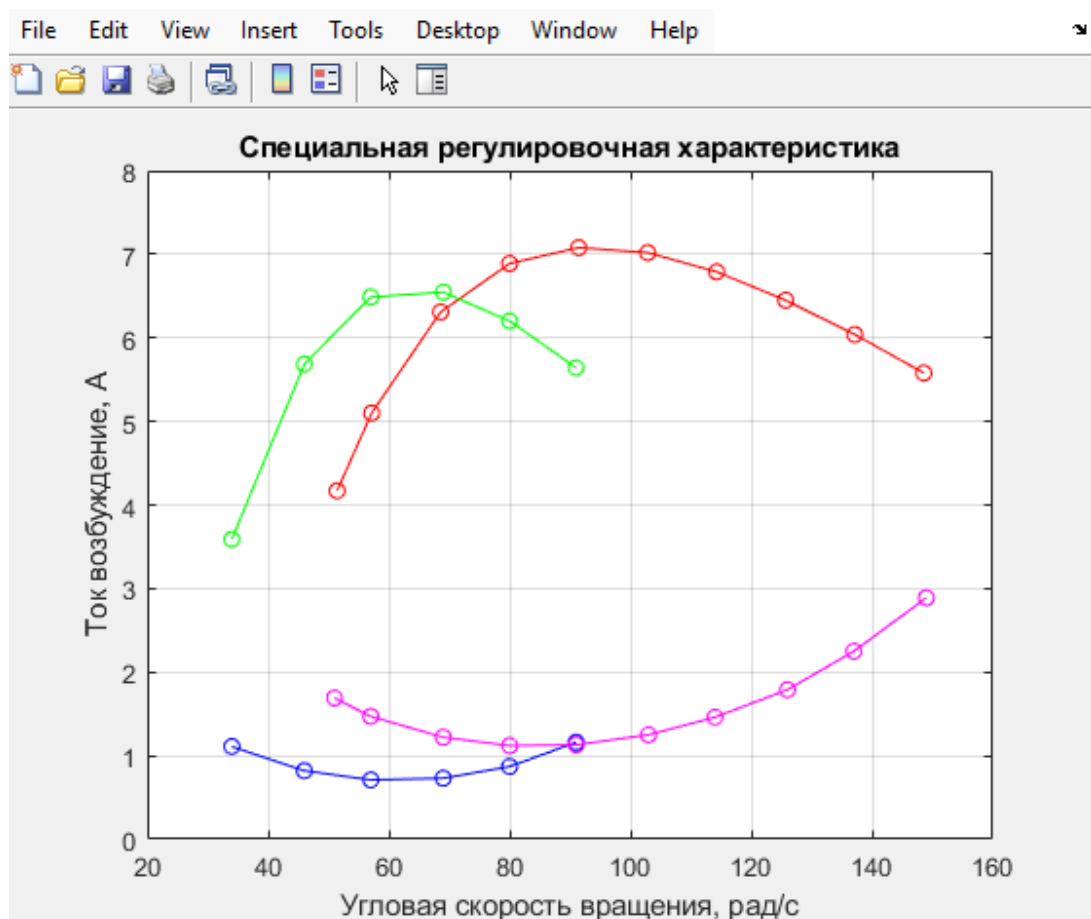


Рисунок 7В – Специальная регулировочная характеристика ВГЩД на MatLab/Simulink

Программа на MatLab для расчета внешних характеристик ВГЩД

```
clear; clc; close all;

%% ===== %%

%  ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА  $U = f(I)$  ПРИ ДВУХ ТОКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ  %%

%% ===== %%

%

% Внешняя характеристика вентильного синхронного генератора Г286В:

% зависимость выпрямленного напряжения от тока нагрузки при постоянной

% номинальной скорости вращения.

%

% Испытание состоит из двух прогонов, различающихся током возбуждения.

% В первом прогоне возбуждение установлено на номинальное значение, ток

% нагрузки увеличивается от нуля ступенями нагрузочного реостата. Во втором

% прогоне возбуждение форсируется до верхнего ограничения, а шкала тока

% продолжается без сброса. В точке переключения напряжение возрастает

% скачком, так как ЭДС пропорциональна току возбуждения.

%

% Скрипт строит две величины:

%   - среднее выпрямленное напряжение под нагрузкой,

%   - мгновенное выпрямленное напряжение с пульсацией и переходными

%     выбросами в моменты включения и переключения возбуждения.

%% ===== %%

%  1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ  %%

%% ===== %%

n_nom = 1200;          % номинальная скорость вращения, об/мин

Ud0    = 26;           % напряжение холостого хода выпрямителя, В

poles = 6;             % число полюсов 2p

% Обмотка якоря

rho20   = 1/57;        % удельное сопротивление меди, Ом*мм2/м
```

```

L_phase = 39.6;           % длина фазы, м
s_prov  = 0.584;          % сечение провода, мм2

Ra20    = rho20 * L_phase / s_prov;
Ra100   = 1.32 * Ra20;    % сопротивление при рабочей температуре 100 С

% Магнитная цепь и возбуждение
ke       = 250;           % конструктивный коэффициент ЭДС, В*с/Вб
Phi_nom  = 2.14e-4;       % номинальный магнитный поток, Вб
If0      = 0.47;          % ток возбуждения холостого хода, А
kf       = Phi_nom / If0; % коэффициент связи потока с током возбуждения, Вб/А
If_max   = 3.0;           % верхнее ограничение тока возбуждения, А

fprintf('\n===== Г286В: внешняя характеристика U=f(I) =====\n');
fprintf('Ra100 = %.4f Ом\n', Ra100);
fprintf('kf     = %.6e Вб/А\n', kf);

%% ===== %%
% 2. РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЯ И СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ %%
%% ===== %%

I_break = 8.0;            % ток переключения возбуждения, А
I_end    = 13.0;          % конечный ток второго прогона, А
I_step   = 0.5;           % ступень нагрузочного реостата, А

omega = 2*pi*n_nom/60;

% ЭДС на стороне постоянного тока пропорциональна магнитному потоку и
% угловой скорости. При неизменной скорости она линейна по току
% возбуждения, поэтому удобно ввести удельную ЭДС на ампер возбуждения.
E_per_If = ke * kf * omega;

% Возбуждение первого прогона выбрано из условия, что напряжение холостого
% хода равно паспортному Ud0. Второй прогон идет на предельном возбуждении.

