

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.С. ОСИМИ

УДК 621.3:621.316.1

*На правах рукописи*

**РАХИМОВ ФИРДАВС МИРЗОУМАРОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНЫХ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ  
ВЕРТИКАЛЬНО – ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК КАРУСЕЛЬНОГО ТИПА**

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности: 05.14.01 - энергетические системы и комплексы

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент,  
Силин Николай Витальевич

Душанбе – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	5
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....</b>	13
1.1. Требование к локальным системам электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии .....	14
1.2. Классификация локальных систем электроснабжения с использованием источников малой генерации .....	15
1.3. Исследование и анализ локальных систем электроснабжения на базе ВИЭ .....	17
1.4. Краткий обзор и анализ состояния электроэнергетики Республики Таджикистан .....	21
1.4.1.Анализ потенциала возобновляемых источников энергии Республики Таджикистан .....	24
1.4.2. Оценка потенциала ветровых ресурсов по территории Республики Таджикистан .....	30
<b>Выводы по первой главе.....</b>	40
<b>ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МГЭС И ВЭУ .....</b>	41
2.1. Постановка задачи.....	41
2.2. Математическое описание оптимизационной задачи и принимаемые допущения.....	44
2.2.1. Принятые допущения и ограничения.....	45
2.2.2. Описание оптимизационной задачи.....	46
2.3. Метод вычисления ограничения $\Delta = \delta P_{\text{ген. ср.}}$ .....	48

2.3.1. Вычисление ограничений.....	49
2.3.2. Переход к дискретному времени.....	51
2.3.3. Сведение процедуры вычисления ограничений к задаче линейного программирования .....	54
2.4. Исследование работы локальной электроэнергетической системы на базе МГЭС, ВЭУ и накопителя энергии .....	55
<b>Выводы по второй главе.....</b>	<b>59</b>
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.....</b>	
3.1. Постановка задачи.....	61
3.2. Анализ действующих конструкций ВЭУ многолопастного типа .....	62
3.3. Разработка конструкции вертикально осевого ВЭУ многолопастного типа для локальных источников электроснабжения .....	67
3.4. Расчетное и экспериментальное исследование энергетических характеристик ВЭУ .....	70
3.5. Имитационное компьютерное моделирование работы вертикально осевой ветроэнергетической установки в среде MatLab.....	80
3.6. Разработка стенда для испытания лопастей вертикально – осевой ветротурбины.....	91
3.7. Экспериментальные исследования работы вертикально осевой ветроэнергетической установки карусельного типа .....	98
<b>Выводы по третьей главе .....</b>	<b>105</b>
<b>ГЛАВА 4. ОЦЕНКА СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ МГЭС И ВЭУ ..</b>	
4.1. Оценка возможности создания локальных электроэнергетических систем на базе ветроустановок в городской среде .....	106

4.2. Оценка надежности локальной электроэнергетической системы на базе МГЭС и ВЭУ .....	115
4.3. Оценка технико-экономических преимуществ ветровой энергии для электроснабжения удаленных потребителей Республики Таджикистан .....	117
<b>Выводы по четвертой главе .....</b>	<b>123</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>125</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>127</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>145</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в электроэнергетической системе Республики Таджикистана основным источником электроэнергии являются гидравлические электрические станции (ГЭС), доля которых составляет в общем энергобалансе 98% всех действующих электростанций. В зимний период из-за жесткого дефицита воды выработка электроэнергии от малых ГЭС сокращается в десятки раз, а в отдельных случаях полностью прекращается. Поэтому актуальной задачей для развития экономики Республики Таджикистан является повышение надежности электроэнергетических систем (ЭЭС), а также поиск альтернативных источников для ослабления зависимости от одного энергоресурса.

Правительством Республики Таджикистан было принято Постановление № 795 (от 30.12.2015г.) «О Программе освоения возобновляемых источников энергии и строительства малых гидроэлектростанций на 2016-2020 гг.». Кроме того, для освоения энергии малых рек разработана и принята Правительством Долгосрочная Программа строительства малых гидроэлектростанций. Согласно этим документам особое внимание следует уделить изучению потенциалов возобновляемых источников и внедрению на их основе новых технологий для электроснабжения потребителей удаленных горных населенных пунктов республики. В настоящее время эти программы частично реализованы, на стадии рассмотрения находится новая программа.

В период независимости Республики Таджикистан до 2021 года введено в эксплуатацию более 1300 МВт новых мощностей, из которых более 25 МВт приходятся на долю малых гидравлических электрических станций (МГЭС). Изолированные МГЭС составляют основу локальных электроэнергетических систем, обеспечивающих электроснабжение потребителей в удаленных и труднодоступных районах РТ. Надежность и бесперебойность обеспечения

потребителей электроэнергией от таких источников в большой степени зависит от наличия водных ресурсов.

Одним из путей решения данной проблемы состоит в создании локальных электроэнергетических систем, состоящих из МГЭС и ветроэнергетических установок (ВЭУ). Ветроэнергетический потенциал Таджикистана достаточно большой и занимает второе место после гидроресурсов. В то же время совместное использование МГЭС и ВЭУ приводит к усложнению решаемых задач по эффективности и оптимизации их совместной эксплуатации ввиду разнохарактерности первичных ресурсов.

Для создания надежной локальной электроэнергетической системы бесперебойного питания потребителей необходима эффективная оптимизация нагрузки. Оптимальное планирование с использованием научно-обоснованных стратегий поможет преодолеть непостоянство потребления и генерации, а также колебания спроса, вызванные изменением численности населения. Разрабатываемые методы решения должны учитывать наихудший сценарий возобновляемой генерации и потребления нагрузки для создания оптимальных мощностей. Благодаря надежности разрабатываемых методов, спроектированная система может обеспечивать нагрузку в дни с меньшей выработкой возобновляемых источников энергии и более высокими колебаниями нагрузки.

Решение проблемы совместного использования МГЭС и ВЭУ является актуальной задачей и связано с оптимизацией процессов преобразования, распределения, регулирования в подобных электроэнергетических системах.

Большого внимания требуют также вопросы разработки и создания ВЭУ, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации, обладающими достаточно надежными энергетическими характеристиками. Эффективное решение подобных задач в основном связано с использованием методов физического и математического моделирования.

**Степень изученности и разработанности темы исследования.**  
Проблемам математической интерпретации процессов преобразования,

распределения, регулирования в электротехнических и электроэнергетических системах, посвящены работы К.С. Демирчяна, Л.Р. Неймана, Н.В. Коровкина, Л.А. Бессонова, В.А. Веникова, Л.Д. Рожкова, Д.А. Арзамасцева, Н.И. Воропая, Ю.Б. Гука и др.

Вопросы оптимизации систем на базе ВИЭ отражены в работах отечественных и зарубежных ученых: В.П. Харитонова, П.П. Безруких, В.В. Елистратова, В.И. Виссарионова, О.С. Поппеля, Б.В. Лукутина, С.Н. Удалова, В.З. Манусова, С.Г. Обухова, А.К. Киргизова, Ф.О. Исмоилова, К. Pope, ГЕН..F. Naterer, S. Eriksson, и др.

Работа посвящена решению как теоретических, так и практических проблем повышения эффективности и оптимизации локальных электроэнергетических систем, в частности, на территории Республики Таджикистан.

**Объектами исследования диссертационной работы являются локальные электроэнергетические системы на базе возобновляемых источников энергии, в том числе локальные энергосистемы на основе МГЭС и ВЭУ.**

**Предмет исследования:** повышение эффективности функционирования локальных электроэнергетических систем на базе возобновляемых источников энергии за счет их комплексного использования.

**Цель диссертационной работы** состоит в создании научно-обоснованной теории оптимизации режимов работы разнохарактерных генерирующих источников в локальных электроэнергетических системах и разработке технических решений по повышению эффективности ветроэнергетических установок.

**Задачи исследований.** Для достижения поставленной цели в данной диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1. Обобщить и проанализировать информацию о современном состоянии электроэнергетики на территории Республики Таджикистан, а также существующих способов и средств повышения их энергетической

эффективности, ослабления зависимости удаленных населенных пунктов от наличия водных ресурсов.

2. Разработать метод оптимизации энергопотребления от локальной энергосистемы, предусматривающий учет различных источников возобновляемой электрической энергии.

3. Разработать расчетную математическую модель локальной электроэнергетической системы на основе МГЭС, ВЭУ и накопителя энергии для оценки и анализа эффективного управления активной нагрузкой в условиях дефицита воды.

4. Исследовать влияние ветроэнергетической установки на режим работы локальной электроэнергетической системы и изменение конфигурации графиков нагрузки потребителей (или групп потребителей) активной мощности.

5. Провести комплексное исследование по физическому и математическому моделированию режимов работы ветровых энергетических установок, выполнить анализ их влияния на работу локальной электроэнергетической системы и на основе полученных результатов разработать рекомендации по практическому применению;

6. Разработать и запатентовать конструкцию ветровой установки многолопастного типа, имеющую улучшенные показатели по стартовому моменту, коэффициенту использования ветра, устойчивости работы конструкции при работе в условиях турбулентности, а также обеспечивающей снижение затрат на обслуживание.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач применяются методы теоретической электротехники, метод минимизации линейной функции при линейных ограничениях в виде равенств и неравенств (симплекс-метод), методы математического моделирования, программный пакет MATLAB/Simulink, методы физического моделирования.

**Научная новизна** работы состоит в том, что в ходе научно – исследовательской работы получены следующие научные результаты:

1. Решена задача оптимизации энергопотребления от локальной энергосистемы, предусматривающая учет различных источников возобновляемой электрической энергии, таких как малые гидроэлектростанции, ветроустановки с накопителями различного типа.

2. Разработана методика повышения эффективности работы малых ГЭС в условиях дефицита воды, предусматривающая подключение к сети ветрогенератора и нагрузки, разделённой на две части: строго заданную и вариативную, изменяющую в целях оптимизации.

3. Разработана конструкция ВЭУ карусельного типа с вертикальной осью, включающая в себя использование одно, двух и многоярусных конструкции ветроколеса;

4. Доказана эффективность корректировки конструкции ветротурбины, в частности, путем изменения соотношения сторон ротора и размеров лопасти с целью увеличения коэффициента мощности. Получены достоверные результаты, позволяющие рассматривать режимы работы в широком диапазоне изменения скорости ветрового потока (от 1 м/с до 30 м/с).

### **Практическая ценность работы**

1. Результаты исследований и разработанные научно-технические решения по созданию локальных электроэнергетических систем с разнохарактерными источниками электроэнергии могут быть использованы для реализации долгосрочной программы освоения возобновляемых источников энергии в Республике Таджикистан.

2. Разработанная ВЭУ с улучшенными энергетическими показателями может быть использована при создании локальных электроэнергетических систем, предназначенных для эксплуатации в заданных условиях удаленных и труднодоступных населенных пунктов Республики Таджикистан.

3. Материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс департамента электроэнергетики и электротехники ДВФУ (Дальневосточного федерального университета), а также на кафедре электрические станции ТТУ имени академика М.С. Осими.

4. Результаты диссертационной работы использованы при создании экспериментальной установки локальной электроэнергетической системы на базе ветрогенератора на кафедре электроэнергетики и электротехники ДВФУ, а также на кафедре электрические станции ТТУ имени академика М.С. Осими.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Пути решения проблем обеспечения электроснабжением потребителей в удаленных районах Таджикистана.

2. Принципы создания локальных энергетических систем на базе использования различных источников возобновляемой энергии.

3. Структура и принцип реализации экспериментального образца вертикально - осевой ВЭУ с двухъярусным ротором.

4. Алгоритм корректировки конструкции ветротурбины, в частности, путем изменения соотношения сторон ротора и размеров лопасти с целью увеличения коэффициента мощности.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований режимов работы вертикально-осевой ВЭУ карусельного типа в составе ЛЭС.

**Личный вклад автора** состоит в общей постановке цели и задач исследования, проведения экспериментальных исследований по определению основных показателей ветроэнергетической установки, участие в обработке, анализе, обобщение полученных результатов, подготовке материалов к публикации, а также формулирование основных выводов выполнен автором совместно с научным руководителем.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы» (п. 3.1, п. 3.3, п. 3.4, и п.3.11).

**Реализация результатов работы.** Результаты работы могут быть использованы при разработке и внедрении автономных систем электроснабжения на базе МГЭС и ВЭУ для локальных электроэнергетических систем удаленных населенных пунктов Республики Таджикистан.

Материалы диссертации внедрены в департаменте «Энергетических систем» ДВФУ в учебном процессе по курсам «Электроснабжение городов и сельской местности», «Основы проектной деятельности», научно-исследовательском семинаре «Энергосберегающие технологии в электроэнергетике». Также и на кафедре «Электрические станции» ТТУ имени академика М.С. Осими в учебный процесс по дисциплинам «Физические основы возобновляемых источников энергии», «Режимов работы оборудования ВИЭ», курсовом проектировании и выпускных квалификационных работах.

**Достоверность и обоснованность научных результатов** подтверждается корректным использованием известных научных методов обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Обоснованность результатов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных результатов по разработанной методике и численных результатов расчета.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертации были представлены на: XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2013г.); X Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительство и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительство и энергетики» (Тула, 2014г.); VII Международной научно – практической конференции «Перспективы развития науки и образования» (Душанбе, 2014г.); XI Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительство и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительство и энергетики» (Тула, 2015 г.); Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования» (Владивосток, 2016г.); Международной научно-практической конференции: «Развитие социального и научно-технического потенциала общества»

(Москва, 2018г.); Тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Девятой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» (Ростов-на-Дону, 2018г.); XV Международной научно-практической конференции «Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее» (Пенза, 2018г.); Региональной научно-практической конференции молодых ученых «Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы» (Владивосток, 2016г.);

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатных работ, в том числе 3 работы в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований, 9 работ – в трудах Международных и Всероссийских научно-технических конференций, 2 работ в других изданиях, 6 патентах на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 135 наименований и приложений; Объем диссертационной работы состоит из 165 страниц содержащей 12 таблицы и 60 рисунков.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Локальные системы электроснабжения известны давно, но после появления генерирующих установок большой мощности, и их объединений они уступили свое место централизованным энергетическим сетям. Хронология развития локальных систем электроснабжения в мировом масштабе приведена на рисунке 1.1.

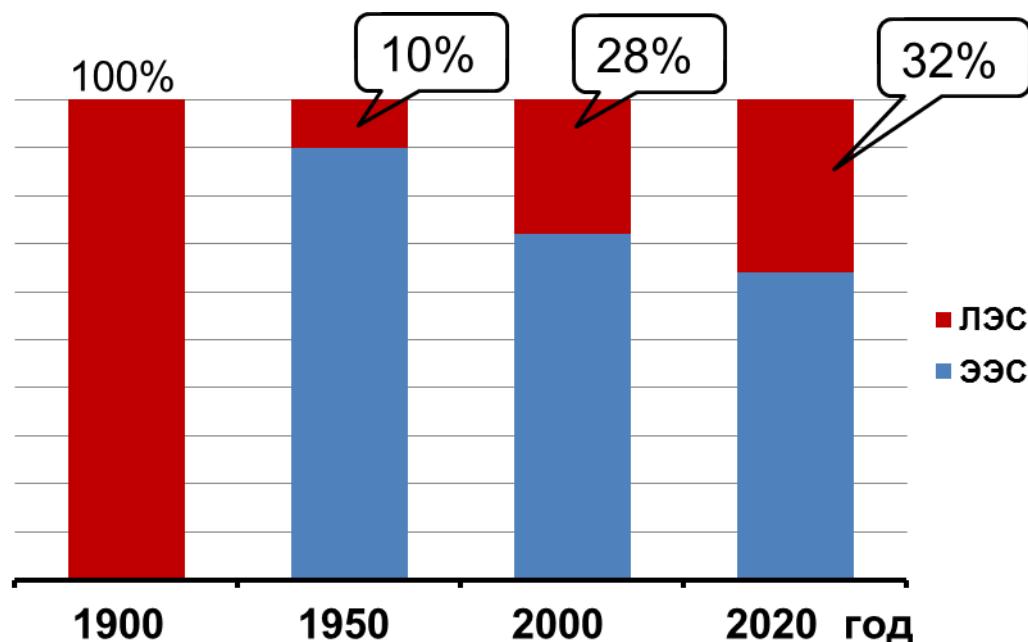


Рисунок 1.1. Хронология развития локальных систем электроснабжения в мировом масштабе: ЛЭС – локальная электроэнергетическая система; ЭЭС – электроэнергетическая система

Доля локальных систем в Канаде составляет 7%, в США 12%, в странах ЕС в среднем 10% [1,2,3], в России 7-10% от общей установленной мощности [4].

В Таджикистане доля локальных систем электроснабжения оценивается около 1-1,5% от общей установленной мощности. Если рассматривать по территории, то локальные системы занимают свыше 35 % от общей территории Республики [5,6,7].

Локальные системы электроснабжения (локальные СЭС) обычно рассматриваются как надежные и экономичные комплексы, обеспечивающие электроснабжение на территориях агропромышленного сектора, сезонных объектах сельскохозяйственного и социального назначения, редко обслуживаемых специальных объектов, небольших населенных пунктах, а также потребителей в условиях городской среды [3,4,8,9].

### **1.1. Требование к локальным системам электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии**

Локальные системы для электроснабжения потребителей (малой и средней мощности) эффективны там, где расширение зоны централизованного энергоснабжения невозможно из-за крайней удаленности или нецелесообразно из-за большой капиталоёмкости сооружения и эксплуатации линий электропередач.

По определению (ФЗ №250 от 04.11.07 РФ) автономные Системы Электроснабжения (СЭС) с широким, максимальным использованием без топливных источников – класс систем для получения электро- и других видов энергии с большой долей без топливных, возобновляемых источников единичной мощностью не более 25 МВт, предназначенных для электроснабжения потребителей, находящихся непосредственно в точках генерации либо на небольшом удалении от них.

В последнее время технология создания локальных систем электроснабжения (в том числе на базе возобновляемых источников) находят применение и в больших городах, испытывающих дефицит электроэнергии [8,10,11].

Большинство промышленно развитых стран активно внедряют установки на базе ВИЭ. Применение установок с использованием ВИЭ выгодны тем, что они отличаются компактностью, модульностью конструкции и их масштабируемостью. Для локальных систем электроснабжения эти

характеристики являются наиболее приемлемыми при увеличении мощности потребителей.

Требования, предъявляемые к локальным системам электроснабжения на базе ВИЭ, в основном диктуются их спецификой и потребителями электроэнергии которые имеют стохастический характер.

Работе локальных систем электроснабжения свойственны следующие особенности [12]:

1. Удаленность от пунктов технического обслуживания.
2. Стохастический характер прихода возобновляемых источников энергии.
3. Эксплуатация в сложных (экстремальных) условиях.

Связи с вышеуказанными особенностями, эксплуатация локальных систем электроснабжения предъявляет специфические требования к оборудованию.

Целесообразность создания и эксплуатации локальных систем электроснабжения на базе ВИЭ для потребителей малой мощности обусловлено в основном следующими причинами [9,13,14,15,16]:

- 1) низкие потери из-за малой удаленности потребителей от источника;
- 2) разгрузка существующих ЛЭП;
- 3) повышение надежности электроснабжения вследствие увеличения количества источников;
- 4) нестабильность цен на топливном рынке;
- 5) экономическая нецелесообразность содержания большого парка генерирующих установок работающих на привозном топливе.

## **1.2. Классификация локальных систем электроснабжения с использованием источников малой генерации**

Локальные СЭС обычно классифицируются по суммарной установленной мощности, и по виду электрической схемы соединения, а также назначении. Классификация локальных СЭС представлена на рисунке 1.2.

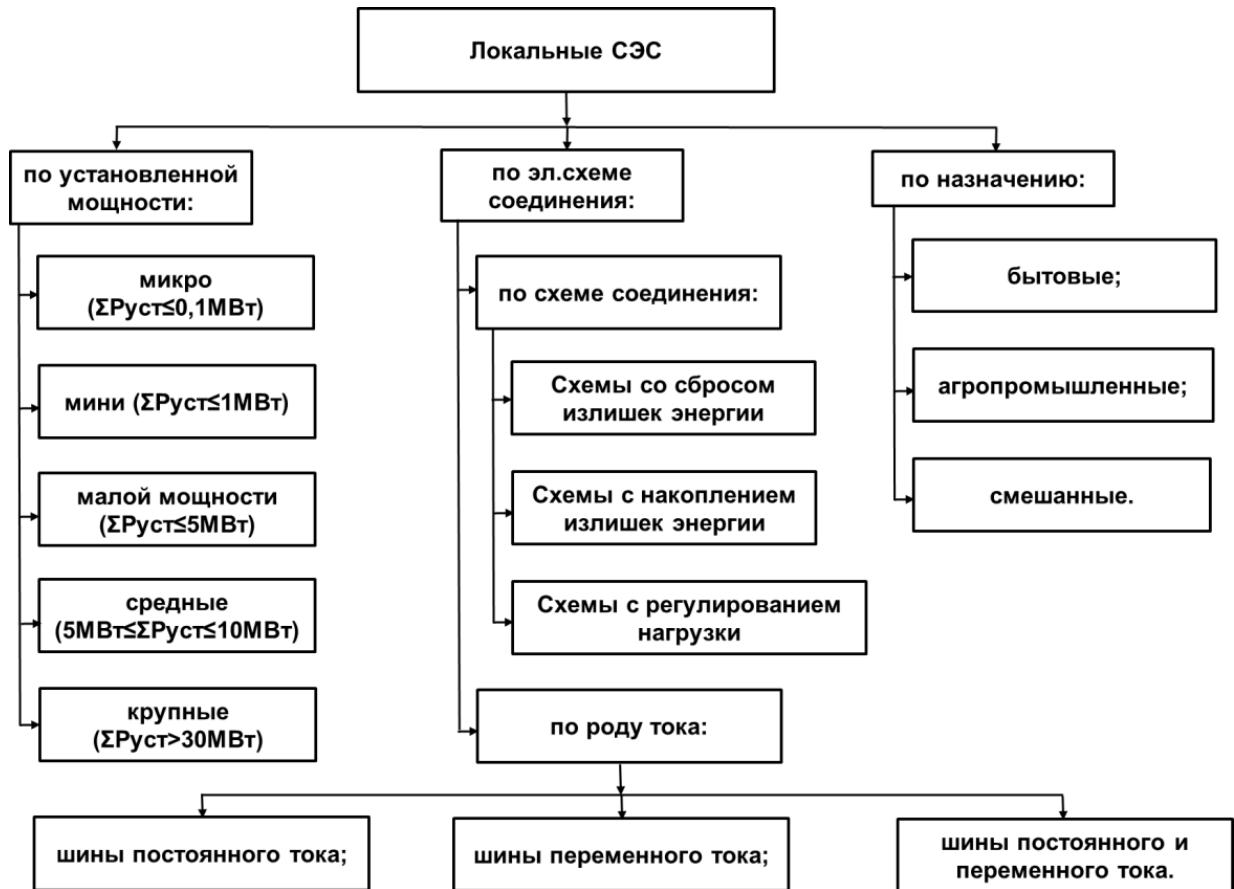


Рисунок 1.2. Классификация локальных СЭС

В зависимости от суммарной установленной мощности энергоустановок, можно выделить:

- 1) микро ( $\Sigma P_{уст} \leq 0,1 \text{ МВт}$ );
- 2) мини ( $\Sigma P_{уст} \leq 1 \text{ МВт}$ );
- 3) малой мощности ( $\Sigma P_{уст} \leq 5 \text{ МВт}$ );
- 4) средней мощности ( $5 \text{ МВт} \leq \Sigma P_{уст} \leq 10 \text{ МВт}$ );
- 5) крупные ( $\Sigma P_{уст} > 30 \text{ МВт}$ ).

По основным видам схемы соединения источников и потребителей различают:

- Схемы со сбросом излишков энергии. Данный способ реализуется, например, подключением балластной нагрузки и/или использования части потенциала: в ветровых энергетических установок за счет изменения угла установки (или длины) лопасти; в малых ГЭС за счет холостых сбросов.

- Схемы с накоплением излишек энергии. Для накопления излишек энергии используются различные буферные накопители энергии: гидроаккумулирующие системы, маховики, аккумуляторные батареи и др.

- Схемы с регулированием нагрузки. Осуществление регулирования потребляемой мощности предполагает, что нагрузка потребителя состоит из строго заданной и вариативной части.

Также схемы энергообеспечения потребителей от локальных СЭС различаются по роду тока:

- шины постоянного тока;
- шины переменного тока;
- шины постоянного и переменного тока.

По назначению локальные СЭС различаются следующим образом:

- бытовые системы, предназначенные для электроснабжения одного или группы бытовых потребителей;
- агропромышленные, предназначенные для электроснабжения небольших агропромышленных комплексов;
- смешанные системы, в состав которых входят и бытовые и агропромышленные потребители.

По составу энергоисточников:

- системы с одним видом энергоисточника (например, дизель электрическая станция (ДЭС) или ВИЭ);
- комбинированные системы (совместное использование ДЭС и ВИЭ, или несколько источников возобновляемой энергии).

### **1.3. Исследование и анализ локальных систем электроснабжения на базе ВИЭ**

Структуру локальных систем электроснабжения – можно представлять в виде совокупность трех взаимосвязанных подсистем: автономных электростанций (АЭ), распределительных электросетей (РЭ) и потребителей электроэнергии (ПЭ), расположение которых ограничивается заданной или же

рассматриваемой территории. Вся подсистема представляет собой единый электротехнический комплекс, эффективность работы которого зависит от оптимизации и согласование параметров, характеристик и режимов их работы между собой.

Проблемой разработки локальных СЭС является то, что методы и методологии, известные для создания электроэнергетических систем (ЭЭС), не могут быть применены при их разработке. При разработке локальной ЭС невозможно ограничиться рассмотрением баланса мощностей как в ЭЭС, это связано, прежде всего, с характером используемого энергоресурса, режима потребления электроэнергии и др. факторов, несмотря на тот факт, что в локальных СЭС не так много элементов чем в ЭЭС. Если локальная ЭС создается на базе ВИЭ, тогда при разработке также необходимо учитывать характер прихода возобновляемого энергоресурса, что усложняет задачу, решение которой требует применения сложной математической модели.

Вопросами разработки локальных СЭС на базе ВИЭ уделяется большое внимание как в Таджикистане так и в других странах [16-22], так как при рассмотрении вопросов применения возобновляемых источников необходимо решить задачи характерных только данному источнику.

В работах [22,23,24] приводится пример решения задачи по разработке и внедрения локальных ЭС на базе ветро-дизельных электрических станции. При создании локальных ЭС на базе ветро-дизельных источников генерации уделяется большое внимание вопросам оптимизации работы дизель-электрической станции и режимов заряд/разряда АБ, но режим работы ветроустановки не регламентируется.

В работах [13, 25, 26] авторы предлагают для разработки локальной ЭС рассмотрение использования солнечных фотоэлектрических панелей и в качестве резервного источника использование АБ. В данном случае стоимость локальной ЭС становится высоким из – за высокой стоимости АБ и необходимости их замены, прежде чем истекает срок окупаемости энергокомплекса.

Вопросы включения ВЭУ и/или ВЭС на параллельную работу с энергосистемой рассмотрены в [27]. Отмечено, что при соизмеримости мощностей ВЭУ (ВЭС) и ЭС возникает необходимость решения задач регулирования негативного влияния ВЭУ на показатели качества электрической энергии, загрузку оборудования, токов КЗ, баланса мощности и энергии.

В работе [23] приведен анализ ВЭУ для автономных систем электроснабжения с различными генераторами. Однако вопросам применения генераторов на основе постоянных магнитов в автономных системах электроснабжении не приведены сведения.

Объединение ГЭС и ВЭС или другого источника на базе ВИЭ впервые было предложено Я. Шефтером, которое получило свое развитие в работах [1, 28], а вопросы аккумулирования энергии в составе энергокомплекса [16]. Данная идея заключается в том, что при заданных первоначальных условиях требуется выполнения критерия оптимизации без нарушения установленных ограничений для режимов ГЭС с возможностью перераспределения и аккумулирования гидравлической энергии.

Вопросы автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью рассмотрены в [15]. В работе [29] приведены результаты экспериментальных исследование низкооборотного магнитоэлектрического генератора, а в [30] рассмотрены характеристики электрогенератора ветроустановки с вертикальной осью вращения. Моделирование генератора на постоянных магнитах в [31], а с асинхронным генератором двойного питания в [32].

В работах [33, 34, 35, 36] рассмотрено имитационное моделирование ВЭУ в программе MATLAB/SIMULINK, электрических нагрузок и их влияние на форму питающего напряжения в автономных систем электроснабжения.

Основное внимание уделяется вопросам касающийся надёжностью, бесперебойности, устойчивости, пропускной способности ЛЭП и снижение потерь (электроэнергии, финансовых и топлива).

Для всех видов и типов генерирующего источников возобновляемой энергии, систем электроснабжения на их основе, и систем управления режимам их работы предложены ряд различных математических моделей, теоретическая и практическая достоверность которых всесторонне обоснована, проверена экспериментами и практическими опытами эксплуатации [33, 34].

Имеются целый ряд компьютерных программ для анализа производительности и надежности, локальных СЭС – MatLab, SiminTech и др. [4], с возможностью моделирования процессов производства, передачи, потребления, а также различных режимов управления с учетом воздействия внутренних/внешних факторов. Данные программы позволяют с достаточной степенью детализации описанию всех основных факторов, необходимые при анализе надежности сложных много-узловых ЭС с учетом надежности генерирующей и передающей её частей, определением необходимых резервов, возможных ограничений потребителей и мероприятий для обеспечения требуемой надежности СЭС [37].

Вместе с тем, следует отметить, что в практике проектирования СЭС применяется весьма ограниченное число разработанных математических моделей: в основном простейшие балансовые (оценочные) модели для формирования вариантов локальной СЭС и некоторые модели анализа технических условий её функционирования [38].

Однако решение задач оптимизации локальной СЭС, состоящей из МГЭС, накопителя энергии и ВЭУ при жестком дефиците воды не было рассмотрено. Математическая модель для описания данной задачи достаточно сложна, поскольку по математическим меркам имеет чрезвычайно большую размерность [39, 40].

Таким образом, требуются специализированные математические модели анализа отдельных факторов или решения частных, но важных проблем связанных с оптимизации локальных СЭС. Для оценки эффективности

комбинированного использования ВИЭ в данной работы излагается возможность использования математической модели.

#### **1.4. Краткий обзор и анализ состояния электроэнергетики Республики Таджикистан**

В конце 80-х и начале 90-х годов электроэнергетика Таджикистана считалась одной из лучших не только среди союзных республик СССР, но и государств Азии. Произошедшие в 90 годы политические события неблагоприятно отразились на энергетической отрасли республики. В большинство районов республики была полностью прекращена поставка природного газа, что привело к резкому увеличению нагрузок в отопительный период. Так как большая доля (96%) установленной мощности системы приходится на гидроэлектростанции (ГЭС), то в осенне-зимний период из-за сокращения стока дефицит электроэнергии составляет 2 – 4 млрд. кВт\*ч [5,7].

Ситуация стало больше ухудшаться после самоликвидации в 2009 году Единой Энергетической Системы Средней Азии (ЕЭС СА), которая являлась единственным рынком импорта электроэнергии в зимний период и экспорта излишков в летний период. Энергетическая система Республики была полностью изолирована и разделена на три отдельные системы: Север, Юг и Горно-Бадахшанская автономная область. Позднее первые две системы были объединены между собой линией электропередачи (ЛЭП) 500кВ «Юг-Север», которая принадлежит ОАХК «Барки Точик» [7].

Энергосистема ГБАО (Горно - Бадахшанской автономной области) с 2002 года перешла от ОАХК «Барки Точик» к «Памир Энерджи» которая является частной компании. Согласно «Концессионного соглашения» срок передачи энергосистемы составляет 25 лет. В настоящее время энергосистема ГБАО состоит из 11 гидроэлектростанции («Памир-1» 28 тыс. кВт, «Хорог» и 9 малых ГЭС) общей установленной мощностью 43,5 тыс. кВт, которые работают в изолированном режиме [41].

В рамках программ развития энергетической отрасли Республики Таджикистан на основании принятых законов и постановлений программа развития состоит из трёх этапов - краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного [41]. В последние годы Правительством активно ведутся переговоры с зарубежными донорами на строительство новых электростанций. В период независимости в республике было введено в эксплуатацию две гидроэлектростанции и одна теплоэлектростанция суммарной мощностью более 1300 МВт.

Республика Таджикистан, являясь горной страной (горы занимают 93% территории), богата гидроресурсами, по запасам которых среди стран СНГ занимает второе место после России [42,43]. По потенциалу резервов гидроэнергии на 1 кв. км территории (3 682,7 тыс. кВтч в год на кв. км) республика занимает первое место в мире, намного опережая другие государства. К сожалению, эти ресурсы в настоящее время используются лишь на 3,1% - в основном гидроэлектростанциями, построенными на реках Вахш и Сырдарья [7,43,44].

В Таджикистане согласно [43,44,45,46] общие потенциальные гидроэнергетические ресурсы, оцениваются среднегодовой мощностью в 51,8 млн. кВт (см. рис. 1.3)



Рисунок 1.3. Среднегодовой мощности потенциала гидроэнергетических ресурсов, млн.кВт

Ресурсы малых рек (малых водотоков) в основном относятся реки мощностью более 2 тыс. кВт, которые имеется возможность производство энергии с помощью малых гидроэлектростанции (МГЭС).

Согласно [46] в Республике Таджикистан помимо гидроресурсов, имеются большие запасы угля и природного газа, а также возможность использования возобновляемых источников энергии см. рис. 1.4.

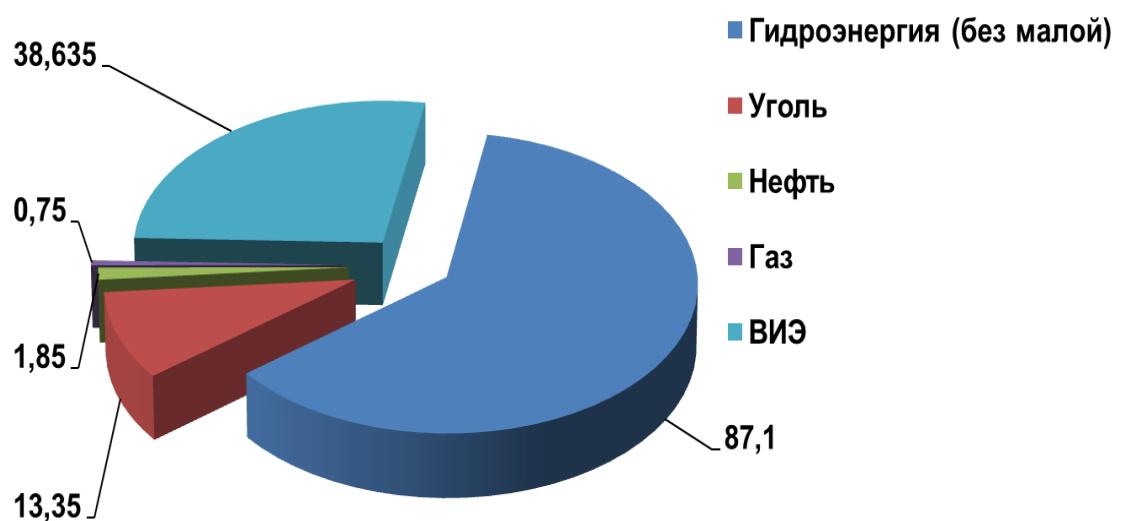


Рисунок 1.4. Технические запасы энергоресурсов Республики Таджикистана, млн. т.у.т. в год

Анализ данных показывает, что общие технические запасы энергоресурсов Таджикистан составляет 141,685 млн. т.у.т. в год. Однако в настоящее время их освоение происходит медленными темпами и объем освоения составляет менее 5%. Тем не менее в последнее время наблюдается темпы роста потребности в электроэнергию, что обострило дефицит электроэнергии в осенне – зимний период. Анализ показывает, что основными причинами роста потребности в электроэнергии является естественный рост численности населения, расширение городов и населенных пунктов в Таджикистане (см. рис. 1.5). За годы независимости населения

республики вырос на 80%, т.е. с 5358 тыс. чел. (1991 г.) на 9504 тыс. чел. (2021 г.) [47,48].

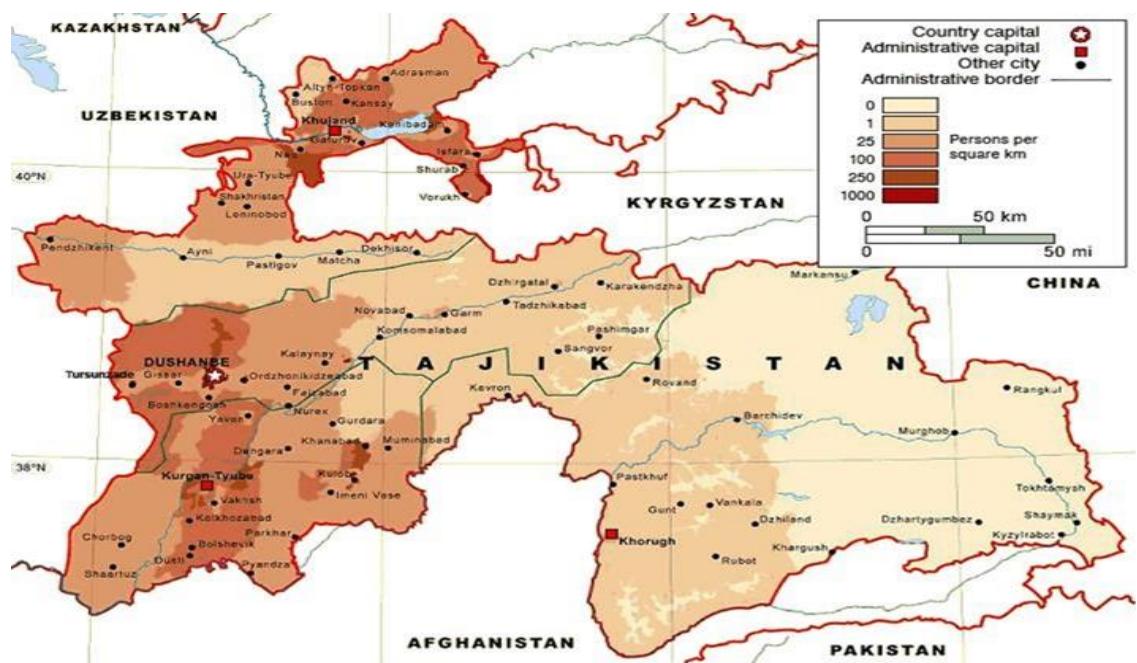


Рисунок 1.5. Плотность населения по территории республики

Таким образом, анализ показывает, что для энергетической отрасли Таджикистана актуальными являются вопросы касающиеся проблемам энергетики, энергообеспечения, надежности и эффективности с применением доступных энергоресурсов и в том числе использование возобновляемых источников энергии.

#### 1.4.1. Анализ потенциала возобновляемых источников энергии Республики Таджикистан

Анализ научно-технической литературы показал, что большинство из них посвящены наиболее доступных видов возобновляемых ресурсов: энергии воды, солнца, ветра, термальных вод и биоресурсы. На территории Республики Таджикистан все они доступны и их суммарный потенциал оценивается в объеме более 38,635 млн. т.у.т. в год (технический потенциал), но, несмотря на это их доля участия в энергобалансе республики без учета

МГЭС почти нулевое (см. рис.1.4). Согласно [49,50,51] из всех видов возобновляемых ресурсов наибольшую привлекательность по техническому потенциалу имеют ресурсы малых рек, ветра и солнечной энергии (см. рис. 1.6).

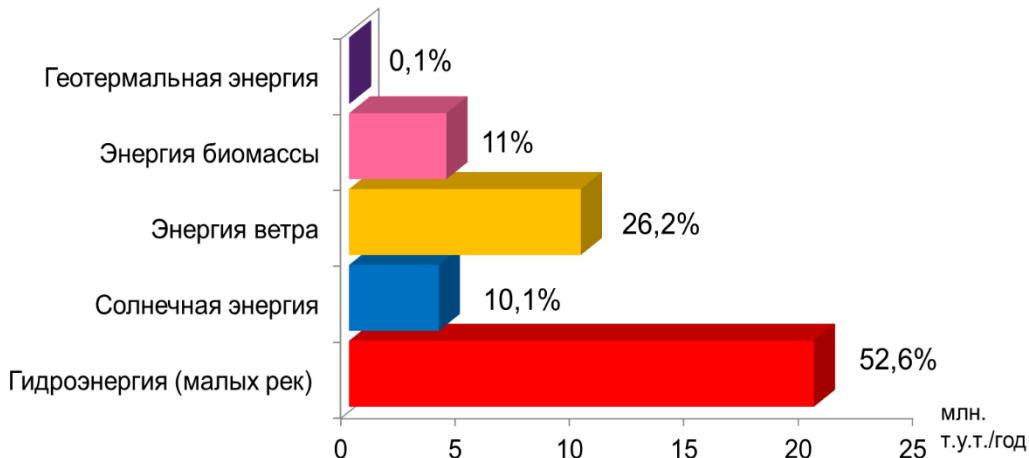


Рисунок 1.6. Технический потенциал ресурсов ВИЭ (в млн. т.у.т./год и в %) Республики Таджикистан

Согласно, вышеприведенной гистограммы на рисунке 1.6 технический потенциал энергия малых рек в республике составляет 52,6 % (20,3 млн. т.у.т./год) от общего объема доступных ВИЭ, вторим, по объему является энергия ветра 26,2% (10,12 млн. т.у.т./год), солнечная энергия 11%, энергия биомассы 10,1% и энергия термальных вод 0,1%.

**Возобновляемые ресурсы малых рек.** Первое промышленное использование гидроэнергии датируется в середине 30 – х годов прошлого века (Варзобская ГЭС-1, мощностью 7,15 МВт была построена в 1936 году). В связи с переориентацией на большую энергетику и началом строительства крупных ГЭС, повсеместное строительство МГЭС в Таджикистане, как и во всем бывшем СССР, были остановлены.