```

```

If_run1 = Ud0 / E_per_If;
If_run2 = If_max;

E0_1 = E_per_If * If_run1;
E0_2 = E_per_If * If_run2;

fprintf('Удельная ЭДС = %.4f В на 1 А возбуждения\n', E_per_If);
fprintf('Прогон 1: If = %.4f А, E0 = %.4f В\n', If_run1, E0_1);
fprintf('Прогон 2: If = %.4f А, E0 = %.4f В\n', If_run2, E0_2);
fprintf('Кратность скачка = %.4f\n', E0_2 / E0_1);

I1 = (0 : I_step : I_break)';
I2 = (I_break : I_step : I_end)';

% Напряжение на нагрузке равно ЭДС за вычетом падения на активном
% сопротивлении обмотки якоря. Ограничение снизу нулем исключает
% нефизичные отрицательные значения при токах выше тока короткого замыкания.
U1 = max(0, E0_1 - Ra100 * I1);
U2 = max(0, E0_2 - Ra100 * I2);

I_full = [I1; I2];
U_full = [U1; U2];

fprintf('Прогон 1: U(0) = %.2f В, U(%.0f А) = %.2f В\n', U1(1), I_break,
U1(end));
fprintf('Прогон 2: U(%.0f А) = %.2f В, U(%.0f А) = %.2f В\n', ...
I_break, U2(1), I_end, U2(end));

%% ===== %%
% 3. МГНОВЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ С ПУЛЬСАЦИЕЙ ВЫПРЯМИТЕЛЯ %%
%% ===== %%
%
% Мгновенное напряжение на выходе моста до сглаживания не постоянно, а
% периодически пульсирует. Это детерминированное колебание, а не разброс

```

```

% измерений: между соседними коммутациями диодов на выход проходит вершина
% той линейной ЭДС, которая в данный момент максимальна, поэтому форма
% напряжения описывается отрезком косинусоиды
%
%  $u(\theta) = V_{pk} * \cos(\theta)$ ,  $\theta$  в интервале  $[-\pi/m; \pi/m]$ 
%
% с периодом  $2\pi/m$  по электрическому углу. Трехфазный мостовой
% выпрямитель дает  $m = 6$  пульсаций за период, а частота пульсации равна
%  $f = m \cdot p \cdot n / 60$  и определяется скоростью вращения, которая в обоих прогонах
% одинакова.
%
% Огибающие пульсации равны  $V_{pk}$  сверху и  $V_{pk} \cdot \cos(\pi/m)$  снизу. Среднее
% значение за период, то есть показание вольтметра постоянного тока,
% получается интегрированием этой формы:
%
% 
$$U_{cp} = (m / (2\pi)) * \int_{-\pi/m}^{\pi/m} V_{pk} \cdot \cos(\theta) d(\theta)$$

% 
$$= V_{pk} * (m/\pi) * \sin(\pi/m)$$

%
% Среднее обязано совпадать с ЭДС  $E_0$  при нулевом токе нагрузки. Поэтому
% амплитуда пульсации не задается произвольно, а вычисляется обращением
% этого соотношения:  $V_{pk} = E_0 / ((m/\pi) \cdot \sin(\pi/m))$ . Проверка независимым
% путем: через принятую в расчете константу выпрямителя  $U = 1.35 \cdot U_{\text{лин.действ}}$ 
% получается  $V_{pk} = \sqrt{2} \cdot E_0 / 1.35$ , что расходится с формулой выше на
% 0.04 процента.

m_pulses = 6;

k_mean = (m_pulses/pi) * sin(pi/m_pulses); % отношение среднего к амплитуде
f_ripple = m_pulses * poles * n_nom / 60;

band1 = [E0_1/k_mean * cos(pi/m_pulses), E0_1/k_mean];
band2 = [E0_2/k_mean * cos(pi/m_pulses), E0_2/k_mean];

fprintf('k_mean = %.5f\n', k_mean);

```

```

fprintf('Прогон 1: огибающие [%.4f; %.4f] В, среднее %.4f В\n', ...
    band1(1), band1(2), band1(2)*k_mean);
fprintf('Прогон 2: огибающие [%.4f; %.4f] В, среднее %.4f В\n', ...
    band2(1), band2(2), band2(2)*k_mean);
fprintf('Размах пульсации = %.2f %% от среднего\n', (1 - cos(pi/m_pulses)) *
100);
fprintf('Частота пульсации = %.0f Гц на обоих прогонах\n', f_ripple);

% Параметры отрисовки. За время ручной развертки тока укладываются десятки
% тысяч периодов пульсации, неразличимых на графике, поэтому отображается
% меньшее их число, достаточное, чтобы колебание читалось как колебание.
cycles_per_A = 3;
pts_per_cycle = 60;
trans_cycles = 6;      % периодов пульсации за время нарастания возбуждения

% Возбуждение переключается при неизменном токе нагрузки, поэтому переход
% между прогонами лежит на вертикали I = I_break. Из-за индуктивности
% обмотки возбуждения ток нарастает не мгновенно, и огибающие проходят все
% промежуточные значения, что дает непрерывную кривую вместо разрыва.
[I_r1, V_r1] = make_ripple_wave(0, I_break, band1, ...
    m_pulses, cycles_per_A, pts_per_cycle);
[I_rt, V_rt] = make_ripple_transition(I_break, band1, band2, ...
    m_pulses, trans_cycles, pts_per_cycle);
[I_r2, V_r2] = make_ripple_wave(I_break, I_end, band2, ...
    m_pulses, cycles_per_A, pts_per_cycle);

I_ripple = [I_r1; I_rt; I_r2];
V_ripple = [V_r1; V_rt; V_r2];

%% ===== %%
% 3В. ПУЛЬСАЦИЯ С ЦЕНТРОМ ПО СРЕДНЕМУ НАПРЯЖЕНИЮ ПОД НАГРУЗКОЙ %%
%% ===== %%
%
% В разделе 3 центр пульсации постоянен в пределах прогона, так как ЭДС

```

```

% прогона E0 не зависит от тока нагрузки. То же соотношение среднее/пик
% верно и поточечно: в любой момент развертки тока среднее пульсации
% обязано совпадать с текущим напряжением под нагрузкой U(I) из раздела 2,
% а не только с ЭДС холостого хода. Отсюда пик пульсации, зависящий от
% тока:
%
%  $V_{pk}(I) = U(I) / k_{mean} = (E0 - Ra100 * I) / k_{mean}$ 
%
% Наклон пульсации в этом варианте, таким образом, не задается отдельно,
% а является прямым следствием уже выведенного падения на сопротивлении
% обмотки якоря.

[I_rs1, V_rs1] = make_sloped_ripple_wave(0, I_break, E0_1, Ra100, k_mean, ...
    m_pulses, cycles_per_A, pts_per_cycle);

band_break_from = [U1(end)*cos(pi/m_pulses)/k_mean, U1(end)/k_mean];
band_break_to    = [U2(1)*cos(pi/m_pulses)/k_mean, U2(1)/k_mean];

[I_rst, V_rst] = make_ripple_transition(I_break, band_break_from,
    band_break_to, ...
    m_pulses, trans_cycles, pts_per_cycle);

[I_rs2, V_rs2] = make_sloped_ripple_wave(I_break, I_end, E0_2, Ra100, k_mean,
    ...
    m_pulses, cycles_per_A, pts_per_cycle);

I_ripple_sloped = [I_rs1; I_rst; I_rs2];
V_ripple_sloped = [V_rs1; V_rst; V_rs2];

%% ===== %%
% 4. ЗАПИСЬ CSV %%
%% ===== %%

outDir = fullfile(fileparts(mfilename('fullpath')), 'output');
if ~exist(outDir, 'dir'), mkdir(outDir); end