После приобретения государственной независимости, Правительством Республики Таджикистан было принято Постановление (№ 73 от 2 февраля 2009 года) "Долгосрочная Программа строительства малых электростанций на период 2009-2020 годов" (см. табл.1.1).

Таблица 1.1 - Программа строительства малых электростанций на период 2009-2020 годов с разбивкой на этапы

№ п/п	Этап	Название	Период реализации, год	Кол-во МГЭС, шт.	Общ. уст. мощность, кВт
1	Первый	Краткосрочная программа	2009-2011	66	43350
2	Второй	Среднесрочная программа	2012-2015	70	3285
3	Третий	Долгосрочная программа	2015-2020	53	28801

Кроме того в 2016 году было принято **Постановление № 636 (от 01.12.2016г.) «Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года»** [52]. В рамках данной Национальной стратегии развития одним из приоритетных направлений указано «Энергетическая независимость Таджикистана».

Следует отметить, что в настоящее время информация о количестве действующих МГЭС по всей Республики Таджикистан в различных источниках разная [5,6,7]. Согласно официально опубликованным данным [6] общее число МГЭС составляет 155 единиц с установленной мощностью 12,184 МВт. Из них построены за счет бюджетных средств 94, остальные за счет частных и грантовых финансовых вложений.

Из практики известно, что в зимний период, когда заметно повышается спрос на электроэнергию, поток воды в горных реках резко сокращается (см. рис. 1.7). Тем самым снижается гарантированная выдача мощности, практически становится невозможным, покрыть пик нагрузки в энергосистеме. Единственным решением в таких моментах является отключение большого числа потребителей третьей категории.

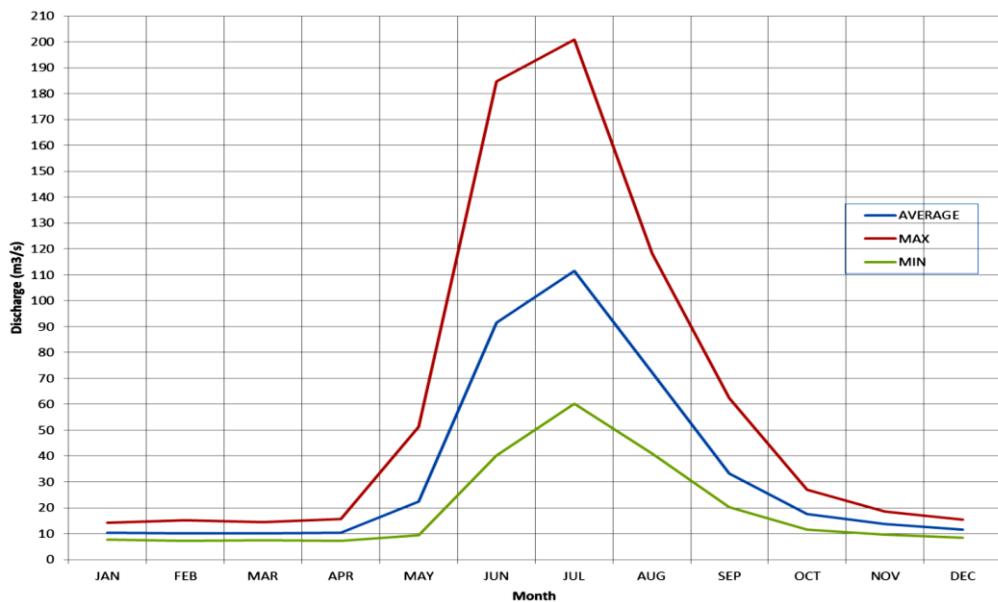


Рисунок 1.7. Характерный график изменения режима воды на маленьких притоках горных реках Таджикистана

Исследования показывают, что большинство МГЭС в Республике Таджикистан из-за несоответствия мощности установленного гидроагрегата мощности потока воды в холодный период года резко сокращают выработку электроэнергии, или вовсе останавливаются [40]. Основная масса МГЭС построена в период пика массового строительства с 2006 по 2009 гг. К сожалению, большая часть из них построена с отклонениями от технологии, без учета информации о режимах водности рек, что привело к недоиспользованию мощности гидротурбин и/или потока воды. Также не были учтены топографические и геологические особенности выбранных участков. В зимние периоды большинство деривационных каналов, а также оборудование гидротехнического тракта подвергаются обледенению, что делает невозможным эксплуатацию станции.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно делать вывод о том, что рассмотрение ресурсов малых рек в качестве основного источника для локальных СЭС, не может гарантировать надежность электроснабжения потребителей.

**Возобновляемая энергия Солнца.** В настоящее время в Таджикистане, несмотря на благоприятные природно-климатические условия, нет промышленных мощностей по выработке солнечной энергии (кроме отдельных маломощных установок до 8-10кВт). Потенциал солнечной энергии в Таджикистане оценивается примерно в 25 млрд. кВт·ч/год, или равной 3,92 млн. т.у.т. в год. Конкретной цифры об использовании солнечного потенциала нет, оно оценивается в пределах 0,01-0,015% [47,50].

Общее количество солнечного излучения при безоблачных днях достигает 7500-8000 МДж/м<sup>2</sup>. В приложение П.А. приведена обобщенная карта продолжительности солнечной радиации в различных регионах Республики Таджикистан, где можно увидеть потенциал солнечной энергии по всей республике. Более подробный анализ проведен в работах [53,54,55,56,57].

Для Таджикистана большие перспективы имеет использование солнечной энергии, так как в республике наблюдается 280-330 солнечных дней в году. Согласно данным приведенных в [53] среднесуточное значение теоретического солнечного облучения в ясный день составляет 228 Вт/м<sup>2</sup> (см. табл. 1.2).

Таблица 1.2 - Параметры солнечного облучения на поверхности по месяцам для Республики Таджикистана (теоретическая)

Величина солнечного облучения	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Вт/м <sup>2</sup> .ср. сут.	150	174	231	289	312	324	301	289	220	174	139	127

Данные приведенные на рис. 1.8 показывают, что наименьшие интенсивность солнечного излучения наблюдаются в холодные период года (январь-февраль; октябрь-декабрь), а повышение интенсивности наблюдается с марта по сентябрь т.е. в теплый период года, что характерно для республики.

Большинство поселений в высокогорных районах Республики Таджикистан расположены в узких долинах и у подножия высоких гор, соответственно в

определенные периоды года поступления солнечной энергии из-за закрытости горизонта окружающими хребтами может быть ниже, чем равнины. В некоторых участках особенно в узких долинах наблюдается снижение поступления солнечной энергии до 15-20%.

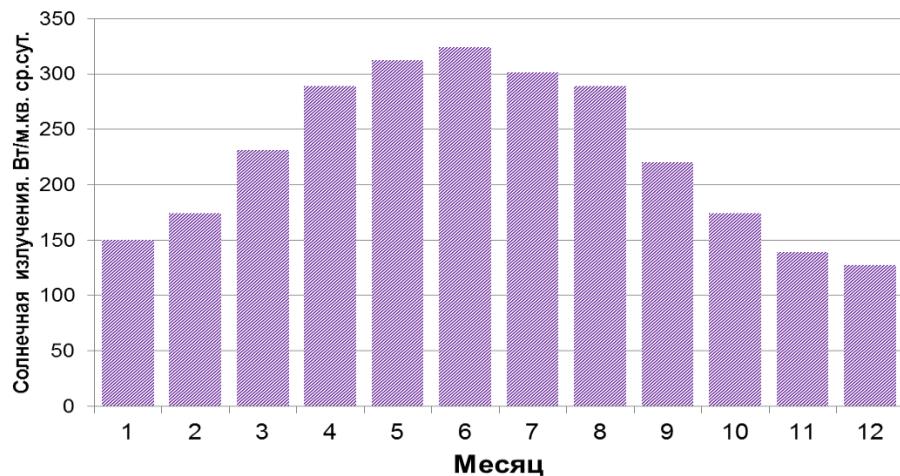


Рисунок 1.8. Интенсивность солнечного излучения по месяцам года для республики Таджикистан (среднесуточная)

Ввиду преобладания гидроэлектроэнергии, фотоэлектричество, предположительно, по причине дороговизны и сложностей в работе, не будет иметь широкого распространения. Однако имеются хорошие перспективы для использования солнечных уличных светильников, систем независимого электропитания для радиопередающих устройств, метеостанций и т.п.

**Возобновляемая энергия ветра.** Ветровая энергия в отличие от гидро- и солнечной энергии по территории Таджикистана распределена неравномерно (см. приложение Б1), среднегодовая скорость ветра в зависимости от географической расположения и рельефа местности колеблется в широких пределах см. приложение Б2. В республике метеорологическая сеть считается слаборазвитой, что ограничивает возможности реальной оценки ветровых потенциалов на местности с точностью до 1 км. Но, несмотря на существующие проблемы, ученые и специалисты данной сферы проводят научные и экспериментальные исследования.

Более подробно оценка потенциала ветровых ресурсов территории Республики Таджикистан приведена в п. 1.4.2. данной главы.

**Возобновляемые ресурсы биомассы.** Практически во всех районах Таджикистана встречаются ресурсы биомассы, которые представляются возможным для получения электроэнергии. На сегодняшний день различают следующие основные группы биомасс [56]:

- биомасса неживотного происхождения;
- отходы животноводства;
- водную биомассу;
- промышленные и городские отходы органического происхождения.

В настоящее время в Таджикистане используется 70 официальных свалок твердых бытовых отходов (ТБО), где накоплено 23.6 млн. м<sup>3</sup> отходов, размещенных на 296 га площади [47,49]. Несмотря на значительный прорыв в области переработки ТБО, вопросы экологии и сохранения природы, до сих пор не организована промышленная переработка ТБО.

В последние годы наблюдается положительная динамика развития животноводство и птицеводство [49].

**Возобновляемые ресурсы термальных вод.** В республике имеются 33 термальных источника с общим дебетом 174.25 л/сек., из них 60.63 л/сек. – на Памире. Термальные источники Таджикистана имеют температуру на изливе от +38 до + 93°C, при среднем значении +50°C [51]. В настоящее время в основном термальные источники используются в лечебных целях и для теплоснабжения теплиц и зданий. В качестве источника для получения электроэнергии пока не рассматриваются.

#### **1.4.2. Оценка потенциала ветровых ресурсов по территории Республики Таджикистан**

В работах [58, 59, 60, 61] рассмотрены перспектива, существующие проблемы использования ВИЭ (в частности ветровой энергии), а также предложены возможности использования ветровой энергии в Таджикистане.

В [61, 62] были исследованы вопросы обеспечения балансов мощности и энергии электроэнергетических систем с распределенной генерацией.

Показано влияние распределенной генерации на формирование балансов мощности и энергии в ЭС и точность их прогнозирования. В работе [62] показаны методы анализа сложных структурных схем электроэнергетических систем. В работе [63] разработана методика расчета показателей балансовой надежности электроэнергетических систем. В работах [64,65,66] рассмотрены вопросы интеграции генерирующих установок объектов распределенной генерации в распределительные сети и/или локальной электроэнергетической системы.

Республика Таджикистан расположено в Центрально Азиатском регионе и являясь горной страной (93% территории занимают горы) занимает площадь 141,4 тыс. км<sup>2</sup> [67]. Согласно [48] численность населения РТ составляет 9,538 миллионов, из них более 70% проживают в горных районах.

В настоящее время, несмотря на то, что по своему географическому расположению и природно – климатическим условиям потенциал ветровой энергии в Таджикистане благоприятные условия к использованию до сих пор промышленного использования нет в республике.

Анализ показывает, что Республике Таджикистан имеет определенный потенциал ветровой энергии. В качестве примера можно привести данные по результатам измерений некоторых метеостанций среднемноголетняя скорость ветра, такова [51].

- метеостанция «Худжанд» - 4,6 м/с (в северной части Республики);
- метеостанция «Ховалинг» - 4,3 м/с (в южной части Республики);
- метеостанция «Файзабад» - 4,1 м/с (в северо – восточной части Республики) районы республиканского подчинения;
- метеостанция «Сангвор» - 2,7 м/с (в восточной части Республики);
- метеостанция «Бустонабад» - 4,7 м/с (в северной части Республики).

В отличие от гидравлической и солнечной энергии, потенциал ветровой энергии по территории Таджикистана распределена неравномерно (см. прил. П.Б.1). В зависимости от географической расположения и рельефа местности колеблется в широких пределах. В осенне – зимний период (ноябрь-март) в

большинстве территории Раштской долины, Фазабадского и Мургасского районов, в городе Ходжент, перевалы Шахристан, Анзоб, Хабуробад и Чормагзак наблюдается усиление скорости ветра начиная от 2,5 м/с до 8 -12 м/с, а в отдельных районах порывы ветра достигают 24-30 м/с.

При использовании доступной ветровой энергии в Республике Таджикистан, можно будет удовлетворить около 15 – 30 % спроса на энергию удаленных горных районов (а также потребителей агропромышленного комплекса в условиях городской среды). По предварительным оценкам, потенциал ветровой энергии в Республике Таджикистан составляет 30 – 100 млрд. кВт\*час в год, которое может быть соизмерим с технически возможным к использованию потенциала энергии малых рек [52].

В таблице П.Б.2. приведена среднегодовая скорость ветра по территории Республики Таджикистан. Результаты анализа данных показывает, что ветровые установки в основном могут быть использованы в горных и предгорных районах с открытым рельефом. В данных районах наблюдается значительные усиления скорости ветра за счет местной погоды и поверхности местности.

Пользуясь данными приведенные в таблице П.А. для каждого населенного пункта можно рассчитать возможности получения электрической мощности с помощью ветровой энергии по известной формуле [68,69]:

Мощность ветрового потока

$$P_{\text{вп}} = A \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2}, \quad (1.1)$$

где  $A$  – ометаемая поверхность ветроколеса,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – плотность воздуха ( $1,2 \text{ кг/м}^3$ );

$V$  – скорость ветра,  $\text{м/с}$ .

Ометаемая поверхность ветроколеса с вертикальной осью вращения может быть вычислена по формуле

$$A = 2R \cdot h, \quad (1.2)$$

где  $R$  – радиус ветроколеса,  $\text{м}$ .

$h$  - высота ветроколеса, м.

Мощность ветроэнергетической установки определяется следующим образом,

$$P_{\text{вэу}} = P_{\text{вп}} \cdot C_p = A \cdot C_p \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2}, \quad (1.3)$$

где  $C_p (\xi)$  – коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ), характеризующая возможность максимальной выработки ветровой энергетической установки (ВЭУ) заданной конструкции. КИЭВ – наиболее известно как критерия Бетца – Жуковского показывающий отношение отобранной мощности ветроколесом к обладающей мощности ветрового потока равной

$$C_p (\xi) = 0,59,$$

которое справедливо для энергетической установки, отмечаемой свободным потоком жидкости или газа. Для ВЭУ с вертикальной осью вращения данный показатель колеблется в широких диапазонах в зависимости от типа конструкции  $C_p (\xi) = 0,12 – 0,4$ .

Так как предполагается использование ветроэнергетических установок (ВЭУ) в удаленных горных районах Республики Таджикистан, где электроснабжение населенных пунктов обеспечивается от малых гидроэлектростанции (МГЭС) приложение П.В.

Выбор мощности ВЭУ должно производиться с учетом условий ограничений логистики. Для условия Республики Таджикистан использование вертикально – осевых ВЭУ предпочтительнее, чем горизонтально – осевых. Согласно [69] выгоднее использовать ВЭУ малой мощности:

Во первых – экономически это выгодно, к примеру, две ВЭУ мощностью по 10 кВт каждая, в совокупности будут стоить дешевле, чем одна установка мощностью 20 кВт.

Во вторых, в условиях горных районов Таджикистана со слаборазвитой логистикой малогабаритные установки проще доставлять и монтировать, в то время как транспортировка и установка средних и крупных установок требует

специальной подготовки персонала, а также применения специальных механизмов.

В третьих, при использовании несколько малых ВЭУ в место одного среднего/крупного обеспечивается повышение надежности и энергобезопасность объекта это связано с тем, что при выходе из строя одной малой установки, минимальный уровень (заданную часть нагрузки  $P_{\text{пост.}}$ ) электроснабжения обеспечивается остальные работоспособные ВЭУ [70].

В четвертых, анализ показывает, что в удаленных районах не требуются больших мощностей [38, 71].

Для определения потенциала ветровой энергии на практике пользуются понятиями валовой, технический и экономический потенциал.

Валовой (теоретический) потенциал ветровой энергии района (страны, континента) - это часть среднемноголетней суммарной ветровой энергии, которая доступна для использования на площади региона в течении одно года [72].

Для удобства рассматриваемый район можно представить как совокупность участков (или зон). При таком представлении рассматриваемого района допускается, что удельная мощность ветровой энергии, а также географические и климатические условия данных участков являются однородными по всей её площади.

Следовательно, валовой потенциал ( $W_{\text{в}}$ , кВт\*ч/год) района будет равно сумме валовых потенциалов составляющих его участков:

$$W_{\text{в}} = \langle P \rangle \cdot T / 20, \quad (1.4)$$

где удельная мощность ветрового потока  $P$ , кВт/м<sup>2</sup> участки;

$T=8760$  час/год.

Модель который наглядно представляет данную формулу является моделью плоскостей («рамок») представляющую систему «воздушных плотин» с высотой  $H$ . Расстояние между «плотинами» принимается равными

20Н, по причине того, что бы возмущенный поток полностью восстанавливается после прохождения препятствий.

Представив участки (площадки) прямоугольной формы со сторонами  $a$  и  $b$  ( $S = a \cdot b$ ), и удельной энергией ( $E_b$ , Вт\*ч/м<sup>2</sup>). Решением задачи является определения отношением валового потенциала к величины пресекаемых воздушными потоками потоками и количества этих плоскостей (см. рис.1.9).

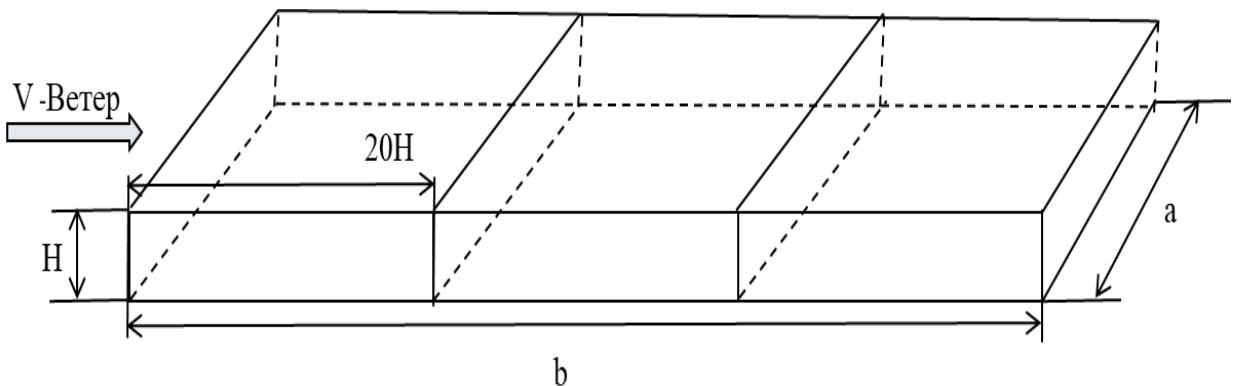


Рисунок 1.9. Модель определения валового потенциала ветровой энергии [72]

Зная высоту  $H$  и ширину  $a$ , можно определить площадь “рамок” :

$$A = a \cdot H$$

Если известно общая количество рамок и соответственно их длина  $b$  на площадке равно:

$$n_p = \frac{b}{20H}$$

Тогда общая площадь, которую пересекает воздушный поток будет равна

$$S_{\text{расч}} = A \cdot n_p = \frac{a \cdot H \cdot b}{20H} = \frac{S}{20}, \quad (1.5)$$

где  $S = a \cdot b$ ;

Если изменить местами стороны  $a$  и  $b$  по отношению к скорости ветра, то значение  $S$  не изменится. С учетом данного положения валовый потенциал ветровой энергии над участком площадью  $S$  будет равен,

$$W_b = E_b \cdot S_{\text{расч}} = E_b \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot t_i \quad (1.6)$$

Как видно из формулы (1.6) толщина слоя  $H$  в явном виде не влияет на значение валового потенциала, так как зависимость валового потенциала

проявляется через скорость ветра, которая применяется для его определения. В настоящее время по Республике Таджикистан нет подробной кадастровой карты ветрового потенциала, что ограничивает возможности всесторонней оценки. Например, в «Атласе ветров Республики Таджикистан» для определения потенциала взята скорость на высоте 50м, что по параметрам современных ВЭУ эти показатели видимо, является недостаточным.

В зависимости от географических характеристиках местности ориентировочные значения валового потенциала на высоте 50 м над поверхностью земли можем определить по формуле:

$$W_{\text{в}} = W_{\text{ув}} \cdot S, \quad (1.7)$$

где  $S$ , м<sup>2</sup> – площадь участка.

В качестве примера определим валовый потенциал ветровой энергии для метеостанции «Ховалинг» расположенного в районе Ховалинг Хатлонской области (см. табл. 1.3.). Метеостанция находится в южной части республики с координатами: 38°20'19" северной широты 69°58'22" восточной долготы. Рельеф местности – состоит из холм и гор.

Таблица 1.3 - Значении среднемесячной скорости ветра  $\langle v \rangle_j$ , м/с по данным метеостанции р. Ховалинг (высота флюгера 10м)

Месяц, j	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$\langle v \rangle_j$ , м/с	6,7	6,7	5,8	4,4	3	3,4	2,6	2,8	2,6	2,5	4,6	5,8	4,24

Данные, представленные в табл. 1.4., показывают, что среднегодовая скорость ветра в рассматриваемом районе составляет 4,24 м/с и в большинстве месяцев значение скорости ветра превышает 4 м/с.

Анализ полученных данных о розе ветров показывает, что направление и скорость ветрового потока изменяется в широком диапазоне с некоторым преимуществом севера - восточного и восточного направлений ветра. Ниже на рисунке 1.10, приведены данные о повторяемости направлений ветра  $\tau_i$  по направлениям сторон света ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ).

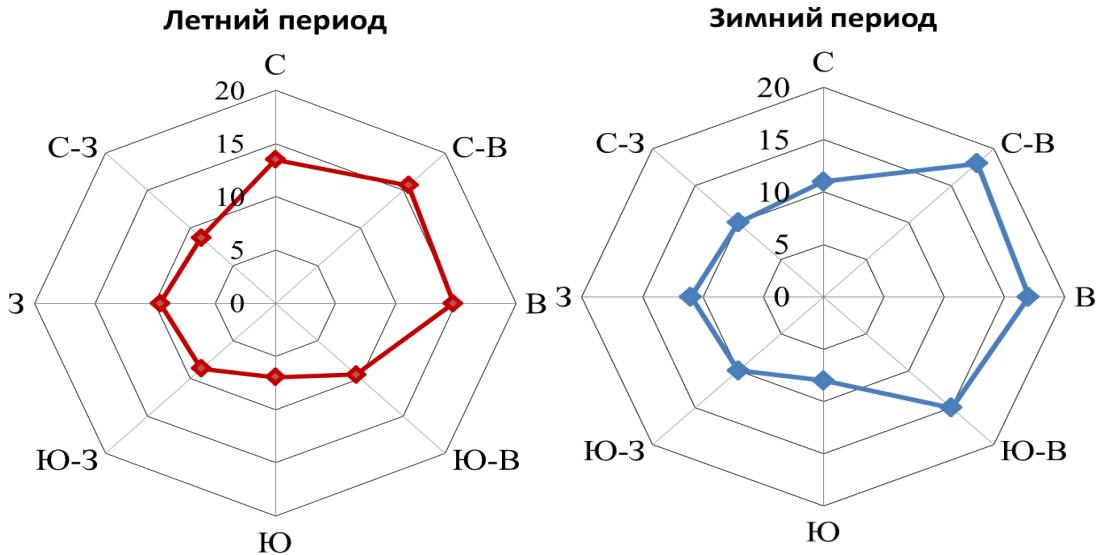


Рисунок 1.10. Повторяемость направления ветра  $t_i$ , %, на метеостанции «Бартанг» в летнее и зимнее периоды

Согласно данным наблюдения в зимние времена года преобладают ветра восточного, юго-восточного и северо-восточного направления. В летние времена преобладают ветра северного, севера-восточного и восточного направления.

Для того чтобы определить валовый потенциал района Бартанг воспользуемся формулами (4 и 6) и получим:

$$W_B = E_B \cdot \left( \frac{S}{20} \right) = 5632,56 \cdot \left( \frac{S \cdot 10^6}{20} \right) = 2,81S \cdot 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}, \quad (1.8)$$

где  $S$ ,  $\text{км}^2$  – площадь территории р. Рушан.

С учетом полученных результатов по (1.8) удельный валовый потенциал ветра по территории района Рушана равно:

$$W_B/S = E_B/20 = 281 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год}).$$

На основе данных о распределении роза ветров по румбам в выбранном участке можно определить технический потенциал ветровой энергии  $W_t$ . Размещение ВЭУ на выбранном участке целесообразно в виде прямоугольной сетки с расстоянием между ближайшими установками  $10D$  ( $D$  – диаметр ветроколеса). Это требование справедливо для горизонтально – осевых ВЭУ, а для ветроагрегатов с вертикальной осью это расстояние сокращается до  $4D$  (для ВЭУ малой мощности вовсе до  $1,5D$ ) [70,73]. На площади  $S_t$ , перспективной для использования ветровой энергии можно разместить  $S_t/$

(100D<sup>2</sup>) установок, что технический потенциал ветровой энергии кВт ч/год, определяется:

$$W_t = K \cdot N_p \cdot T \cdot \frac{S_t}{(100D^2)}, \quad (1.9)$$

где:  $N_p$ , кВт, - расчетная мощность ВЭУ,  $T=8760$  ч/год.

$S_t$  – это площадь участки (зоны, района), на котором с учётом ограничений (технических, экологических и пр.) возможно размещение ВЭУ. Практика показывает, что данная величина может колебаться от 10 до 30% всего рассматриваемой площади. В нашем примере принимаем  $S_t$  равным 14%.

$K$  – коэффициент использования установленной мощности принимаем  $K = 0,45$ .

Расчетная мощность ВЭУ  $N_p = 1000$ , кВт, на высоте  $h = 50$ м (диаметр ветроколеса  $D=60$ м).

$$W_t = 1,09 \cdot 10^7 \cdot S_t \text{ кВт*ч/год.} \quad (1.10)$$

При известном значении валового потенциала мы можем найти удельный технический потенциал, которая может быть получена с единицы площади  $S_t$  от ветровой энергии, равен:

$$W_t/S_t = 10,9 \cdot 10^7 \text{ кВт*ч/(м}^2 \cdot \text{год).} \quad (1.11)$$

Экономический потенциал ветровой энергии района в соответствии с принятыми условиями составляет 0,5% от технического потенциала.

$$W_{ek} = W_t \cdot 0,005 = 1,09 \cdot 10^7 \cdot 0,005 \cdot S_t \text{ кВт*ч/год.} \quad (1.12)$$

Учитывая то, что при преобразование ветровую энергию в электрическую реальная выходная мощность ВЭУ будет меньше расчетной. Это связано с потерями на преобразование различного рода (механическую, электрическую и т.п.). Если примем за расчетную КПД – 20% то технический потенциал ветровой энергии в рассматриваемом районе будет равен:

$$W_t = 1,09 \cdot 10^7 \cdot 0,2 \cdot S_t \text{ кВт*ч/год.} \quad (1.13)$$

Соответственно экономический потенциал ветровой энергии также будет меньше,

$$W_{ek} = 1,09 \cdot 10^7 \cdot 0,005 \cdot 0,2 \cdot S_t \text{ кВт*ч/год.} \quad (1.14)$$

В настоящее время ветроэнергетика не может конкурировать с гидроэнергетики, так как удельная стоимость строительства МГЭС в республике Таджикистан составляет порядка 1000 долл/кВт, средний тариф на электроэнергию – 1,5 цент/кВт\*ч [74, 75]. В тоже время, удельная стоимость ветровой ЭС, за МВт – установленной мощности составляет около 1,04 млн. евро, а планируемый тариф в разных странах отличается [76].

Как было отмечено в осенне – зимнем периоде в удаленных сельских местностях республики наблюдается дефицит электроэнергии, из-за чего нарушается балансовая надежность по энергии и мощности в локальных электроэнергетических системах. С учетом данной ситуации в первую очередь потенциал ветровой энергии будет востребован в основном в осенне-зимнем периоде.

Важность повышение эффективности функционирования локальной электроэнергетической системы на базе ВИЭ за счет обеспечения балансов энергии и мощности, устойчивости, а также управляемости энергосистемы признан уже в начале 1980-х годов [77, 78]. В настоящее время, данное направление продолжает быть актуальным среди научных коллективов, научных центров, что свидетельствует большое количеством публикаций за рубежом [11], в России [79,80], и в Республики Таджикистан [81].

Таким образом, для развития энергетики удаленных районов Республики Таджикистан, подключение к локальным электроэнергетическим системам ветровых установок является одним из наиболее актуальных направлений. Однако вопрос влияния ветровой генерации на режимы работы локальных систем электроснабжения, обеспечение балансовой надежности энергии и мощности остаются открытым.

Вопросы разработки и повышение эффективности функционирования электроэнергетической системы на базе ВИЭ за счет обеспечения балансов энергии и мощности рассматривалось в многочисленных публикациях, но ее режимы и влияния в локальных электроэнергетических системах не проводились не в одной из выше перечисленных публикации.

## Выводы по первой главе

1. Локальные системы электроснабжения (локальные СЭС) как надежные и экономичные комплексы, обеспечивающие электроснабжение на территориях агропромышленного сектора, сезонных объектах сельскохозяйственного и социального назначения, небольших населенных пунктах в настоящее время успешно развиваются, достигая в отдельных странах 10-12 % от общей установленной мощности.

2. В Таджикистане доля локальных систем электроснабжения оценивается около 1-1,5% от общей установленной мощности, занимая при этом 35 % от общей территории Республики. Именно этими обстоятельствами обусловлен повышенный интерес Правительства Таджикистана к разработке программ освоения возобновляемых источников энергии и строительства малых гидроэлектростанций.

3. Данные о том, что технический потенциал энергии малых рек в Республике Таджикистан составляет 52,6 % (20,3 млн. т.у.т./ год) от общего объема доступных ВИЭ, вторым, по объему является энергия ветра 26,2% (10,12 млн. т.у.т./ год), солнечная энергия 11%, энергия биомассы 10,1% и энергия термальных вод 0,1%. предопределяют огромные перспективы развития электроэнергетики Республики путем создания локальных источников электроснабжения на базе возобновляемых источников.

4. Для развития энергетики удаленных районов Республики Таджикистан, подключение к локальным электроэнергетическим системам ветровых установок является одним из наиболее актуальных направлений. В связи с этим приобретают актуальное значение вопросы повышения эффективности функционирования электроэнергетической системы на базе ВИЭ, в том числе оптимизации режимов и состава локального источника.

## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МГЭС И ВЭУ

### 2.1. Постановка задачи

Как было отмечено в первой главе значительная доля локальных электроэнергетических систем (ЭС) Таджикистана базируется на использование наиболее доступного возобновляемого энергоресурса – энергии малых водотоков с применением МГЭС [6].

Основными потребителями локальных ЭС в большинстве случаев являются удаленные малонаселенные поселки и другие маломощные агропромышленные комплексы, преимущественно потребляющие активную мощность. Практика показывает, что максимальная потребность в электроэнергии наблюдается в холодные периоды года (рисунок 2.1). Требуемая мощность вырабатываемой электроэнергии в зимние месяцы почти в два раза превышает необходимую мощность в летние месяцы.

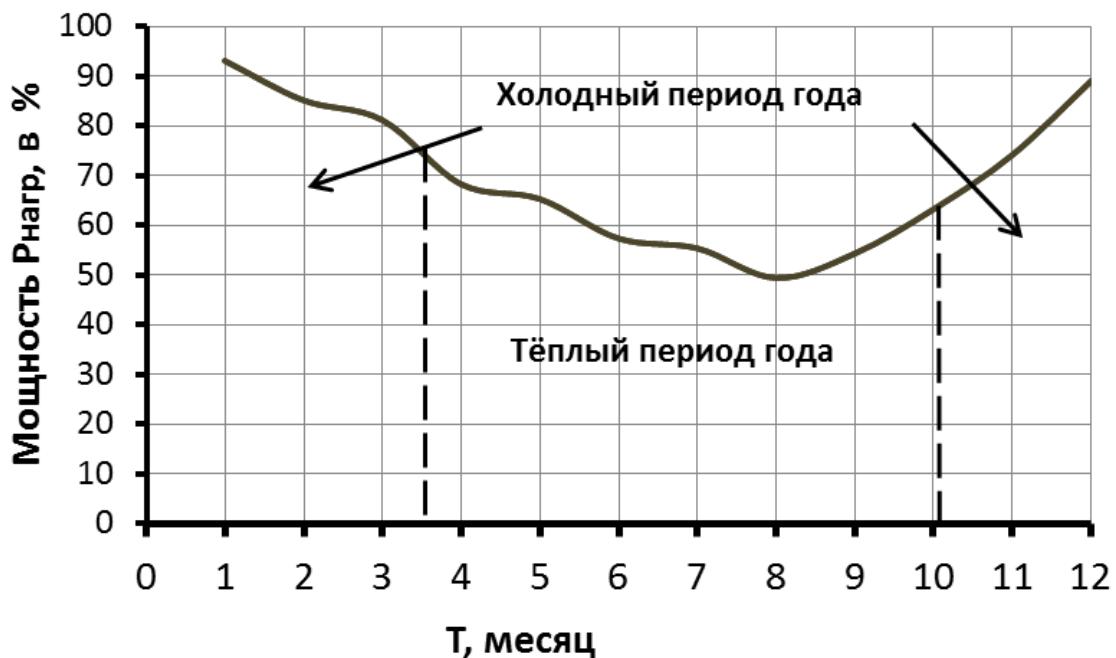


Рисунок 2.1. Обобщённый годовой график потребления электроэнергии локальной ЭС

Из приведенного на рисунке 2.1 обобщенного годового графика потребления электроэнергии в локальной ЭС видно, что потребляемая мощность нагрузки изменяется в широком диапазоне. В тёплый период года

(март - октябрь) мощность может снижаться до 50% от максимального, а в холодный период (январь – март и октябрь - декабрь) наблюдается увеличение спроса мощности со стороны потребителя.

Как было отмечено ранее в связи с горным рельефом местности для Республики характерен большой потенциал гидроресурсов малых рек, что обуславливает широкое использование малых гидроэлектростанций (МГЭС), которые являются основным источником для покрытия нагрузки. На рисунке 2.2 приведён характерный график распределения стока воды по месяцам горных рек на территории Таджикистана [43].

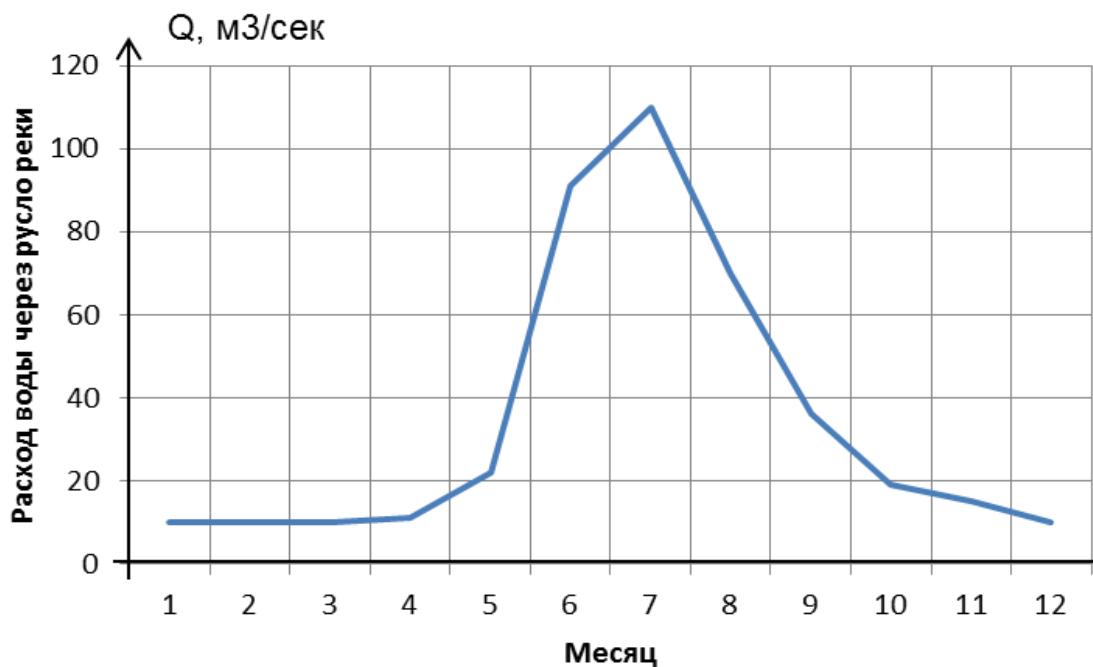


Рисунок 2.2. Характерный график изменения потока воды на малых горных реках

Обозначим расход воды приведенную на рисунке 2.2 как преобразованную в потенциальную энергию Рген. Для наглядности объединим график потребления электроэнергии с графиком изменения режима воды в горных реках, что даёт возможность определения баланса мощностей (рисунок 2.3).

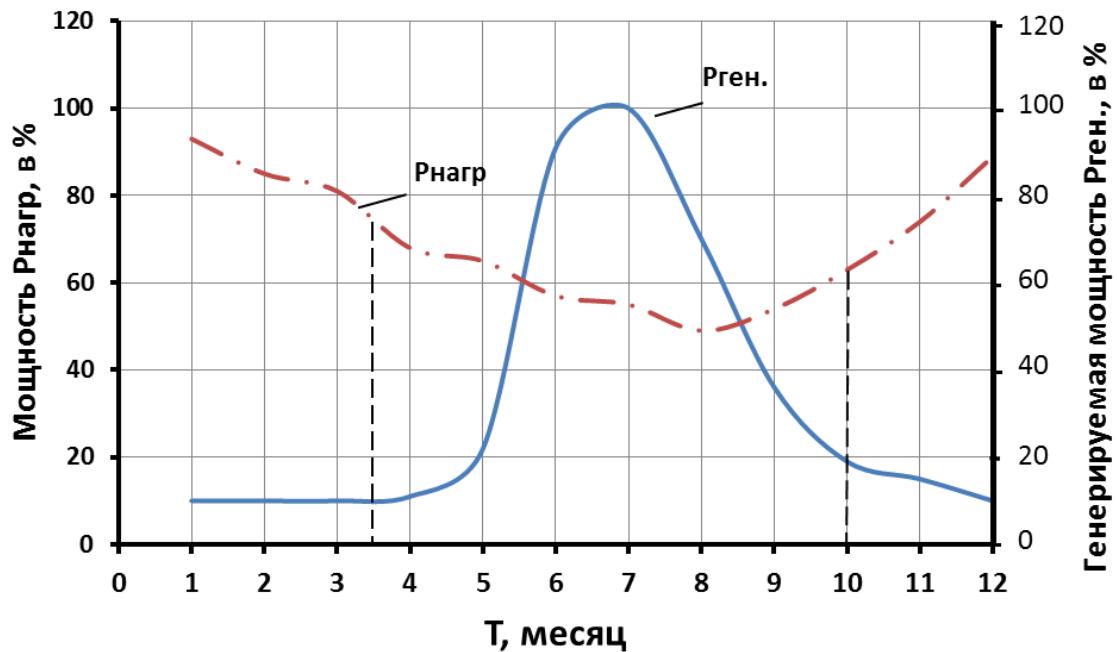


Рисунок 2.3. Годовые графики потребление (Рнагр.) и выработки (Рген.) ЭЭ

Анализируя полученный результат общего баланса можно сделать вывод, что максимумы и минимумы обоих графиков не совпадают, что указывает на наличие дефицита электроэнергии в зимний период.

Из результатов данного анализа следует, что для покрытия нагрузки локальной СЭС в зимний период, необходимо использовать другие виды источников энергии. Привлекательным вариантом в горных условиях Таджикистана могут стать возобновляемые источники энергии, в частности энергия солнца и ветра.

По оценкам местных специалистов технический потенциал солнечных и ветровых ресурсов в республике составляет 10,1% и 26,2% соответственно [14,40,42,85].

При решении задачи комбинированного применения ВИЭ возникает необходимость рассматривать несколько критериев оптимизации (минимизации и/или максимизации показателей) для решения которых можно применить математические модели основанные, например, на методах линейного программирования и генетического алгоритма. Возникает, также задача разработки оптимального выбора структуры электропотребления для

систем с возобновляемыми источниками энергии. Следует, отметит, что при разнородности источников (например, применение МГЭС и ВЭУ) также возникает необходимость решение задачи оптимального управления режимами генерации и потребления электроэнергии нагрузкой для обеспечения балансов энергии и мощности соответствующей выражению;

$$P_{\text{нагр.}} = P_{\text{ген.}}; W_{\text{нагр.}} = W_{\text{ген.}}$$

где  $P_{\text{нагр.}}$  – мощность потребителя;

$P_{\text{ген.}}$  – мощность источника электроэнергии (ЭЭ);

$W_{\text{нагр.}}$  – потребляемая электроэнергия со стороны потребителя;

$W_{\text{ген.}}$  – вырабатываемая электроэнергия источником ЭЭ.

Для описания режимов ветроустановок и их решения необходимо использовать математические модели основанных на теории метода минимизации линейной функции и математического аппарата – генетического алгоритма которые могут адекватно описать модель сопоставления вырабатываемой мощности ВЭУ и мощности потребляемой электрической нагрузкой.

## 2.2. Математическое описание оптимизационной задачи и принимаемые допущения

Как правило, специфика планирования локальных электроэнергетических систем состоит в том, что сети уже установлены и основные усилия направлены в основном на определения наилучшей эффективности компонентов системы (в том числе при их различном сочетании) с помощью алгоритмов с использованием целевых функций, на которые накладываются ограничения исходя из реальных условий эксплуатации.