```

```

writematrix([I_full, U_full], fullfile(outDir, 'external_U_vs_In.csv'));

% Огибающие пульсации на измерительной сетке тока: нижняя и верхняя.
envelope = [ I1, repmat(band1, size(I1));
             I2, repmat(band2, size(I2)) ];
writematrix(envelope, fullfile(outDir, 'external_ripple_envelope.csv'));

% То же для пульсации с наклонным центром: нижняя и верхняя огибающие
% меняются вместе с U(I).
envelope_sloped = [ I1, U1*cos(pi/m_pulses)/k_mean, U1/k_mean;
                   I2, U2*cos(pi/m_pulses)/k_mean, U2/k_mean ];
writematrix(envelope_sloped, fullfile(outDir,
'external_ripple_envelope_sloped.csv'));

fprintf('\nCSV-файлы сохранены в папку %s\n', outDir);

%% ===== %%
% 5. ГРАФИКИ %%
%% ===== %%

fig1 = figure('Name', 'Внешняя характеристика U=f(In)', 'Color', 'w');
ax1 = axes(fig1); %#ok<LAXES>
hold(ax1, 'on'); grid(ax1, 'on'); box(ax1, 'on');
set(ax1, 'Color', 'w', 'XColor', 'k', 'YColor', 'k', 'GridColor', [0.5 0.5
0.5]);
plot(ax1, I_ripple, V_ripple, '-', 'Color', [0.85 0.10 0.10], 'LineWidth', 1,
...
'DisplayName', 'u(t) - мгновенное, до сглаживания');
plot(ax1, I_full, U_full, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'U - среднее под
нагрузкой');
xlabel(ax1, 'I_н, A'); ylabel(ax1, 'U, B');
title(ax1, 'Внешняя характеристика U=f(I_н)', 'Color', 'k');
legend(ax1, 'Location', 'northeast', 'Color', 'w', 'TextColor', 'k');
xlim(ax1, [0, I_end + 1]); ylim(ax1, [0, 70]);
hold(ax1, 'off');
ax1.Toolbar.Visible = 'off';

```

```

disableDefaultInteractivity(ax1);

exportgraphics(fig1, fullfile(outDir, 'external_U_vs_In.png'), 'Resolution',
150);

fig2 = figure('Name', 'Внешняя характеристика  $U=f(I_a)$ ', 'Color', 'w');
ax2 = axes(fig2); %#ok<LAXES>
hold(ax2, 'on'); grid(ax2, 'on'); box(ax2, 'on');
set(ax2, 'Color', 'w', 'XColor', 'k', 'YColor', 'k', 'GridColor', [0.5 0.5
0.5]);
plot(ax2, I_full, U_full, 'b-', 'LineWidth', 2);
xlabel(ax2, 'Ia, A'); ylabel(ax2, 'U, В');
title(ax2, 'Внешняя характеристика  $U=f(I_a)$ ', 'Color', 'k');
xlim(ax2, [0, I_end + 1]); ylim(ax2, [0, 70]);
hold(ax2, 'off');
ax2.Toolbar.Visible = 'off';
disableDefaultInteractivity(ax2);

exportgraphics(fig2, fullfile(outDir, 'external_U_vs_Ia.png'), 'Resolution',
150);

fig3 = figure('Name', 'Внешняя характеристика  $U=f(I_a)$ , пульсация с наклоном',
'Color', 'w');
ax3 = axes(fig3); %#ok<LAXES>
hold(ax3, 'on'); grid(ax3, 'on'); box(ax3, 'on');
set(ax3, 'Color', 'w', 'XColor', 'k', 'YColor', 'k', 'GridColor', [0.5 0.5
0.5]);
plot(ax3, I_ripple_sloped, V_ripple_sloped, '-', 'Color', [0.85 0.10 0.10],
'LineWidth', 1, ...
    'DisplayName', 'u(t) - мгновенное, до сглаживания');
plot(ax3, I_full, U_full, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'U - среднее под
нагрузкой');
xlabel(ax3, 'Ia, A'); ylabel(ax3, 'U, В');
title(ax3, 'Внешняя характеристика  $U=f(I_a)$  с пульсацией', 'Color', 'k');
legend(ax3, 'Location', 'northeast', 'Color', 'w', 'TextColor', 'k');
xlim(ax3, [0, I_end + 1]); ylim(ax3, [0, 70]);
hold(ax3, 'off');
ax3.Toolbar.Visible = 'off';
disableDefaultInteractivity(ax3);

```

```

exportgraphics(fig3,      fullfile(outDir,      'external_U_vs_Ia_ripple.png'),
'Resolution', 150);

fprintf('Графики сохранены в папку %s\n', outDir);

%% ===== %%

%   ЛОКАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ                                     %%

%% ===== %%

function [I_out, V_out] = make_ripple_wave(I_start, I_stop, band, m,
cycles_per_A, pts_per_cycle)

% Строит пульсацию m-пульсного выпрямителя, развернутую вдоль оси тока.

%

% Электрический угол нарастает линейно вместе с током развертки и
% заворачивается в интервал  $[-\pi/m; \pi/m]$ . Форма колебания внутри полосы
% повторяет отрезок косинусоиды и масштабируется так, чтобы минимум лег на
% нижнюю границу полосы, а максимум на верхнюю. Результат детерминирован и
% воспроизводится при каждом запуске без изменений.

%

% I_start, I_stop - границы интервала тока, А.
% band            - огибающие пульсации [нижняя, верхняя], В.
% m              - число пульсаций выпрямителя за период.
% cycles_per_A   - число периодов пульсации на 1 А развертки тока.
% pts_per_cycle  - число расчетных точек на период.

n_cycles = cycles_per_A * (I_stop - I_start);
n_pts     = max(2, round(n_cycles * pts_per_cycle));

I_out = linspace(I_start, I_stop, n_pts)';

theta   = 2*pi * cycles_per_A * (I_out - I_start);
theta_w = mod(theta + pi/m, 2*pi/m) - pi/m;

V_out = band(1) + (band(2) - band(1)) * ripple_shape(theta_w, m);
end

```

```

function [I_out, V_out] = make_ripple_transition(I_at, band_from, band_to, m,
n_cycles, pts_per_cycle)

% Строит пульсацию на участке переключения тока возбуждения.
%
% Ток нагрузки при этом не меняется, поэтому участок лежит на вертикали
%  $I = I_{at}$ . Огибающие пульсации переходят от band_from к band_to, проходя
% все промежуточные значения, что связывает два прогона непрерывной кривой.
%
% I_at                - ток нагрузки при переключении возбуждения, А.
% band_from, band_to  - огибающие до и после переключения, В.
% m                   - число пульсаций выпрямителя за период.
% n_cycles             - число периодов пульсации за время нарастания.
% pts_per_cycle       - число расчетных точек на период.

n_pts = max(2, round(n_cycles * pts_per_cycle));
s      = linspace(0, 1, n_pts)';

V_lo = band_from(1) + (band_to(1) - band_from(1)) * s;
V_hi = band_from(2) + (band_to(2) - band_from(2)) * s;

theta    = 2*pi * n_cycles * s;
theta_w = mod(theta + pi/m, 2*pi/m) - pi/m;

V_out = V_lo + (V_hi - V_lo) .* ripple_shape(theta_w, m);
I_out = repmat(I_at, n_pts, 1);
end

function [I_out, V_out] = make_sloped_ripple_wave(I_start, I_stop, E0, Ra,
k_mean, m, cycles_per_A, pts_per_cycle)

% Строит пульсацию m-пульсного выпрямителя, центр которой повторяет
% просадку среднего напряжения под нагрузкой  $U(I) = E0 - Ra \cdot I$ .
%
% Пик пульсации в каждой точке тока определяется тем же соотношением
% среднее/пик, что и для постоянной ЭДС:  $V_{pk}(I) = U(I)/k\_mean$ . Ток