На рисунке 2.4. представлен один из вариантов локальной электроэнергетической системы, наиболее типичный для Республики Таджикистан. В ее составе в качестве источников используются ветрогенератор и МГЭС. В энергосистеме имеется также накопитель, причем

тип накопителя не конкретизируется [82,83]. По мнению специалистов качестве накопителя целесообразно использовать батареи аккумуляторов или суперконденсатор [84].

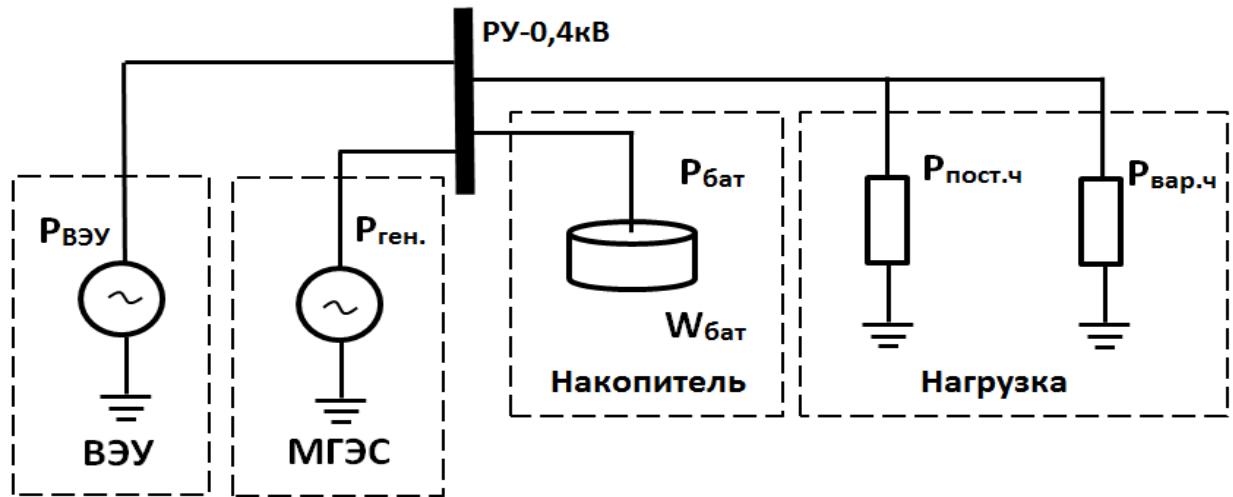


Рисунок 2.4. Модель рассматриваемой локальной электроэнергетической системы (ЛЭС)

### 2.2.1. Принятые допущения и ограничения

Работа рассматриваемой локальной энергосистемы проходит в условиях довольно сложного графика энергопотребления. Эффективное использование всех компонентов этой системы в большой степени зависит от подробного предварительного анализа технических характеристик установок, ограничений на режимы эксплуатации. Сформулируем допущения и ограничения на выполнение целевых функций, которые лягут в основу построения математической модели:

- график потребления  $P_{\text{нагр.}}(t)$  неоднороден по времени как в течении дня, так и для различных дней интервала  $T$  оптимизации, который принят равным 168 часам – одной неделе;
- мощность нагрузки может быть условно представлена как сумма строго заданной т.е. постоянной  $P_{\text{пост.ч.}}(t)$  и вариативной  $P_{\text{вар.ч.}}(t)$  частей, из которых только последняя может изменяться при оптимизации, очевидно, что  $P_{\text{нагр.}}(t) = P_{\text{пост.ч.}}(t) + P_{\text{вар.ч.}}(t)$ ;

- общее количество ЭЭ  $W_{\text{нагр.}}(t) = \int_0^T P_{\text{нагр.}}(t) dt$ , потребленной за интервал  $T$  оптимизации известно, соответственно, известна и средняя мощность потребления  $P_{\text{вар.ч.}} = W_{\text{нагр.}}/T$ , также задано и значение

$W_{\text{нагр.вар.ч.}} = \int_0^T P_{\text{нагр.}}(t) dt$  - энергия, потребленная вариативной частью нагрузки;

- начальная  $W_{\text{бат.}}(0)$  и конечная  $W_{\text{бат.}}(T) = W_{\text{бат.}}(0) + \int_0^T P_{\text{бат.}}(t) dt$  энергии накопителя одинаковы, откуда следует, что  $\int_0^T P_{\text{бат.}}(t) dt = 0$ ;

- наилучшим режимом выработки ЭЭ для микро ГЭС является режим, при котором расходуется минимальное количество воды при одновременном отсутствии дефицита мощности в нагрузке;

- мощность поставляемая в сеть ветрогенератором  $P_{\text{ВЭУ}}(t)$  задается исходя из среднестатистических значений для зимнего периода соответствующей местности, определим также среднюю мощность поставляемую в сеть ветрогенератором  $P_{\text{ср.ВЭУ}} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{ВЭУ}}(t) dt$ ;

- потери в элементах рассматриваемой автономной энергосистемы не учитываются – это упрощающее допущение может быть легко снято и принято здесь, чтобы не перегружать изложение деталями.

### 2.2.2. Описание оптимизационной задачи

Для получения надежной системы локального электроснабжения, обеспечивающей бесперебойное питание нагрузки необходима надежная оптимизация. Оптимальное планирование с использованием надежных стратегий может преодолеть непостоянство потребления и генерации, а также колебания спроса, вызванные изменением численности населения. Надежные стратегии могут учитывать наихудший сценарий возобновляемой генерации и потребления нагрузки для создания оптимальных мощностей. Благодаря надежности этих методов спроектированная система может обеспечивать

нагрузку в дни с меньшей выработкой возобновляемых источников энергии и более высокими колебаниями нагрузки.

Сформулируем далее цель оптимизации локальной энергосистемы, представленной на рисунке 2.4. Требуется таким образом управлять вариативной частью нагрузки -  $P_{\text{нагр.вар.ч.}}(t)$  и накопителем -  $P_{\text{бат}}(t)$ , чтобы одновременно выполнялись два условия:

1. Режим выработки ЭЭ микро-ГЭС стабилен, испытывает небольшие изменения во времени. В предельном, наилучшем случае мощность выработки постоянна, то есть  $P_{\text{ген.}}(t) = P_{\text{ген.0}} = \text{const}$ ;
2. Установленные мощности  $P_{\text{вэу.макс.}}$  ветрогенератора,  $P_{\text{бат.макс.}}$  преобразователя и емкость  $W_{\text{бат.макс.}}$  преобразователя имеют минимальные значения при заданном потреблении  $W_{\text{нагр.}}$ .

Исходя из вышеизложенного сформулированную цель оптимизации можно записать в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{вэу.макс.}} \rightarrow \min, \\ P_{\text{бат.макс.}} \rightarrow \min, \\ W_{\text{бат.макс.}} \rightarrow \min, \\ \Delta = \delta(P_{\text{ген.ср.}}), \\ P_{\text{вэу.макс.}} \geq 0, P_{\text{бат.макс.}} \geq 0, W_{\text{бат.макс.}} \geq 0 \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Вариация  $\delta$  определяется с помощью следующего выражения:

$$\delta = \max_{t \in [0, T]} \frac{|P_{\text{ген.ср.}} - P_{\text{ген.}}(t)|}{P_{\text{ген.ср.}}}, \quad P_{\text{ген.ср.}} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{ген.}}(t) dt \quad (2.2)$$

причем  $\Delta$  – заданное в ограничении типа равенства значение этой вариации.

Решение этой нелинейной задачи многоцелевой оптимизации (2.1) целесообразно выполнять при ограничении  $\Delta = \delta(P_{\text{ген.ср.}})$ . Следует отметить, что вычисление данного ограничения значительно превосходит по сложности вычисление минимизируемых функций. Рассмотрим подробнее само это

ограничение и способ его вычисления. Равенство нулю вариации  $\Delta$  соответствует тому, что МГЭС работает в оптимальном режиме. Однако, при этом величины  $P_{\text{вэу.макс.}}$ ,  $P_{\text{бат.макс.}}$ ,  $W_{\text{бат.макс.}}$  могут быть большими и вся система в целом будет весьма дорогой. Уменьшение установленных мощностей ветрогенератора  $P_{\text{вэу.макс.}}$ , преобразователя  $P_{\text{бат.макс.}}$ , а также и емкости  $W_{\text{бат.макс.}}$  накопителя удешевляет систему, но в то же время приводит к повышению нагрузки на МГЭС и, начиная с каких-то значений, приводит к невозможности сохранять выработку ЭЭ  $P_{\text{ген.}}(t)$  на постоянном уровне и, следовательно, появлению ненулевых значений вариации  $\delta(P_{\text{ген.ср.}})$ .

На практике представляет значительный интерес решение поставленной многоцелевой задачи при различных задаваемых уровнях вариации  $\Delta$ . Чем выше этот уровень, тем меньше стоимость всей системы, но тем менее эффективно работает МГЭС. Компромисс между этими взаимно противоречащими тенденциями зависит от конкретной ситуации (имеющихся для реализации проекта технических возможностей, перспективных планов развития данной локальной сети, планируемого объема финансирования) у заказчика.

### 2.3. Метод вычисления ограничения $\Delta = \delta(P_{\text{ген.ср.}})$

На практике вычисление ограничения  $\Delta = \delta(P_{\text{ген.ср.}})$  предваряет процедура вычисления по определенному алгоритму оптимального  $P_{\text{ген.}}(t)$ . Это обусловлено тем, что при известной  $P_{\text{ген.}}(t)$  вычисление ограничения не представляет больших трудностей. Оптимальность  $P_{\text{ген.}}(t)$  понимается в том смысле, что используя все возможности локальной системы, а именно: управление вариативной частью нагрузки  $P_{\text{вар.ч.}}(t)$ , управление накопителем ЭЭ -  $P_{\text{бат.}}(t)$  и используя энергию, получаемую от ветрогенератора  $P_{\text{вэу}}(t)$  требуется найти такие  $P_{\text{вар.ч.}}(t)$ ,  $P_{\text{бат.}}(t)$ ,  $P_{\text{ген.}}(t)$ , что  $P_{\text{ген.}}(t)$  возможно меньше уклоняется на временном интервале  $[0, T]$  от своего среднего значения  $P_{\text{ген.ср.}}$ .

Сложность задачи может быть несколько уменьшена, если известно соотношение стоимости киловатта установленной мощности ветрогенератора  $S_{\text{ВЭУ}}$  и преобразователя энергии  $S_{\text{бат}}$ . Пусть  $S_{\text{ВЭУ}}/S_{\text{бат}} = m$ , тогда в силу того, что  $P_{\text{ВЭУ, max}}$  и  $P_{\text{бат, max}}$  — это установленные мощности ветрогенератора и преобразователя ЭЭ соответственно. Смысл задачи, определяемой выражением (2.1), состоит в том, чтобы найти наиболее дешевую оптимальную конфигурацию локальной энергосистемы. В этом случае можно перейти к следующей формулировке:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{вэу.макс.}} + m \cdot P_{\text{бат.макс.}} \rightarrow \min, \\ W_{\text{бат.макс.}} \rightarrow \min, \\ \delta(P_{\text{ген.ср.}}) = \max_{t \in [0, T]} \frac{|P_{\text{ген.ср.}} - P_{\text{ген.}}(t)|}{P_{\text{ген.ср.}}} = \Delta, \\ P_{\text{вэу.макс.}} \geq 0, P_{\text{бат.макс.}} \geq 0, W_{\text{бат.макс.}} \geq 0 \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Решением задачи (2.3) является множество Парето, для построения которого предлагается использование генетического алгоритма [83] и алгоритма не доминирующей сортировки [84] NSГЕН.А – II.

### 2.3.1. Вычисление ограничений

Таким образом, «внутри» нелинейной многоцелевой задачи, сформулированной выше, нам необходимо многократное решение более простой задачи: определения оптимального  $P_{\text{ген.}}(t)$  и вычисления по нему  $\delta(P_{\text{ген.ср.}})$ . Рассмотрим теперь постановку этой «внутренней» задачи.

Исходными данными для поставленной задачи являются:

- зависимости  $P_{\text{пост. ч.}}(t)$  и  $P_{\text{вэу.}}(t)$ , их характерный вид представлен на [рисунке 2.2](#);
- общее количество ЭЭ  $W_{\text{нагр.}}$ , потребленной за время  $T$  и общее количество энергии  $W_{\text{нагр.вар.ч.}}$  которая потребляется вариативной частью нагрузки.

Постановка задачи дополнительно включает в себя ограничения на переменные и связи между ними. Баланс мощности в рассматриваемой сети выражается соотношением:

$$\forall_{t \in [0, T]}: \underbrace{P_{\text{пост. ч.}}(t) + P_{\text{вар. ч.}}(t)}_{P_{\text{нагр.}}(t)} = P_{\text{ген.}}(t) + P_{\text{вэу.}}(t) + P_{\text{бат.}}(t) \quad (2.4)$$

Предположим, что нагрузка должна потребить за время  $T$  энергию  $W_{\text{нагр.}}$ . Эта энергия, а также та часть энергии нагрузки  $W_{\text{нагр.вар.ч.}}$ , которая потребляется вариативной частью заданы и определяются следующими выражениями:

$$W_{\text{нагр.}} = \int_0^T P_{\text{нагр.}}(t) dt, \quad W_{\text{нагр.вар.ч.}} = \int_0^T P_{\text{вар.ч.}}(t) dt \quad (2.5)$$

Задав как исходные данные  $W_{\text{нагр.}}$  и  $W_{\text{нагр.вар.ч.}}$  мы, фактически, определили и величину  $W_{\text{нагр.пост.ч.}} = W_{\text{нагр.}} - W_{\text{нагр.вар.ч.}}$ .

Для накопителя:

$$\forall_{t \in [0, T]}: -P_{\text{бат.макс.}} \leq P_{\text{бат.}}(t) \leq P_{\text{бат.макс.}} \quad (2.6)$$

$$\forall_{t \in [0, T]}: 0 \leq W_{\text{бат.}}(t) \leq W_{\text{бат.макс.}}, \quad (2.7)$$

Последнее неравенство далее будет использоваться и в иной эквивалентной форме:

$$\forall_{t \in [0, T]}: 0 \leq \int_0^T P_{\text{бат.}}(t) dt \leq W_{\text{бат.макс.}} \quad (2.8)$$

В силу того, что  $W_{\text{бат.}}(T) = W_{\text{бат.}}(0)$ :

$$\int_0^T P_{\text{бат.}}(t) dt = 0. \quad (2.9)$$

Вариативная компонента  $P_{\text{вар.ч.}}(t)$  мощности нагрузки должна быть неотрицательна, также положительна производимая микро-ГЭС мощность  $P_{\text{ген.}}(t)$  и не может превышать суммарную установленную мощность  $P_{\text{ген.макс.}}(t)$  генераторов:

$$\forall_{t \in [0, T]}: 0 \leq P_{\text{вар.ч.}}(t) \leq P_{\text{вар.ч.}}, \quad 0 \leq P_{\text{ген.}}(t) \leq P_{\text{ген.макс.}} \quad (2.10)$$

### 2.3.2. Переход к дискретному времени

Для удобства представления процедуры решения задачи оптимизации введем в рассмотрение вектора  $P_{\text{вар.ч.}}, P_{\text{бат.}}, P_{\text{ген.}}, P_{\text{вэу.}}, P_{\text{нагр.}}, P_{\text{пост.ч.}}$ , элементы которых являются значениями соответственно величин  $P_{\text{вар.ч.}}(t), P_{\text{бат.}}(t), P_{\text{ген.}}(t), P_{\text{вэу.}}(t), P_{\text{нагр.}}(t), P_{\text{пост.ч.}}(t)$ , в дискретные моменты времени  $t_k : \{t_1 = 0; t_k = t_{k-1} + h; t_N = T\}$ , где  $h$  – шаг наблюдения – 10 мин в наших расчетах. Тогда  $P_{\text{вар.ч.}}, P_{\text{бат.}}$  и аналогично для всех введенных векторов:

$$P_{\text{вар.ч.}} = [P_{\text{вар.ч.}1}, P_{\text{вар.ч.}2}, \dots, P_{\text{вар.ч.}N}]^T, P_{\text{бат.}} = [P_{\text{бат.}1}, P_{\text{бат.}2}, \dots, P_{\text{бат.}N}]^T. \quad (2.11)$$

В (10) « $T$ » – символ транспонирования и для краткости записи приняты обозначения  $P_{\text{вар.ч.}} = P_{\text{вар.ч.}}(t_k), P_{\text{бат.}} = P_{\text{бат.}}(t_k)$ , которые будут далее использоваться для всех векторов.

Неизвестными векторными величинами нашей задачи являются вектора  $P_{\text{вар.ч.}}, P_{\text{бат.}}, P_{\text{ген.}}$ . Объединим их в один вектор неизвестных  $\mathbf{Y}$ :

$$Y = \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Перепишем выражение для баланса мощности (2.4) таким образом, чтобы в правой части находились только известные величины:

$$\bigvee_{t \in [0, T]}: P_{\text{вар.ч.}}(t) + P_{\text{бат.}}(t) + P_{\text{ген.}}(t) = P_{\text{пост.ч.}}(t) + P_{\text{вэу.}}(t).$$

Откуда для векторов:

$$[E, E, E] \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \end{bmatrix} = [P_{\text{пост.ч.}} + P_{\text{вэу.}}], \quad (2.13)$$

где  $E$  – единичная матрица. Перепишем (2.5) таким образом, чтобы в правой части находились только известные величины:

$$\int_0^T (P_{\text{ген.}} + P_{\text{бат.}}(t)) dt = W_{\text{нагр.}} - \int_0^T P_{\text{вэу.}}(t) dt.$$

Заменяя интегралы суммами, для элементов векторов получим следующее уравнение:

$$h \sum_{k=1}^{k=1008} (P_{\text{ген.}k} + P_{\text{бат.}k}) = W_{\text{нагр.}} - h \sum_{k=1}^{k=1008} P_{\text{вэу.}k}$$

Второе равенство в (2.5) также может быть переписано для элементов векторов в виде:

$$W_{\text{нагр.вар.ч.}} = h \sum_{k=1}^{k=1008} P_{\text{вар.ч.}k}$$

Последние соотношения удобно представить в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 1, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \sum_{k=1}^{k=1008} P_{\text{вар.ч.}k} \\ \frac{W_{\text{нагр.}}}{h} - \sum_{k=1}^{k=1008} P_{\text{вэу.}k} \end{bmatrix} . \quad (2.14)$$

В соотношении (14)  $h$  – шаг сетки по времени – 10 минут, соответственно, одна неделя – 168 часов или 1008 десятиминутных интервалов, **0** – матрица строка, содержащая 1008 нулей, **1** - матрица строка, содержащая 1008 единиц. Аналогично (2.14) уравнение (2.9) для компонент векторов будет иметь вид:

$$h \sum_{k=1}^{k=1008} P_{\text{бат.}k} = 0.$$

Или в матричной форме:

$$[0, 1, 0] \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.15)$$

Рассмотрим ограничения типа неравенств (2.6), (2.8) и (2.10). Ограничения (2.6) и (2.10) устанавливают границы изменения неизвестных. Соответствующие им неравенства для элементов векторов имеют вид:

$$-P_{\text{бат.макс}} \leq P_{\text{бат.}k} \leq P_{\text{бат.макс}}, \quad k = \overline{1, 1008}, \quad (2.16)$$

$$0 \leq P_{\text{вар.ч.}k} \leq P_{\text{вар.ч.макс}}, \quad 0 \leq P_{\text{ген.}k} \leq P_{\text{ген.макс}}, \quad k = \overline{1,1008}, \quad (2.17)$$

Ограничение (2.8) при переходе к векторам порождает 1008 двойных неравенств:

$$0 \leq h \sum_{k=1}^{k=S} P_{\text{бат.}k} \leq W_{\text{бат.макс}}, \quad S = \overline{1,1008}.$$

Матричная форма записи этих неравенств имеет вид:

$$\begin{bmatrix} N, & D, & N \\ N, & -D, & N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \end{bmatrix} \leq \frac{W_{\text{бат.макс}}}{h} \cdot \begin{bmatrix} 1^T \\ 0^T \end{bmatrix}, \quad D = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{1008}. \quad (2.18)$$

В соотношении (2.18)  $\mathbf{N}$  – квадратная матрица размера  $1008 \times 1008$ , все элементы которой нули.

После записи ограничений типа равенств и неравенств можно перейти к формированию целевой функции. В качестве целевой функции, как было определено, в постановке задачи должен выступать некоторый функционал  $F(P_{\text{вар.ч.}}, P_{\text{бат.}}, P_{\text{ген.}})$ , характеризующий неоднородность выработки ЭЭ на микро-ГЭС. Задача состоит в поиске минимума этого функционала.

Введем в рассмотрение два вектора  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ , компоненты которых  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  неотрицательны:

$$\mathbf{A} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{1008}]^T, \quad \mathbf{B} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{1008}]^T, \quad \alpha_k \geq 0, \quad \beta_k \geq 0, \quad k = \overline{1,1008}. \quad (2.19)$$

Используя  $P_{\text{ср.}} = \frac{W_{\text{нагр}}}{T}$  – среднюю мощность, потребляемую нагрузкой за интервал времени  $T$ ,  $P_{\text{ср.вэу}} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{вэу}}(t) dt$  – среднюю мощность, поставляемую в сеть ветрогенератором и учитывая, что  $\int_0^T P_{\text{бат.}}(t) dt = 0$ , запишем для потребляемой от сети мощности неравенства:

$$(P_{\text{ср.}} - P_{\text{ср.вэу}}) - \alpha_k \leq P_{\text{ген.}k} \leq (P_{\text{ср.}} - P_{\text{ср.вэу}}) + \beta_k, \quad k = \overline{1,1008},$$

которые при стремлении к нулю  $\alpha_k$  и  $\beta_k$ ,  $k = \overline{1,1008}$  гарантируют постоянство  $P_g(t)$  или, что то же равенство между собой всех  $P_{g,k}$ . Матричная форма записи последних неравенств имеет вид:

$$\begin{bmatrix} N, & N & -E & -E, & N \\ N, & N & E & N, & -E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \\ A \\ B \end{bmatrix} \leq (P_{\text{ср.}} - P_{\text{ср.вэу}}) \cdot \begin{bmatrix} 1^T \\ 0^T \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

### 2.3.3. Сведение процедуры вычисления ограничений к задаче линейного программирования

В качестве минимизируемого функционала таким образом может быть взят линейный функционал:

$$F(P_{\text{вар.ч.}}, P_{\text{бат.}}, P_{\text{ген.}}) = \sum_{k=1}^{k=1008} (\alpha_k + \beta_k) \xrightarrow{P_{\text{вар.ч.}}, P_{\text{бат.}}, P_{\text{ген.}}} \min \quad (2.21)$$

Задача (2.21) минимизации линейного функционала с линейными ограничениями типа равенств и неравенств, полученными выше, классифицируется как задача линейного программирования. Результат этой классификации чрезвычайно важен, так как методы решения этой задачи хорошо изучены и доказано существование ее единственного решения, доставляющего глобальный минимум функционалу  $F$ . Приведем задачу к стандартному виду, используемому, например, в пакете MATLAB:

$$F(X) = \langle C, X \rangle \xrightarrow{X} \min$$

$$\begin{cases} A_{eq}X = b_{eq}, \\ A_{ineq}X \leq b_{ineq}, \\ X_{\min} \leq X \leq X_{\max}. \end{cases}$$

В записи минимизируемого функционала скобки  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  обозначают скалярное произведение векторов. Вектор  $\mathbf{X}$  неизвестных и вектор коэффициентов  $\mathbf{C}$  нашей задачи имеют вид:

$$\mathbf{X} = [P_{\text{вар.ч.}}, P_{\text{бат.}}, P_{\text{ген.}}, A, B]^T$$

$$\mathbf{C} = [0, 0, 0, 1, 1]^T$$

Объединим соотношения (2.13)-(2.15) в одно матричное равенство и сформируем тем самым матрицу  $A_{eq}$  и вектор  $\mathbf{b}_{eq}$ :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} E, & E, & E & N & N \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{eq}} \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \\ A \\ B \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} P_{\text{пост.ч.}} - P_{\text{вэу.}} \\ h \sum_{k=1}^{1008} P_{\text{вар.ч.}k} \\ \frac{w_{\text{нагр.}}}{h} - \sum_{k=1}^{1008} P_{\text{вэу.}k} \\ 0 \end{bmatrix}}_{b_{eq}} \quad (2.22)$$

Объединим соотношения (2.18) и (2.20) в одно матричное неравенство и сформируем тем самым матрицу  $A_{ineq}$  и вектор  $\mathbf{b}_{ineq}$ :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} N, & N, & -E & -E & N \\ N & N & E & N & -E \\ N & D & N & N & N \\ N & -D & N & N & N \end{bmatrix}}_{A_{ineq}} \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{вар.ч.}} \\ P_{\text{бат.}} \\ P_{\text{ген.}} \\ A \\ B \end{bmatrix} \leq \underbrace{\begin{bmatrix} -(P_{\text{ср.}} - P_{\text{ср.вэу.}}) \cdot 1^T \\ (P_{\text{ср.}} - P_{\text{ср.вэу.}}) \cdot 1^T \\ \frac{w_{\text{нагр.}}}{h} \cdot 1^T \\ 0^T \end{bmatrix}}_{b_{ineq}} \quad (2.23)$$

Неравенства (2.16), (2.17) и (2.19) дают возможность сформировать вектора  $\mathbf{X}_{\min}$  и  $\mathbf{X}_{\max}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\min} &= [0, -P_{\text{бат.макс.}} \cdot 1, 0, 0, 0] \\ \mathbf{X}_{\max} &= [P_{\text{вар.ч.макс.}} \cdot 1, P_{\text{бат.макс.}} \cdot 1, P_{\text{ген.макс.}} \cdot 1, (P_{\text{ср.}} - P_{\text{ср.вэу.}}) \cdot 1, (P_{\text{ген.макс.}} - (P_{\text{ср.}} - P_{\text{ср.вэу.}})) \cdot 1] \end{aligned} \quad (2.24)$$

Таким образом, «внутренняя» задача определения оптимального  $P_{\text{ген.}}$ , а, соответственно, и  $P_{\text{ген.}}(t)$  сведена к стандартному для задач линейного программирования виду.

## 2.4. Исследование работы локальной электроэнергетической системы на базе МГЭС, ВЭУ и накопителя энергии

Теперь можно перейти к решению задачи (2.1). Приведем еще раз ее формулировку:

$$\begin{cases} P_{\text{вэу.макс.}} \rightarrow \min, \\ P_{\text{бат.макс.}} \rightarrow \min, \\ W_{\text{бат.макс.}} \rightarrow \min, \\ \delta(P_{\text{ген.ср.}}) = \max_{t \in [0, T]} (|P_{\text{ген.ср.}} - P_{\text{ген.}}(t)| / P_{\text{ген.ср.}}) = \Delta, \\ P_{\text{вэу.макс.}} \geq 0, P_{\text{бат.макс.}} \geq 0, W_{\text{бат.макс.}} \geq 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Сложность задачи (2.25) может быть несколько уменьшена, если известно соотношение стоимости киловатта установленной мощности ветрогенератора  $S_{ВЭУ}$  и преобразователя энергии  $S_{бат.}$ . Пусть  $S_{ВЭУ} / S_{бат.} = m$  тогда в силу того, что  $P_{вэу.макс.}$  и  $P_{бат.макс.}$  это установленные мощности ветрогенератора и преобразователя соответственно, и смысл задачи (2.25), найти наиболее дешевую оптимальную конфигурацию локальной энергосистемы, можно перейти к следующей формулировке:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{вэу.макс.} + m \cdot P_{бат.макс.} \rightarrow \min, \\ W_{бат.макс.} \rightarrow \min, \\ \delta(P_{ген.ср.}) = \max_{t \in [0, T]} (|P_{ген.ср.} - P_{ген.}(t)| / P_{ген.ср.}) = \Delta, \\ P_{вэу.макс.} \geq 0, P_{бат.макс.} \geq 0, W_{бат.макс.} \geq 0 \end{array} \right. \quad (2.26)$$

которая и будет рассматриваться далее.

В настоящее время для решения оптимизационных задач существует ряд графических сред для визуального моделирования, но для систем электроснабжения целесообразно использование программного комплекса MatLab/Simulink, предусматривающего применение интегрированного комплекса моделирования с использованием методов графического (визуального) программирования [85,86].

Разработанная имитационная модель локальной системы электроснабжения состоящей из генерирующего источников МГЭС, ВЭУ и накопителя электрической энергии, реализована в программном пакете MatLab. Модель позволяет получить характеристики гидрогенератора, ветрогенератора, накопителя электроэнергии, потребителя и исследовать различные режимы работы локальной СЭС. Математические модели элементов системы электроснабжения и его генерирующих источников приведены в предыдущем параграфе данной главы.

### **Пример моделирования одноуровневой системы электроснабжения**

В настоящее время в удаленных районах Республики Таджикистан широко распространены «одноуровневые» схемы локальных СЭС. Данные

схемы отличаются простотой и низкой стоимостью за счет исключения из схемы трансформаторов и коммутационных аппаратов высокого напряжения. В качестве примера расчета приведем схему системы электроснабжения посёлка Басид Рушанского района ГБАО (см. рис. 2.5). Сельское поселение Басид расположено на следующих географических координатах N 38° 06' 40.5'', E 072° 02' 58.7''.

Модель выбранной схемы локальной СЭС и численные исследования к ней приведены ниже.

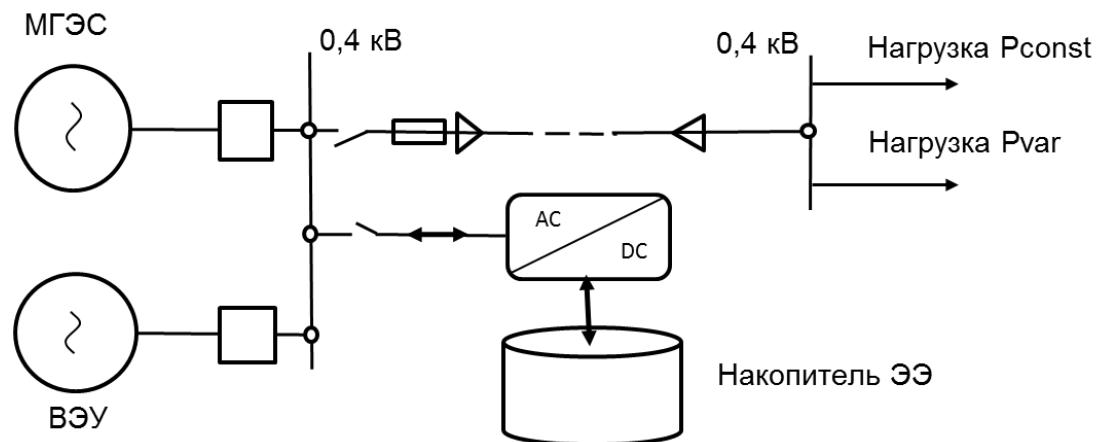


Рисунок 2.5. Одноуровневая схема локальной СЭС

Одноуровневая схема локальной системы электроснабжения приведенной на рис. 2.5 состоит из следующих элементов:

- МГЭС – малая гидроэлектростанция мощностью 250кВт;
- ВЭУ – ветровая энергетическая установка 8 шт. по 10кВт;
- ЛЭП – линия электропередачи 0,4кВ;
- Блок контроллера заряд/разряда накопителя;
- Накопитель электрической энергии;
- Постоянная составляющая части нагрузки  $P_{пост.ч} = 70\text{кВт}$ ;
- Вариативная составляющая часть нагрузки  $P_{вар.ч} = 25\text{кВт}$ ;

Кроме вышенназванных элементов в схеме также имеются коммутационные аппараты, и предохранители которые при расчете не учитываются.

На основе математической модели работы локальной СЭС, приведенной в предыдущих параграфах решена задача минимизация линейного функционала с линейными ограничениями типа равенства и неравенств, которая классифицируется как задача линейного программирования (рис. 2.7).

Результаты (рис. 2.7) решения оптимизационной задачи по (2.21) получены для усредненного графика ветровой активности, представленного на рис. 2.6.

График ветровой активности построен на основании аппроксимации многомесячных экспериментальных данных в горных районах Таджикистана.

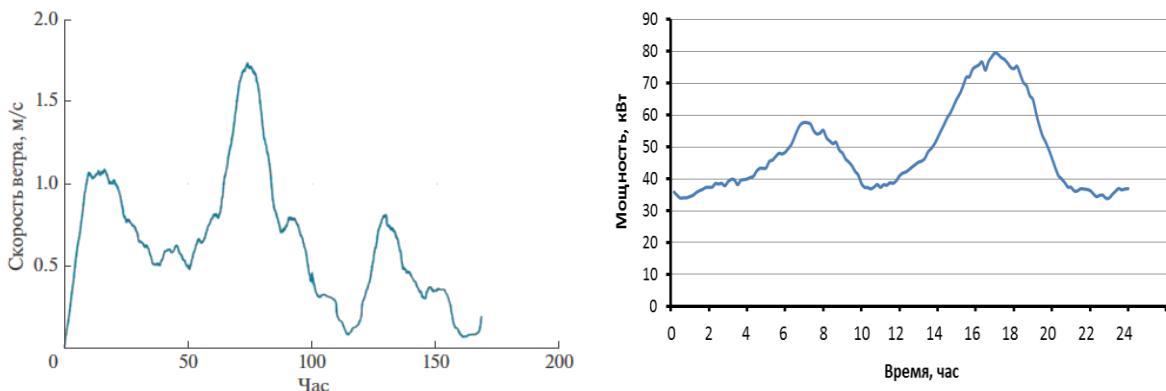


Рисунок 2.6. Усредненный график ветровой активности для горных районов республики Таджикистан, и среднесуточный график электропотребления потребителей

На рис. 2.7 представлен ряд результатов задачи (2.21), генерируемых в ходе решения (2.3). При этом решение, представленное на рис. 2.7а, соответствует относительно большому уровню  $\Delta$ , а решение, представленное на рис. 2.7б, соответствует относительно малому уровню  $\Delta$ .

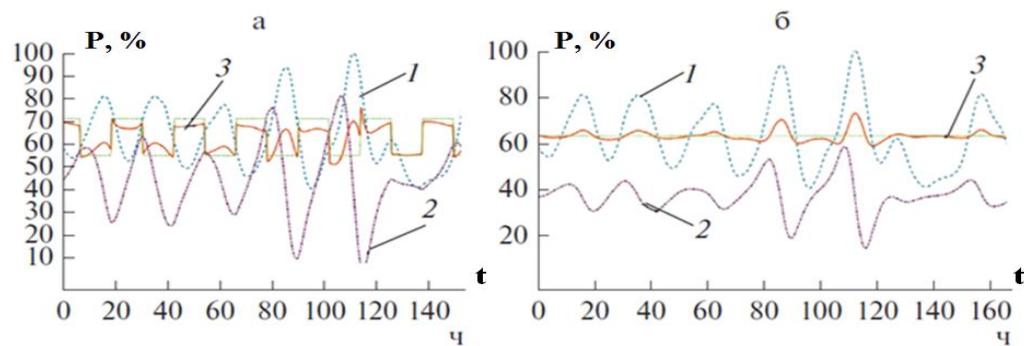


Рисунок 2.7. Типичные решения задачи (2.21). На графиках: 1 – мощность вариативной части нагрузки, 2 – энергия, запасенная в накопителе, 3 – мощность, генерируемая МГЭС.

Решение (2.26) представлено на рис. 2.8, где по оси ординат в относительных единицах (приведено к  $P_{\text{ср.}}$ ) отложен первый из минимизируемых функционалов ( $P_{\text{вэу,макс}} + m P_{\text{бат,макс}}$  для  $m=1$ ), а по оси абсцисс, также в относительных единицах (приведено к  $P_{\text{ср.}}$ ) отложен второй минимизируемый функционал ( $1080hP_{\text{вэу,ср.}}$ ).

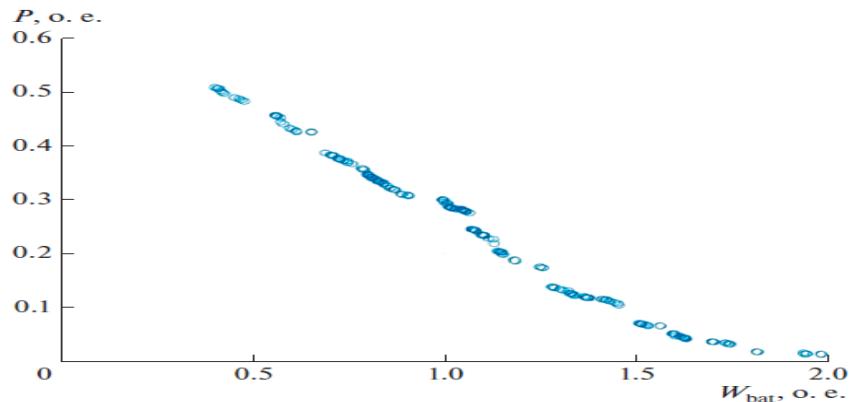


Рисунок 2.8. Типичный вид решения задачи (2.3)

Уровень  $\Delta$  неравномерности загрузки МГЭС –  $\sim 0.1$ . Множество Парето, представленное на рис. 2.8, позволяет в широком диапазоне изменения параметров всей системы определять ее состав оптимальным образом.

### Выводы по второй главе

1. При решении задачи оптимизации (минимизации и/или максимизации показателей) при комбинированном применении ВИЭ целесообразно применять математические модели, основанные на методах линейного программирования и генетического алгоритма. При разнородности источников (например, применение МГЭС и ВЭУ) большое внимание следует также уделять решению задачи оптимального управления режимами генерации и потребления электроэнергии нагрузкой для обеспечения балансов энергии и мощности.

2. Для Республики Таджикистан одной из наиболее эффективных систем локального источника энергии является система, включающая в себя МГЭС, ВЭУ и накопитель энергии. Предложена модель и алгоритм решения оптимизационной задачи выбранной системы локального источника

электроснабжения, позволяющие с помощью целевых функций и ограничений на основе реальных условий эксплуатации определить наиболее эффективные режимы выработки электроэнергии компонентами системы (в том числе при их различном сочетании)

3. Моделирование процессов локальной электроэнергетической установки, включающей в себя МГЭС и ВЭУ, целесообразно проводить путем применения методики, предусматривающей представление мощности нагрузки как сумму строго заданной и вариативной частей, из которых только последняя может изменяться при решении задачи оптимизации .

4. Решена задача оптимизации одноуровневого локального источника электроснабжения для поселка Басид, позволяющая для усредненного графика ветровой активности и минимальной мощности МГЭС выбирать мощность накопителя энергии.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Данная часть диссертации посвящена разработке и исследованию вертикально осевой ветроэнергетической установки (ВО ВЭУ) карусельного типа. На основе анализа существующих типов конструкций предложена новая концепция вертикально осевого ветроэнергетического устройства карусельного типа. В заключительной части главы выполнена сравнительная оценка основных показателей разработанной конструкции ВО ВЭУ карусельного типа.

### 3.1. Постановка задачи

Как отмечено во второй главе, решение задачи оптимизации энергопотребления от локальной энергосистемы предусматривает учет неограниченного количества разнохарактерных источников возобновляемой электрической энергии. К числу таких источников можно отнести малые гидроэлектростанции, ветроустановки, солнечные батареи, биоустановки с накопителями различного типа. Каждое устройство должно обладать оптимальными характеристиками, удовлетворяющими предполагаемым условиям эксплуатации и обеспечивающими надежное электроснабжение [89 - 92].

Для Таджикистана наибольшую эффективность дает использование МГЭС и ВЭУ, поскольку они обладают наиболее высокими потенциалами. Не менее важным фактором является способность установки работать в условиях резкого перепада высот. Республика Таджикистан является горной страной с уникальным контрастом географических и климатических условий. Уникальность заключается в том, что высота гор достигает более 7000 метров. Районы с населенными пунктами располагаются на высотах от 300 до 4000 метров и более, а температура колеблется в широких диапазонах ( $+50^{\circ}$  С (на юге) и  $-45^{\circ}$  С на востоке республики).

Решение указанной проблемы может быть достигнуто за счет разработки ветроустановки с оптимальными для условий Таджикистана характеристиками. Особую актуальность решение этой задачи приобретает для локальной энергосистемы с одним единственным генерирующим источником, которые подробно рассмотрены в главах 1 и 2, а также данного раздела настоящей работы. В целом наибольший дефицит электроэнергии в удаленных районах (населенных пунктах) республики наблюдается в зимний период, сопровождаемый маловодием горных рек.

Как показано ниже основными преимуществами вертикально осевой ветроэнергетической установки карусельного типа является простота конструкции, монтажа, эксплуатации, возможность компоновки нескольких ярусов друг над другом, что не требует выделения новых участков, устойчивость к порывам ветра и возможность адаптации к зданиям и сооружениям при выборе последних для монтажа.

### **3.2. Анализ действующих конструкций ВЭУ многолопастного типа**

В настоящее время существуют несколько вариантов вертикально осевых конструкций ВЭУ многолопастного типа, главным отличительным признаком которых является наличие внешнего контура направляющих лопастей, одновременно выполняющие роль защитного кожуха [93 - 100]. Наиболее известными являются конструкции, разработанные Е.И. Кончаковым [101, 103] и С.В. Грибковым [104]. Данные конструкции предназначены для использования в районах с умеренным скоростями ветровых потоков от 8 м/с до 25 м/с, в равнинных местностях. Конструкция С.В. Грибкова (рис.3.1) предусматривает также возможность установки несколько модулей друг на друга в несколько ярусов. Анализ существующих конструкций указывает на необходимость разработки многолопастных ветроэнергетических установок, адаптированных к климатическим условиям Республики Таджикистан и

обладающих повышенной надежностью конструкции, обеспечивающей работоспособность при порывах ветра до 40 м/с.



Рисунок 3.1. Разработка ЦАГИ, выполненная под руководством Грибкова С.В.

[100]

С целью проведения анализа производительностью ВЭУ методом статистического анализа были рассмотрены параметры 15 серийно выпускающихся ветроустановок для построения среднестатистической энергетической характеристики малой ВЭУ (мощностью до 10 кВт). Для которых в качестве системы регулирования мощности и частоты вращения используется балластная нагрузка. На рисунке 3.2 приведены зависимости развиваемой мощности в о.е. от скорости ветра рассматриваемых ВЭУ, а также среднеарифметические значения их мощностей (черная линия на графиках). При этом все данные были разделены на два диапазона относительно расчетной скорости ветра  $V_{расч}$  (см. П.В1. и П.В2).

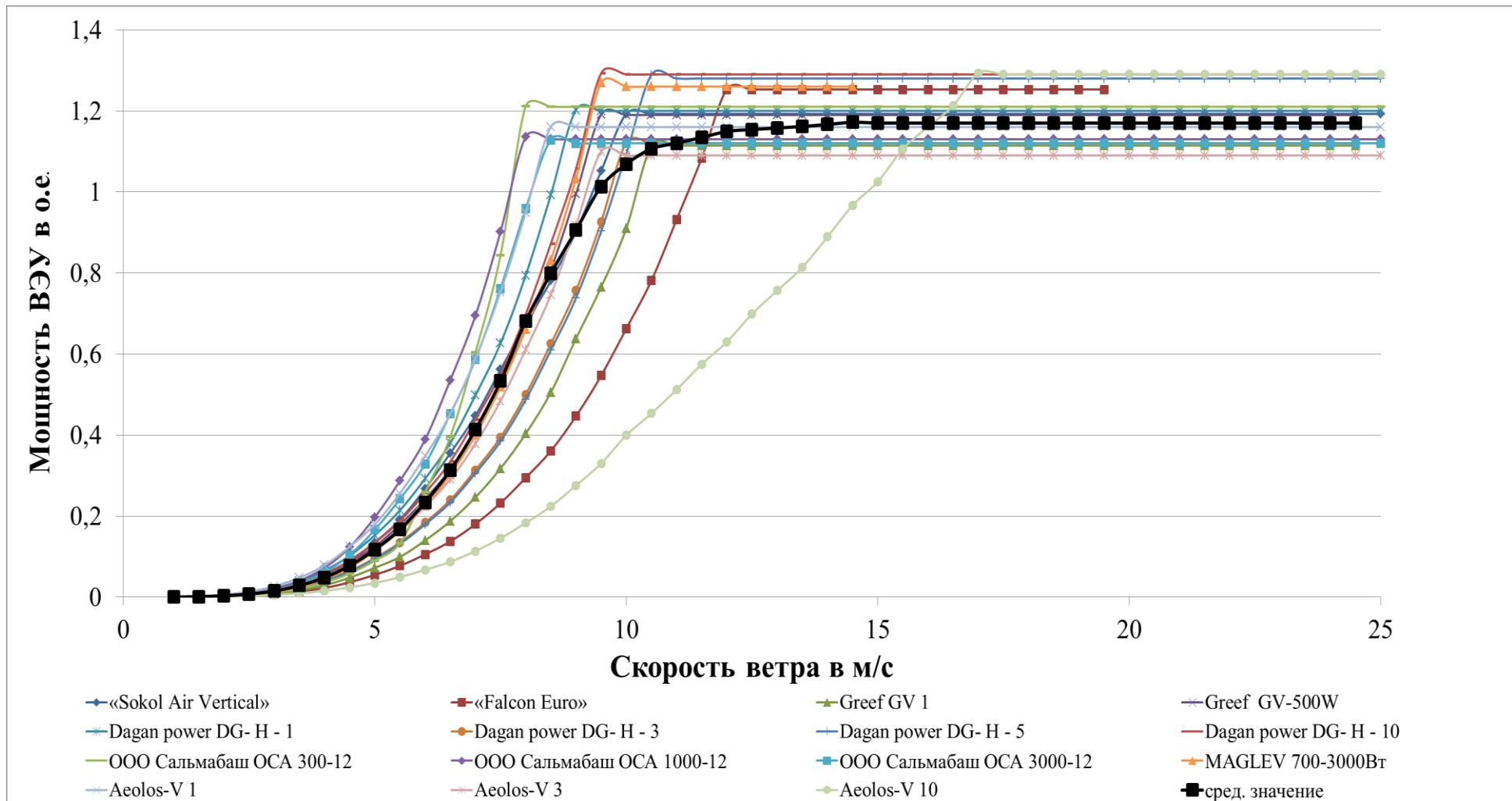


Рисунок 3.2. – Энергетические характеристики малых ВЭУ с регулированием мощности за счет включения балластной нагрузки параллельно сети

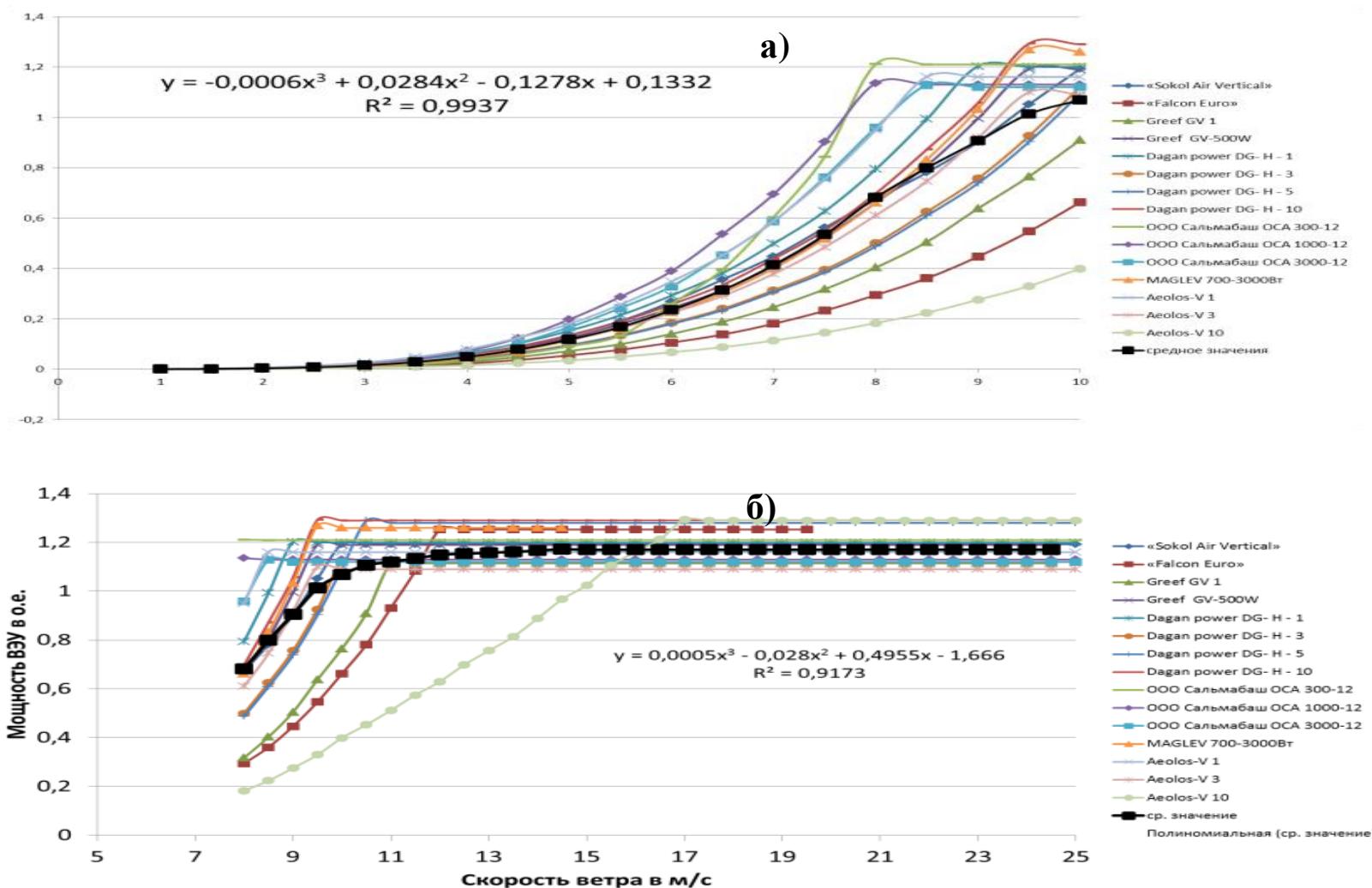


Рисунок 3.3 - Аппроксимация среднестатистической энергетической характеристики ВЭУ в о.е.: а) — в диапазоне скоростей ветра от минимальной  $V_{\min}$  до расчетной  $V_{\text{расч}}$ ; б) — в диапазоне скоростей ветра от расчетной  $V_{\text{расч}}$  до максимальной  $V_{\max}$

При анализе полученных энергетических характеристик в о.е., по формулам (3.1) и (3.2) можем определить значения стандартного отклонения  $\sigma$  и коэффициента вариации  $v$  среднеарифметического значения мощности рассматриваемых ВЭУ для каждой скорости ветра из рабочего диапазона ВЭУ с шагом 1 м/с. Результаты расчетов приведены в таблицу 3.1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i^* - P_{cp}^*)^2}{n}} \quad (3.1)$$

где  $P_i^*$  — мощность  $i$ -той из рассматриваемых в ходе проведения анализа ВЭУ в о.е. (см. таблицу 1) при заданной скорости ветра из рабочего диапазона;  $P_{cp}^*$  — среднеарифметическое значение мощности в о.е. всех рассматриваемых ВЭУ при заданной скорости ветра;  $n$  — количество рассматриваемых рабочих характеристик ВЭУ при заданной скорости ветра.

$$v = \frac{\sigma}{P_{cp}^*} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Таблица 3.1- Стандартное отклонение и коэффициент вариации

Скорость ветра $U$ , м/с.	Стандартное отклонение $\sigma$ , о.е.	Коэффициент вариации $v$ , %	Скорость ветра $U$ , м/с.	Стандартное отклонение $\sigma$ , о.е.	Коэффициент вариации $v$ , %
2	0,0003	10,1	15	0,08	6,8
3	0,0001	9,4	16	0,079	6,7
4	0,004	9,3	17	0,079	6,8
5	0,01	9,6	18	0,7	6,8
6	0,02	9,4	19	0,07	6,8
7	0,04	9,9	20	0,11	9,5
8	0,073	10,7	21	0,11	9,5
9	0,07	7,7	22	0,11	9,5
10	0,59	5,6	23	0,11	9,5
11	0,047	4,2	24	0,11	9,5
12	0,039	3,4	25	0,13	15,6
13	0,031	2,7			
14	0,024	2,1			

По результатам проведенного анализа во всем диапазоне рабочих скоростей ветра коэффициент вариации среднеарифметического значения мощности ВЭУ не превышает 15%. Таким образом, можно сделать вывод о том, что совокупность представленных на рисунке 3.2. энергетических

характеристик рассматриваемых ВЭУ является однородной. Совокупность представленных на рисунке 3.3 паспортных энергетических характеристик ВЭУ также является однородной, их средние значения для каждой скорости ветра из рабочего диапазона — надежными.

### **3.3. Разработка конструкции вертикально осевого ВЭУ многолопастного типа для локальных источников электроснабжения**

В целях создания локальных источников электроснабжения в условиях Таджикистана автором разработана и запатентована конструкция ветровой установки многолопастного типа, имеющая улучшенные показатели по стартовому моменту, коэффициенту использования ветра, устойчивости работы конструкции при работе в условиях турбулентности, а также обеспечивающая снижение затрат на обслуживание.

На основе разработанных технических решений по оптимизации ВЭУ, а также проведенного по Российской и зарубежным базам патентного поиска согласно ГОСТ Р 15.011-96., получен патент на полезную модель ВЭУ №184213 [105]. Двухъярусная конструкция ветроколеса снабжена двенадцатью лопастями (по 6 лопастей на каждый ярус), количество которых может быть изменено. Для улучшения плавности хода, а также для устранения непродуктивных углов, лопасти одного яруса относительно другого смешены на половину расстояния между ними (см. рисунок 3.4).

Непродуктивные углы появляются, в основном на установках с меньшим числом лопастей и со значительным диаметром ветроколеса. В этом случае часть потока может протекать беспрепятственно между лопастями, что приведет к низкому показателю коэффициента использования энергии ветра.

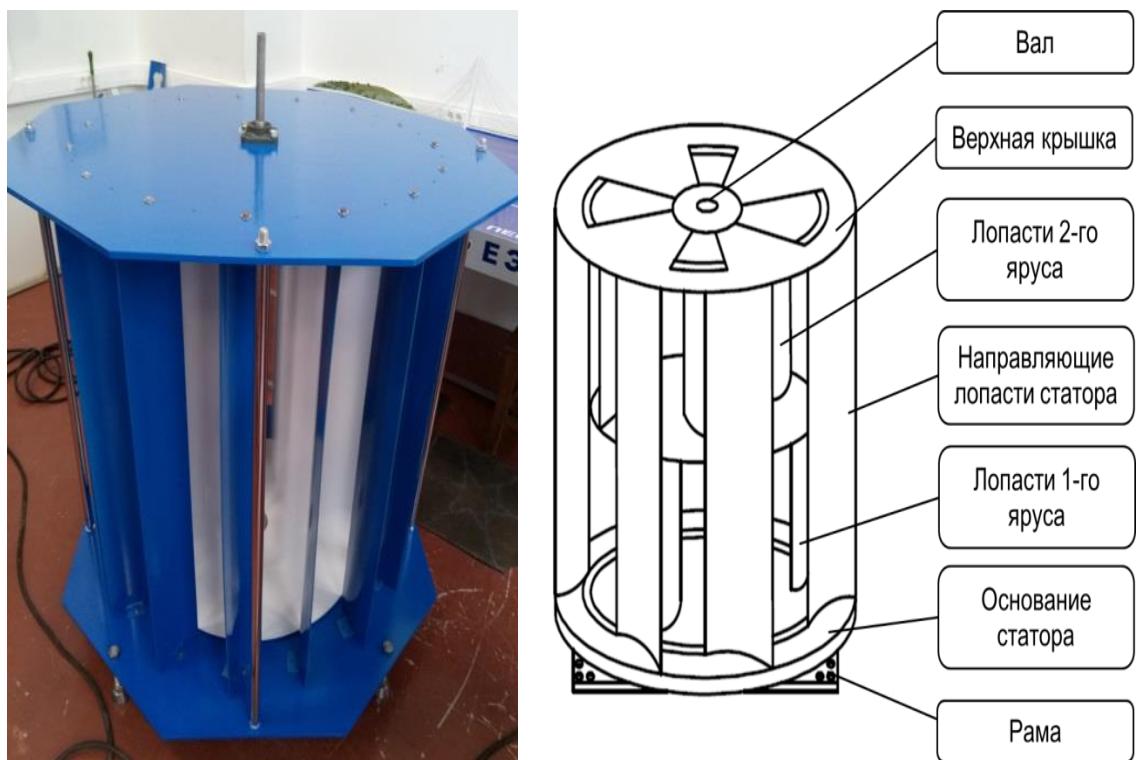


Рисунок 3.4. Общий вид конструкции двухъярусного ВЭУ многолопастного типа

Разработанная конструкция ВЭУ обладает следующими основными достоинствами:

1. Разделение рабочего колеса на ярусы снижает неравномерность преобразования потока из-за наличия непродуктивных углов в межлопастных каналах которое наблюдается у одноярусных ВД.
2. Двухъярусная конструкция ротора ВЭУ позволяет улучшить стартовый момент при низких скоростях ветра, менее 2,5 м/с.
3. При разделении ротора на ярусы уменьшается длина лопастей, что приводит к их устойчивости при воздействии центробежной силы.
4. Упрощается обслуживание ротора, при необходимости можно без привлечения грузоподъёмных механизмов заменить лопасти ротора.

Также получен патент на полезную модель на конструкцию ВЭУ №174578 [106] мобильного исполнения, мощность которого может составлять от 0,1 кВт до 10 кВт. (рисунок 3.5).

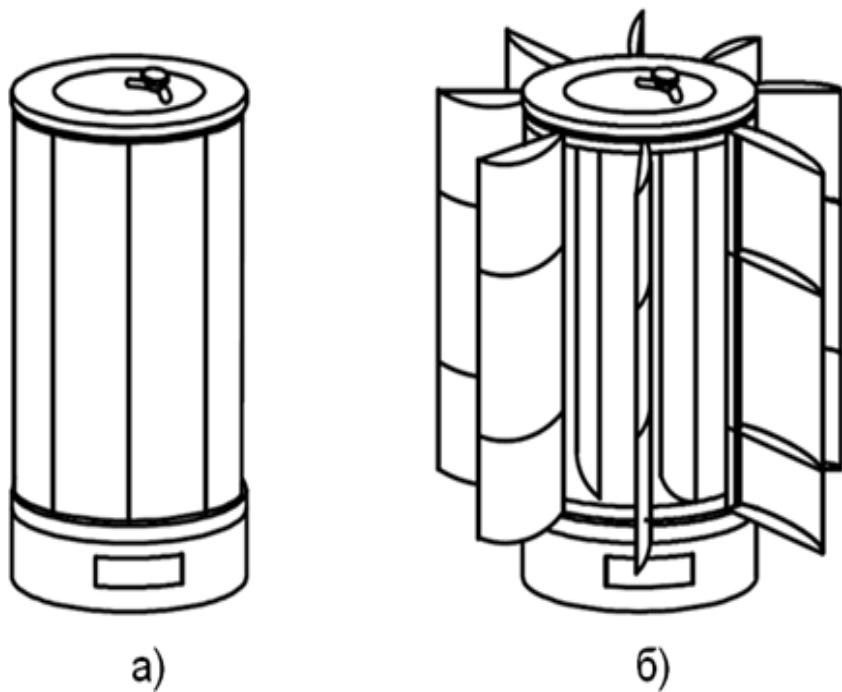


Рисунок 3.5. Модифицированная конструкция мобильного ВЭУ многолопастного типа: а) в транспортном положении (направляющие лопасти свёрнуты); б) в рабочем положении (направляющие лопасти развёрнуты)

Разработанная конструкция ВЭУ мобильного исполнения (рисунок 3.5.) обладает следующими основными достоинствами:

1. Конструкция ветроколеса повышает эффективность отбора ветровой мощности (ветровой к.п.д.) до 34-37% при различных скоростях ветра (от 1 м/сек до 15 м/сек).
2. В транспортном положении корпус ВЭУ имеет минимальное поперечное сечение, т.к. направляющие лопатки максимально придвинуты к ее вертикальной оси (уменьшения объема до 20%).
3. Безопасность и надежность конструкции в рабочем режиме при эксплуатации, а также снижение уровня шума и отсутствие низкочастотных акустических колебаний обеспечивается за счет внешнего контура лопастей выполняющий роль направляющих.

Запатентованные конструкции ветроэнергетических установок обеспечивают улучшенный стартовый момент и устойчивость работы в экстремальных условиях.

### 3.4. Расчетное и экспериментальное исследование энергетических характеристик ВЭУ

Известно, что в процессе преобразования энергии ветрового потока в механическую энергию, основным функциональным блоком ветродвигателя, является ротор с лопастями (см. рис. 3.6). Эффективность ротора оценивается по значению КИЭВ (коэффициента использования энергии ветра)  $C_p(\xi)$ . КИЭВ равно отношению энергии ветрового потока, воспринятой и преобразованной лопастями ВД в механическую Евд, к полной энергии ветрового потока Е, действующего на ротор [19, 20, 21].

$$C_p(\xi) = \frac{E_{вд}}{E} \quad (3.3)$$

Количество и форма лопастей ротора может быть различной. Однако для начала вращения ротора в большинство турбин требуется, чтобы скорость ветрового потока составляла более 3,5 м/сек. Это связано с наличием момента троганья Мтр, вызванным собственным весом ветроколеса, трением на подшипниках, а также наличием угловых положений ротора, при которых  $M_{вр} \leq M_{тр}$  называемых непродуктивными углами [103]. Качества выходных параметров ВЭУ напрямую зависят от равномерного «хода» ветроколеса, т.е. отсутствием непродуктивных угловых положений которые приводят к неравномерности преобразования двигателем энергии ветрового потока – к снижению. Данный фактор неравномерности объясняет, в частности, нелинейность зависимости  $M_{вр}$  от скорости  $V_{в}$ , характерную для традиционно используемых вертикально-осевых ветродвигателей [107, 108].

Оптимальные рабочие характеристики (максимальный коэффициент мощности и др.) зависят от прочности ротора и окружной скорости вращения лопастей [97]. Прочность ротора ВО ВЭУ зависит от количества лопастей,

хорды аэродинамического профиля и радиуса ротора. Отношение скорости кончика лопасти является функцией угловой скорости  $\omega$ , скорости невозмущенного ветра  $v$  и радиуса ротора  $R$  называемый быстроходностью.

$$Z = \frac{\omega R}{v}$$

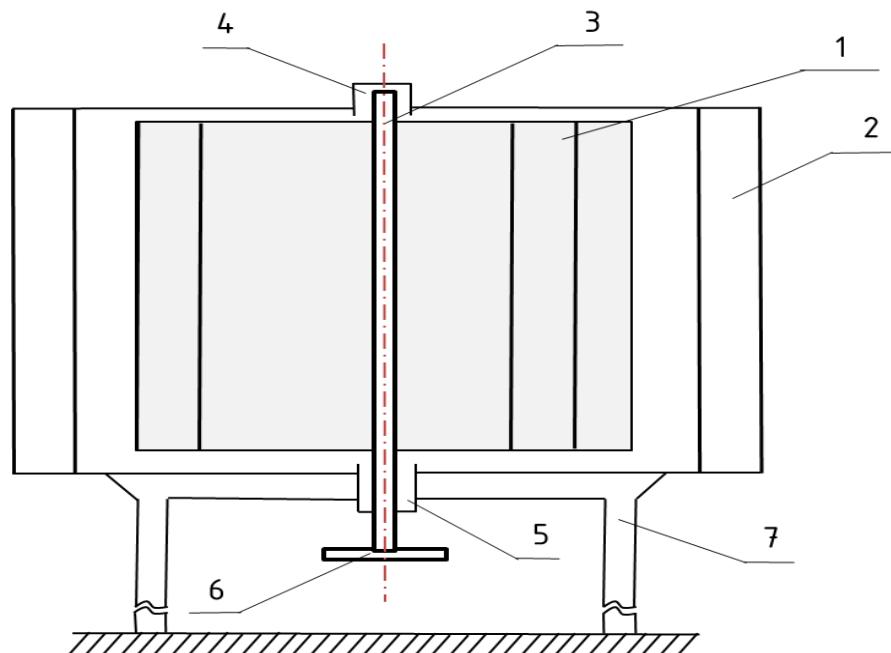


Рисунок 3.6. Вертикально-осевой ветродвигатель многолопастного типа  
 1 – ротор с лопастями; 2 – направляющие лопасти статора; 3 – вал; 4 – центрирующий подшипниковый узел; 5 – опорный подшипниковый узел; 6 – соединительная муфта для передачи механической энергии вращения электрогенератору; 7 – рама (основание)

В процессе проектирования ветротурбины с вертикальной осью крайне важно оптимизировать аэродинамические характеристики лопастей и ветроколеса в целом [72, 97 - 100].

Для фиксированной ометаемой площади турбины с целью оптимизации её коэффициента мощности можно использовать различные сечения профиля или роторы с различной плотностью [68].

Мировой опыт показывает, что оптимизацию формы и размеров лопастей целесообразно проводить с помощью математического и компьютерного моделирования. Это связано с тем, что проведение натурных экспериментов требует значительных финансовых и временных затрат.

На рис. 3.7. представлены графики зависимости коэффициента мощности  $C_p$  от отношения быстроходности  $Z$  в зависимости от плотности ротора  $\sigma$  для вертикально-осевой ветровой турбины с прямыми лопастями, построенные с помощью алгоритмов, основанных на теории модели множеств трубок тока (МТТ) [109]. Кроме того, на рисунке 3.7 показана зависимость коэффициента мощности для ветровой турбины с прямыми лопастями и аэродинамическим профилем NACA 0018.

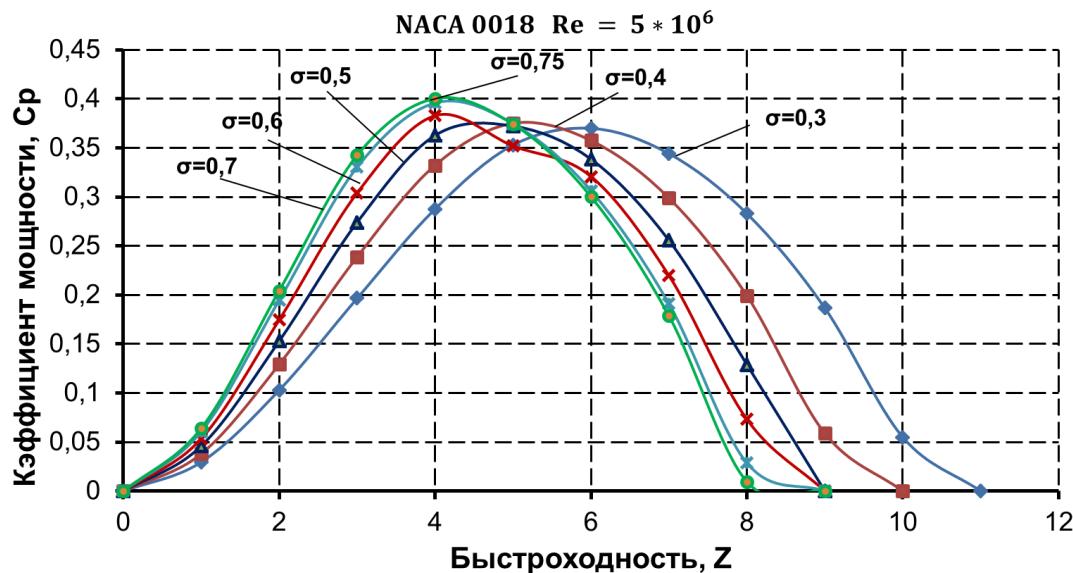


Рисунок 3.7 - Зависимости коэффициента мощности от быстроходности и плотности ротора

Из графика на рис.3.7 можно определить плотность  $\sigma = 0,7$  которая максимизирует коэффициент мощности, который принимает значение  $C_{p\max} = 0,4$  соответствующий значению быстроходности  $Z (\lambda) = 4,0$ .

Так как плотность  $\sigma$  равна:

$$\sigma = \frac{N_b c}{R} \quad (3.4)$$

то хорда с может быть выражена как функция плотности, радиуса ротора R и числа лопастей Nb:

$$c = \frac{\sigma_{cpmax}}{Nb} R \quad (3.5)$$

**Соотношение сторон.** В процессе проектирования ВЭУ с вертикальной осью следует учитывать, что значения коэффициента мощности (КПД ветротурбины) также зависит от выбора соотношения сторон ветротурбины. Обычно на практике этот параметр (т.е. соотношение сторон) часто выбирается эмпирически на основе опыта разработчика, а не на основе научных соображений. Математически мощность ветротурбины с вертикальной осью вращения (рис.3.8) определяется по выражению (3.6),

$$P = \frac{1}{2} \rho V_0^3 2R h C_p \quad (3.6)$$

где  $R$  – радиус ветроколеса ВЭУ, м;

$h$  - высота ветроколеса ВЭУ, м.

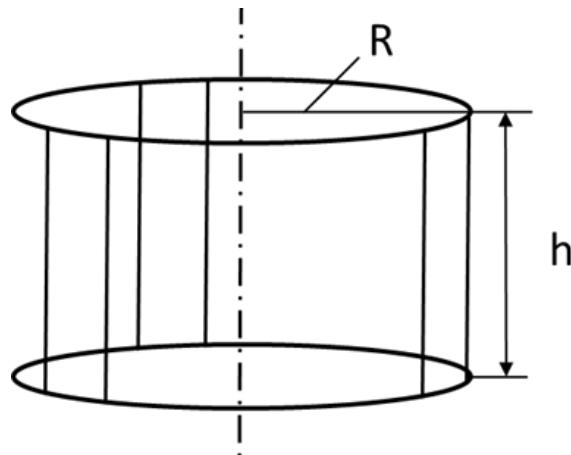


Рисунок 3.8 - Ветроколеса ВЭУ с вертикальной осью вращения

Определив соотношение сторон турбины (AR) как отношение высоты лопасти к радиусу ротора ( $AR = h / R$ ), радиус ротора можно получить из формулы 3.6 [66, 70, 72]:

$$R = \sqrt{\frac{P}{\rho V_0^3 A R C_p}} \quad (3.6)$$

где мощность  $P$  и скорость ветра  $V_0$  являются расчетными данными  
 $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$  – значение которого зависит от температуры  
и высоты расположения над уровнем моря

Анализ вышеприведенных соотношений показывает, что радиус  $R$  увеличивается при уменьшении отношения  $AR$ , что приводит к уменьшению угловой скорости вращения  $\omega$ :

$$\omega = \frac{\lambda_{cpmax} V_0}{R} \quad (3.7)$$

Так, чтобы максимально увеличить коэффициент мощности  $C_p$ , соотношение сторон ветроколеса должно быть как можно меньше. По мере уменьшения соотношения сторон достигается два преимущества: число Рейнольдса растет и одновременно скорость вращения уменьшается. Влияние соотношения сторон ротора на число Рейнольдса и скорость вращения показано на рис.3.9 для двухлопастной турбины мощностью 1 кВт со скоростью ветра 10 м/с.

Анализ прямого влияния  $AR$  на показатели производительности ВО ВЭУ карусельного типа выполнен при допущении, что рассматриваемые установки проверяются в одинаковых эксплуатационных условиях. Из рис. 3.9, видно, что низкий  $AR$  дает высокое число Рейнольдса, и это может улучшить показатели ветротурбины.

Таким образом в процессе проектирования конструкции, рекомендуется выбор низкого значения коэффициента соотношения сторон  $AR$ .

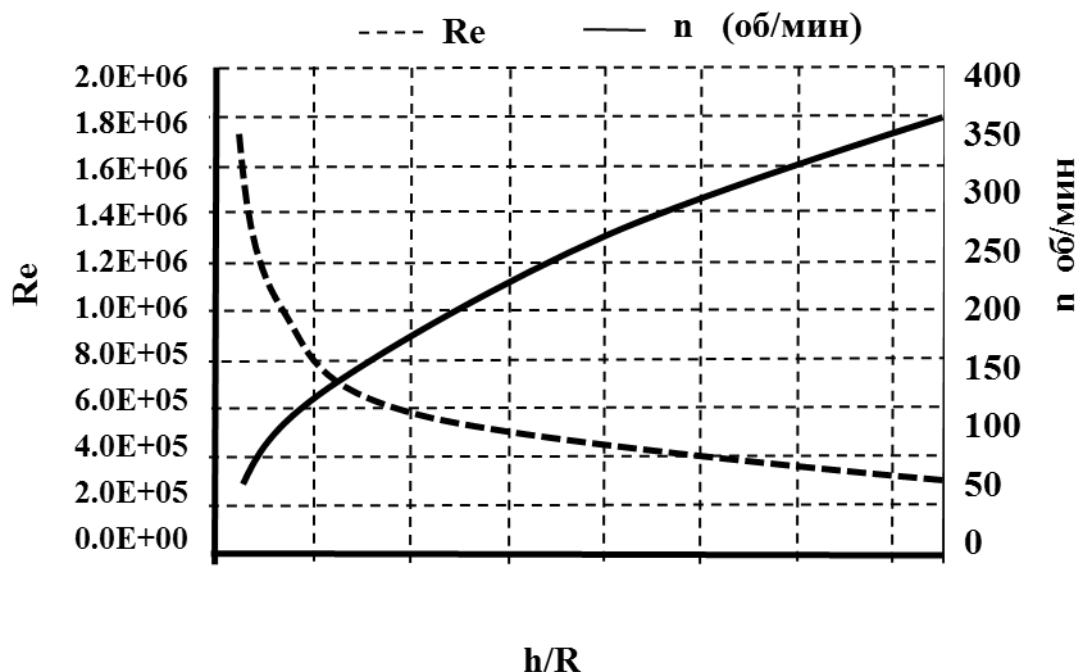


Рисунок 3.9 - Влияние соотношения сторон ротора на число Рейнольдса и скорость вращения показано

В качестве примере будет представлено сравнение двух ветротурбин сконструированных с двумя различными значениями AR (AR = 2 и AR = 0.4) рисунок 3.10.

Как известно из ранее сказанного турбина с наименьшей AR будет иметь наибольший коэффициент мощности и наименьшую скорость вращения. Данная турбина будет иметь еще два преимущества: во-первых, структурный (более толще лопасти устойчивы к возмущениям), а во-вторых, стабильность (т.е. большой момент инерции роторов).

Для простоты предположим, что мы хотим спроектировать ВЭУ с номинальной мощностью 1 кВт, имеющий шесть прямых лопастей с симметричным аэродинамическим профилем (NACA 0018). Место предполагаемой установки характеризуется средней скоростью ветра 10 м/с. Разработанная алгоритм расчета приведен на рис. 3.10. Здесь показано блок – схема определения оптимального числа Рейнольдса. При применении данной методики, прежде всего, предполагается, что число Рейнольдса известно или

предварительно задано, и будем называть её: "первая попытка числа Рейнольдса".

При числе Рейнольдса, равного  $5 \times 10^6$ , из графика на рис. 3.7 определяем максимальное значение коэффициента мощности ( $C_{pmax} = 0.41$ ) при максимальных значениях коэффициента заполнения ротора и быстроходности соответственно:  $\sigma_{pmax} = 0.7$  и  $Z_{pmax} = 4.0$ . Для соотношения сторон 2 ( $h / R = 2$ ), по формуле (4) радиус ротора  $R = 0,904$  м ( $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>). Далее по приведенным формулам, получаем хорду  $c = 0,136$  м, и скорость вращения  $n=320$  об/мин. При необходимости новую число Рейнольдса (вторая попытка) можно определить по формуле (3.7):  $Re = 2.8 \times 10^5$ .

Теперь можно процедуру проектирования повторить с новым значением числа Рейнольдса. Данная число Рейнольдса будет называться: "вторая попытка числа Рейнольдса". С учетом рис. 3.7, мы получим новые геометрические значения для ветротурбины. Эти значения приведены в таблице 3.1. Процедура проектирования закончится, тогда когда число Рейнольдса не изменится значимым образом. Порядок и последовательность проектирования переходит к численной сходимости только с двумя итерациями.

Из данных, приведенных в таблице 3.1 для  $h/R = 2$ , порядок расчета дает коэффициент мощности 0,464. Повторяя описанную выше процедуру для  $h / R = 0,4$ , получим более высокую эффективность:  $C_{pmax} = 0,475$  (см. табл. 3.).

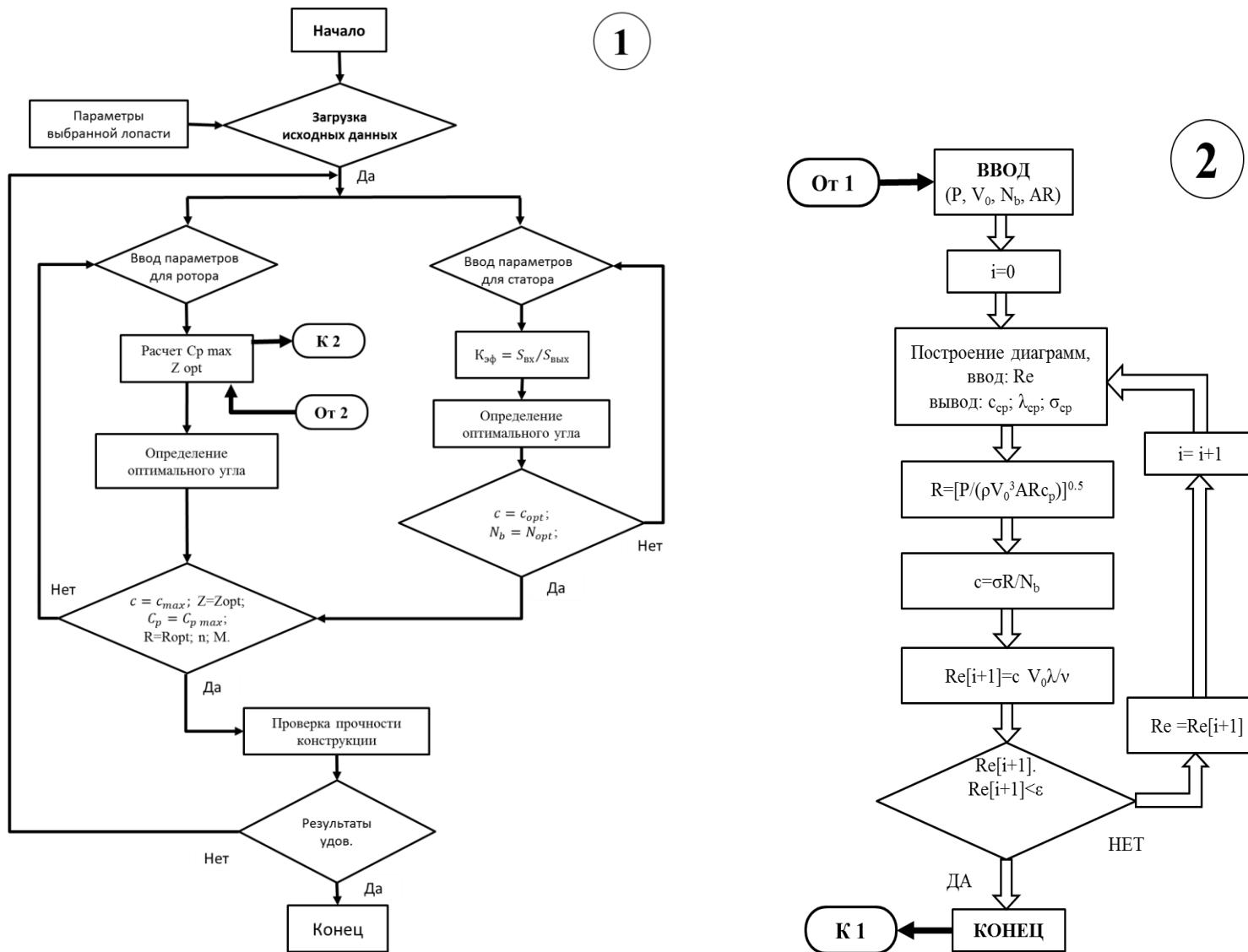


Рисунок 3.10. Алгоритм расчета параметров ВЭУ с вертикальной осью вращения

Таблица 3.2 - Методика проектирования вертикально – осевой ВЭУ с различным коэффициентом AR

	<b>h/R = 2</b>		<b>h/R = 0,4</b>	
	Первая попытка	Вторая попытка	Первая попытка	Вторая попытка
Мощность (кВ)	1	1	1	1
Профиль (лопасти)	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0018
Скорость ветра, м/с	10	10	10	10
Атмосферное давление, кг/м <sup>3</sup>	1,2	1,2	1,2	1,2
Кинематическая вязкость воздуха, м <sup>2</sup> /с	$1,46 \times 10^{-5}$	$1,46 \times 10^{-5}$	$1,46 \times 10^{-5}$	$1,46 \times 10^{-5}$
Соотношения сторон h/R	2	2	0,4	0,4
Количество лопастей, шт	6	6	6	6
Первая попытка числа Рейнольдса	$5 \times 10^6$	$2,8 \times 10^5$	$5 \times 10^6$	$6,2 \times 10^5$
Радиус ротора, м	0,904	0,947	2,02	2,09
Хорда лопасти, м	0,136	0,189	0,303	0,314
Скорость вращения, об/мин	320	301	140	135
Вторая попытка числа Рейнольдса	$2,8 \times 10^5$	$3,8 \times 10^5$	$6,2 \times 10^5$	$6,5 \times 10^5$
Следующий шаг	Вторая итерация	Конец	Вторая итерация	Конец

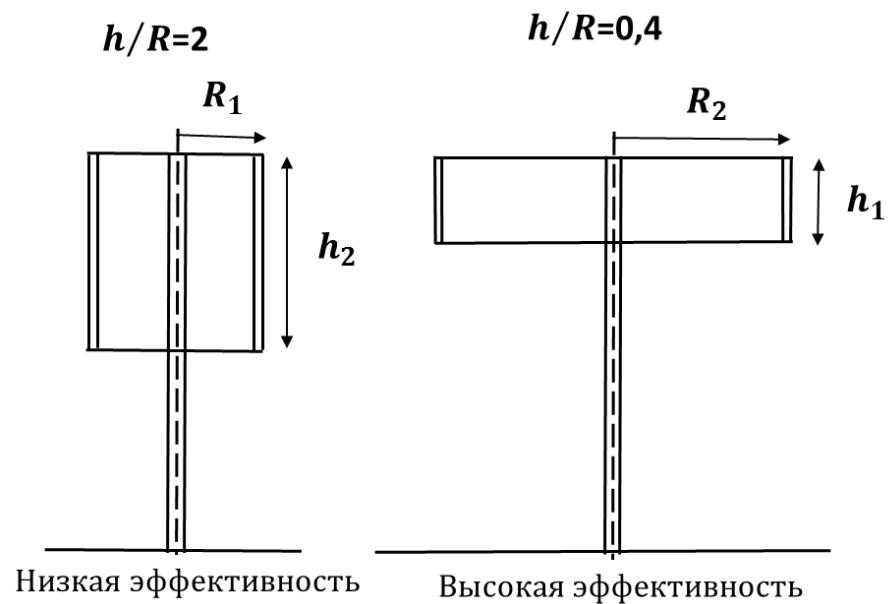


Рисунок 3.11 - Варианты исполнения ветроколес турбин и его зависимости от AR

На рис. 3.12 показаны те же графики, что и на рис. 3.9 но параметризованный для различных мощностей турбины. Анализ показывает, что турбины с наибольшей мощностью имеют большее число Рейнольдса и меньшую скорость вращения.