```

```

% ограничен снизу нулем по той же причине, что и в среднем напряжении.
%
% I_start, I_stop - границы интервала тока, А.
% E0              - ЭДС прогона при нулевом токе нагрузки, В.
% Ra              - сопротивление обмотки якоря, Ом.
% k_mean          - отношение среднего значения пульсации к ее амплитуде.
% m              - число пульсаций выпрямителя за период.
% cycles_per_A    - число периодов пульсации на 1 А развертки тока.
% pts_per_cycle   - число расчетных точек на период.

n_cycles = cycles_per_A * (I_stop - I_start);
n_pts     = max(2, round(n_cycles * pts_per_cycle));

I_out = linspace(I_start, I_stop, n_pts)';

U_mean = max(0, E0 - Ra * I_out);
V_pk   = U_mean / k_mean;

theta   = 2*pi * cycles_per_A * (I_out - I_start);
theta_w = mod(theta + pi/m, 2*pi/m) - pi/m;

V_out = V_pk .* cos(theta_w);
end

function shape = ripple_shape(theta_w, m)
% Возвращает нормированную форму пульсации в диапазоне от 0 до 1.
%
% Ноль соответствует моменту коммутации, когда напряжение минимально,
% единица - вершине косинусоиды между коммутациями.

shape = (cos(theta_w) - cos(pi/m)) / (1 - cos(pi/m));
end

```

СОГЛАСОВАНО
Генеральный директор
ТОО КазНИИЭ им.акад.Ш.Ч. Чокина


К.Бакенов
« 4 » 09 2025 г.

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по науке НАО «АУЭС»
к.т.н., профессор


К.Алипбаев
« 4 » 09 2025 г.

Протокол №1

Испытания ВГШД на модели ветряной турбины ВРТБ

г. Алматы

« ____ » _____ 2025 г.

Мы, нижеподписавшиеся, от ТОО «Казахский научно-исследовательский институт энергетики им.акад. Ш.Ч.Чокина» Бакенов К.А. и от НАО «Алматинский университет энергетики и связи» Умбеткулов Е.К. научный руководитель проекта АР19679469, договор №340/23-25 от 03 августа 2023 года) и члены исследовательской группы: Агимов Т.Н., Солтанаев А.М. и Рашидов Ш.У., провели испытания ВГШД на физической модели и стенде, изготовленных в исследовательской лаборатории НАО «АУЭС» при непосредственном участии представителей ТОО «КазНИИЭ им.акад. Ш.Ч.Чокина».

Сборка и испытания ВГШД проводились в исследовательской лаборатории «Возобновляемые источники энергии» АУЭС, лаб.536А.

ВГШД должен отвечать следующим требованиям:

Номинальная (расчетная частота вращения) n_n – 1200 об/мин;

Номинальная мощность P_n – 1,1 кВт;

Номинальное фазное напряжение U_ϕ – 24 В;

Напряжение на выходе выпрямителя U_d – 29 В;

Коэффициент мощности $\cos\phi$ – 0,9

Количество фаз m – 3;

Количество параллельных ветвей a – 2.

Результаты испытаний ВГШД приведены в Приложении 1 и 2. В рамках испытаний сняты характеристики холостого хода, регулировочные характеристики, внешние характеристики с переключением количества параллельных ветвей 1 или 2 при частотах вращения от 200 до 1200 оборотов, что моделирует работу при скоростях ветра от 3,7 до 22 м/с соответственно.

Параметры ВГШД:

Сопротивление параллельной ветви якорной обмотки – 1,39 Ом;

Схема соединения якорной обмотки - Δ ;

Сопротивление обмотки возбуждения – 3,7 Ом;

Число витков обмотки возбуждения – 550.

Условные обозначения:

I_{vg} – ток возбуждения генератора, измеряется в Амперах;

I_{vg}^* - ток возбуждения ВГШД в относительных величинах к номинальному току возбуждения при котором достигается номинальное напряжение;

U_{d1} , U_{d2} – напряжение выпрямительного модуля, измеряется в Вольтах;

$U_{d\Sigma}$, U_{dpar} – выпрямленное напряжение ВГШД при последовательном и параллельном включение выпрямительных модулей соответственно;

U_g^* - выпрямленное напряжение ВГШД в относительных величинах;

номинальный ток 80 А, заданный ток 13 А, заданное напряжение 23 В, частота вращения при заданной точке нагрузки и напряжения 1250 об/мин.

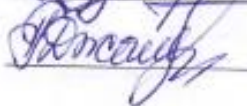


Рисунок 2 - Общий вид испытательного стенда: 1 – ВГШД; 2 - двигатель ПЗ2М; 3 – тахогенератор; 4 – АТ; 5 – блок выпрямителей; 6 – нагрузки.

В генераторе произведена перемотка обмотки якоря В1 и В2, обмотка возбуждения ВВ2 осталась без изменений. Она питается через выпрямитель ВВ3. Якорная обмотка перемотана на 24 В и 2 параллельные ветви. Каждая параллельная ветвь подключена к своему выпрямителю ВВ4 и ВВ5. За номинальную частоту вращения принята 1200 об/мин. Номинальная мощность принята 600 Вт. К выпрямительным модулям подключено нагрузочные сопротивления R1-R7. Сердечник статора состоит из Z=18 пазов, ротор состоит из 12 когтеобразных полюсов. Обмотку выполняли двухслойной. В одной катушке 75 витков, а в фазе 225 витков. Фазовые обмотки были соединены по схеме треугольник.

Программа испытаний включает измерение сопротивлений параллельных ветвей якорной обмотки, снятие характеристики холостого хода на частоте вращения 600 и 1200 об/мин, снятие внешней характеристики на частоте вращения 600 об/мин с последовательным и параллельным включением вентиляционных модулей, снятие регулировочной характеристики 600 и 1200 об/мин (Приложение 1 и 2).

ТОО КазНИИЭ им.акад.Ш.Ч. Чокина

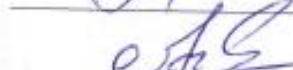
К.Бакенов

Манапова Г.Д.

НАО «Алматинский Университет
Энергетики и Связи»



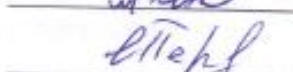
Умбеткулов Е.К.



Агимов Т.Н.



Солтанаев А.М.



Рашидов Ш.У.

Таблица 3 - Характеристика холостого хода при частоте вращения 600 об/мин

Ivg, A	Ivg*	Ud1	Ud2	UdΣ	Udpar	Ug*	Ud1r	Ivgr
0,47	0,93	13	11	24	13	0,4	3	0,1
0,78	1,55	18	16	34	18	0,6	15	0,3
1,01	2,00	24	21	45	24	0,8	30	0,5
1,50	2,98	33	29	62	33	1,1	45	0,8
2,04	4,05	38	34	72	38	1,3	60	1,2
3,00	5,95	41	37	78	41	1,4	75	1,7
3,99	7,92	44	40	84	44	1,5	90	2,4
5,91	11,73	47	42	89	47	1,6	105	4,7