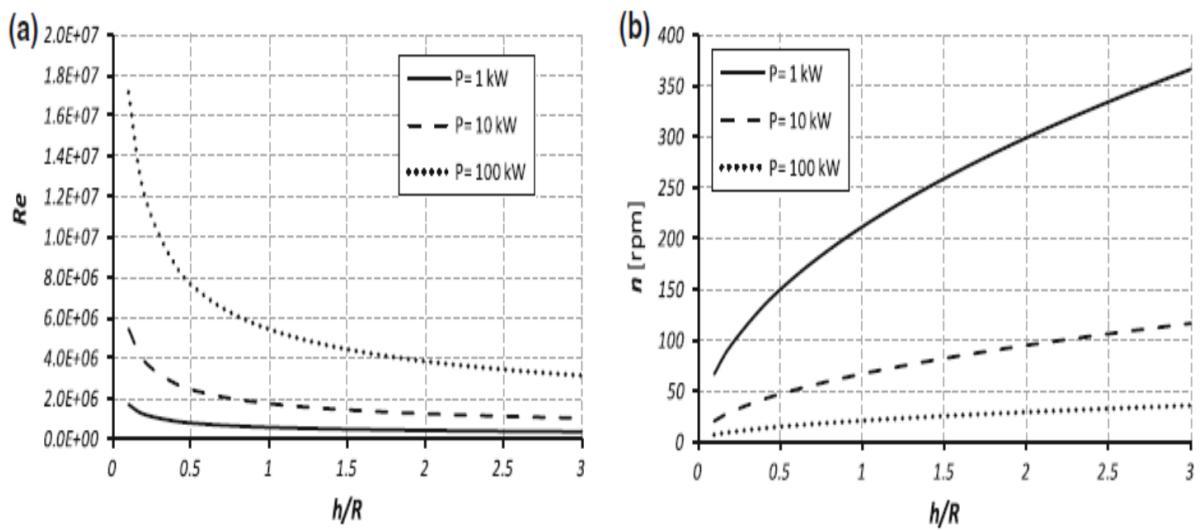


Рисунок 3.12 - Зависимости число Рейнольдса и скорости вращения от соотношения сторон

Отсюда можно сделать вывод, что ВО ВЭУ зависит от числа Рейнольдса его лопастей. Чем выше это, тем лучше производительность турбины. Это происходит потому, что с увеличением числа Рейнольдса повышается коэффициент подъемной силы лопасти [109, 110, 111] и уменьшаются коэффициенты сопротивления (рис. 3.13а, б) таким образом, обеспечивающий большой вращающий момент.

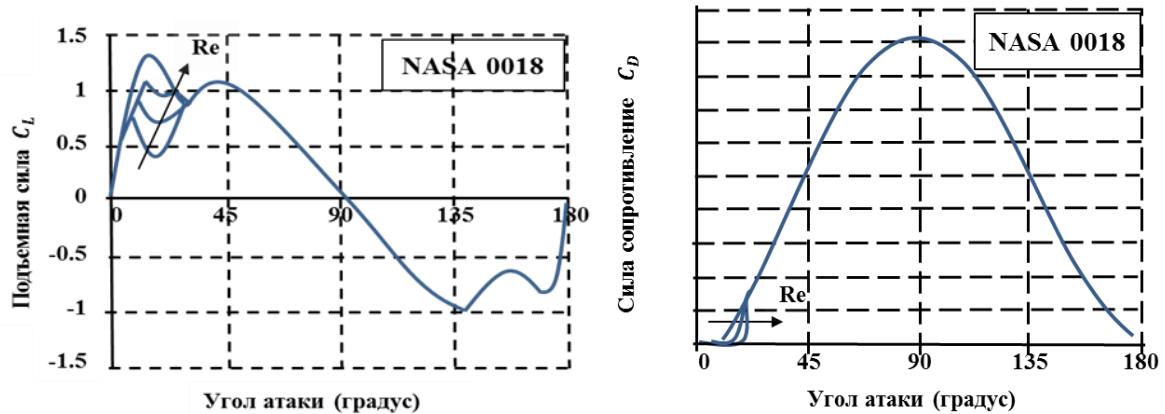


Рисунок 3.13 - Зависимости коэффициентов подъемной силы (а) и силы сопротивления (б) от угла атаки ветрового потока [110]

### 3.5. Имитационное компьютерное моделирование работы вертикально осевой ветроэнергетической установки в среде MatLab

Как отмечено в предыдущих главах, оптимизацию локальных электроэнергетических систем на основе малых ГЭС в горных районах Таджикистана в условиях жесткого дефицита воды целесообразно выполнять за счет подключения к сети накопителя энергии [112, 113] и использования ВИЭ.

В последние времена все большее распространение получили цифровые системы управления [114]. Вместе с тем совершенствуются и развиваются различные средства разработки и анализа как математические аппараты так

и языки высокого уровня для математического моделирования и численного анализа.

Применение методов имитационного моделирования в начальных этапах проектирования сложных систем/конструкций и управления способствуют существенному сокращению затрат на исследование, разработку, испытания, а также уменьшению времени разработки самого изделия [115].

Для достижений повышения эффективности процесса разработки ВО ВЭУ выбран пакет программ MATLAB/Simulink. Для проведения исследования в системе компьютерного моделирования MATLAB/Simulink создана математическая модель с учетом алгоритма расчета рассмотренного в данной главе. Разработанная модель отличается от имеющейся стандартной модели в пакете Simulink тем, что имитация различных режимов работы ВЭУ проводится с учетом изменения коэффициента соотношения сторон (AR) ветроколеса ветротурбины. Имитационная математическая модель вертикально осевого ВЭУ с различными коэффициентом AR представлено на рисунке 3.14.

Компьютерная модель ВЭУ была разработана с заданной КИЭВ и ометаемой площади с возможностью изменения коэффициента соотношения сторон (AR) ветроколеса ветротурбины. Функциональная схема модели приведена на рисунке 3.14.

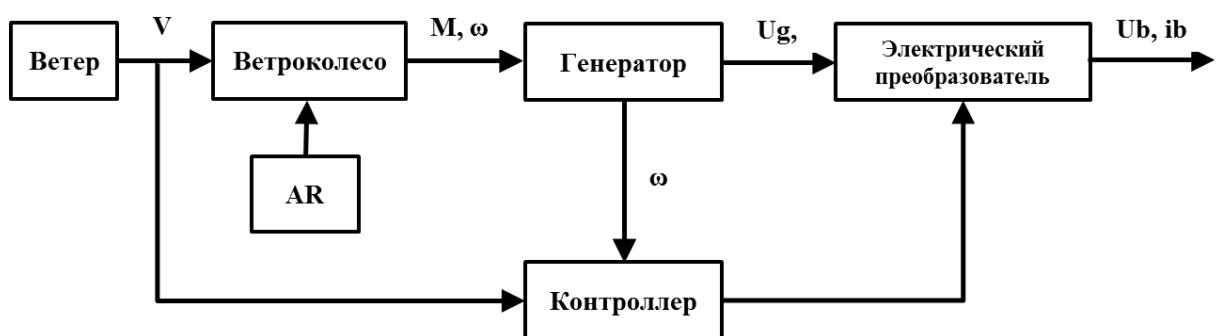


Рисунок 3.14. Функциональная схема имитационной модели ВЭУ

Особенностью предлагаемой модели является модуль коэффициента соотношения сторон (AR) ветроколеса ветротурбины, работающего по задаваемому алгоритму пользователем.

Целью моделирования является определение производительности ВЭУ при различных внешних воздействиях для выбора оптимального размера конструкции при разработке и исследований, а также разработке ВЭУ для натурных испытаний в реальных условиях [110].

Имитационная модель исследования режимов работы вертикально осевой ВЭУ приведенная на рисунке 3.15. позволяет рассматривать режимы работы в широком диапазоне изменения скорости ветрового потока (от 1 м/с до 30м/с).

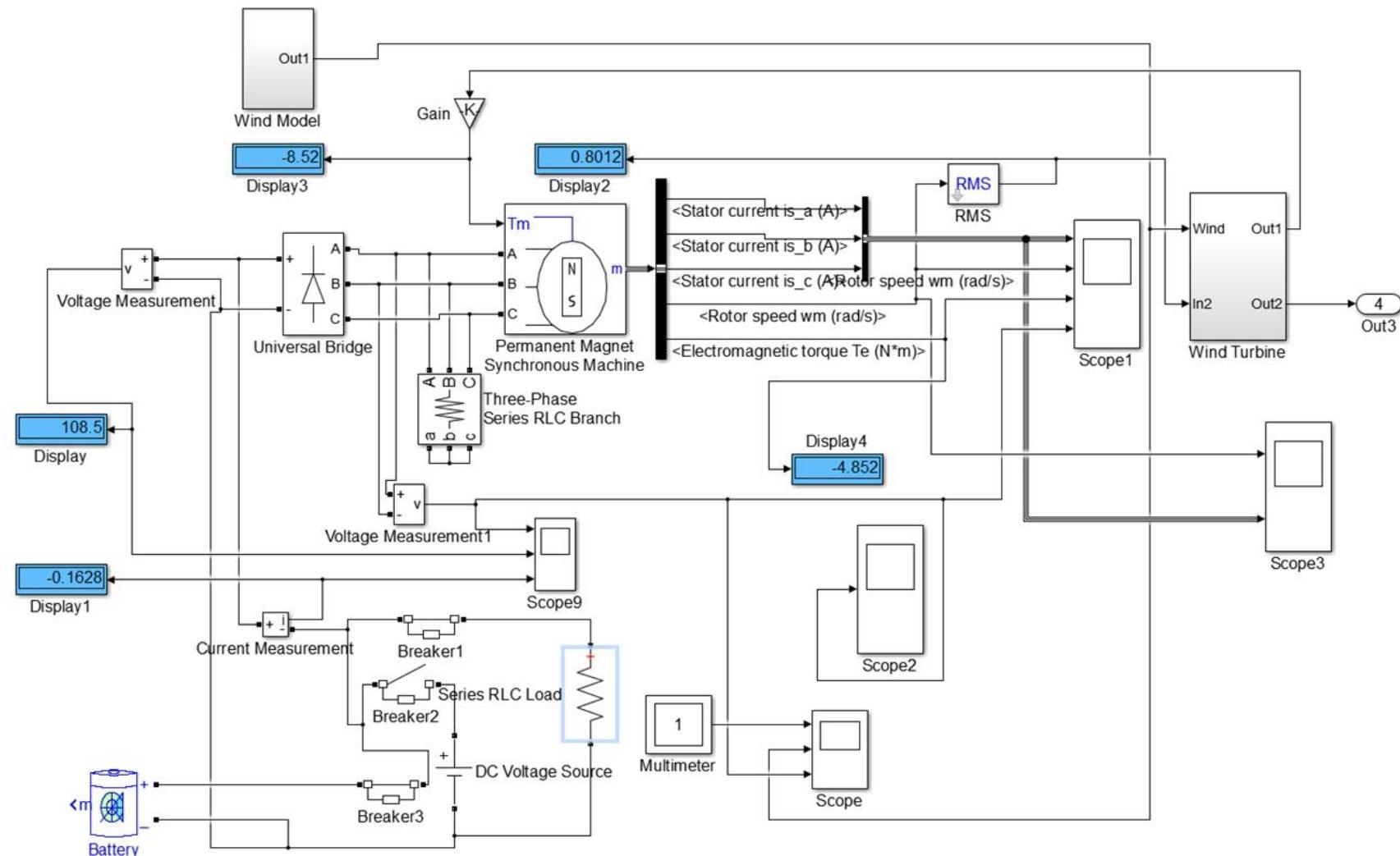


Рисунок 3.15. – Имитационная модель вертикально – осевого ВЭУ с различным коэффициентом AR в пакете программ MATLAB/Simulink

### 3.5.1. Модель ветра как источника энергии для ВЭУ в программной среде Simulink/Matlab

Моделирование ветра является неотъемлемой частью решения задач по применению ВЭУ в электроэнергетике. В настоящее время известны различные варианты моделирования ветра [98, 110, 115], которые отличаются степенью учета характеристик ветрового потока. Далее для представления результатов принята модель ветра состоящей из четырёх компонентов.

$$V = V_b + V_s + V_g + V_f$$

где  $V_b$  – постоянного составляющего, равного среднегодовому скоростью ветра;

$V_s$  – синусоидальная составляющая скорость ветра;

$V_g$  – нарастающая составляющая скорость ветра;

$V_f$  – затухающая составляющая скорость ветра.

Принятая модель ветра, выполненная в Simulink/Matlab, и суммарный график его скорости приведены на рисунках 3.16, 3.17.

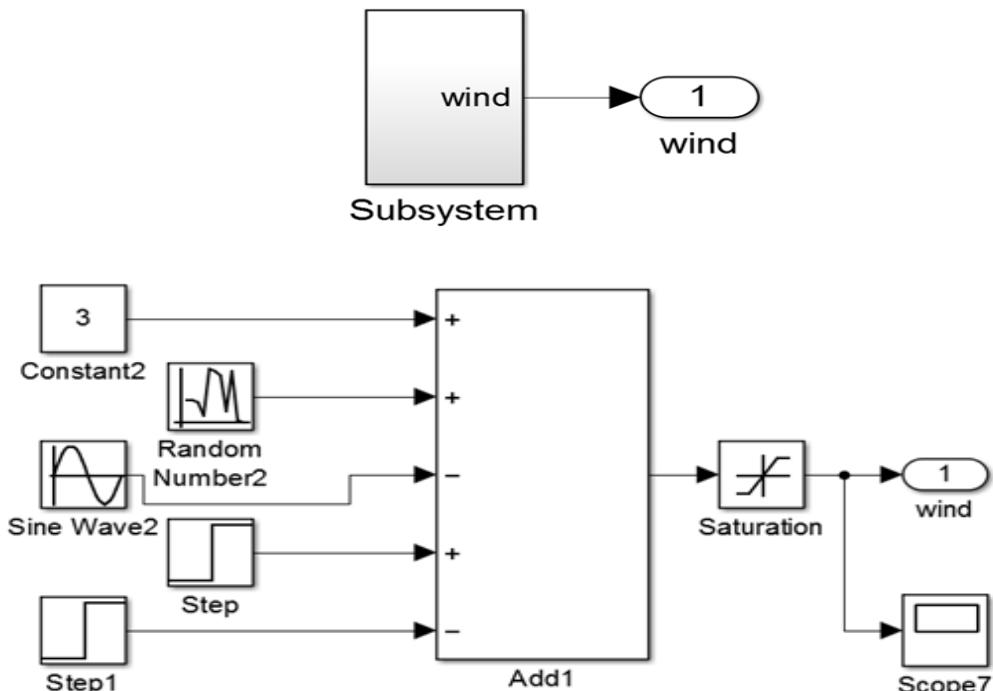


Рисунок 3.16. Блок модели ветра в Simulink/Matlab

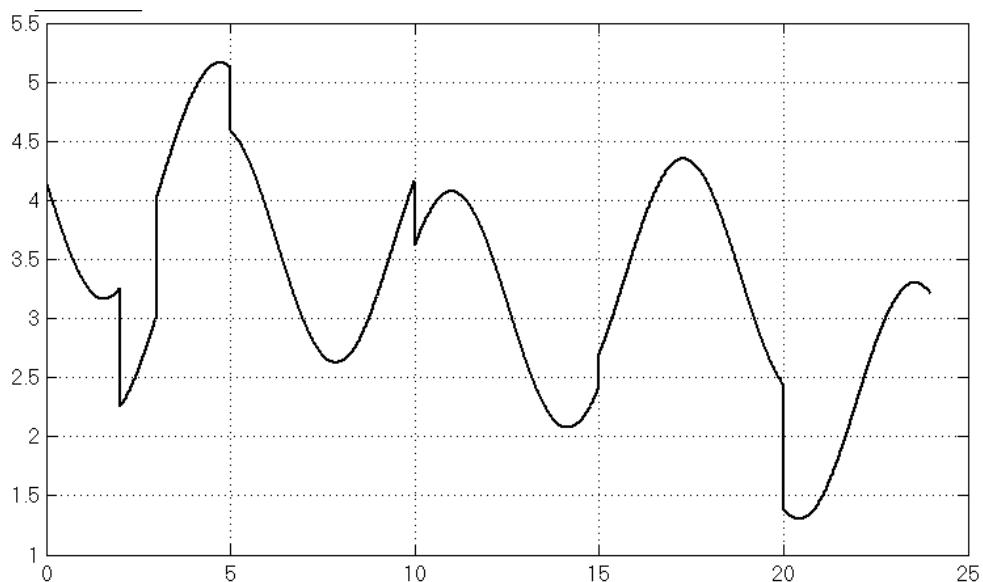


Рисунок 3.17. Суточный суммарный график модели скорости ветра

### 3.5.2. Моделирование ветротурбины в Simulink/Matlab.

Мощность, разрабатываемую ветродвигателем при заданных параметрах ветроколеса и в зависимости от изменения скорости ветрового потока определяют согласно выражения:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V^3 C_p(\xi) 10^{-3},$$

где  $P_{wind}$  – мощность разрабатываемая ветродвигателем, кВт;

$R$  – радиус ветроколеса, м;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup> (принимаемая в расчета при нормальных условиях  $\rho=1,225$  кг/м<sup>3</sup>);

$V$  – скорость ветрового потока, м/с;

$C_p(\xi)$  – КИЭВ (коэффициент использования энергии ветра)

Математически мощность ветротурбины с вертикальной осью вращения определяется по выражению:

$$P = \frac{1}{2} \rho V_0^3 2Rh C_p(\xi) 10^{-3}$$

где  $R$  – радиус ветроколеса ВЭУ, м;

$h$  - высота ветроколеса ВЭУ, м.

Практика использование ветроустановок, а также многочисленные исследования показывает, что КИЭВ  $C_p(\xi)$  определяется типом ветроколеса и не зависит от его габаритов.

Аэродинамические характеристики ветродвигателей с вертикальной осью вращения, полученных эмпирическим путем имеют форму представленную на рисунке 3.18, и могут быть аппроксимированы с помощью двух парабол квадратичной и кубической [112].

Для аппроксимации правой ветви характеристики используется  $C_p(\xi) = f(Z)$  квадратичная парабола с вершиной в точке А (рис.3.18) и определяет численные значения  $C_p$  в пределах быстроходности от нормальной  $Z_n$  до синхронной  $Z_0$  ( $Z_n \leq Z \leq Z_0$ ):

$$C_p = C_{p \max} - \frac{C_{p \max}}{(Z_0 - Z_n)^2} (Z - Z_n)^2 \quad (3.8)$$

где  $C_{p \max}$  – максимальный коэффициент использования энергии ветра.

Для левой ветви аэродинамической характеристики соответствующей значениям быстроходности  $Z \leq Z_n$  и может быть аппроксимирована кубической параболой:

$$C_p = C_{p \max} \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^2 \left[ 3 - 2 \left( \frac{Z}{Z_n} \right) \right] \quad (3.9)$$

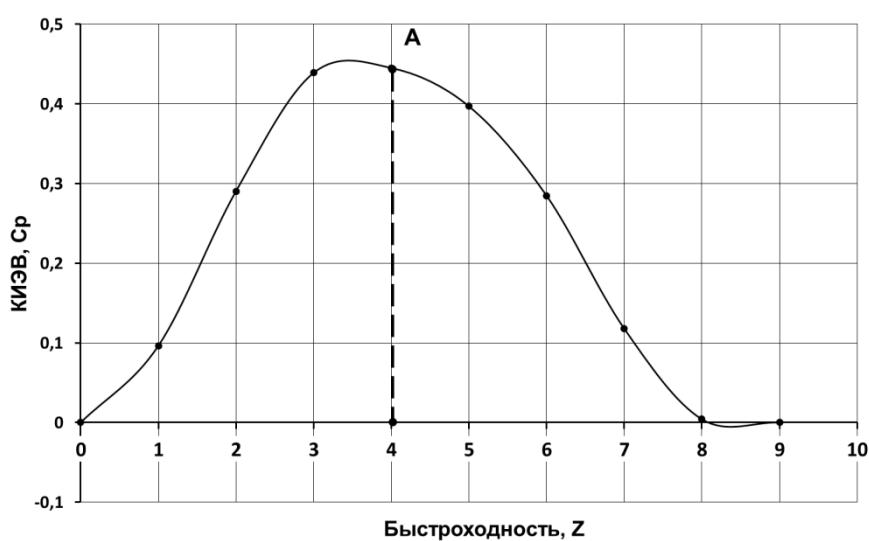


Рисунок 3.18. Аэродинамическая характеристика ветровой турбины (зависимость КИЭВ  $C_p(\xi)$  от быстроходности  $Z$ )

Значение коэффициента использования энергии ветра  $C_p$  и быстроходности  $Z$  зависят от плотности ротора  $\sigma$  которое определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{N_b c}{R} \quad (3.10)$$

где  $N_b$  – количество лопастей, шт.;  $c$  – хорда лопастей, м.

Здесь, хорда  $c$  может быть выражена как функция плотности, радиуса ротора  $R$  и числа лопастей  $N_b$ , по формуле:

$$c = \frac{\sigma_{cpmax}}{N_b} R \quad (3.11)$$

Частота вращения ветроколеса  $n_{wind}$  связаны с быстроходностью  $Z$  и скоростью ветра  $V$  соотношением

$$n_{B\mathcal{E}U} = \frac{30ZV}{\pi R}, \quad (3.12)$$

$$\omega_{B\mathcal{E}U} = \frac{Z \cdot V}{R}, \quad (3.13)$$

где  $Z$  – быстроходность ветроколеса (число модулей);

$V$  – скорость ветрового потока, м/с;

$R$  – радиус ветроколеса ВЭУ, м;

$n_{B\mathcal{E}U}$  – частота вращения ветродвигателя (ветроколеса), об/мин;

$\omega_{B\mathcal{E}U}$  – частота вращения ветродвигателя (ветроколеса), рад/с.

Крутящий момент развиваемый ветродвигателем определяется по формуле:

$$M_{B\mathcal{E}U} = \frac{1}{2} \bar{M} \rho V_0^2 2R h,$$

где  $M_{B\mathcal{E}U}$  – крутящий момент развиваемый ветродвигателем, Н · м;

$\bar{M}$  – аэродинамическая момент ветродвигателя в о.е.;

Исходными параметрами для моделирования ветротурбины являются скорость ветрового потока, подаваемого на вход 2, скорость вращения ветроколеса, соединенного с электрогенератором – подается на вход 1, и

значение коэффициента соотношения сторон которое подается на вход 3 (см. рис. 3.19).

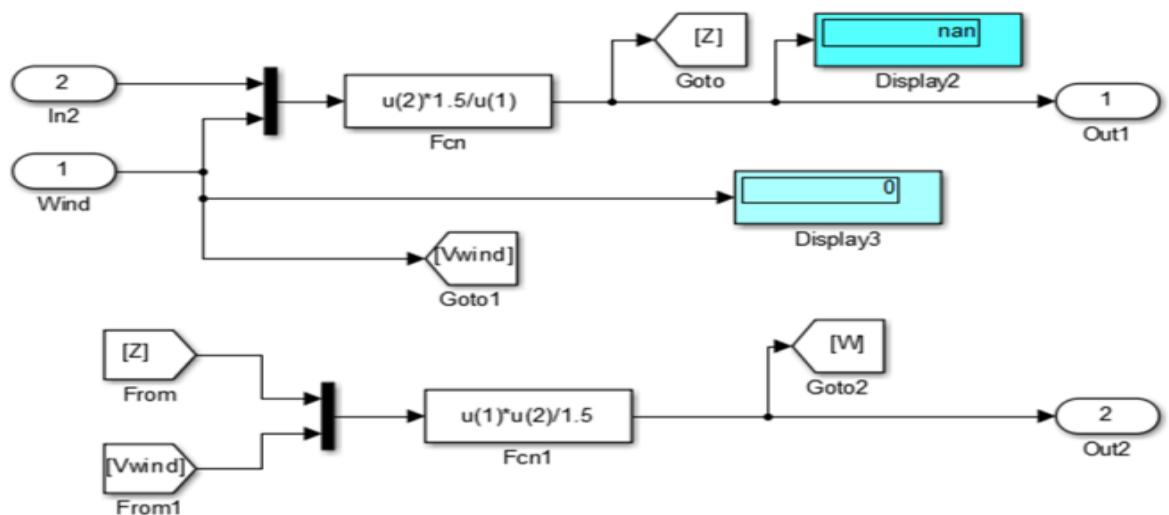
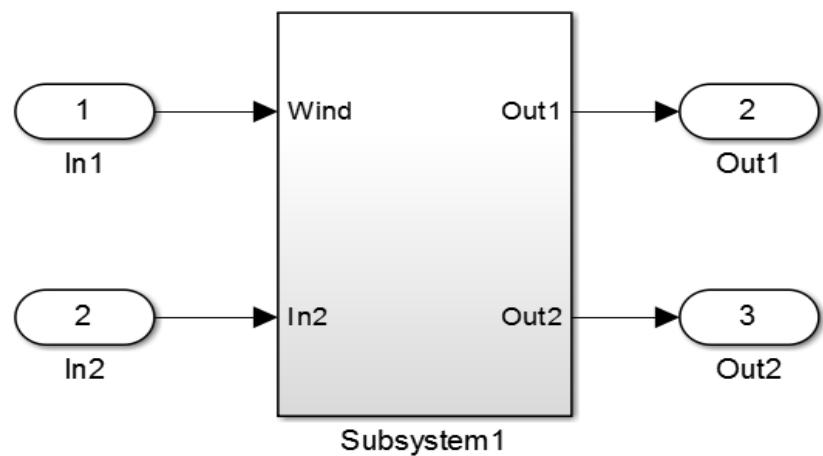


Рисунок 3.19 – Модель ВЭУ в пакете MATLAB/Simulink

С помощью модели построены графики, характеризующие зависимость мощности ветродвигателя от частоты его вращения, для различных коэффициентов соотношения сторон AR, которые представлено на рисунке 3.20.

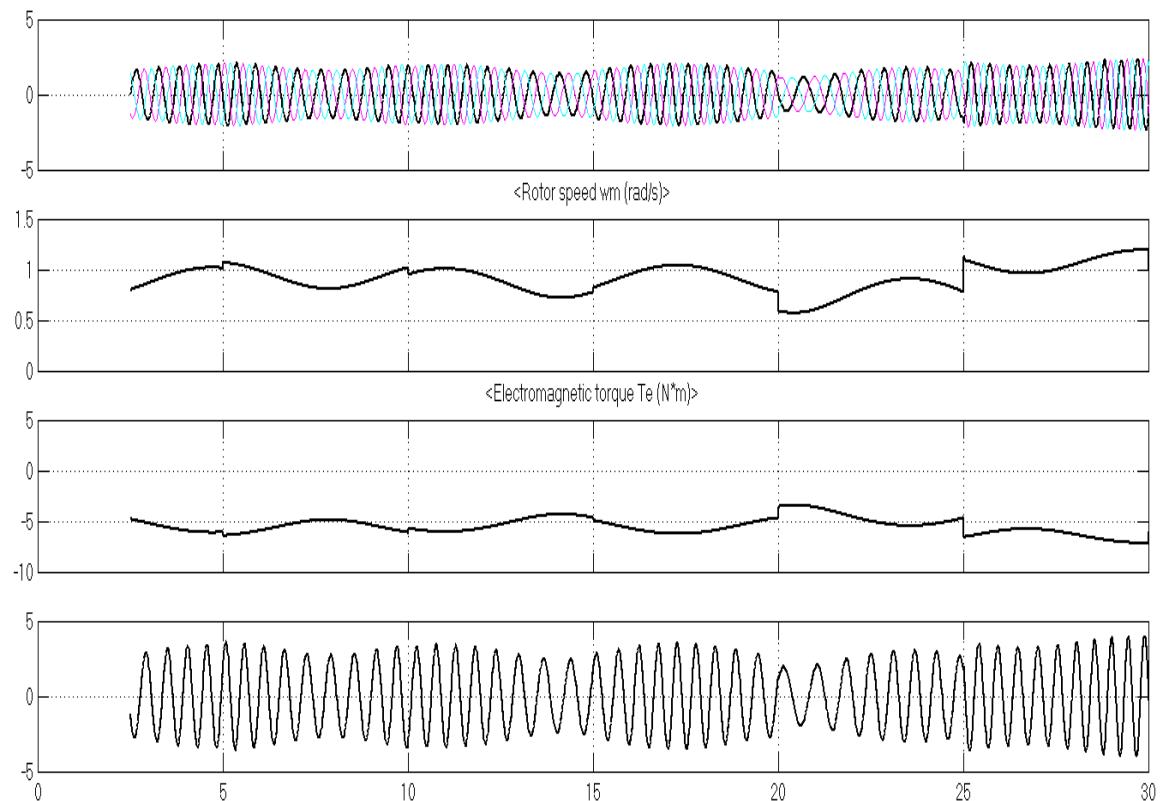


Рисунок 3.20 – Фрагмент графика зависимости мощности ветродвигателя от частоты его вращения и изменения скорости ветра

На рисунке 3.20 приведен результат моделирования работы ветродвигателя при соотношении сторон AR равной 2 и работе на нагрузку 5A.

- Верхний график показывает электрическую мощность генератора на постоянных магнитах.
- Второй график сверху показывает зависимости скорости вращения ротора ветродвигателя от скорости ветрового потока.
- Третий график сверху показывает оценку тока нагрузки с помощью осреднения мгновенных значений мощности ветродвигателя и скорости ветрового потока.
- Четвертый график сверху показывает оценку изменения качества выходного напряжения в зависимости от изменения скорости ветрового потока и скорости вращения ветродвигателя.

Анализируя полученные графики видно, что изменение скорости ветрового потока напрямую влияет на выходных параметров ветродвигателя и на качество поставляемой электроэнергии.

В настоящее время на практике для ВЭУ в качестве генераторов применяются синхронные электрогенераторы с электромагнитным возбуждением и синхронные генераторы на постоянных магнитах. Для тихоходных маломощных ветроустановок предпочтение дается синхронным генераторам на постоянных магнитах, т.к. электрическая схема упрощается за счет отсутствия системы возбуждений.

Пакет программы MATLAB/Simulink имеет блок синхронного генератора на постоянных магнитах, которое показано на рисунке 3.21.

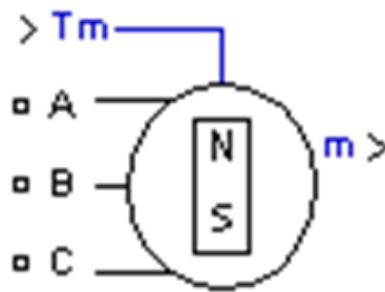


Рисунок 3.21. Блок синхронного генератора на постоянных магнитах в MATLAB/Simulink

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q}$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$$

### 3.6. Разработка стенда для испытания лопастей вертикально – осевой ветротурбины

Ветровая энергетическая установка с вертикальной осью вращения (ВЭУ ВО) карусельного типа является одним из многочисленных разновидностей известных и используемых в настоящее время ветроэнергетических установок. Для каждого конкретного типа конструкции необходимо с учетом его специфики определять характеристики в предусмотренных рабочих режимах для выполнения требований, предъявляемых к ним [66, 116, 117]. Однако на сегодняшний момент сложно найти методику, которую можно было применить в большинстве типов ВЭУ ВО. По этой причине возникает необходимость создания экспериментальной установки для исследования характеристик ВЭУ ВО карусельного типа. Определение соотношение сторон ветроколеса и угол установки лопастей направляющего аппарата необходимо для определение и оптимизации производительности ВЭУ ВО карусельного типа за счет повышение его чувствительности на низких значениях скоростей ветрового потока.

Существуют различные методы измерения момента ветроколеса, которое является частью типовых испытаний (определение КПД, механических характеристик) [75,118], которые отличаются друг от друга объемом получаемых показателей и степенью точности получаемых результатов [103].

Проведение натурных испытаний ВЭУ является трудоёмкой работой, требующей создания (или наличие) идеальных условий, близких к эксплуатационным. Организация таких испытаний естественно требуют больших капитальных и временных затрат.

В работе [119] проводится аналитическое исследование параметров ветроустановок с вертикальными полуцилиндрическими лопастями для

определения зависимости вращающего момента, мощности и КПД установки. Для адекватности полученных результатов авторами разработана экспериментально – демонстрационная установка. Порядок и условия проведения эксперимента не приводится и не описывается методика, по которой производится сравнение полученных результатов. Следует отметить, что предлагаемая методика расчета не может быть применена для ВЭУ ВО карусельного типа, так как не учитывается взаимовлияние направляющих лопаток на ветроколесо турбины.

В работе [120] изучается точность функционирования синтезированной структурной схемы ветроустановки и обоснование методики расчета решетчатых лопастей. При проектирование и проведение экспериментов определены критерия подобия: критерии Рейнольдса и Струхала.

Производители ВЭУ ВО карусельного типа редко публикуют материалы, где можно найти информацию о порядке выбора угла установки направляющих лопастей, а также учета их показателей в различные рабочие режимы.

В данной работе для исследования сил действующих на лопасти и передачи момента на валу, позволяющую повысить эффективность работы ветрогенератора, и выбор оптимальной конструкции разработано стенд для испытания вертикальных лопастей.

Основной задачей стенда заключается обеспечение возможности ее использования для исследования статических моментных характеристик лопастей вертикально-осевых ветроэнергетических установок.

Стенд обеспечивает требуемую точность определения статических моментных характеристик лопастей вертикально-осевых ветроэнергетических установок, учет влияния неподвижных направляющих лопастей, оптимальных параметров угла установки направляющих лопастей и лопастей ветроколеса [121].

Для оценки эффективности конструкции вертикально – осевой ВЭУ сила, действующая на ветроколесо, определяется по формуле:

$$M = \frac{\pi R^3}{2Z} \cdot V^2 \cdot C_P(V), \quad (3.14)$$

где:

$M$  – момент на валу;

$R$  – радиус ветроколеса;

$\rho$  – плотность воздуха;

$V$  – скорость потока воздуха;

$Z$  – быстроходность ветроколеса;

$C_P(V)$  – коэффициент использования энергии ветра.

Коэффициент  $C_P(V)$  зависит от формы тела лопасти (рис.3.22). Если лопасть неподвижна, то полезная мощность равна нулю. Если лопасть движется со скоростью равной скорости потока, то она не испытывает давления ветра и мощность тоже равна нулю. Скорость вращения ветроустановки с вертикальной осью меньше как следствие потери мощности, так как мощность равна произведению силы на скорость ( $N=F*V^3$ ).

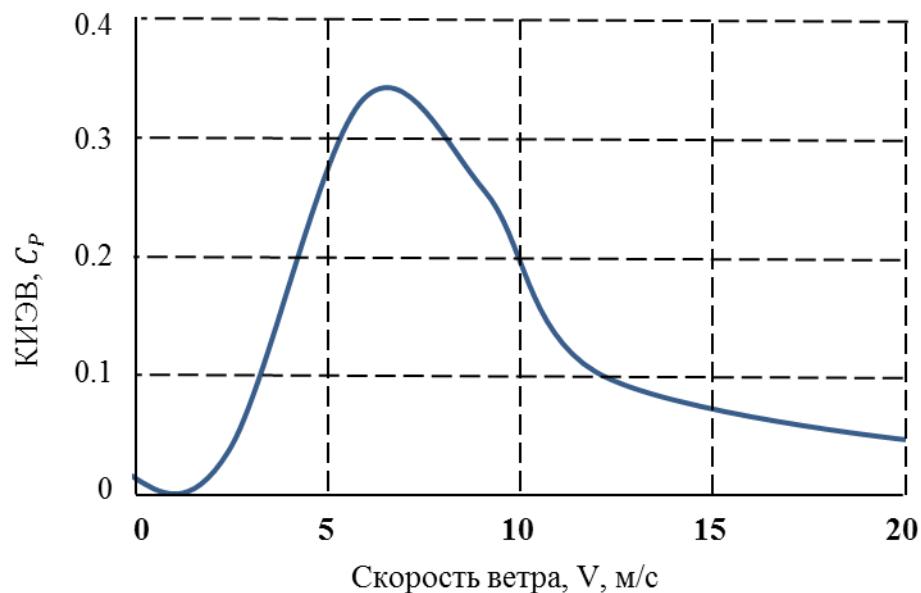


Рисунок 3.22 – Зависимость коэффициента использования энергии ветра от ветрового потока  $C_P(V)$

Характеристики ветротурбины зависят не только от диаметра ветроколеса (рис. 3.23), но и от формы лопастей. Чем лопасть шире, тем чувствительнее становится конструкция к слабому потоку. Но такая лопасть требует большей энергии на вращение вокруг своей оси, усиление механизма вращения. Узкая лопасть имеет лучшую аэродинамику, позволяет упростить механизм вращения вокруг своей оси, требует меньшей энергии на вращение. Узкие лопасти более эффективно используют подъемную силу ветра, что в совокупности, с вышесказанным приводит к увеличению (нарастанию) скорости вращения ветротурбины и как следствие к увеличению мощности.

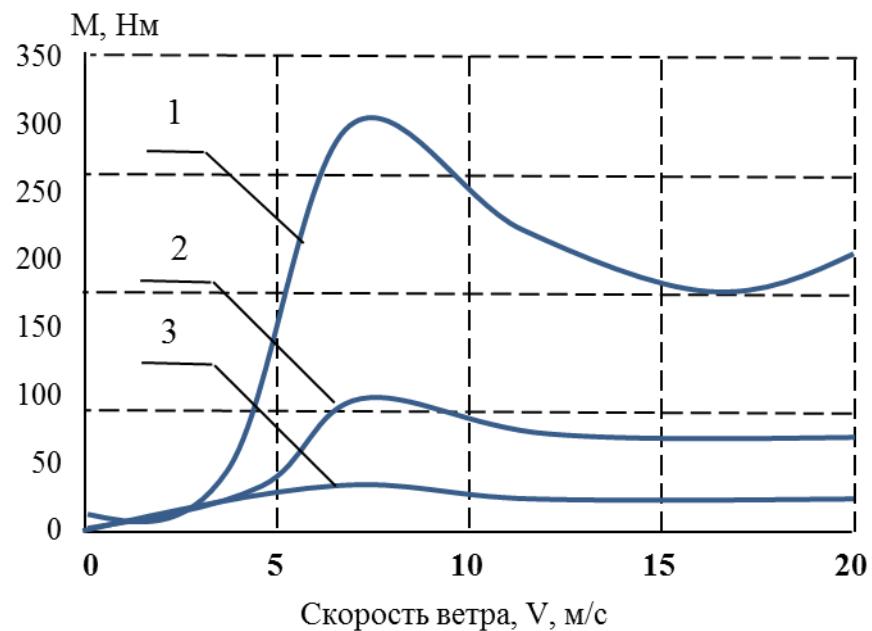


Рисунок 3.23. – Момент на валу ветроколеса в зависимости от скорости ветра:

1 – для диаметра ветроколеса 7 м; 2 – для диаметра ветроколеса 5 м; 3 – для диаметра ветроколеса 3 м.

Механических характеристик ветротурбин можно представить как функциональные зависимости выходной механической мощности  $P_m$  и момента  $M_m$  от скорости вращения ветроколеса  $n$  при различных скоростях ветрового потока  $V$ . Эти параметры позволяют проводить исследования ее

рабочих режимов в статике. Дополнив их уравнением движения ветроколеса, получаем полную динамическую модель ветротурбины, математическую запись которой можно представить в следующем виде:

$$P_m = f(V, n); \quad M_m = \frac{P_m}{\omega}; \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_g, \quad (3.15)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения ветроколеса;

$J$  – момент инерции ветродвигателя;

$M_{gen}$  – механический момент ветрогенератора.

Для исследования вертикально осевых ветротурбин на кафедре электроэнергетики и электротехники ДВФУ разработан и запатентован стенд по измерению момента вращения (Мвр) лопастей ветротурбины упрощённая схема которого приведена в рис. 3.24. Стенд состоит из платформы (1) на которой размещается исследуемая лопасть или конфигурация лопастей (3). Лопасти направляющего аппарата (4) при необходимости могут крепиться в специально предусмотренном месте на платформе. Платформы, где крепятся исследуемые лопасти, имеют возможность, дискретно изменить угол установки. Измерение значений происходит в следующем порядке: под действием ветрового потока создается вращающий момент лопасти (Мвр) относительно оси вращения (2), который действует на (растягивает или сжимает пружину). Динамометр (5) который снабжен измерительной линейкой (6) установленный в конце пружины фиксирует значения момента на валу.

Стенд позволяет моделировать и исследовать механических характеристик ветротурбины при заданных скоростях ветра и хорд исследуемых образцов лопастей. Естественно при моделировании и исследовании процессов взаимодействия лопастей с ветровым потоком в данном стенде учитываются критерии подобия, так как натурное испытание даёт возможность всестороннего изучения всех факторов взаимодействия.

Тем не менее для сокращения трудозатрат и финансовых средств применения стационарного метода исследования лопастей позволяет

подобрать наиболее эффективные типы лопастей для конкретных случаев и типоразмеров турбин.

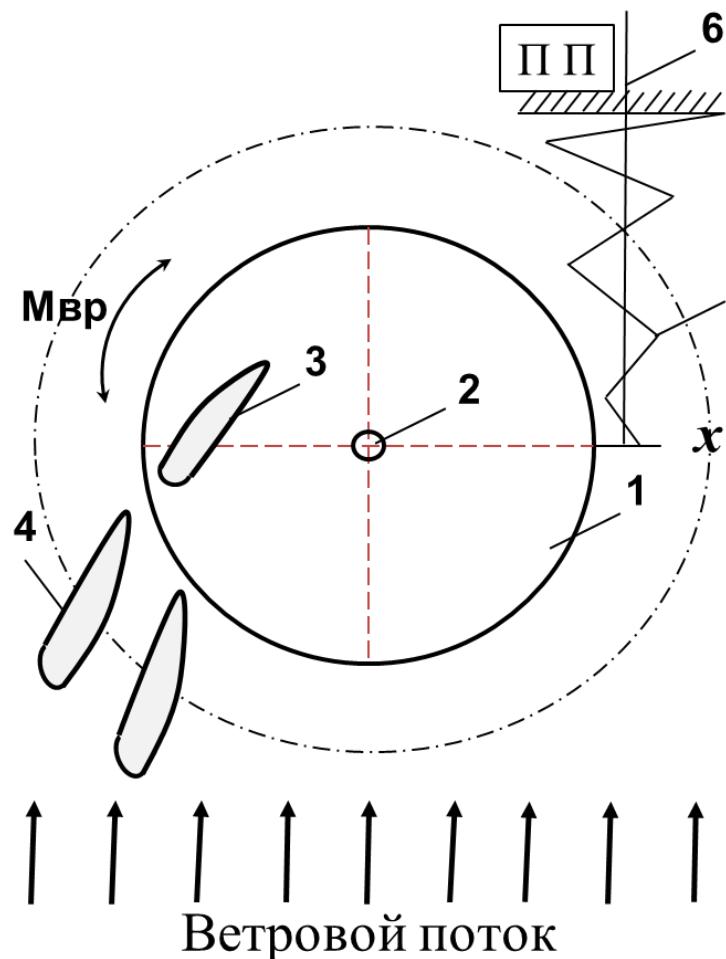


Рисунок 3.24. – Упрощённая схема экспериментального стенда для исследования основных характеристик и определению  $M_{вр}$  лопасти вертикально осевой ветротурбины вид сверху: 1 – платформа; 2 – ось вращения; 3 – исследуемая лопасть; 4 – лопасти направляющего аппарата; 5 – пружина динамометра; 6 – измеритель

В качестве примера было исследовано три образца лопастей с длинами хорд:  $c_1 = 6$  см;  $c_2 = 9$  см;  $c_3 = 11$  см. По полученным данным был определен момент на валу  $M$ , используя формулу (3.16).

$$M = F \cdot l, \quad (3.16)$$

где  $F$  – сила тяги ветра;

$l$  – плечо.