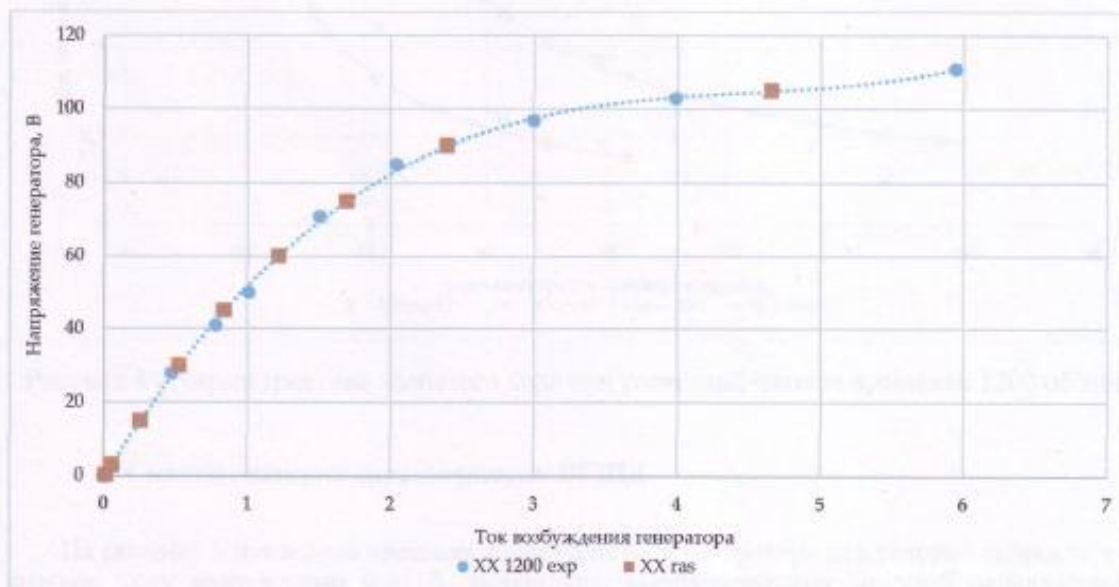


Рисунок 3 - Характеристика холостого хода при расчетной частоте вращения 1200 об/мин.

В таблице 4 приведены результаты снятия специальной характеристики холостого хода. Также в ней приведены расчетные результаты математического моделирования.

Таблица 4 - Специальная характеристика холостого хода.

Vwind, m/sec	3,7	5,5	7,3	9,2	11	12,8	13,7	14,7	16,5	18,3	22
n _{opt} , rot/sec	200	300	400	500	600	700	750	800	900	1000	1200
ω _{opt} , rad/sec	21	31	42	52	63	73	79	84	94	105	126
Ug, V	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Ivexp, A	-	-	2,55	-	1,22	-	0,93	-	-	-	0,51
Ivr1, A	-	-	2,39	1,58	1,21	0,99	-	0,84	0,73	0,64	0,52
Ivr2, A	2,4	1,21	0,84	0,64	0,52	0,44	-	0,38	0,34	0,3	0,25

«Специальная» характеристика холостого хода снималась при угловых скоростях от 21 до 137 рад/сек, что соответствует скорости вращения ВРТБ с диаметром ротора 175 мм при скоростях ветра от 3,7 до 23,8 м/с. «Специальная характеристика холостого хода» отражает зависимость тока возбуждения генератора, необходимого для поддержания постоянства напряжения при изменении частоты вращения на холостом ходу, без нагрузки. В испытаниях поддерживалось постоянная величина выпрямленного напряжения 29 В.

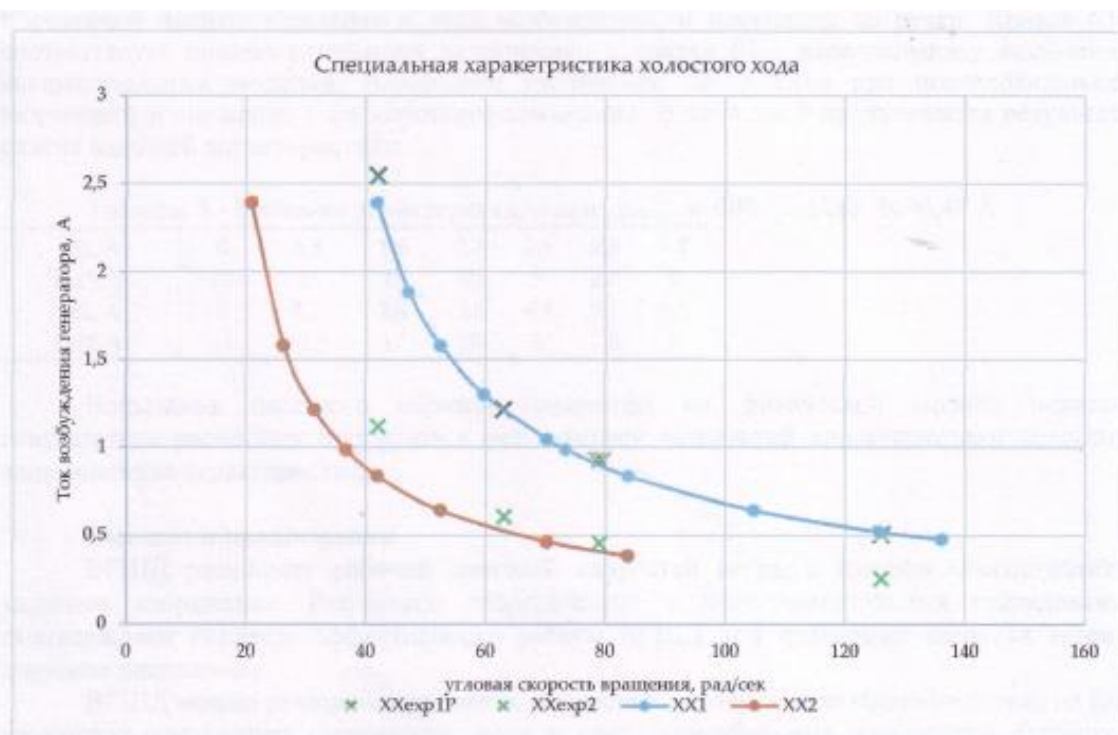


Рисунок 4 - Характеристика холостого хода при расчетной частоте вращения 1200 об/мин.

3. Снятие внешних характеристик ВГЩД

На рисунке 5 приведена внешняя характеристика генератора для угловой скорости в 63 рад/сек, току возбуждения 0,47 А, включению выпрямительных модулей параллельно и последовательно.

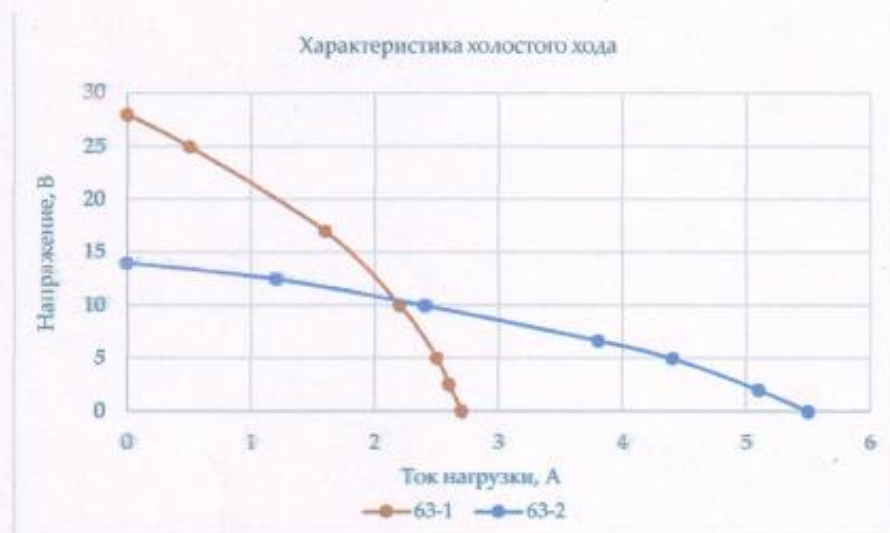
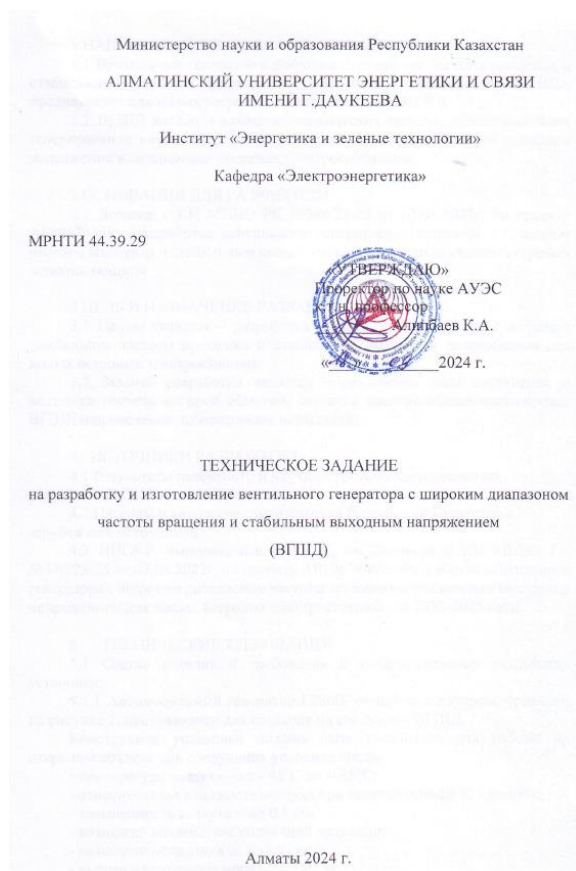


Рисунок 5 - Внешняя характеристика ВГЩД

ПРИЛОЖЕНИЕ Е



аппараты регулирования и управления, а на лицевой панели устанавливаются измерительные приборы и ручки управления: амперметр, частотомер, вольтметр на 100 В, регулятор напряжения, автоматический выключатель.

5.2 Технические параметры генератора:

Номинальная мощность, кВт	1,1
Номинальное напряжение, В	24
Номинальный ток, А	80
Частота тока, Гц	50
Тип генератора	Г 286В
Частота вращения вала генератора, мин ⁻¹	1250
Соединение обмоток генератора	звезда с выведенным нулем
Режим работы	продолжительный
Система регулирования напряжения	ручная
Габаритные размеры, мм	
Длина	260
Ширина	180
Высота	160
Масса установки, кг	14

5.3 Требования безопасности:

Как правило распределительные электрические сети 0,4 кВ выполнены с глухозаземленной нейтралью, поэтому основным режимом работы ВГЩ будет режим с глухозаземленной нейтралью.

5.3.1 Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала при эксплуатации ВГШД необходимо нейтраль генератора, металлические части электрооборудования (корпус генератора и щит управления) подсоединить к заземляющему устройству сети. Сопротивление заземляющего устройства не должно превышать 10 Ом.

5.3.2 Для защиты электросхемы от короткого замыкания и токов перегрузки в ВГПД применяются защитные устройства (автоматические выключатели), расположенные в шите управления.

5.3.3 Перед пуском ВГЩД в эксплуатацию, после ремонта и после расконсервации обязательно произвести замер сопротивления защитного заземления и сопротивление изоляции электрокабеля. Результаты замеров должны оформляться соответствующим документом.

5.3.4 Не допускается, чтобы ВГЩД работала при сопротивлении изоляции обмоток генератора относительно корпуса ниже 0,2 МОМ.

5.3.5 Перед запуском ВГШД в работу и в процессе ее эксплуатации следует проверять надежность электромонтажа всех точек заземления установки. Запускать в работу незаземленную ВГШД или эксплуатировать ее при ненадежном заземлении категорически запрещается.

5.3.6 Все электрические части и пусковая аппаратура должны быть защищены от попадания воды и заземлены;

5.4.1. К эксплуатации ВГЩД должны допускаться лица, имеющие допуск для работы на электроустановках до 1000 В.

1 НАИМЕНОВАНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Вентильный генератор с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением, именуемая в дальнейшем «ВГШД», предназначен для малых ветровых электростанций (МВЭС).

1.2 ВГЩД входит в комплект технических средств, обеспечивающих генерирование электроэнергии и зарядку аккумуляторных батарей заданного напряжения в автономных системах электроснабжения.

2 ОСНОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ

2.1 Договор с КН МНВО РК №340/23-25 от 03.08.2023г. по проекту АР19679469: «Разработка вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением для малых ветровых электростанций»

3 ЦЕЛЬ И НАЗНАЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ

3.1 Целью является – разработка вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением для малых ветровых электростанций.

3.2 Задачей разработки является – разработка схем соединения и методики расчета якорной обмотки, создания экспериментального образца ВГШД и проведение лабораторных испытаний.

4 ИСТОЧНИКИ РАЗРАБОТКИ

4.1 Результаты патентного и научно - технического поиска по разработке ВГПД для МВЭС.

4.2 Патенты и авторские свидетельства Республики Казахстан и зарубежных источников.

4.3 НИОКР, выполняемые в АУЭС, по Договору с КН МНВО РК №340/23-25 от 03.08.2023г. по проекту AP19679469: «Разработка вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением для малых ветровых электростанций» на 2023-2025 годы.

5 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

5.1 Состав изделия и требования к конструктивному устройству установки:

5.1.1 Автомобильный генератор Г286В, общий вид которого приведен на рисунке 1, предназначен для создания на его основе ВГШД.

Конструкция установки должна быть рассчитана для работы на открытом воздухе при следующих условиях среды:

- температура воздуха – от -45°C до $+55^{\circ}\text{C}$;
- относительная влажность воздуха при температуре 20°C – до 98%;
- запыленность воздуха – до $0,5 \text{ г/м}^3$
- возможно воздействие солнечной радиации;
- возможно попадание дождя и снега;
- высота над уровнем моря – до 1800м

5.4.2. Электромеханик, обслуживающий ВГПД, обязан обеспечить надлежащее ее обслуживание в соответствии с данными технического описания и инструкцией по эксплуатации. Он должен изучить эти и другие эксплуатационные документы и периодически проходить инструктаж по технике безопасности, который обязано проводить предприятие, эксплуатирующее изделие.

5.4.3 Электромеханик должен быть знаком с правилами техники безопасности и технической эксплуатации электроустановок потребителей, а также иметь навыки обслуживания электроустановок.

5.4.4 Работа электромеханика при эксплуатации ВГШД сводится к подготовке установки к работе, запуску ее и выводу на номинальный режим работы, контролю номинальных параметров по приборам в период работы, ее техническому обслуживанию.

6 ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

6.1 ВГПД должна обеспечить снижение годовых приведенных затрат на его содержание.

6.2 Ожидаемый экономический эффект – снижение импорта ветряных электрогенераторов и устройств стабилизации выходного напряжения.

6.3. Лимитная цена – 800 000 тенге.

6.4. Оптовая цена – 700 000 тенге.

7 СТАДИИ И ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ

7.1 Разработка ТЗ на ВГЩД – III кв. 2024 г.