Расчеты и построения механических характеристик отражены в таблице 3.3 и рисунок 3.25 соответственно.

Таблица 3.3 - Значение механических характеристик лопастей с длинами хорд:  $M_1$  ( $c_1 = 6$  см);  $M_2$  ( $c_2 = 9$  см);  $M_3$  ( $c_3 = 11$  см).

Скорость ветра $V, \text{ м/с}$	Момент на валу, $H^*M$		
	$M_1$	$M_2$	$M_3$
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0,02254	0,0147	0,01323
4	0,03381	0,0294	0,02646
5	0,050715	0,0392	0,03969
6	0,06762	0,049	0,055125
7	0,107065	0,0833	0,0882
8	0,1324225	0,0882	0,11466
9	0,163415	0,1127	0,14994
10	0,1831375	0,1372	0,17199

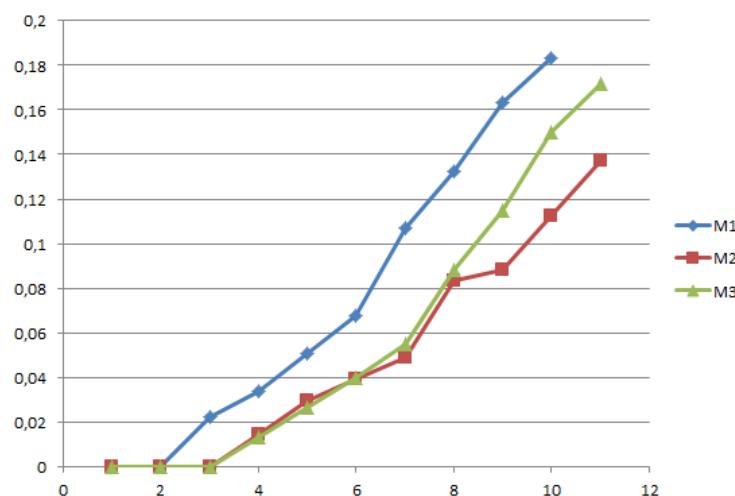


Рисунок 3.25. – Графики зависимости момента на валу  $M$  от ширины лопасти

Помимо моделирования момента на валу, используемый стенд также позволяет исследовать такие характеристики как мощность, развивающую ветроколесом  $P_K$  и его быстроходность  $Z$ .

$$P_K = \rho_B V^3 \frac{\pi R^2}{2} C_P, \quad (3.17)$$

где  $\rho_B$  – плотность воздуха при нормальных условиях;

$R$  – радиус ветроколеса;

$V$  – скорость ветра;

$C_P$  – коэффициент использования энергии ветра (для реальных ветродвигателей  $C_P = 0,1 – 0,5$ ).

$$Z = \frac{\omega R}{V}, \quad (3.18)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ветроколеса.

Таким образом, разработанный стенд позволяет проводить широкий спектр исследований по оптимизации конструктивных и геометрических особенностей моделируемых ветродвигателей, что выгодно отличает его от известных аналогов.

### **3.7. Экспериментальные исследования работы вертикально осевой ветроэнергетической установки карусельного типа**

Для подтверждения теоретических результатов была разработана и изготовлена ВЭУ многолопастного типа мощностью 3кВт. Мощность выбрана из соображений того, что в течение месяца ВЭУ может выработать электроэнергии в объеме 300-500 кВт\*час в месяц достаточной для обеспечения энергией семьи из четырёх человек.

#### **Описание разработанного ветроэнергетической установки карусельного типа.**

Чтобы проверить адекватность разработанной компьютерной модели, на базе действующего объекта было создано локальная электроэнергетическая система. Для этого была изготовлена ВЭУ карусельного типа диаметром ветроколеса – 2,4м, с электрогенератором на постоянных магнитах

мощностью 5 кВт, выходное напряжение 48 В при скорости вращения 180 об/мин.

Для исключения влияния близко расположенных препятствий на величину однородности воздушного потока ВЭУ установлено на крыше «подсобного помещения» (рис.3.26, а). Высота от крыши до оси ВЭУ составляет 2 метра, а общая высота от поверхности земли составляет 7 м. Также установлены десять фотоэлектрических панелей (ФЭП) общей мощностью 2,5кВт ориентированные на Юг под углом 43 градуса.

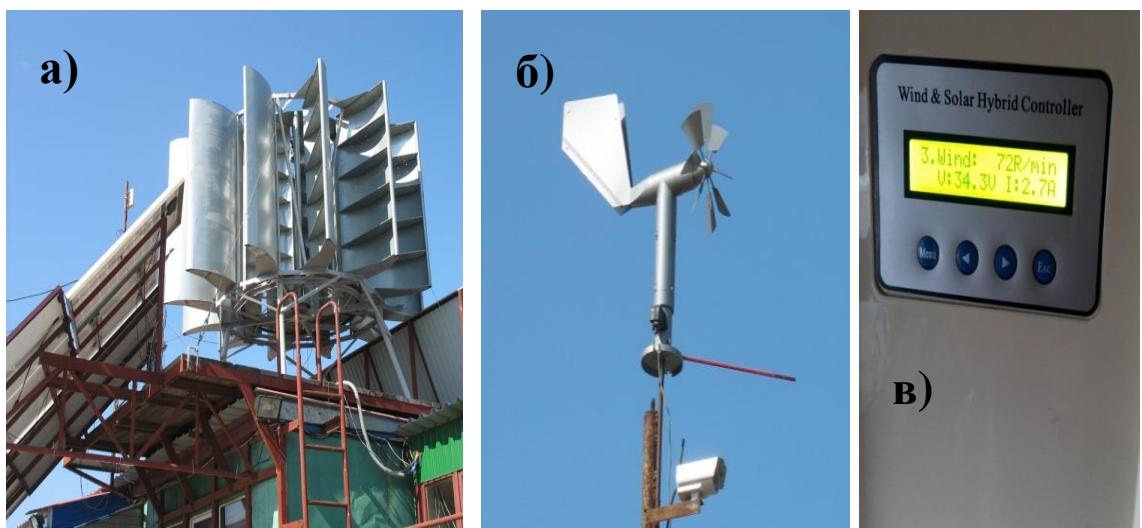


Рисунок 3.26. ВЭУ многолопастного типа установленный на крыше подсобного помещения автостоянки г. Владивосток:

а – общий вид расположения; б - датчик скорости и направления ветра М-127 с устройством согласования УСТ 0-5 «Гидрометприбор»; в – гибридный контроллер

Для снятия метеоданных на экспериментальном участке организовано постоянное наблюдение и установлены измерительные датчики. С целью получения статистических данных о скорости и направления ветрового потока на участке установлено анеморумбометр типа М – 127 входящих в госреестр измерительных приборов для регистрации метеоданных рис. 3.26,б. Кроме регистрации величин направления и скорости ветра также ведется постоянное наблюдение, накопление и передача данных об

изменениях температуры и солнечного радиации. Для обеспечения круглогодичной регистрации данных, а также снижение влияния внешних факторов основное оборудование системы накопления и передачи данных размещено в специальном «термоизолирующем» шкафе. Содержимое шкафа с обозначениями размещенных в нем компонентов системы представлены на рис. 3.27.



Рисунок 3.27. Компоненты системы управления, регистрации и передачи данных: 1 – электронный регистратор данных, 2 и 3 – контроллеры заряда АКБ ФЭМ, 4 и 5 – АКБ, 6 – измерительная плата, 7 – предохранительные автоматы, 8 - сетевой коммутатор, 9 – роутер с поддержкой 3ГЕН. модема, 10 – устройство согласования сигнала датчика ветра, 11 – блок бесперебойного питания, 12 - сетевой диск; 13 – 3ГЕН. модем; 14 – блок питания устройства согласование сигнала датчика ветра.

Для обеспечения удаленного доступа к системе сбора данных и передачи накопленной информации на централизованный сервер осуществлено подключение системы к сети Internet, через web-сервер с ограниченным количеством пользователей (вход по логину/паролю).

Упрощенная схема проведения измерения и подключения основных компонентов электротехнического комплекса представлена на рисунке 3.28.

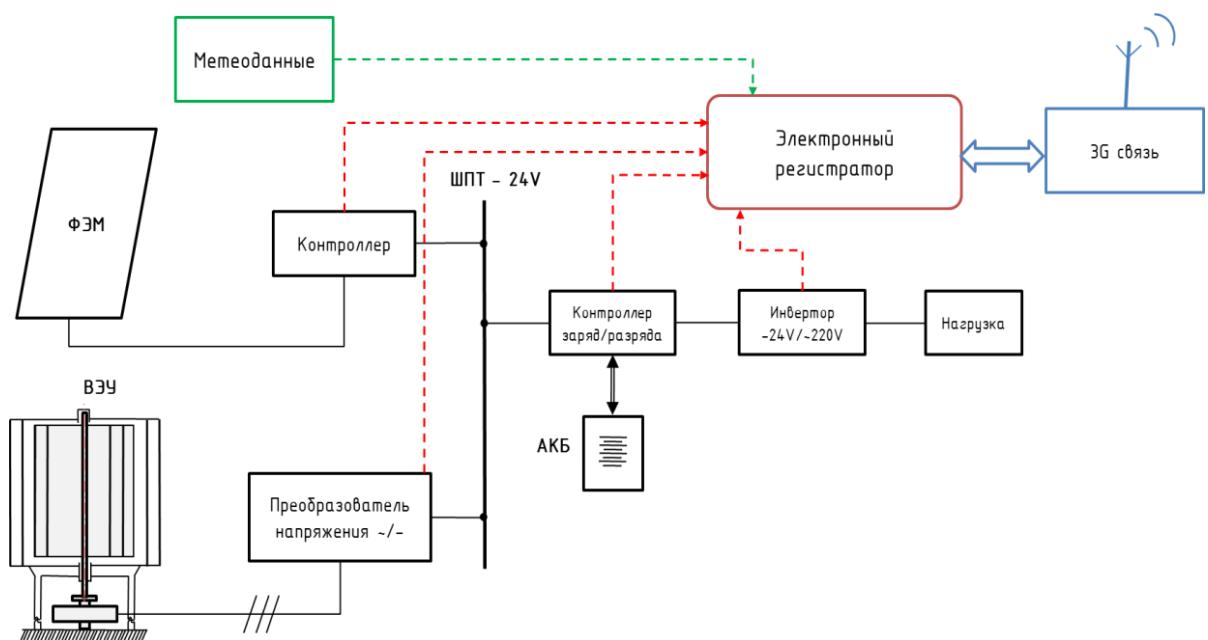


Рисунок 3.28. Упрощенная схема проведения измерения и подключения основных компонентов электротехнического комплекса

Черным цветом обозначены силовые компоненты, красным – компоненты системы регистрации данных, синим – коммуникационной системы, зеленым – системы регистрации метеоданных. Также в системе используются датчики температуры (на рисунке не показаны) для регистрации температуры задних поверхностей ФЭМ и окружающей среды.

Сбор статистических данных было проведено с декабря 2015 года по июня 2018 года.

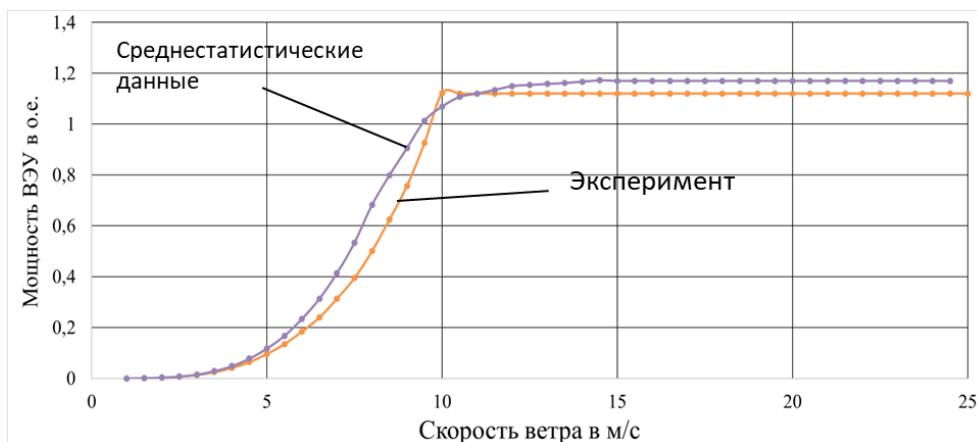


Таблица 3.4 - Характеристики разработанного ВО ВЭУ карусельного типа 5 кВт

<b>1</b>	Мощность генератора номинальная	5 кВт	<b>17</b>	Высота ротора	2,5 м
<b>2</b>	Скорость ветра номинальная	10,4 м/с	<b>18</b>	Высота башни от уровня наземной площадки	7 м
<b>3</b>	Ориентация на направление ветра	Не требуется	<b>19</b>	Шум, дБ (макс. уровень звука на макс. скорости)	0 дБ на расст. 15 м
<b>4</b>	Стартовая скорость ветра	2,5 м/сек	<b>20</b>	Инфразвук, дБ (уровень звукового давления в октавных полосах)	не зафикс.
<b>5</b>	Диапазон рабочих скоростей ветра	3.. .50 м/сек	<b>21</b>	Ультразвук, дБ	не зафикс.
<b>6</b>	КПД	38%	<b>22</b>	Электромагнитное излучение: - магнитная индукция 50Гц, мкТл - электрическое поле, кВ/м	не измерялось не измерялось
<b>7</b>	Выходное напряжение ВЭУ	48 В пер. тока	<b>23</b>	Диапазон рабочих температур воздуха	-40. . . +40 0С
<b>8</b>	Выходное напряжение инвертора (чистая синусоида)	220 В	<b>24</b>	Срок эксп. ВЭУ без капитального ремонта	*25 лет
<b>9</b>	Номинальная частота инвертора	50 Гц	<b>25</b>	Период между техническим обслуживанием	1 год
<b>10</b>	Диапазон частоты вращения	40-200 об/мин	<b>26</b>	1. Масса модуля, в том числе:	395 кг
<b>11</b>	Номинальная частота вращения	60 об/мин	<b>27</b>	1.1. Ротор	150 кг
<b>12</b>	Количество лопастей ротора	12	<b>28</b>	1.2. Статор	150 кг
<b>13</b>	Количество лопастей статора	12	<b>29</b>	1.3. Лопасти	70 кг
<b>14</b>	Хорда лопасти (длина по горизонтальному разрезу)	400 мм	<b>30</b>	1.4. Генератор	85 кг
<b>15</b>	Диаметр ротора (колеса)	2.4 м	<b>31</b>	1.5. Механический тормоз	10 кг
<b>16</b>	Диаметр статора (ограждающие лопасти)	4 м			

\* при условий того, что лопасти изготовлены из композитного материала

Анализ полученных данных в ходе эксперимента позволили получить зависимости выходного мощности ВО ВЭУ карусельного типа от изменения скорости ветра при изменении мощности нагрузки  $P_{load}$ . В качестве нагрузки (постоянно заданного)  $P_{const}$  использовались аккумуляторы свинцово – кислотные (необслуживаемые) общей емкостью 450 А.час, а в качестве вариативной части  $P_{var}$  – использовалася система освещения объекта мощностью 2 кВт. Для системы освещения объекта предусмотрено возможность переключения на резервную источник питания через АВР (срабатывание происходит при получении соответствующего сигнала) см. на рисунке 3.29.



Рисунок - 3.29. Схема переключения на резервную источник питания через АВР: слева – показано АКБ и контроллеры ВЭУ и ФЭП; справа – АВР

Получение зависимости в ходе экспериментального исследования приведены на рисунке 3.30, которых можно сравнивать с осциллограммами полученных в ходе имитационного компьютерного моделирования (см. рис. 3.30).

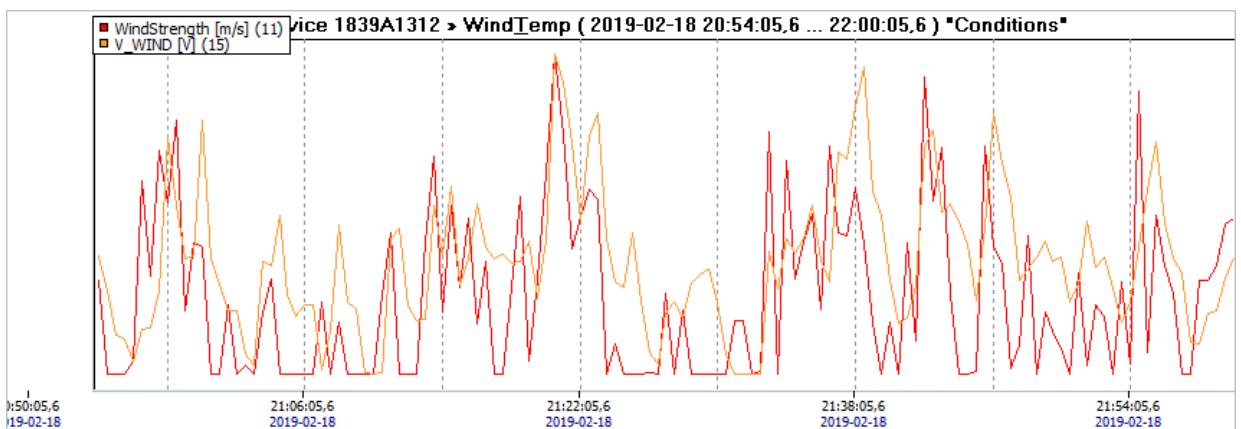


Рисунок 3.30. Осциллограмма зависимости выходного мощности ВО ВЭУ карусельного типа от изменения скорости ветра при изменении мощности нагрузки  $P_{load}$

Полученные зависимости развиваемой мощности ВО ВЭУ карусельного типа при различных значениях  $P_{load}$  изображены на рисунке 3.31. При сравнении полученных результатов имитационного компьютерного моделирования с экспериментальными данными их сходимость составила 92%.

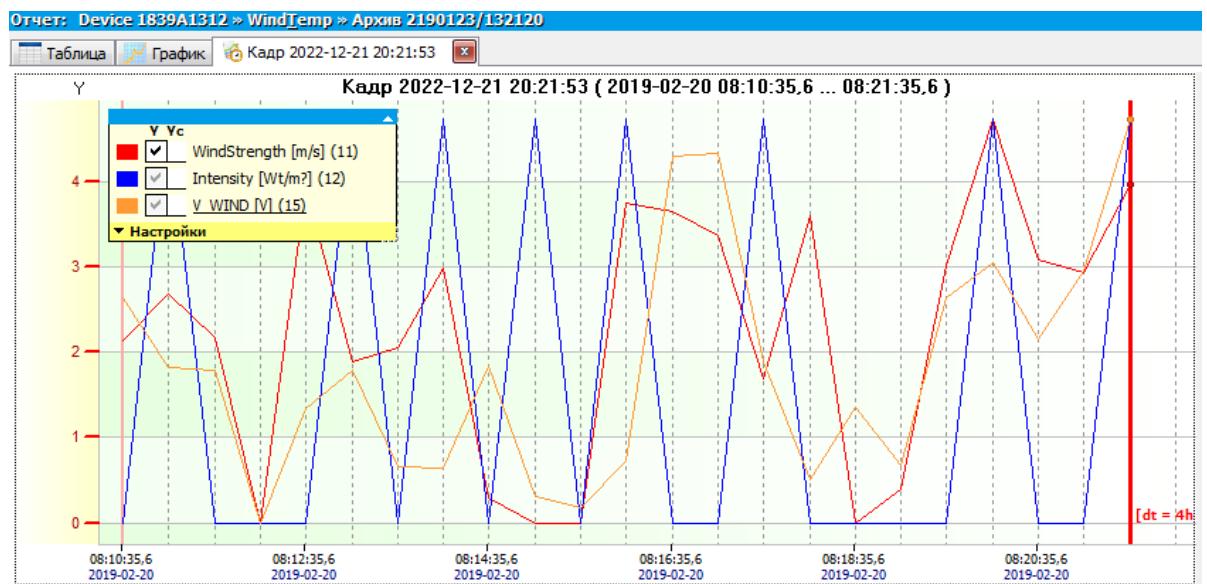


Рисунок - 3.32. Выходные энергетические характеристики ВЭУ в о.е. с учетом вариации мощности  $P_{load}$

## Выводы по третьей главе

1. Одними из наиболее эффективных конструкций ветровых установок являются ветроэнергетические генераторы карусельного типа, обладающие такими преимуществами, как простота конструкции, монтажа, эксплуатации, возможность компоновки нескольких ярусов друг над другом, что не требует выделения новых участков, устойчивость к порывам ветра и возможность адаптации к зданиям и сооружениям.

2. Разработанная и запатентованная автором двухъярусная конструкция ветровой установки многолопастного типа позволяет улучшить качественные характеристики ветроустановки, такие как устойчивость работы конструкции при работе в условиях турбулентности, обеспечение плавности хода, устойчивость при воздействии центробежной силы, снижение неравномерности преобразования потока. Кроме того, возрастают значения таких показателей, как:

- стартовый момент – на 5 %,
- коэффициент использования ветра – на 2 %,
- снижение затрат на обслуживание – на 15%.
- уменьшить длину лопастей – на 8 %.

3. Исследования с помощью моделирования показали, что выбор соотношения сторон ветротурбины с вертикальной осью для максимального увеличения коэффициента мощности целесообразно выполнять путем анализа факторов, влияющих на число Рейнольдса, добиваясь увеличения его значения. Первостепенное значение при этом имеет соотношение высоты лопасти и радиуса ротора (коэффициент AR).

4. Основными преимуществами турбин с низким коэффициентом AR (порядка 0,4), являются следующие: высокой коэффициент мощности, устойчивость конструкции за счет более толстых лопастей (низкой высоты и большой хорды), большая стабильность в работе, обеспечиваемая за счет большого момента инерции ротора турбины.

## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ МГЭС И ВЭУ

### 4.1. Оценка возможности создания локальных электроэнергетических систем на базе ветроустановок в городской среде

В последнее время различными производителями ВЭУ и исследовательскими коллективами предлагается внедрение ветровых установок в городскую среду. Результаты исследования показывает, что в большинстве крупных городов нехватка мощности в часы пика нагрузки влияют на качество электроснабжения и электрической энергии. Одновременно анализ показывает, что специфика городского ландшафта позволяет выявить места для установки турбин с точки зрения её наиболее эффективной эксплуатации.

Первом делом необходимо исследование движение воздушных масс в городской среде. С этой целью подстилающая поверхность по «шероховатости» можно разделить на макро (до 200 м.), мезо – (до 25 м) и микроуровней (до 3 м) [122, 124]. Под шероховатостью понимается оказание влияния поверхности земли на движение воздуха. В городской среде влияние оказывают высокоэтажная, средне этажная и малоэтажная застройки, а также элементы благоустройства и озеленения.

В качестве исходных данных при оценки ветроэнергетического потенциала рассматриваются как слагающие городского микроклимата такие как градация подстилающей поверхности по шероховатости в нижнем приземном ярусе воздушных масс, которые соответствуют основным уровням аэрационного режима.

Важным показателем макрометеорологических изменений скорости ветра является его среднее значение  $\bar{V}$ , определяемое по формуле

$$\bar{V} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (|V_{(i)}|) \quad (4.1)$$

где  $N_s$  - количество измерений скорости ветра,  $V_{(i)}$  – измеренное значение скорости ветра.

Значительное влияние, оказываемое на производительность турбины является турбулентность ветрового потока, интенсивность ( $TI$ ) определяемое как

$$TI = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}, \quad (4.2)$$

где  $\bar{V}$  – среднее значение скорости ветра,  $\sigma_v$  - стандартное отклонение ветра в горизонтальной плоскости, определяемое выражением

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N_{s-1}} \sum_{i=1}^{N_s} (|V_{(i)}| - \bar{V})^2} \quad (4.3)$$

Турбулентность обусловлена двумя взаимосвязанными процессами, которые обуславливают появление двух составляющих свободной и принудительной, которые зависят от взаимного расположения зданий, определяемого понятием морфология городской застройки.

Сдвиг ветрового потока с препятствием можно представить в виде логарифмического профиля ветра вблизи поверхности земли (см. рис. 4.1),

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_o} \right), \quad (4.4)$$

где  $u$  - скорость ветра,  $z$  - высота и  $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$  - величина, называемая скоростью трения, полученной из турбулентного возмущения  $\tau$  и плотности воздуха  $\rho$ , так как  $\tau$  приблизительно постоянна в инерциальном подслое,  $\kappa \approx 0,4$  постоянная В. Кармана,  $z_o$  - длина шероховатости,  $d$  - высота смещения.

Из формулы (4.4) следует, что изменение высоты смещения  $d$  меняет эффективное начало, т.е. высоту от которого измеряется перемещение профиля ветра (вверх или вниз), тогда как изменение значения  $z_o$  приводит к изменению значения скорости ветра на одну и ту же величину на всех высотах. Если известна средняя высота препятствий  $h$ , то можно  $z_o$  и  $d$

определить аналитическим путем, или выбрать средних значений приведенных в табл.4.1.

$$z_o = 0,1h; d = 2h/3$$

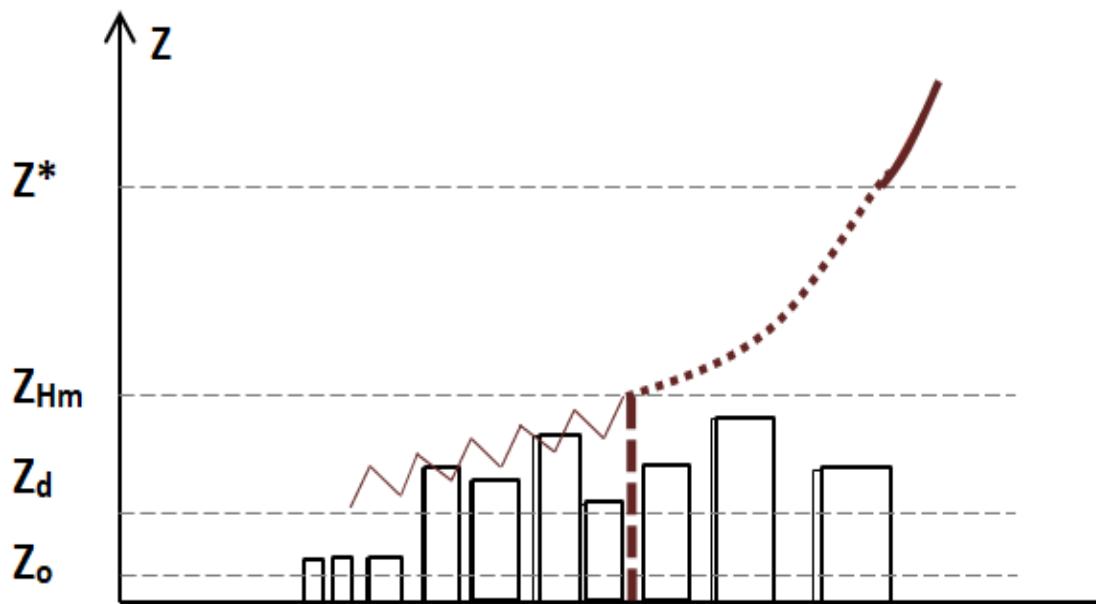


Рисунок – 4.1 Модель логарифмического профиля городской среды в зависимости от шероховатости: в пределах шероховатости подслоя ( $z^* < z < z_{Hm}$ ) в ветре преобладают турбулентные вихри.

Количественную оценку влияния уплотнения элементов шероховатости на режимы потока можно произвести различными параметрами, например, такими как сумма всех площадей  $\lambda_p$ , охватываемых зданиями городской территории и суммой фронтальных площадей  $\lambda_f$  всех зданий нормальных к ветру [125].

$$\lambda_p = A_p / A_T$$

$$\lambda_f = A_F / A_T$$

где  $A_p$  – площадь занимаемой одним зданием,  $\text{м}^2$ ;  $A_F$  – фронтальная площадь зданий нормальной к ветру,  $\text{м}^2$ ;  $A_T$  – общая площадь выбранного участка городской территории для оценки ветропотенциала,  $\text{м}^2$ .

Заметим, что  $\lambda_f$  зависит от направления ветра и  $\lambda_p < 1$ .

Иллюстрация этих параметров, где объясняется их смысл приведен на рис. 4.2, представленной как простая квадратная матрица одинаковых элементов шероховатости кубической формы.

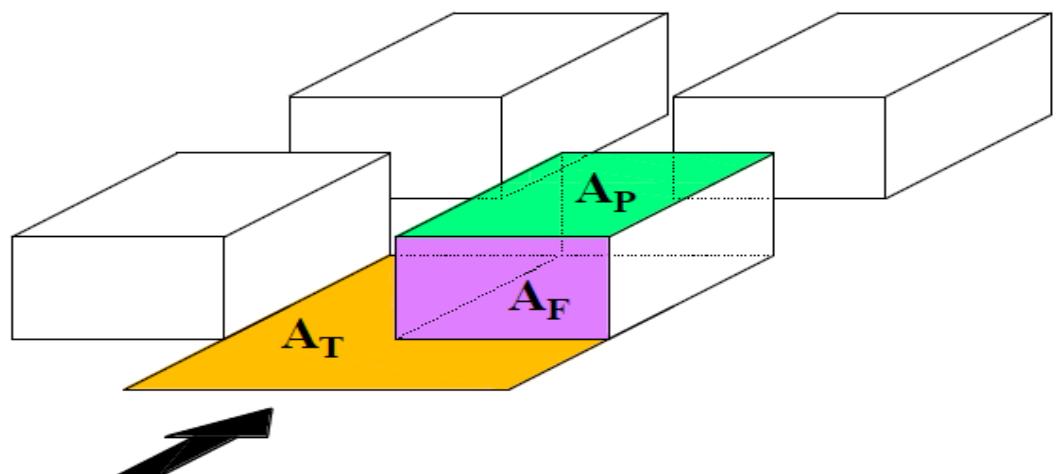


Рисунок – 4.2 Иллюстрация областей, учитывающие при расчете плотность площади

С учетом данной простой геометрии поверхности можно сделать вывод, что при значениях  $\lambda_p$ , приближающихся к единице, площадь поверхности элементов напоминает плоскую поверхность, которая является истинной поверхностью, поднятой на высоту  $h$ . то есть,  $d/h \approx 1$ , при  $\lambda_p \approx 1$ . Аналогичным образом, в определенных пределах увеличение сопротивления от более высоких зданий может переходить в возрастание  $z_0$  с увеличением  $\lambda_f$ .

Исходя из предположения, что существует логарифмический профиль ветра для  $z \geq h$ , можно получить аналитические формулы для зависимостей  $d/h$  и  $z_0/h$  от параметров  $\lambda_p$  и  $\lambda_f$  для площади поверхности элементов, состоящей из кубоидов [121, 122]:

$$d/h = 1 - \frac{1 - \exp(-\sqrt{15\lambda_f})}{\sqrt{15\lambda_f}}$$

$$z_o/h = \left(1 - d/h\right) \exp \left[ -\frac{\kappa}{\min(\sqrt{0.003+0.3\lambda_f}, 0.3)} + 0.193 \right] \quad (4.5)$$

По результатам вычисления (4.5) можно построить зависимость рассматриваемых значений примеры которых приведены [126].

При плотности элементов шероховатости  $\lambda_P \approx 0,1$ , элементы шероховатости изолированы в том смысле, что каждый из них находится за пределами основной зоны бокового воздействия по ветру. При  $(0,1 < \lambda_P < 0,4)$  наблюдаются взаимодействующие потоки, а при наивысших плотностях ( $\lambda_P > 0,4$ ) происходит образование пенообразных-потоков, а эффективное начало профиля ветра смещается вверх до верхней части площади поверхности элементов. Эти режимы наглядно проиллюстрированы на рис. 4.3.

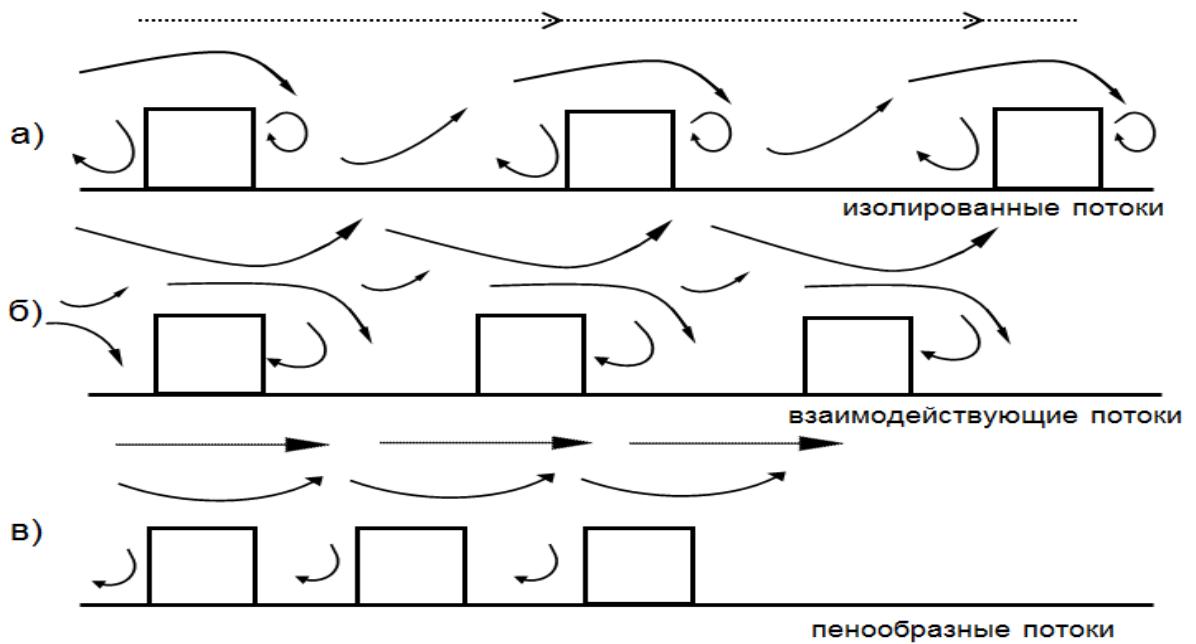


Рисунок – 4.4 Режимы потока для различных плотностей элементов шероховатости: (а) изолированные, (б) взаимодействующие, (в) пенообразные.

По результатам исследования повторяемость скорости ветра наблюдается в диапазоне от 2 до 4 м/с на низких уровнях (мезо - и микроуровень) с достаточной турбулентностью [127,128]. Показано, что

усиление ветра наблюдается в центре прохода между зданиями на уровне 2 метра от земли. В зависимости от формы зданий с повышением высоты коэффициент усиления увеличивается в квадратных формах зданий до 25 – 30% а в круглых формах зданий до 40%. Максимальное усиление согласно [129] наблюдается в середине зданий любой формы, тогда как на верхней части зданий, имеющих круглую форму, усиление ветра не наблюдалось. Данные четко показывают, что потенциал ветра между проходами здания можно использовать с помощью небольших ветровых турбин для производства энергии.

С целью оценки ветрового потенциала в условиях городской среды в качестве примера будем рассматривать участок города Худжанд.

Выбранный участок имеющее длину, и ширину 480/455 м соответственно, где расположены 27 зданий, различной формы высоты (максимальная высота 12,5м.). Здания расположены параллельно друг другу с различной шириной проходов. Здания, расположенные на периферии участка имеют преимущество для усиления ветра, так как ветер непосредственно проникает в проходы в невозмущённое состояние. Для определения характеристик роза ветров, используем метеорологические данные, находящиеся в свободном доступе, которые измерены на метеорологических станциях на стандартной высоте 10 - 15м. (см. рис. 4.5) [130]. Из рисунка 4.4 и данные приведенных в табл. 4.2 видно, что распределение скорости ветра имеет большое значение по восточной, западной и юго - западной сторонами участка.

Таблица 4.2 - Усредненные значения направления ветра в городе  
Худжанд

<b>С</b>	<b>С-В</b>	<b>В</b>	<b>Ю-В</b>	<b>Ю</b>	<b>Ю-З</b>	<b>З</b>	<b>С-З</b>
1,50%	5,60%	53,70%	2%	0,40%	11,20%	25,20%	0,40%

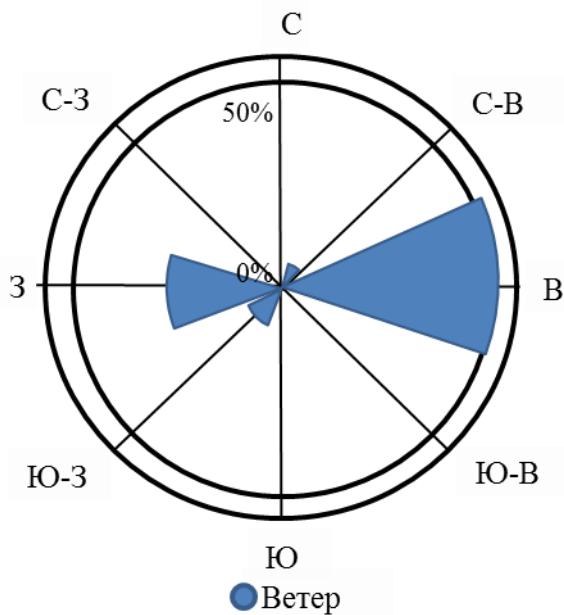


Рисунок – 4.4 Розы ветров в г. Худжанд за 2020 год [125].

Чтобы наблюдать усиление скорости ветра в проходах, измерения проводились одновременно внутри прохода и свободного поля. Измерение скорости ветра произведен на высоте 2 м и на центральной линии прохода, с помощью переносного анемометра ГЕН.М816 с диапазоном измерения от 0 – 30 м/с. Измерения проводились в течении трёх часов, а затем вычислялась средняя скорость ветра, так как ветер имеет прерывистый характер. Вне прохода скорость ветра для участка была взята из данных метеорологической станции местоположения за те же 3 часа, а затем с использованием формулы сдвига ветра, она была рассчитана на высоте 2 м.

$$v = v_{\text{эталон}} \frac{\ln(z/z_0)}{(z_{\text{эталон}}/z_0)}, \quad (4.6)$$

где  $v$  – скорость ветра на высоте  $z$  над уровнем земли;  $v_{\text{эталон}}$  – эталонная скорость, т. е. скорость ветра известное на высоте  $Z_{\text{эталон}}$ ;  $\ln (...)$  – функция натурального логарифма;  $Z_{\text{эталон}} = 10$  м – высота над землей, при которой измеряется текущая скорость ветра на метеорологической станции;  $z$  – высота над уровнем земли равной 2 м, а  $z_0$  – длина шероховатости в текущем направлении ветра.

Отметим, что на выбор участка для размещения ветровых установок, также влияет ландшафт местности, тип и высота зданий, расположение

разно этажных зданий относительно друг друга, протяженность зданий, покрытие стен и др.

Выбор участка в основном производиться с условием избегание зон ветровой тени (рис. 4.5 а). В зависимости от высоты  $H$  и протяженности  $L$  зданий при направлении ветра под углом 90 градусов к фасаду как видно на рисунке 4.5 наблюдается образование зон ветровой тени в противоположной стороне зданий (см. рис.4.5).

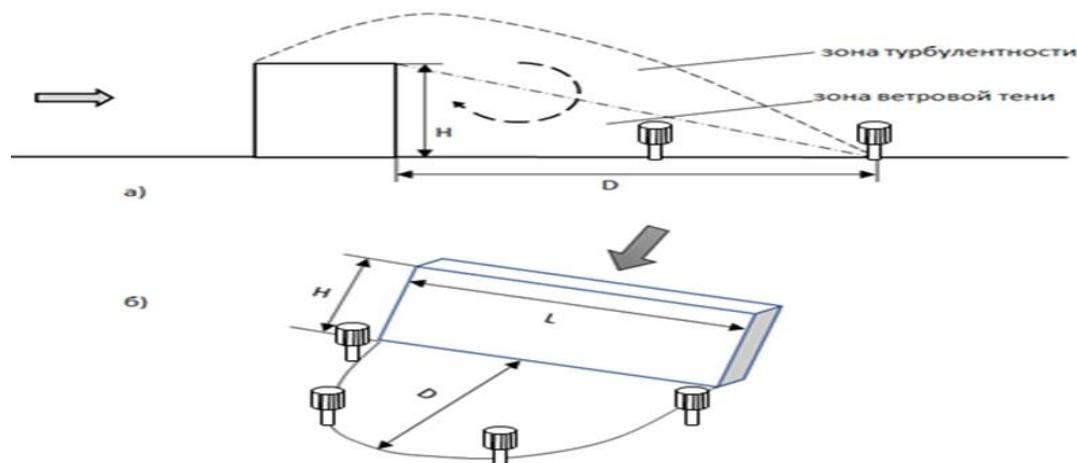


Рисунок – 4.5 Иллюстрация зоны ветровой тени и размещение ветроустановок

В зависимости от направления скорости ветра определяются зоны ветровой тени, потом методом наложения определяются места, где при любом направлении ветра участок имеет наименьшую скорость ветра относительно других (см. рис. 4.6 и рис. 4.7).