7.2 Разработка КД для изготовления опытного образца ВГШД IV кв. 2025 г.

Руководитель проекта,
к.т.н., доцент

Умбеткулов Е.К.

Исполнитель проекта,
к.т.н., доцент

Бакенов К.А.

Конструкторская документация

Согласно календарного плана договора №340/23-25 от 3 августа 2023 года по проекту AP19679469 «Разработка вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным выходным напряжением для малых ветровых электростанций» разработана конструкторская документация на опытный образец ВГЩД.

Для достижения технического результата ВГЩД собран на основе трехфазного синхронного генератора (СГ) с электромагнитным индуктором, у которого обмотка якоря выполнена из «m» - фазных и «А» - параллельных ветвей (ПВ). В соответствии со скоростью ветрового потока ПВ могут соединяться параллельно или последовательно (при слабых ветровых потоках).

Схема намотки проводов в пазы якоря ВГЩД приведена на рисунке 1. Сердечник статора состоит из $Z=18$ пазов, ротор состоит из 12 когтеобразных полюсов. Обмотку выполняли двухслойной. В одной катушке 75 витков, а в фазе 225 витков. Фазовые обмотки были соединены по схеме треугольник.

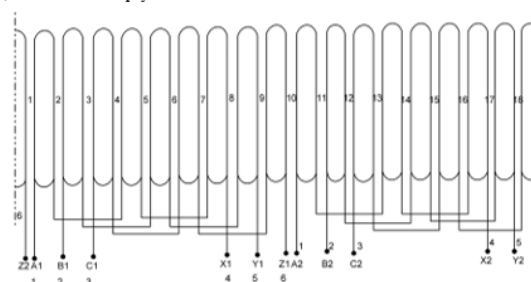


Рисунок 1. Схема намотки якорной обмотки ВГЩД.

Подробные расчеты параметров ВГЩД изложены в «Методике расчета якорной обмотки ВГЩД», которая приведена в Приложении Б.

В данной работе опытный образец ВГЩД создан на основе СГ типа Г-286В со следующими основными техническими характеристиками: номинальная мощность 1,1 кВт, номинальное напряжение 24 В, номинальный ток 50 А, максимальный ток нагрузки 75А. Обмотка якоря СГ была перемотана на 2 трехфазные параллельные группы (А1 и А2), начала которых соединены вместе с образованием схемы соединения - «звезда». На рисунке 2 приведен общий вид и разобранное состояние ВГЩД.



а)



б)

Рисунок 2 - Общий вид (а) и разобранное состояние ВГЩД (б)

Из рисунка 2 видно, что из статора выходят 6 концов 2-х трехфазных групп параллельных ветвей (А1 и А2) перемотанной обмотки якоря. Соединение начал этих групп в «звезду» находится под изоляцией.

На рисунке 3 приведена монтажная схема ВГЩД.

На монтажной схеме приведены основные элементы ВГЩД при подключении к АБ. Трехфазный переменный ток преобразуется в диодных мостах (D1 и D2) в постоянный ток.

С помощью переключателя S (вручную или автоматически), в зависимости от частоты вращения ВГЩД, диодные мосты могут соединяться последовательно (при пониженной частоте вращения) или работать параллельно (при нормальной или повышенной частоте вращения).

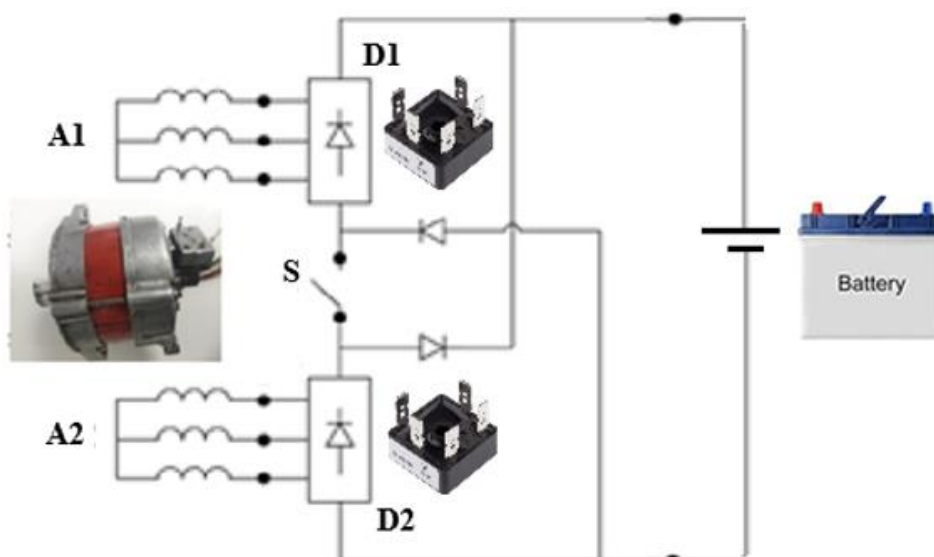


Рисунок 3 - Монтажная схема ВГЩД

Активация Window
Чтобы активировать Win



КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ PATENT

№ 9750

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2024/1073.2

(22) 05.09.2024

(45) 05.09.2025

- (54) Аккумуляторды зарядтауға арналған жел қондырғының үш фазалы синхронды генераторы
Трёхфазный синхронный генератор ветроустановки для зарядки аккумуляторов
Three-phase synchronous wind turbine generator for battery charging
- (73) «Гүмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)
Некоммерческое акционерное общество «Алматинский университет энергетики и связи
имени Гумарбека Даукеева» (KZ)
«Gumarbek Daukeev Almaty Energy and Communications University» Non-Profit Joint-Stock
Company (KZ)
- (72) Умбеткулов Ертуган Кожажулович (KZ) Umbetkulov Yertugan Kozhagulovich (KZ)
Бакенов Кайрат Асанғалиевич (KZ) Bakenov Kairat Asangalievich (KZ)
Агимов Талгат Нурланович (KZ) Agimov Talgat Nurlanovich (KZ)
Рашидов Шерхан Уахитович (KZ) Rashidov Sherkhan Uakhitovich (KZ)
Солтанаев Абылайхан Мухитұлы (KZ) Soltanaev Abylaikhan Mukhituly (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

С. Ахметов
С. Ахметов
S. Akhmetov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директорының м.а.
И.о. директора РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке ИАГ «АУЭС»

PhD, профессор



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Основные научные положения и технические решения в области повышения эффективности использования малых ветровых электростанций, изложенных в диссертационной работе Агимова Талгата Нурлановича на тему «Разработка вентильного электрогенератора с приводом от вала переменной частоты вращения», представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071800 «Электроэнергетика», внедрены в учебный процесс кафедры «Электроэнергетика» Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева. Результаты исследования и разработки вентильного электрогенератора с приводом от вала переменной частоты вращения применяются в лекционных, практических и лабораторных занятиях магистрантов научно-педагогического направления по следующим дисциплинам:

- «Современные проблемы и перспективы использования возобновляемых источников энергии» (ОП 7M07118 – Современные и инновационные технологии возобновляемой энергетики);
- «Энергосбережение в автономных системах ВИЭ» (ОП 7M07118 – Современные и инновационные технологии возобновляемой энергетики);
- «Динамические характеристики воздушных течений и ветра как энергоносителя для системной и автономной энергетики» (ОП 7M07101 «Электроэнергетика»).

В лекционных материалах вышеперечисленных дисциплин магистратуры приведены отдельные результаты исследований, полученные в рамках указанной диссертационной работы.

На практических и лабораторных занятиях магистратуры используется, разработанный с участием автора, научно-исследовательский стенд «Испытания вентильного генератора с приводом от вала переменной частоты вращения» для изучения внешних и регулировочных характеристик предлагаемого вентильного генератора на малых ветровых электростанциях.

Заведующий кафедры
«Электроэнергетика» к.т.н., профессор

Умбеткулов Е.К.

**ЖШС «ҒЫЛЫМИ-ӨНДІРІСТІК
КОМПАНИЯ ТАЛҒАР
ЖАҒЫРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ
КӨЗДЕРІ»**

041600, Қазақстан Республикасы,
Алматы обл.,
Талғар қ. Ықылас к.,
25а үй. моб.: +7 701 395 22 99;
+7 777 684 73 43

toonpktalgarenergy@gmail.com;

mgturganbaikz@gmail.com

БИН 230840035028

Исх. № 28

От 05.08.2026



**ТОО «НАУЧНО-
ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ
«ТАЛҒАР ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ»**

041600, Республика Казахстан,
Алматинская обл.,
г. Талғар, ул. Ықылас,
дом 25а моб.: +7 701 395 22 99;
+7 777 684 73 43

toonpktalgarenergy@gmail.com;

mgturganbaikz@gmail.com

БИН 230840035028

АКТ

внедрения диссертационной работы «Разработка и исследование вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным напряжением для малых ветровых электростанций»

докторанта Агимова Талгата Нурлановича

Настоящим актом внедрения подтверждается, что результаты диссертационной работы докторанта PhD Агимова Талгата Нурлановича на тему «Разработка и исследование вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения и стабильным напряжением для малых ветровых электростанций» являются актуальными, представляют научный и практический интерес для возможного внедрения в системах автономного электроснабжения отдаленных сельскохозяйственных объектов.

В диссертационной работе Агимова Т.Н. использованы современные подходы по исследованию эффективного использования маломощных вертикальных ветровых установок в климатических условиях Республики Казахстан. Приведены подробные результаты экспериментальных исследований вентильного генератора с широким диапазоном частоты вращения (ВГШД), способного вырабатывать стабильное напряжение при различных скоростях ветра.

С учетом актуальности диссертационного исследования, ценности полученных результатов настоящим документом подтверждаем возможность использования технических решений для нашего производства. В частности, наши маломощные отдаленные сельскохозяйственные объекты, к которым не подведены линии электропередачи, остро нуждаются в таких эффективных ВГШД для зарядки аккумуляторных батарей. Тем более предлагаемые монтажные схемы ВГШД вполне реализуемы в наших ремонтных мастерских.

ТОО «Научно-производственная компания «Талғар Возобновляемые Источники Энергии» не несет никаких обязательств по премированию исполнителей переданных нам материалов научно-исследовательских работ.

Директор ТОО «Научно-производственная компания
Талғар Возобновляемые источники энергии»



Нарбаев Н.Д.

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Список научных трудов, опубликованных по теме диссертации

Статьи в базе данных Scopus:

1. T. Agimov, K. Bakenov, Yer. Umbetkulov, A.Soltanayev, Sh.Rashidov, G.Manapova. Performance Enhancement of a Cross-Flow Turbine Using a Synchronous Generator with a Multi-Stage Rectifier // Clean Energy Science and Technology. 2025; 3(4): 517.

<https://cest.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/517/394>

2. Agimov, T.N., Umbetkulov, E.K., Bakenov, K.A., Nekrasov, A.I., Ongar, B. Development of a valve generator with a variable frequency of rotation // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences this link is disabled, 2019, 3(435).
<https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.84>

Журналы КОКСНВО МНВО Республики Казахстан:

3. Т.Н. АГИМОВ, К.А. БАКЕНОВ, Е.К. УМБЕТКУЛОВ, А.М. СОЛТАНАЕВ. Повышение коэффициента использования установленной мощности вертикальной ветряной турбины / Вестник АУЭС - Алматы: №2(73). 2026.- С.44 -55.

4. К.А. Бакенов, Е.К. Умбеткулов, Т.Н. Агимов, Ш.У. Рашидов. Стабилизация напряжения вентильного генератора при широком диапазоне изменения частоты вращения// Вестник АУЭС.- Алматы: №3(66). 2024.- С.25-36.

5. Агимов Т.Н. Разработка системы автоматического управления напряжением генератора постоянного тока // Промышленность Казахстана №3 (107)2019.-С.59-61.

6. Агимов Т.Н. Возможности определения устойчивости нелинейной системы регулирования напряжения генератора с помощью математической системы MATLAB// Вестник КазНАУ «Ізденістер, нәтижелер-Исследования, результаты» № 3 (83) 2019. С.343-348.

7. Агимов Т.Н., Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А., Бектемиров А.Т. Прямой пуск электродвигателя соизмеримой мощности с учетом предварительного повышения напряжения на электрогенераторе // Вестник Алматинского университета энергетики и связи, Алматы: АУЭС. №4, 2018.- С.11-15.

Патенты Республики Казахстан:

8. Патент на полезную модель Республики Казахстан. Универсальный генератор / Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А., Агимов Т.Н. - №3260 от 17.10.2018.

9. Патент на полезную модель Республики Казахстан «Трехфазный синхронный генератор ветроустановки для зарядки аккумуляторов» / Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А., Агимов Т.Н., Рашидов Ш.У., Солтанаев А.М.- №9750 от 05.09.2024.

Конференции:

10. Агимов Т.Н. Моделирование вертикально осевого ветродвигателя результаты испытаний на физическом стенде / Материалы XIII Международной научно-технической конференции // «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование», приуроченной к 50-летию Алматинского университета энергетики и связи. 22–24 октября, Алматы, 2025.- С.208-220;

11. Agimov, T.N. To the Questions of Energy Efficiency of Autonomous Energy Sources. 2018 14TH International scientific technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (apeie) – 44894 proceedings APEIE – 2018 In 8 Volumes Volume 1 Part 5 Novosibirsk, October 2-6, 2018.-P. 25-30.

12. Агимов Т.Н., Умбеткулов Е.К. Вентильный электрогенератор с приводом от вала с различной частотой вращения. VI Международный научный конгресс «Agricultural machinery 2018», Burgas, Bulgaria. 25-28 июня 2018. Том I. с.20-24.

13. Агимов Т.Н., Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А. Жиілігі өзгерісті білігі бар жетегіндегі электр генератордың тиімділігін арттыру. V Межд. научно – практ. конф. //Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения (17 марта 2017 г., Часть 2), Евраз. нац. унив-т им. Л.Н.Гумилева, Астана, 2017.- С190-194.

14. Агимов Т.Н., Умбеткулов Е.К., Бакенов К.А. Мобильные электростанции для электроснабжения маломощных объектов сельского хозяйства. Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов // Приоритетные направления развития АПК: глобальные вызовы и научно-технический потенциал. Казахский инженерно-технологический университет, Алматы, 2017.- С. 20-23.

15. Агимов Т.Н., Бакенов К.А., Умбеткулов Е.К. Повышение эффективности электрогенератора с приводом от вала с переменной частотой вращения. Материалы межд. научно-практ. конф. «Инновации в науке, образовании и производстве Казахстана». – Алматы: ЕТУ, 17-18 ноября 2016. Том I.- С. 165-169.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