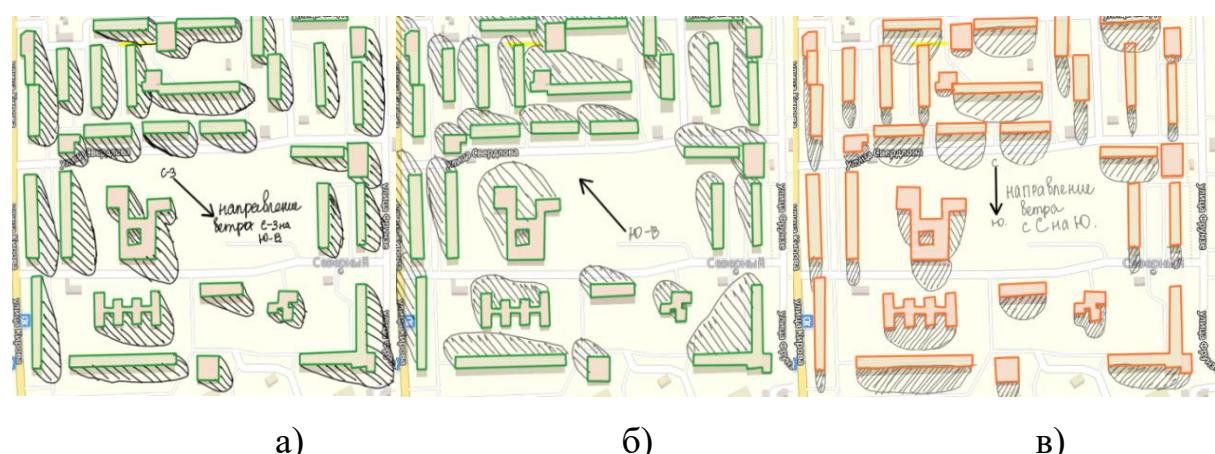


Рисунок –4.6 План участка города Худжанда с указанием направления ветра и зон ветровой тени

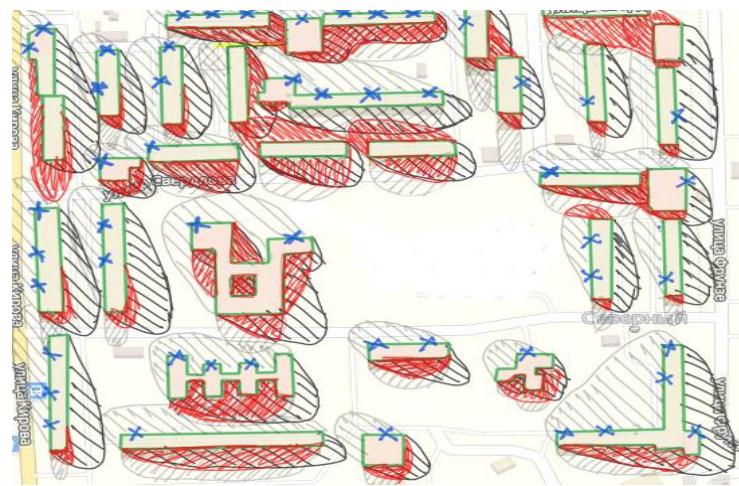


Рисунок – 4.7 Звёздочкой выделены места, где можно установить ветроэнергетическую установку. Красным цветом показаны зоны ветровой тени, где устанавливать ветроэнергетическую установку нецелесообразно.

Наиболее ветренные месяцы в городе Худжанта являются январь, февраль и ноябрь (см. рис.4.8).

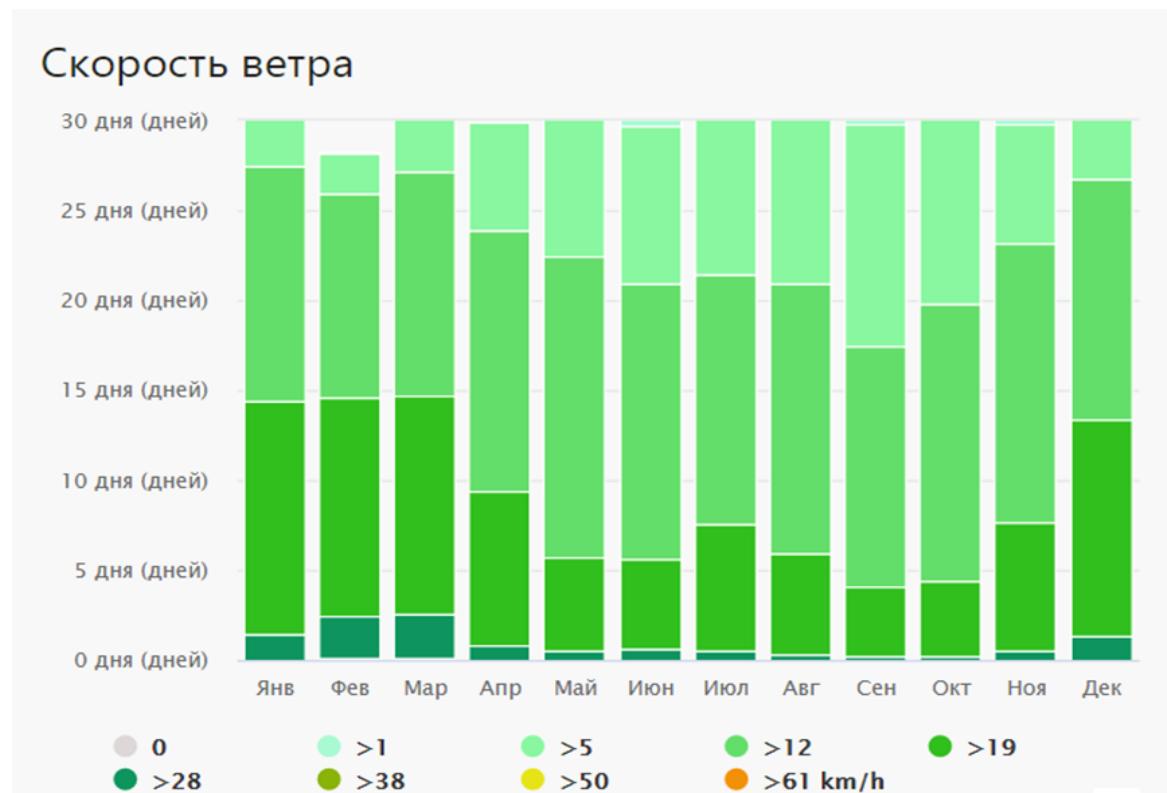


Рисунок 4.8. Повторяность ветра помесяцам в г. Худжанде

## 4.2. Оценка надежности локальной электроэнергетической системы на базе МГЭС и ВЭУ

Локальные электроэнергетические системы электроснабжения потребителей характерны для горных районов Республики Таджикистан. Это системы энергоснабжения труднодоступных горных районов и отдельных населенных пунктов, а также небольшое количество маломощных объектов различных отраслей народного хозяйства, не имеющие связи с централизованной энергосистемой. Для таких локальных систем возникает необходимость по обеспечению надежности энергоснабжения потребителей. Если применяется в качестве генерирующего источника дизельный электрогенератор (ДЭС) то вопрос надежности может быть снят с рассмотрения т.к. практика эксплуатации показывает их эффективность. Однако, в удаленных горных районах возникает проблема с поставкой топлива, и её нехватка или задержка может влиять на надежность электроснабжения потребителей. Отметим, что в горных районах Республики Таджикистан характерны эксплуатация МГЭС, которые зависимы от наличия воды.

Для осуществления электроснабжения удаленных объектов от локальных электроэнергетических систем, автономный источник электропитания должен иметь коэффициент готовности не ниже 0,99. Для сравнения комплексных показателей надежности и коэффициентов готовности различных локальных электроэнергетических систем, рассмотрим два варианта структурных схем электроснабжения потребителей рис. 4.9:

- от двух автономных МГЭС;
- от двух автономных МГЭС и ВЭУ.

Коэффициент готовности  $K_{t,g}$  определяется согласно выражения:

$$K_{t,g} = T / (T + \tau), \quad (4.7)$$

где  $\tau$  — среднее время восстановления структуры, ч;  $T$  — среднее время безотказной работы (ч):

$$T = \frac{1}{\omega}, \quad (4.8)$$

(где  $\omega$  — частота отказов структуры, ч<sup>-1</sup>;

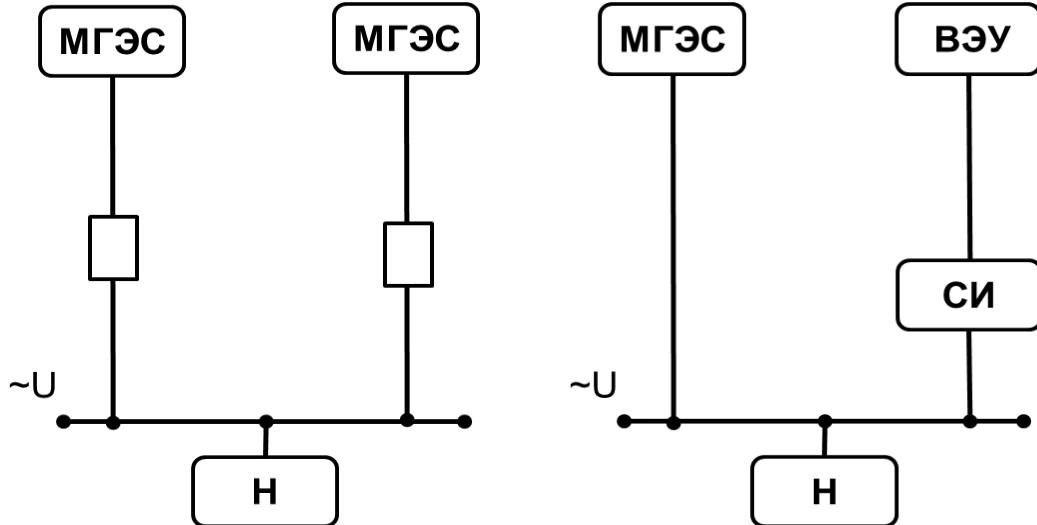


Рисунок 4.10 – Структурные схемы локальных электроэнергетических систем: а – от двух автономных МГЭС; б – от двух автономных МГЭС и ВЭУ.

В общем случае, если система состоит из  $n$  параллельно соединенных элементов, частота отказов структуры может быть определена по формуле [60]:

$$\omega_c^n = \omega^0 + \sum_{i=1}^n \omega^{(i)}, \quad (4.9)$$

$$\omega^{(0)} = (\prod_{i=1}^n \omega_i \tau_i) (\sum_{i=1}^n \tau_i^{-1}) 8760^{(i-n)}, \quad (4.10)$$

$$\omega^{(i)} = v_i \eta_i \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \omega_j \tau_j \right) \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \tau_j^{-1} \right) 8760^{(i-n)}, \quad (4.11)$$

$v$  — частота преднамеренных отключений, ч

$$\tau_c^{(n)} = \left( \omega_c^{(n)} \right)^{-1} (\omega^0 \tau^0 + \sum_{i=1}^n \omega^{(i)} \tau^{(i)}), \quad (4.12)$$

$$\tau^0 = (\sum_{i=1}^n \tau_i^{-1})^{-1}, \quad (4.13)$$

$$\tau^{(i)} = \left( \eta_j^{-1} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \tau_j^{-1} \right), \quad (4.14)$$

где  $i = 1,2,\dots, n$ ;  $j = 1,2,\dots, n$ ;  $\eta$  — длительность технического обслуживания, ч.

Для удобства все параметры исходных данных и результаты расчетов согласно формулам (4.7) - (4.14) сведем в табличной форме (см. табл. 4.3.)

Таблица 4.3 - Показатели надежности локальной

электроэнергетической системы

Параметры	МГЭС	ВЭУ	ЛЭС с двумя МГЭС	ЛЭС с одной МГЭС и ВЭУ
Среднее время безотказной работы $T$ , ч.	3334	2000	1923	3704
Среднее время восстановления $\tau$ , ч.	100	105,3	54	48
Частота отказов $\omega$ , $\text{ч}^{-1}$	0,0003	0,0005	0,00052	0,00027
Частота преднамеренных отключений $v$ , $\text{ч}^{-1}$	0,004	0,00011	-	-
Время технического обслуживания $\eta$ , ч	4	24	-	-
Минимальный коэф. совпадения графика нагрузки и графика выработки эл. эн. ВЭУ $K_{gr,n}$	-	0,5	-	-
Коэффициент готовности	0,97	0,95	0,972	0,987

Анализ полученных данных показывает, что при коэффициенте совпадения графиков нагрузки и выработкой электроэнергии ВЭУ  $K_{gr,n}=0,5$  в рассматриваемый период (месяц, сезон и более) коэффициент готовности ЛЭС, включающей в себя МГЭС и ВЭУ равен 0,987 а это близко к значению 0,99, что можно отнести к надежным источникам электроснабжения.

#### 4.3. Оценка технико-экономических преимуществ ветровой энергии для электроснабжения удаленных потребителей Республики Таджикистан

Быстрые темпы роста населения и соответственно потребность на энергию в Таджикистане вызвало «дисбаланс» между спросом и предложением (выработки) электроэнергии. Численность населения за

последнее 10 лет вырос более чем на 22%, а за весь период независимости на 93,6%. Однако за этот период рост установленных мощностей составил всего 30,4% (более 1300 МВт) [43]. Сегодняшнее производство электроэнергии и темпы ввода новых мощностей не могут, удовлетворять возрастающего темпа спроса на ЭЭ.

Из диаграммы, представленной на рис. 4.10 видно, что ветровые ресурсы по объему занимают второе место по доступности в Таджикистан, которые могут стать альтернативным вариантом для удаленных районов [42].

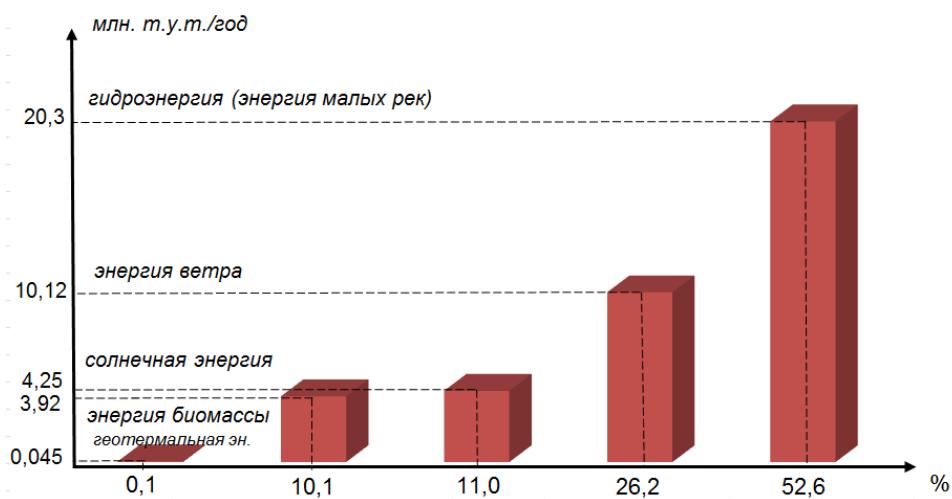


Рисунок 4.10 - Технический потенциал ресурсов ВИЭ (в млн. т.у.т./год и в %) Республики Таджикистан

По результатам наблюдений среднегодовой скорости ветра, около на 40% площади Таджикистана имеется возможность использования ветроэнергетических установок. Анализ показывает, что наиболее сильные ветры встречаются в высокогорных и северных районах республики, где среднегодовая скорость колеблется в пределах от 2,5 до 6 м/с, в отдельных районах достигает 11-15 м/с (25м/с в высокогорных районах) см. ПБ.1.

В качестве примера оценим потенциал использования энергии ветра в село Басид расположенного в Рушанском районе ГБАО рис.4.11. Общее количество домохозяйств составляет 32 с общей численностью 280 человек, и со среднегодовым электропотреблением (см. табл. 4.4 [47]).



Рисунок 4.11. Посёлок Басид, Рушанского района ГБАО

Основным преимуществом выбранного посёлка заключается в качестве объекта исследования заключается:

- наличие МГЭС мощностью 250кВт работающей в локальном режиме;
  - удобное географическое расположение (см. рис. 4.11) с возможностью расположения ВЭУ;
  - наличие инфраструктуры системы электроснабжения (наличие ЛЭП).

Таблица 4.4 – Характеристики потребителей село Басид

Все выполняемые расчеты являются оценочными и не могут использоваться при принятии конкретных решений по сооружению ВЭУ.

Мировая практика показывает, что применения ветровой энергии целесообразна в районах, где средне - годовая скорость ветра на уровне флюгера не ниже 5 м/с или коэффициент использования установленной мощности ветроэлектрической установки мощностью более 100 кВт оказывается порядка 20 % [71].

В осенне-зимний период (ноябрь-март) на большинстве территории республики и в том числе Рушанского района наблюдается значительные усиления ветрового потока до 25 м/с (на некоторых участках до 40 м/с), совпадающие с периодом маловодия русла реки.

Для оценки потенциала ветровых ресурсов село Басид воспользуемся методикой предложенной в работе [131,132]. Выражение для определения валового потенциала (годовой объем электроэнергии, содержащийся в данном виде ВИЭ при полном ее превращении в полезную энергию):

$$W_{\text{в}} = E_{\text{в}} \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \sum_{i=1}^n \vartheta_i^3 \cdot t_i, \quad (4.15)$$

где  $E_{\text{в}}$  – удельная энергия ветра, кВт\*ч/м<sup>2</sup>\*год;

$T$  – число часов в году ( $T = 8760$  ч);  $S$  – площадь территории, м<sup>2</sup> (для село Басид 4,6 км<sup>2</sup>);

$\vartheta_i$  – среднемноголетняя скорость ветра в диапазоне от 2 до 8 м/с;

$t_i$  – вероятность нахождения скорости в диапазоне (согласно [133,134,135] при скоростях ветра в диапазоне от 5 до 8 м/с составляет 0,41).

Оценка технического потенциала (часть валового потенциала, преобразование которого в полезную энергию возможно при существующем уровне развития технических средств, при соблюдении требований по охране природной среды), выполненная с использованием характеристик ВЭУ суммарной мощностью 100 кВт, номинальная мощность одной установки равно 10 кВт.

Выражение для определения технического потенциала:

$$W_T = N \cdot T_{\text{исп}} \cdot n, \quad (4.16)$$

где,  $N$  – средняя мощность ветроэнергетической установки, Вт, определяемая по выражению:

$$N = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n \vartheta_i^3 \cdot \eta_{\text{вэу}}(\vartheta) \cdot t_i, \quad (4.17)$$

где,  $D$  – диаметр ветроколеса, м;

$\eta_{\text{вэу}}$  – общий КПД ВЭУ (для современных ВЭУ составляет  $\approx 0,4$ );

$T_{\text{исп}}$  – годовое число часов использования установленной мощности ВЭУ определенное по выражению:

$$T_{\text{исп}} = T \cdot k_i = 8760 \cdot 0,47 = 4117 \text{ час}$$

где,  $k_i$  – коэффициент использования установленной мощности ВЭУ (согласно техническим данным, большинство производителей для вертикально осевых ВЭУ составляет 0,47 при скорости ветра 7 м/с);

$n$  – количество ВЭУ, которое возможно разместить на площади  $S_t$  (составляет примерно 0,2 % от общей территории района) определяется по выражению:

$$n = \frac{S_t}{10 \cdot D^2} \quad (4.18)$$

Для определения экономического потенциала (часть технического потенциала, преобразование которого в полезную используемую энергию экономически целесообразно при данном уровне цен на ископаемое топливо, тепловую и электрическую энергию и т. д.) рассчитаем стоимость производимой электроэнергии и срок окупаемости.

Стоимость производства электроэнергии, сом./кВт·ч определяется по выражению:

$$\Pi = \frac{r_3 \cdot C \cdot (1 + \gamma \cdot T_{\text{сл}})}{k_i \cdot T \cdot T_{\text{сл}}} = \frac{12000 \cdot (1 + 0,05 \cdot 25)}{4117 \cdot 25} = 0,26 \text{ сом./кВт·ч}$$

где,  $r_3$  – региональный экономический фактор стоимости ветроэнергетической установки;

$C$  – удельная стоимость установленной мощности ветроэнергетической установки, сом./кВт;

$T_{\text{сл}}$  – срок службы ветроэнергетической установки, год, принимаемый по данным завода изготовителя конкретного установки (в среднем указывается 25 лет);

$\gamma$  – норма эксплуатационных издержек, принимаемая равной 0,05.

Удельная стоимость установленной мощности, сом./кВт согласно мировой статистики  $C_3 = r_3 \cdot C = 1200$  долл./кВт.  $\approx 12000$  сом./кВт.

Срок окупаемости, год:

$$T_{\text{ок}} = \frac{r_3 \cdot C}{T \cdot k_i \cdot \Pi_3 - \gamma \cdot r_3 \cdot C} = \frac{12000}{4117 \cdot 0,29 - 0,05 \cdot 12000} \approx 20 \text{ лет}$$

где,  $\Pi_3 = 0,29$  – стоимость (средний тариф) электроэнергии, вырабатываемой на традиционных установках, дол./кВт.

Условие  $T_{\text{сл}} \geq T_{\text{ок}}$  выполняется.

$$T_{\text{сл}} = 25 \text{ лет} \geq T_{\text{ок}} = 20 \text{ лет}$$

Экономический эффект использования ветроэнергетической установки при дефиците электроэнергии в 1 кВт·ч, сом.:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=0}^N \frac{\beta_i}{(1+i)^t} \quad (4.19)$$

где  $N$  – количество лет, входящих в период эксплуатации объекта;  $t$  – порядковый номер шага расчета;  $i$  – норма дисконта (была принята 10 %).

$E$  – электроэнергия, вырабатываемая установкой в год, кВт·ч/год, определяется по формуле:

$$W = N \cdot T_{\text{исп}} = 100 \cdot 4117 = 411700, \text{ кВт·ч/год.}$$

В соответствии с определением экономического потенциала ветровой энергии региона, представляет собой энергию, которая может быть выработана в год ветроэнергетическими установками при условии, что их экономический эффект больше нуля.

Выполнение условий  $T_{\text{сл}} \geq T_{\text{ок}}$  и  $\mathcal{E} > 0$  означает, что в данном случае целесообразно использовать максимально возможную мощность

ветроэлектрических станций, так что экономический потенциал ветровой энергии оказывается больше годового расхода электроэнергии всеми объектами:

$$W_{\text{э}} \geq W_{\text{т}}$$

Заметим, что полученные результаты имеют оценочный характер и при реализации проектов по внедрению и использованию ВЭУ оценка производиться на основе фактических измеренных метеоданных участка предполагаемой место установки.

При оценке небыли учтены расходы связанные с особенностью транспортировки, строительно – монтажных работ в условиях горных районов Республики Таджикистан.

### **Выводы по четвертой главе**

1. Оценка ветропотенциала городской среды с точки зрения эффективности использования ветроустановок является многофакторным сложным процессом, требующим учета таких характеристик как шероховатость земли, этажность зданий, интенсивность турбулентных потоков, направление ветрового потока, ландшафт местности.

2. Учет вышеперечисленных показателей позволяет на 30-40% повысить эффективность использования ветроустановки.

3. Ветропотенциала городской среды в выбранном участке города Худжанд достаточно для использования ветроустановок, поскольку характер и этажность застройки позволяют указать места с высокой турбулентностью потоков, при этом ветровые потоки со скоростью более 5 м/с наблюдаются в более 75% дней ежемесячно.

4. В настоящее время производство электроэнергии и темпы ввода новых мощностей в Республике Таджикистан не удовлетворяют возрастающего темпа спроса на электроэнергию. Использование ветровых ресурсов позволит помочь решить эту проблему, поскольку ветропотенциал в Республике по доступности в горных районах превышает потенциал солнечной энергии.

5. Показатели среднего времени безотказной работы и среднего времени восстановления у ЛЭС с одной МГЭС и ВЭУ выше, чем у ЛЭС с двумя МГЭС и обеспечивают повышение значения коэффициента готовности до 0,987, которое близко к нормативной величине 0,99.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ современного состояния электроэнергетики на территории Республики Таджикистан, а также существующих способов и средств повышения их энергетической эффективности. В результате обобщения данных показано, что в настоящее время надежность и эффективность электроснабжения удаленных районов на территории Республики Таджикистан является актуальной проблемой. Несмотря на достаточный потенциал ветровых ресурсов их доля в энергобалансе республике практически нулевая. Из – за недостаточно обоснованной оценки потенциала водотока при выборе мест строительства МГЭС наблюдается недоиспользование мощности потока и установленной мощности гидроагрегатов, что напрямую влияет на их эффективность.

2. Разработан метод оптимизации энергопотребления от локальной энергосистемы, предусматривающий учет неограниченного количества разнохарактерных источников возобновляемой электрической энергии. Строгая математическая постановка и решение задачи по оптимизации энергопотребления позволит разрабатывать системы эффективного электроснабжения для конкретных условий удаленных районов.

3. Разработана математическая модель локальной электроэнергетической системы на основе МГЭС, ВЭУ и накопителя энергии. для оценки и анализа эффективного управления активной нагрузкой в условиях жесткого дефицита воды. Исследование данной структуры локальной электроэнергетической системы путем разделения мощности нагрузки на строго заданную и вариативную часть показало целесообразность её применения при решении задачи повышения эффективности работы малых ГЭС в условиях жесткого дефицита воды.,

4. Исследовано влияние ветроэнергетической установки на режим работы локальной электроэнергетической системы в условиях изменения конфигурации графиков нагрузки потребителей активной мощности с

помощью методов математического моделирования. В результате разработаны рекомендации по практическому применению ВЭУ.

5. Предложены и запатентованы новые конструкции ветровой установки многолопастного типа. Разработанные конструкции ВЭУ карусельного типа с вертикальной осью, включающие в себя использование одно, двух и многоярусных конструкции ветроколеса, а также технические решения позволяют существенно улучшить показатели по стартовому моменту, коэффициенту использования ветра, устойчивости работы конструкции при работе в условиях турбулентности, а также обеспечить снижение затрат на обслуживание.

6. Проведены работы по технико-экономическому обоснованию применения локальных электроэнергетических систем для электроснабжения в городской среде. Показано, что эффективность использования ВЭУ в условиях городской среды в большой степени зависит от обоснованного выбора места расположения установки с учетом высоты близлежащих зданий и направлений ветровых потоков.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ВЭУ – ветровая энергетическая установка;

ВЭС – ветровая электрическая станция;

МГЭС – малые гидравлические электрические станции;

СЭС – система электроснабжения;

ЛЭС – локальное электроэнергетическая система;

ЛЭП – линий электропередачи;

РТ – Республика Таджикистан;

ТР – трансформатор;

РУ – распределительное устройство;

ДВФУ – Дальневосточный федеральный университет;

ДЭС – дизельная электрическая станция;

ЕЭС СА – Единая Энергетическая Система Средней Азии;

ОАХК БТ – Открытая Акционерная Холдинговая Компания «Барки Точик»;

ГБАО – Горно – Бадахшанская автономная область;

СНГ – Союз Независимых Государств;

ТБО – твердые бытовые отходы;

ТТУ – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими;

ГО – горизонтально осевые;

ВО – вертикально осевые;

ВД – ветродвигатели;

КИЭВ – коэффициент использования энергии ветра;

КИУМ – коэффициент использования установленной мощности;

ЦАГИ – центральный аэрогидродинамический институт;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елистратов В.В. Использование возобновляемой энергии [Текст]: учеб. пособие / В.В. Елистратов. – СПб.: Изд – во Политехн. ун – та, 2010. – 224 с.
2. Воропай Н. И. и др. Энергетика будущего: комплексные проблемы инновационного развития и управления //ЭНЕРГЕТИКА РОССИИ В XXI ВЕКЕ. Инновационное развитие и управление. – 2015. – С. 10-21.
3. Decentralised ген.eneration technologen.ies: potentials, success factors and impacts in the liberalized EU energen.y markets. Final report, DECENT. October 2002. 234 p.
4. Воропай Н.И. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование/ Н.И. Воропай, С.В. Подковальников, В.В. Труфанов и др.; Отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2015. – 448 с.
5. Сайт минэнерго РТ <http://www.minenergen.oprom.tj>
6. Официальный сайт Центра по развитию малой гидроэнергетики в Таджикистане [Сайт] – URL: <http://www.tajhydro.tj/>.
7. Официальный сайт Открытая Акционерная Холдинговая Компания (ОАХК) Барки Точик <http://www.barqitojik.tj>
8. Прохорова Т.В. Особенности и перспективы развития ветроэнергетики в урбанизированной среде // Вестник Поволжья. 2013. № 2. С. 121—128.
9. Гуревич Ю.Е. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.
10. Егорычев О. О., Дуничкин И. В. Вопросы прогнозирования микроклимата городской среды для оценки ветроэнергетического потенциала застройки //Вестник мгсу. – 2013. – №. 6.

11. Smith J. et al. Built-environment ВЭУ turbine roadmap. – National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2012. – №. NREL/TP-5000-50499.
12. Сергеев В.Д., Кулешов Е.В., Ковалев А.Е. Автономная ветроэнергетическая установка малой мощности, структура и режимы работы // Труды Дальневосточного политехнического института им. В.В. Куйбышева – 2001. - №128. – С. 138 – 142.
13. Григораш, О.В. Выбор оптимальной структуры системы автономного электроснабжения / О.В. Григораш, С.А. Симоненко, А.М. Передистый и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2007. – №8. – С. 31-33.
14. Киргизов, А.К. Экономическая выгода от использования солнечного теплоснабжения в Таджикистане / А. К. Киргизов, М. Б. Иноятов // Вестник Таджикского технического университета. – 2009. – № 5. С. 32-34.
15. Четошникова, Л.М. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью [Текст] / Л.М. Четошникова, и др. // Проблемы энергетики. – 2018. том 20 № 5-6. – С. 3-10.
16. Конищев М.А. Совместная работа ГЭС и ВЭС в составе энергокомплекса с гидравлическим аккумулированием энергии [Текст] / Конищев М.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2010. №3 – С. 45-51.
17. Heath, M.A., Walshe, J.D. and Watson S.J., Estimating the potential yield of small building-mounted ВЭУ turbines, ВЭУ Energen.y, 10, 271-287 (2007) Ньюлосс, Дж. Развитие распределенной генерации/Дж. Ньюлосс, И. Ряпин//Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, август 2012, - 38с.
18. Decentralised generation technologies: potentials, success factors and impacts in the liberalized EU energy markets. Final report, DECENT. October 2002. 234 p.

19. Харитонов В.П., Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280с.
20. Сурков, М.А. Мировые тенденции в области построения автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] /М.А. Сурков, Б.В. Лукутин, и др.// Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» №4 2012. –с. 2-15. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru>
21. Лукутин Б.В. Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие/ Б.В. Лукутин. И.О. Муравлев, И.А. Плотников- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100с.
22. Телегин, В. В. Оптимизация структуры и параметров автономных электрогенерирующих комплексов / В. В. Телегин // Научный журнал "Фундаментальные исследования" – Пенза: ИД «Академия Естествознания» – 2013. – № 8(2)– С. 312-317.
23. Воронин, С.М. Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на основе возобновляемых источников энергии: дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.20.02 / Воронин Сергей Михайлович. – Зерноград, 2009. – 323 с.
24. Бельский А.А. Электротехнический комплекс с гибридной ветроэлектрической установкой гарантированного электроснабжения: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Бельский Алексей Анатольевич.– СПб., 2013.– 24 с.
25. Попель, О.С. Современные виды накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике / О.С. Попель, А.Б. Трасенко // Теплоэнергетика, 2011. -№11. –С. 2-11.
26. Никишин А.Ю., Казаков В.П. Современные ветроэнергетические установки на базе асинхронных машин // Современные проблемы науки и образования -2012. – С. 122-122

27. Васильев Ю.С. Возобновляемые источники энергии и гидроаккумулирование [Текст]: учебное пособие / Ю.С. Васильев, В.В. Елистратов [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 1995.
28. Татевосян, А.А. Экспериментальное исследование низкооборотного магнитоэлектрического генератора [Текст] / А.А. Татевосян, В.С. Мищенко, А.А. Лукачева // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. том.5 №3 – С. 113-117.
29. Панченко, В.И. Характеристики электрогенератора ветроустановки с вертикальной осью вращения / В.И. Панченко, и др. // Електрифікація транспорту. – 2016. №11. – С. 36-43
30. Татевосян, А.А. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами / А.А. Татевосян, В.С. Мищенко // Омский научный вестник. – 2016. №4 (148). – С. 90-93.
31. А. Рамадан, В.В. Елистратов. Моделирование и управление сетевой ветроэнергетической установкой с асинхронным генератором двойного питания // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 22–37. DOI: 10.18721/JEST.240302.
32. Гордиевский, Е.М. Имитационное моделирование ветроэнергетической установки в программе MATLAB/SIMULINK / Е.М. Гордиевский, и др. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2020. №1. – С. 25-32.
33. А. Рамадан. Моделирование автономных энергокомплексов на основе ВИЭ для изолированных потребителей в среде MATLAB/SIMULINK / А. Раматан, Р.С. Денисов // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 3(39). – С. 10-20.
34. Золотов И.И., Шевцов А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 131-140. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140.

35. Ершов С.В. Моделирование электрических нагрузок в автономных системах электроснабжения / С.В. Ершов, С.Ю. Шефер // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. Вып. 11. – С. 177-183
36. Воропай Н.И., Труфанов В.В., Селифанов В.В, Шевелева Г.И. К анализу эффективности Единой электроэнергетической системы России // Электричество.- 2000.- №5.- С. 2-9.
37. Арзамасцев, Д.А. Модели оптимизации развития энергосистем: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов/ Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин / Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высш. шк., 1987. – 272 с.: ил.
38. **Рахимов, Ф.М.** Вопросы комплексного использования возобновляемых источников энергии на локальных объектах / Н.В. Силин, Ф.М. Рахимов // «Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы» [Электронный ресурс]: материалы региональной науч.-практ. конф. молодых ученых, ДВФУ, - Владивосток, 2016. с. 77-81.
39. **Рахимов, Ф.М.** Оптимизация энергопотребления на основе использования накопителя энергии [Текст] / Н.В. Коровкин, Н.В. Силин, Ф.М. Рахимов // Известия РАН. Энергетика. – 2019. - №4. – С. 27 – 41.
40. Султонов Ш. М. Оптимизация режимов работы энергосистемы с высокой долей гидроэлектростанций: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.14.08/Шерхон Муртазокулович Султонов, - Новосибирск, 2016. – 20с.
41. Постановления Правительство Республики Таджикистана №795 от 30.12.2015 г. «О Программе освоения возобновляемых источников энергии и строительства малых гидроэлектростанций на 2016-2020».
42. Петров Г.Н. и др. Общая оценка ситуации в энергетике в мире и Таджикистане//Известия академии наук Республики Таджикистан. – Душанбе, - 2009. - №2 (135). – С. 101 – 111.

43. Абдуллаева, Ф.С. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР/ Ф.С. Абдуллоева, Г.Б. Баканин, С.М. Гордон. – Л.: Недра, 1965. – 658 с.
44. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск.3. Бассейн р. Амударья: Гидрометоиздат, 1971. – 359 с.
45. Шульц, В.Л. Реки Центральной Азии/ В. Л. Шульц // Научно-исследовательский Институт по гидрометрологии Центральной Азии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965. — 691 с.
46. Петров Г. Н. Ахмедов Х. М. Каримов Х. Возобновляемые источники энергии Таджикистана и их оценка по категориям // Материалы республиканской научно-практической конференции " Экономика и перспективы развития возобновляемых источников энергии в республике Таджикистан". Худжанд, 12-13 ноября 2015.
47. Численность населения Республики Таджикистан на 01.01.2019 год.

[http://stat.ww.tj/publications/July2019/macmuai\\_sumorai\\_aholi\\_to\\_1\\_anvari\\_soli\\_2019.pdf](http://stat.ww.tj/publications/July2019/macmuai_sumorai_aholi_to_1_anvari_soli_2019.pdf)

48. Статистический ежегодник Таджикистана  
<https://stat.tj/ru/news/publications/statistical-yearbook-was-released>
49. Кабутов К. Возобновляемые источники энергии проблемы и перспективы использования в Таджикистане // Материалы международной конференции. «Хартия» Земли и устойчивое развитие Таджикистана», Душанбе. 2011. – С.75 – 81.

50. Бабаджанов Ш.Б., Юлдашев З.Ш. Перспективы использования энергии ветра в мире и республике Таджикистан // Материалы IX Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <a href="https://scienceforum.ru/2017/article/2017040599">https://scienceforum.ru/2017/article/2017040599</a> (дата обращения: 15.07.2022 ).

51. Ахмедов, X. M. Возобновляемые источники энергии в Таджикистане: состояние и перспективы развития / X. M. Ахмедов, X. С. Каримов, К. Кабутов//Физико-Технический институт им. С. У. Умарова Академии наук республики Таджикистан. – Доклад. – Душанбе: – 2010г. – 30 с.
52. Постановление № 636 (от 01.12.2016г.) «Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года».
53. ГЕН.. V. Shvedov, S. R. Chorshanbiev and A. D. Vaskov, " Analysis and Evaluation of Potential of Renewable Energy Resources of Republic of Tajikistan," 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2018. pp. 26-33.
54. **Рахимов, Ф.М.** Система мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей с применением современных коммуникационных технологий / Н.В. Силин, Ф.М. Рахимов // Материалы Республиканской научно – практической конференции Электроэнергетика, гидроэнергетика, надёжность и безопасность / Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими.-Душанбе: «Промэкспо». – 2016. – с. 232-236.
55. Э.А. Плотников, Б.С. Сирожев, Х.М. Усманов Возможности использования солнечной энергии в Таджикистане. Обзорная информация – 1987. – 45с.
56. Ахмедов X.M., Каримов X.C. Возможности получения и использования биогаза в Таджикистане. Второе изд. – Душанбе: Дониш, 2008, 50 с.
57. **Рахимов, Ф.М.** Эффективность использования солнечных фотоэлектрических панелей в условиях Таджикистана [Текст] / Л.С. Касобов, Ф.М. Рахимов // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительство и энергетики» 10-я Международная конференция по проблемам горной промышленности,

строительство и энергетики/ Материалы конференции ТулГУ, -Тула, 2014. Т-2. с. 356-359.

58. Киргизов А. К. Развитие и оптимизация режимов электроэнергетической системы с распределенными возобновляемыми источниками энергии методами искусственного интеллекта (на примере Республики Таджикистан): автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук: спец. 05.14. 02 :Киргизов Алифбек Киргизович, – 2017.

59. **Рахимов, Ф.М.** Ввод распределенной генерации в сеть для предоставления системных услуг [Текст] / С.Т. Исмаилов, Ф.М. Рахимов, А. Гуломзода // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительство и энергетики» 11-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительство и энергетики/ Материалы конференции ТулГУ, -Тула, 2015. с. 362-367.

60. **Рахимов, Ф.М.** К вопросу создания виртуальной электростанции для повышения эффективности распределенных энергетических источников / Н.В. Силин, Ф.М. Рахимов // «Современные технологии и развитие политехнического образования» [Электронный ресурс]: международная научная конференция, ДВФУ, - Владивосток, 2016. с. 378-381.

61. Закон Республики Таджикистан об использовании возобновляемых источников энергии №587: [Принят Постановлением Маджлиси намояндагон Маджлиси Оли Республики Таджикистан от 23 дек.2009 г.: по состоянию на 23 нояб.2015 г.№587]. – Ирфон. 2009. – 8 с.

62. Самойленко В. О. Обеспечение балансов мощности и энергии электроэнергетических систем с распределенной генерацией: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14. 02 : дис. – б. и., 2017.

63. Савина Н.В. Надежность систем электроэнергетики: учебное пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2011.

64. Валиев Р. Т. Развитие методов расчета показателей балансовой надежности электроэнергетических систем: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14. 02 : дис. – б. и., 2020.
65. Влияние конфигурации графика нагрузки на показатели балансовой надежности ЭЭС / В.П. Обоскалов, Р.Т. Валиев, И.Л. Кирпикова, С.А. Дехтяр // Электроэнергетика глазами молодежи Научные труды IV международной научно-технической конференции Новочеркасск: Лик. – 2013. – Т2. С. 75-78 (0,2 п.л./0,07 п.л.)
66. Николаев В.Г. К решению проблемы локализации в российской ветроэнергетике / Николаев В.Г., Ганага С.В., Николаев В.В., Перминов Э.М. // Энергетик. 2015. № 8. С. 16-19.
67. **Рахимов, Ф.М.** К вопросу создания локальных энергетических установок на базе возобновляемых источников энергии / А.В. Таскин, Е.И. Кончаков, А.В. Герасименко, Ф.М. Рахимов, Н.В. Силин, Н. Хасанзода // «Современные технологии и развитие политехнического образования» [Электронный ресурс]: международная научная конференция, ДВФУ,- Владивосток, 2016. с. 391-393.
68. **Рахимов, Ф.М.** К вопросу внедрения инновационных технологий smart ген.rid в систему электроснабжения острова русский / Н.В. Силин, В.А. Кислюков, Н. Хасанзода, Е.П. Манаков, Ф.М. Рахимов // «Современные технологии и развитие политехнического образования» [Электронный ресурс]: международная научная конференция, ДВФУ,- Владивосток, 2016. с. 382-386.
69. [Электронный ресурс]: – URL: <https://ru.wikipedia.orggen./wiki/Таджикистан>. (Дата обращения 14.07.2022г.)
70. Твайделл, Дж., Возобновляемые источники энергии/Твайделл Дж., Уэйр А./ пер. с англ. –М.: Энергоатомиздат. 1990. -392с.
71. А. да Роза, Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие/ А. да Роза; пер. с англ. Под

редакцией ел. Малышенко, О.С. Попеля. -Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; М.: Издательский дом МЭИ; 2010.- 704 с.

72. Сироткин, Е.А. Историко-экономический анализ ветроэнергетических установок и систем управления / Коробатов Д.В., Козлов С.В., Сироткин Е.А. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 15-18. С. 54-66.

73. Соломин, Е.В. Методология разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок: монография / Соломин, Е.В. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – ISBN:978-5-696-04199-5. – 2011. – 256с.

74. **Рахимов, Ф.М.** Пат. 208745 Российская Федерация. МПК F03D 5/00 (2006.01) Лопасть ветродвигателя/ Ф.М. Рахимов, Н.В. Силин, А.К. Киргизов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» №2021122913 от 02.08.2021г. Бюл. №2 опубл. 11.01.2022г.

75. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: - ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010, - 320с.

76. Мартынов А. С. Вертикально-осевые ветровые турбины. Новые аспекты / И. М. Кирпичникова, А. С. Мартынов, Е. В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС, 2013 — №01/2(118). -С.55-58.

77. Исмоилов Ф.О. Комплексное использование возобновляемых источников энергии для электроснабжения автономных потребителей Республики Таджикистан: дис...канд.техн.наук: спец. 05.14.02 / Исмоилов Фирдавс Олимшоевич. — М., 2012. — 188 с.

78. Secretariat R. Renewables 2017 ГЕН.lobal Status Report. REN21. – Paris, Tech. Rep, 2021.

79. Гук Ю.Б., Окороков В.Р., Папин А.А. Многоцелевая оптимизация структуры электроэнергетических систем при их перспективном планировании на основе экспертных оценок и факторного

эксперимента // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1973.- №1.- С. 3-12.

80. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения.- М.: Радио и связь, 1992.- 504 с.

81. Грозных, В.А. Разработка методики повышения надежности электроснабжения отдаленных поселений за счет ветроэнергетики (на примере Астраханской области): дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.09.03 / Грозных Вадим Алексеевич. – М., 2011. – 272 с.

82. Конищев, М.А. Методика обоснования параметров и режимов работы энергокомплексов ГЭС-ВЭС: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.14.08 / Конищев Михаил Анатольевич. – СПб., 2010. – 19 с.

83. **Рахимов, Ф.М.** Анализ эффективности внедрения вертикально – осевых ветроэнергетических установок в частных домохозяйствах (на примере Приморского края) / Ф.М. Рахимов // Международная научно-практическая конференция: «Развитие социального и научно-технического потенциала общества» сборник статей Международной научно-практической конференции 15 января 2018 г. г. Москва. [Электронный ресурс]– М.: Импульс, 2018. – с. 854-860.

84. **Рахимов, Ф.М.** Применение мобильных ветроустановок для энергообеспечения маломощных потребителей [Текст]/ Ф.М. Рахимов // Перспективные системы и задачи управления: материалы Тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Девятой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2018. –с. 270-272.

85. Киргизов, А.К. К вопросу использования малой гидроэнергетики в условиях Таджикистана./А. К. Киргизов. М. Б. Иноятов // Вестник Таджикского технического университета. – 2008. – № 2(18). – С. 38-42.

86. Деньщиков К.К. и др. Суперконденсаторы в современной энергетике. Известия РАН. Энергетика. 2011. № 5. С. 125–132.
87. Коровкин Н.В., Потиенко А.А. Использование генетического алгоритма для решения электротехнических задач. Электричество. № 11. 2002.
88. Deb K., Agarwal S., Pratap A., Meyarivan T. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. In: Schoenauer M. et al. (eds) Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. PPSN 2000. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1917. Springer, Berlin, Heidelberg..
89. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB 5.0/5.3. Система символьной математики. М.: Нолидж, 1999. — 328 с.
90. Дьяконов, В.П. Matlab 6. Учебный курс / В.П. Дьяконов. СПб., 2001. — 592 с.
91. Воронин С.М., Бабина Л.В. Работа ветроустановки при изменении направления ветра // Альтернативная энергетика и экология, 2010 № 1. С. 98-100
92. Горелов Д.Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. – Омск: Полиграфический центр КАН, 2012. – 68 с.
93. Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Анализ направлений повышения конкурентоспособности конструкций энергоэффективных ветроэнергоустановок различных типов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2017. – №. 2 (64).
94. Pope K. et al. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis ВЭУ turbine // Renewable Energy. – 2010. – Т. 35. – №. 5. – С. 1043-1051.
95. Бетц, А.И. Ветряные двигатели в свете современных исследований / А.И.Бетц // Успехи физических наук. – 1930. – Т. X. вып.2. – 26 с.

96. Асарин, А. Е. Ветроэнергетические расчеты / А. Е. Асарин, К. Н. Бестужева. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
97. Armstrong, S., Fiedler, A., Tullis, S.: Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis ВЭУ turbine with straight and canted blades and canted blades with fences. *Renew. Energy* 41, 13–22 (2012)
98. Paraschivoiu, I.: ВЭУ Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept. Polytechnic International, Canada (2002)
99. Pope, K., Naterer, G.F., Dincer, I., Tsang, E.: Power correlation for vertical axis ВЭУ turbines with varying geometries. *Int. J. Energy Res.* 35, 423–435 (2011)
100. Eriksson, S., Bernhoff, H., Leijon, M.: Evaluation of different turbine concepts for ВЭУ power. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12, 1419–1434 (2008)
101. Соломин Е. В. Методологические основы разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок для агропромышленного комплекса России: автореферат дис. – Алтайский гос. техн. универ. 2013. Электронный ресурс: <http://www.altstu.ru/media/f/2013-02-15-AvtoreferatSolomin-EV.pdf>, 2013.
102. Пат. 2484297 Российская Федерация, МПК F03D3/04. Ветротурбинная установка [Текст]. / Е.И. Кончаков, Н.С. Дружинин; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО ДВФУ. - № 3 2012113011/06, заявл 03.04.2012, опубл. 10.06.2013.
103. Пат. 2531160 Российская Федерация, МПК F03D7/06. Ветротурбинная установка [Текст]. / Е.И. Кончаков, Н.С. Дружинин, Д.А. Сузько, С.В. Грибков; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО ДВФУ. - № 3 2013143985/06, заявл 30.09.2013, опубл. 20.10.2014.
104. Грибков С. В., Павлихин Д. С. Оптимизация вертикально-осевых ветротурбинных установок с направляющим аппаратом //Техника и оборудование для села. – 2014. – №. 10. – С. 40-45

105. Пат. 184213 Российская Федерация. МПК F03D 3/04(2018.05) Ветроэнергетическая установка/ Н.В. Силин, **Ф.М. Рахимов**, А.В. Таскин; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» №2018114126 от 18.04.2018г. Бюл. №29 опубл. 18.10.2018г.
106. Пат. 174578 Российская Федерация. МПК F03D 3/04(2006.01), F03D 7/06 (2006.01), F03D 9/25(2016.01) Мобильная ветроэнергоустановка/ Е.И. Кончаков, А.В. Таскин, **Ф.М. Рахимов**, Н.В. Силин; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» №2017103385 от 02.02.2017г. Бюл. №29 опубл. 20.10.2017г.
107. Берг, О. И. Принципы построения мобильных ветроэлектростанций /С. К. Прищепов, И. Р. Зинатуллин, О. И. Берг // Вестник КГУ. – 2010. – №3 (6). –С. 38 – 43
108. Березин, М. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций / М. А. Березин, В. В. Катюшин – Новосибирск: Олден-полиграфия, 2003. – 137 с.
109. Жуковский, Н. Е. Полное собрание сочинений в 10 томах: Винты. Ветряки. Аэродинамическая труба / Н.Е. Жуковский. – Москва–Ленинград: Главная редакция авиационной литературы. – 1937. – 6 т.
110. **Рахимов, Ф.М.** Влияние соотношение сторон турбины вертикально-осевой ветроэнергетической установки на его производительность [Текст] / Ф.М. Рахимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. — 2022. — №2 (58). —С. 21 - 31.
111. Zubova N. V. Simulation of ВЭУ speed in the problems of ВЭУ power / S. N. Udalov, N. V. Zubova // Журнал Сибирского федерального университета. – Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 2. – p. 150–165.
112. Brusca S., Lanzafame R., Messina M. Design of a vertical-axis ВЭУ turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance //International Journal of Energy and Environmental Engineering. – 2014. – Т. 5. – №. 4. – С. 333-340.

113. Чудновец С. П., Харитонов С. А. Накопители электрической энергии для систем генерирования электрической энергии (аналитический обзор) //Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – №. 1. – С. 163-172.
114. Н. В. Коровкин. Оптимизация энергопотребления на основе использования накопителя энергии / Н. В. Коровкин, Ву Куанг Ши // Известия НТЦ Единой энергетической системы.-2018. - Т. 79, № 2. - С. 131–138.
115. Математическое моделирование: Методы, описания и исследования сложных систем / Под ред. А.А. Самарского. -М.: Наука, 1989. - 271 с.
116. Мартынов А. С. Решение задач оптимизации в ANSYS MAXWELL // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 67-ой научной конференции. Секция технических наук. — 2015. — С. 24—28.
117. Шефтер Я.И. Ветроэнергетические агрегаты. М.: Машиностроение, 1972. — 288 с.
118. Шефтер, Я.И. Использование энергии ветра / Я.И. Шефтер. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 199 с.
119. Горелов Д.Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. – Омск: Полиграфический центр КАН, 2012. – 68 с.
120. Шишкин, Н.Д. Аналитическое исследование параметров ветроэнергетических установок с вертикальными полуцилиндрическими лопастями / Н.Д. Шишкин, Е.А. Манченко // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2013. №1. – С. 155-161.
121. Морозов Д.А. Синтез ветроустановки малой мощности с вертикальной осью вращения / автореферат дисс. – ГОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет» - 2011.
122. Пат. 193425 Российская Федерация. МПК ГЕН.01М 13/00 (2006.01) Стенд для испытаний вертикальных лопастей/ Н.В. Силин, М.А. Аврамцева, В.В. Уэно, В.С. Вейна, **Ф.М. Рахимов**, А.В. Таскин; заявитель и

патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» №2019123145 от 23.07.2019г. Бюл. №31 опубл. 29.10.2019г.

123. **Рахимов, Ф.М.** Исследование характеристик вертикально-осевой ветротурбины / Н.В. Силин, Ф.М. Рахимов // Актуальные вопросы фундаментальных и прикладных исследований. Сборник статей Всероссийской научной конференции. – Владивосток, ДВФУ, 2019. – с . 56-57.

124. Пат. 208745 Российская Федерация. МПК F03D 5/00 (2006.01) Лопасть ветродвигателя/ **Ф.М. Рахимов**, Н.В. Силин, А.К. Киргизов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» №2021122913 от 02.08.2021г. Бюл. №2 опубл. 11.01.2022г.

125. Manusov V.Z. The effective use of Statcom in the electrical system of the republic of Tajikistan to reduce the losses of active power in the electric network / V.Z. Manusov, A.K. Kirgen.izov, Ja.S. Ahyoев // В сборнике: Труды XIII международной научно-технической конференции актуальные проблемы электронного приборостроения Proceedin gen.s: in 12 volumes . 2016. С. 60-63.

126. Егорычев О. О., Дуничкин И. В. Вопросы прогнозирования микроклимата городской среды для оценки ветроэнергетического потенциала застройки // Вестник МГСУ. – 2013. – №. 6.

127. Mertens S. ВЭУ energen.y in the built environment: concentrator effects of buildin gen.s. – 2006.

128. **Рахимов, Ф.М.** К вопросу интеграции ветровых турбин с вертикальной осью в городскую среду [Текст] / Ф.М. Рахимов, Н.В. Силин, А.К. Киргизов, И. Толибзода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. — 2018. — №4 (44). —С. 40–46.

129. **Рахимов, Ф.М.** К вопросу использования ветроустановок в городской среде / Н.В. Силин, Ф.М. Рахимов // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее. сборник статей XV Международной

научно-практической конференции в 3 ч. .Ч 1. [Электронный ресурс]–Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». –2018. –с.39-43.

130. Smith J. et al. Built-environment ВЭУ turbine roadmap. – National Renewable Energy Lab.(NREL), ГЕН.olden, CO (United States), 2012. – №. NREL/TP-5000-50499.

131. Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки. М.: ЦНИИП Градостроительства, 1986г.

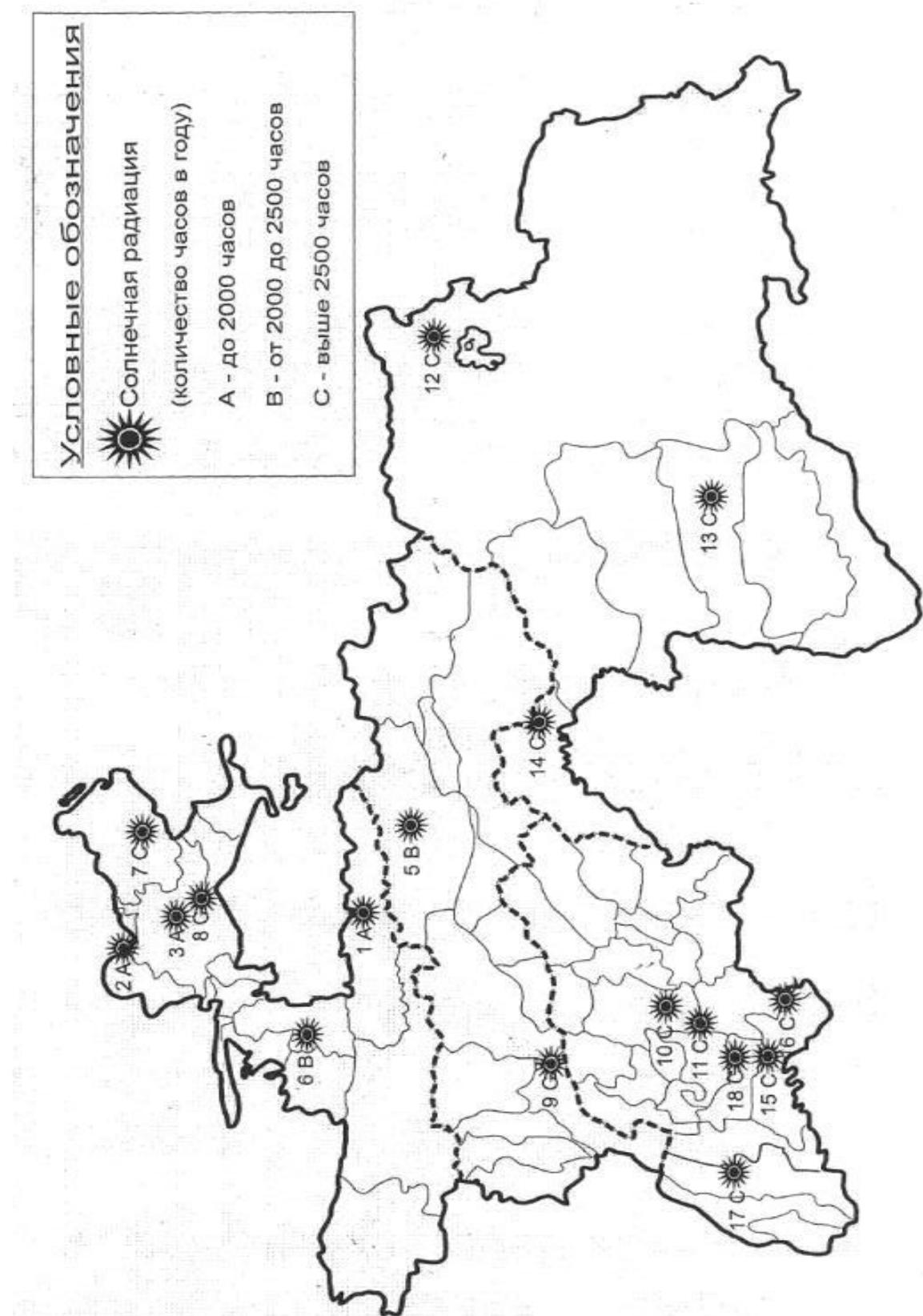
132. Карта роза ветров города Находки Приморского края [электронный ресурс] режим доступа <https://world-weather.ru/archive/russia/nakhodka/> (дата обращение 06.06.2018г.)

133. Зарубин А. С. Оценка потенциала использования энергии ветра в северных районах Красноярского края. – 2014.

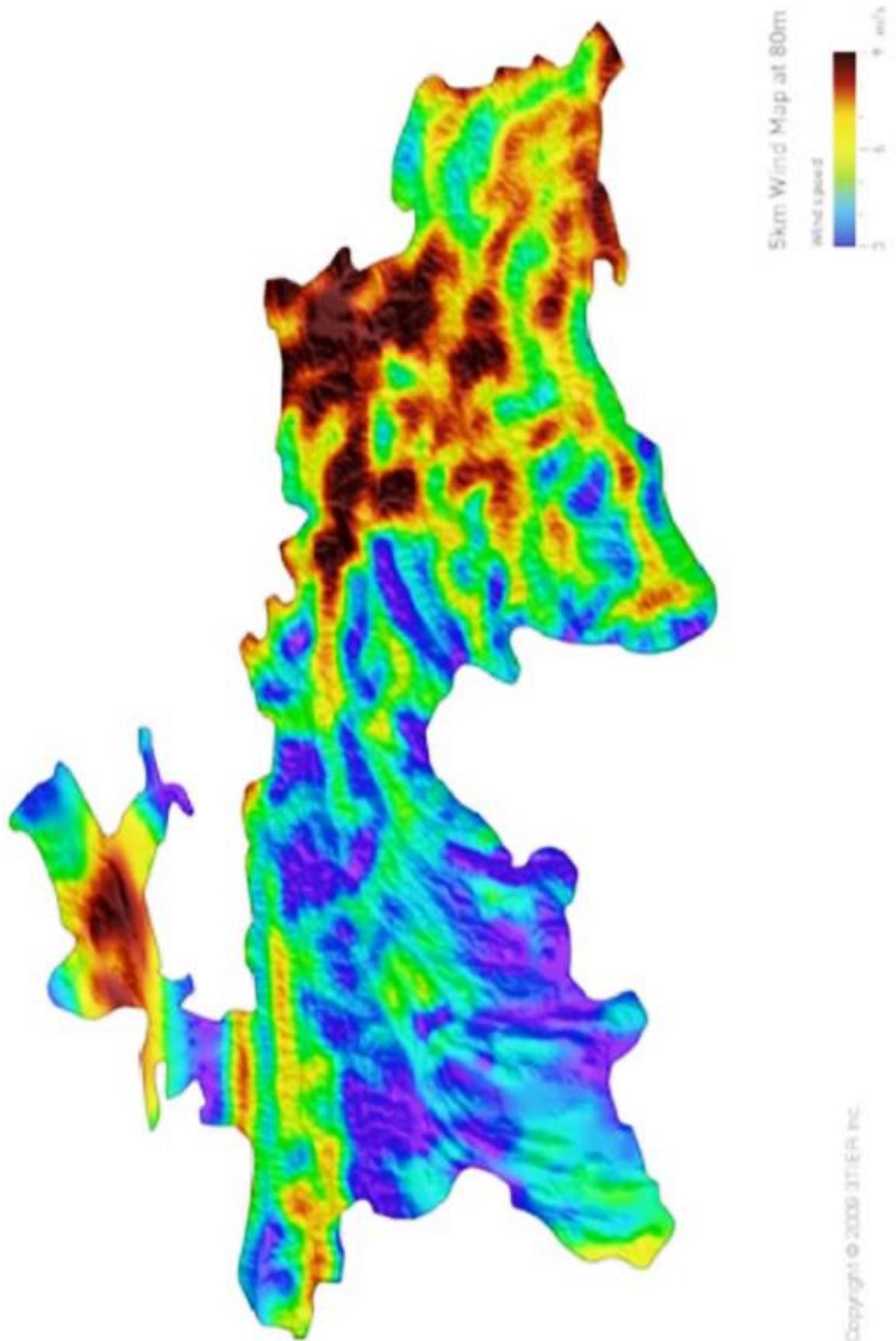
134. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Часть 3. Выпуск 31. Таджикская ССР.– Л.: изд-во Гидрометеоиздат, 1968. – 301с.

135. **Рахимов, Ф.М.** Оценка возможности использования ветровой энергии в локальной электроэнергетической системе Раштской долины Таджикистана / Ф.М. Рахимов, Л.С. Касобов // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики». 16-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. Т.2: материалы конференции. – Тула. ТулГУ, 2020. – с. 297 - 301

## ПРИЛОЖЕНИЯ

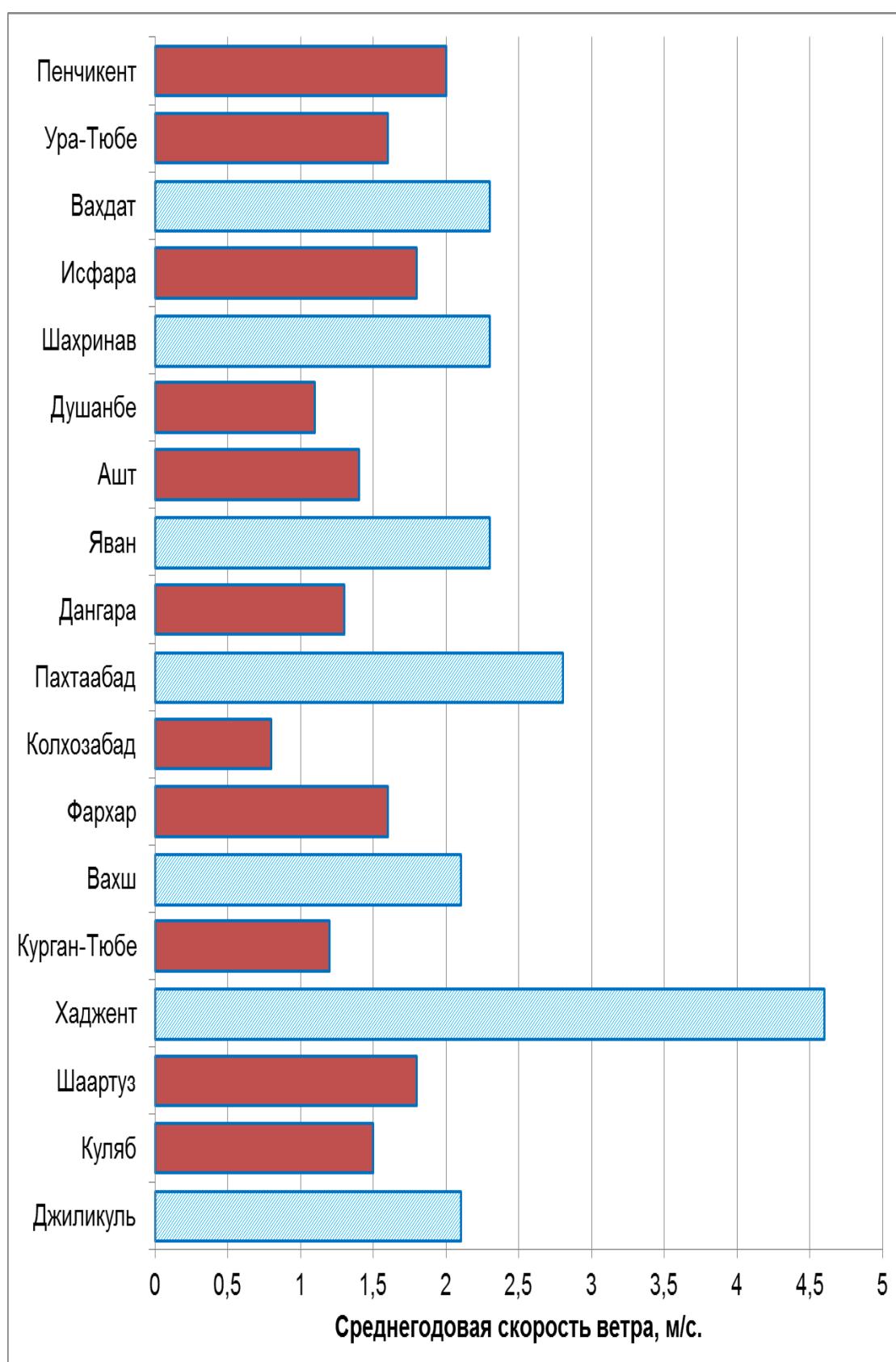


**Обобщенная карта продолжительности солнечной радиации в различных районах Республики Таджикистан**

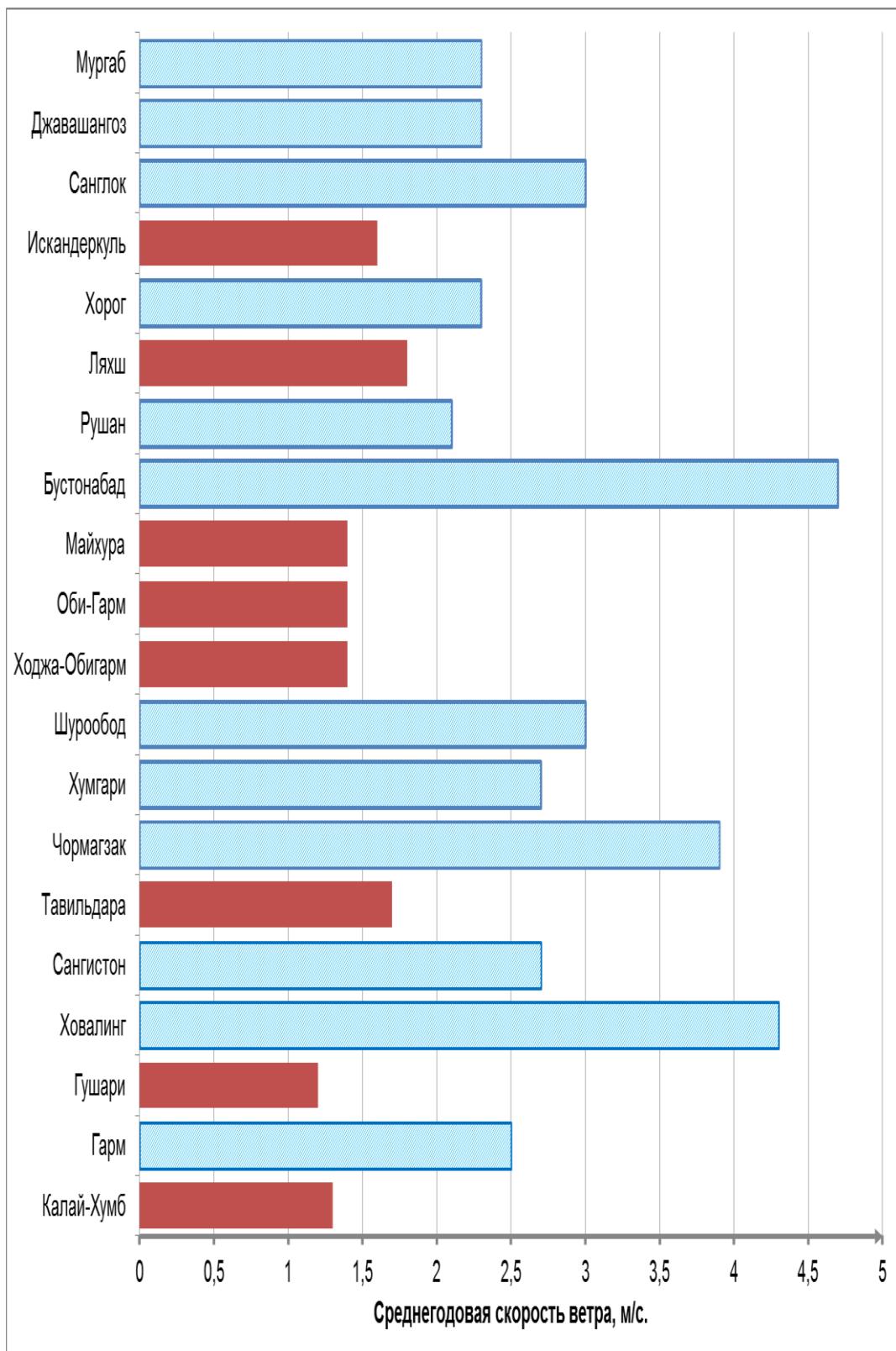


## Приложение Б.2

## Среднегодовая скорость ветра по территории Таджикистана



## Продолжение П. Б.2



## Приложение В.1

## Паспортные данные серийно выпускаемых ВЭУ малой мощности

№ п/п	Наименование модели	Страна производи- тель	Мощность, Рном.	Диаметр ВК, D.	Высота ВК, H.	Ометаема- я площадь, (S) F.	$\Delta h$	Скорость вращения, n	Скорость ветра, м/с			
			кВт	м	м	м <sup>2</sup>			Об/мин	V <sub>min</sub>	V <sub>расч</sub>	V <sub>max</sub>
1	Вертикально- осевой ветрогенератор «Sokol Air Vertical»	P	5	4	4,5	18	0,6	80/155	2	7,5	35	45
2	Ветрогенератор «Falcon Euro»	P	10	4	5	20	0,6	95/180	2,5	12	20	35
3	ГЕН.reef ГЕН.V 1	K	1	1,4	2	2,8	0,7	150	2,8	11	25	50
4	ГЕН.reef ГЕН.V-500W	K	0,5	1,3	1,5	1,95	0,6	200	1	10	25	50
5	Dagen.an power ДГЕН.- Н - 1	K	1	2,2	2,4	5,28	0,5	н/д	2	12	35	50
6	Dagen.an power ДГЕН.- Н - 3	K	3	2,85	3,5	9,975	0,6	н/д	2	12	35	50
7	Dagen.an power ДГЕН.- Н - 5	K	5	3,6	4,5	16,2	0,6	н/д	2	12	35	50
8	Dagen.an power ДГЕН.- Н - 10	K	10	5,8	8	46,4	0,7	н/д	2	12	35	50

## Продолжение П.В.1

№ п/п	Наименование модели	Страна производи- тель	Мощность, Рном.	Диаметр ВК, D.	Высота ВК, H.	Ометаема- я площадь, (S) F.	$\Delta h$	Скорость вращения, n	Скорость ветра, м/с				
			кВт	м	м	м <sup>2</sup>			Об/мин	V <sub>min</sub>	V <sub>расч</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>бур</sub>
9	ООО Сальмабаш ОСА 300-12	Р	0,3	1,2	1,6	1,92	0,7	120		5	8	45	45
10	ООО Сальмабаш ОСА 1000-12	Р	1	3	2	6	0,3	200		3	8	40	45
11	ООО Сальмабаш ОСА 3000-12	Р	3	3,8	4	15,2	0,5	160		3	8	40	45
12	МАГЕН.LEV 700-3000Вт	Т	3	3,6	4,2	15,12	0,6	150		3,5	13	15	60
13	Aeolos-V 1	Д	1	2	2,8	5,6	0,7	300		1,5	10	30	50
14	Aeolos-V 3	Д	3	3	3,6	10,8	0,6	260		1,5	10	40	50
15	Aeolos-V 10	Д	10	3	3,6	10,8	0,6	260		1,5	10	50	50

Примечание: Страна производитель: Р - Россия; Д - Дания; К - Китай; Т - Тайвань

## Приложение B.2

## Коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) Ср

$$C_p = 4a(1-a)^2$$

Скорость потока, м/с	1	2	3	4	ГЕН.reef ГЕН.V 1	ГЕН.reef ГЕН.V-500W	Daren.an power DГЕН.- Н - 1	Daren.an power DГЕН.- Н - 3	Daren.an power DГЕН.- Н - 5	Daren.an power DГЕН.- Н - 10	ООО Сальмабаш ОСА 300-12	ООО Сальмабаш ОСА 1000-12	ООО Сальмабаш ОСА 3000-12	МАГЕН.ЛЕ В 700-3000Вт	Aeolos-V 1	Aeolos-V 3	Aeolos-V 10
	«Sokol Air Vertical»	«Falcon Euro»	ГЕН.reef ГЕН.V 1	ГЕН.reef ГЕН.V-500W	Daren.an power DГЕН.- Н - 1	Daren.an power DГЕН.- Н - 3	Daren.an power DГЕН.- Н - 5	Daren.an power DГЕН.- Н - 10	Daren.an power DГЕН.- Н - 10	Daren.an power DГЕН.- Н - 10	ООО Сальмабаш ОСА 300-12	ООО Сальмабаш ОСА 1000-12	ООО Сальмабаш ОСА 3000-12	МАГЕН.ЛЕ В 700-3000Вт	Aeolos-V 1	Aeolos-V 3	Aeolos-V 10
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,13	0,1	0,09	0,18	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,05	0,09	0,09	0,05	0,18 05	0,18 05	0,18 05
2	0,18 05	0,14	0,12	0,21	0,18	0,1805	0,1805	0,1805	0,1805	0,1805	0,07	0,12	0,12	0,1	0,21	0,21	0,21
2,5	0,24	0,18	0,15	0,25	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,09	0,15	0,15	0,13	0,25	0,25	0,25
3	0,28	0,21	0,18 05	0,28	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,1	0,1805	0,18	0,15	0,28	0,28	0,28
3,5	0,33	0,26	0,22	0,32	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,12	0,25	0,25	0,180 5	0,32	0,32	0,32
4	0,39	0,28	0,26	0,35	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,14	0,3	0,3	0,22	0,35	0,35	0,35
4,5	0,44	0,32	0,3	0,39	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,16	0,36	0,36	0,25	0,39	0,39	0,39
5	0,48	0,35	0,33	0,41	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,18	0,42	0,42	0,29	0,41	0,41	0,41
5,5	0,51	0,37	0,34	0,44	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,2	0,46	0,46	0,31	0,44	0,44	0,44
6	0,55	0,39	0,37	0,46	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,3	0,48	0,48	0,33	0,46	0,46	0,46

## Продолжение П.В.2

Скорость потока, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6,5	0,57 5	0,4	0,39	0,47	0,42	0,42	0,42	0,42	0,36	0,52	0,52	0,35	0,47	0,47	0,47
7	0,58	0,42	0,41	0,49	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,54	0,54	0,37	0,49	0,49	0,49
7,5	0,59 15	0,44	0,43	0,51	0,45	0,45	0,45	0,45	0,5	0,57	0,57	0,39	0,51	0,51	0,51
8	0,58 5	0,46	0,45	0,53	0,47	0,47	0,47	0,47	0,591	0,5915	0,59	0,41	0,53	0,53	0,53
8,5	0,56 5	0,47	0,47	0,54	0,49	0,49	0,49	0,49	0,58	0,58	0,58	0,43	0,54	0,54	0,54
9	0,55	0,49	0,5	0,56	0,5	0,5	0,5	0,5	0,57	0,57	0,57	0,45	0,56	0,56	0,56
9,5	0,54 5	0,51	0,51	0,57	0,52	0,52	0,52	0,52	0,57	0,57	0,57	0,47	0,57	0,57	0,57
10	0,53	0,53	0,52	0,591 5	0,54	0,54	0,54	0,54	0,56	0,56	0,56	0,48	0,59 15	0,591 5	0,59 15
10,5	0,52	0,54	0,55	0,58	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,5	0,58	0,58	0,58
11	0,51	0,56	0,59 15	0,56	0,57	0,57	0,57	0,57	0,53	0,53	0,53	0,52	0,57	0,57	0,57
11,5	0,49	0,57	0,58	0,54	0,58	0,58	0,58	0,58	0,52	0,52	0,52	0,54	0,56	0,56	0,56
12	0,48	0,58	0,56	0,52	0,591	0,591	0,591	0,591	0,51	0,51	0,51	0,56	0,54	0,54	0,54
12,5	0,47	0,591 5	0,55	0,5	0,58	0,58	0,58	0,58	0,49	0,49	0,49	0,57	0,53	0,53	0,53
13	0,46	0,56	0,53	0,48	0,57	0,57	0,57	0,57	0,47	0,47	0,47	0,591 5	0,51	0,51	0,51
13,5	0,44	0,52	0,51	0,46	0,56	0,56	0,56	0,56	0,46	0,46	0,46	0,42	0,49	0,49	0,49
14	0,43	0,48	0,47	0,44	0,54	0,54	0,54	0,54	0,45	0,45	0,45	0,29	0,48	0,48	0,48
14,5	0,41	0,44	0,45	0,42	0,52	0,52	0,52	0,52	0,44	0,44	0,44	0,09	0,47	0,47	0,47

## Продолжение П.В.2

Скорость потока, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15	0,4	0,4	0,43	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,43	0,43	0,43	0	0,45	0,45	0,45
15,5	0,38	0,36	0,41	0,38	0,49	0,49	0,49	0,49	0,41	0,41	0,41		0,44	0,44	0,44
16	0,37	0,32	0,39	0,36	0,47	0,47	0,47	0,47	0,39	0,39	0,39		0,42	0,42	0,42
16,5	0,35	0,29	0,37	0,34	0,45	0,45	0,45	0,45	0,38	0,38	0,38		0,4	0,4	0,4
17	0,34	0,26	0,34	0,32	0,44	0,44	0,44	0,44	0,37	0,37	0,37		0,39	0,39	0,39
17,5	0,33	0,21	0,32	0,3	0,42	0,42	0,42	0,42	0,36	0,36	0,36		0,38	0,38	0,38
18	0,32	0,16	0,3	0,28	0,4	0,4	0,4	0,4	0,34	0,34	0,34		0,36	0,36	0,36
18,5	0,3	0,12	0,28	0,26	0,39	0,39	0,39	0,39	0,32	0,32	0,32		0,35	0,35	0,35
19	0,29	0,09	0,26	0,24	0,38	0,38	0,38	0,38	0,31	0,31	0,31		0,33	0,33	0,33
19,5	0,27	0,06	0,24	0,22	0,36	0,36	0,36	0,36	0,3	0,3	0,3		0,31	0,31	0,31
20	0,26	0	0,22	0,2	0,33	0,33	0,33	0,33	0,28	0,28	0,28		0,3	0,3	0,3
20,5	0,24		0,2	0,18	0,31	0,31	0,31	0,31	0,27	0,27	0,27		0,29	0,29	0,29
21	0,23		0,17	0,16	0,3	0,3	0,3	0,3	0,25	0,25	0,25		0,27	0,27	0,27
21,5	0,22		0,15	0,14	0,29	0,29	0,29	0,29	0,24	0,24	0,24		0,26	0,26	0,26
22	0,21		0,13	0,12	0,27	0,27	0,27	0,27	0,23	0,23	0,23		0,24	0,24	0,24
22,5	0,2		0,11	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	0,22	0,22		0,23	0,23	0,23
23	0,18		0,09	0,08	0,23	0,23	0,23	0,23	0,21	0,21	0,21		0,21	0,21	0,21
23,5	0,16		0,07	0,06	0,21	0,21	0,21	0,21	0,2	0,2	0,2		0,2	0,2	0,2
24	0,15		0,04	0,04	0,2	0,2	0,2	0,2	0,18	0,18	0,18		0,18	0,18	0,18
24,5	0,14		0,02	0,02	0,18	0,18	0,18	0,18	0,16	0,16	0,16		0,17	0,17	0,17
25	0,13		0	0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,14	0,14		0,15	0,15	0,15
25,5	0,11				0,15	0,15	0,15	0,15	0,13	0,13	0,13		0,14	0,14	0,14
26	0,09				0,13	0,13	0,13	0,13	0,11	0,11	0,11		0,12	0,12	0,12
26,5	0,08				0,12	0,12	0,12	0,12	0,1	0,1	0,1		0,11	0,11	0,11

## Продолжение П.В.2

Скорость потока, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
27	0,07				0,1	0,1	0,1	0,1	0,09	0,09	0,09		0,09	0,09	0,09
27,5	0,05				0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07		0,07	0,07	0,07
28	0,04				0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06		0,06	0,06	0,06
28,5	0,03				0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05		0,04	0,04	0,04
29	0,02				0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04		0,03	0,03	0,03
29,5	0,01				0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02		0,02	0,02	0,02
30	0				0	0	0	0	0	0	0		0	0	0

## Приложение B.3.

## Зависимость выходного мощности ВЭУ от изменения скорости ветрового потока

Скорость потока, м/с	Мощность потока, Вт. При 1 м <sup>2</sup>	«Sokol Air Vertical»	«Falcon Euro»	ГЕН.reef ГЕН.В 1	ГЕН.reef ГЕН.В 500W	Датч.ан power ДГЕН.- Н - 1	Датч.ан power ДГЕН.- Н - 3	Датч.ан power ДГЕН.- Н - 5	Датч.ан power ДГЕН.- Н - 10	ООО Сальмабаш ОСА 300-12	ООО Сальмабаш ОСА 1000-12	ООО Сальмабаш ОСА 3000-12	МАГЕН.ЛЕВ 700-3000Вт	Аeolos-V 1	Аeolos-V 3	Аeolos-V 10	среднее значение
1	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1,5	0,9492	0,0010	0,0004	0,0005	0,0015	0,0014	0,0009	0,0009	0,0013	0,0007	0,0011	0,0010	0,0005	0,0021	0,0014	0,0004	0,0010
2	2,2500	0,0032	0,0014	0,0017	0,0041	0,0048	0,0030	0,0029	0,0042	0,0022	0,0036	0,0030	0,0025	0,0059	0,0038	0,0011	0,0032
2,5	4,3945	0,0084	0,0035	0,0041	0,0095	0,0108	0,0068	0,0066	0,0095	0,0056	0,0088	0,0074	0,0064	0,0137	0,0088	0,0026	0,0075
3	7,5938	0,0170	0,0071	0,0085	0,0184	0,0214	0,0135	0,0131	0,0188	0,0108	0,0183	0,0154	0,0128	0,0265	0,0170	0,0051	0,0149
3,5	12,0586	0,0318	0,0139	0,0165	0,0334	0,0396	0,0249	0,0243	0,0348	0,0206	0,0402	0,0339	0,0244	0,0480	0,0309	0,0093	0,0284
4	18,0000	0,0562	0,0224	0,0291	0,0546	0,0655	0,0412	0,0402	0,0575	0,0358	0,0720	0,0608	0,0444	0,0784	0,0504	0,0151	0,0482
4,5	25,6289	0,0902	0,0365	0,0478	0,0866	0,1022	0,0644	0,0627	0,0898	0,0583	0,1230	0,1039	0,0718	0,1244	0,0800	0,0240	0,0777
5	35,1563	0,1350	0,0547	0,0722	0,1249	0,1526	0,0961	0,0937	0,1341	0,0903	0,1969	0,1663	0,1142	0,1794	0,1153	0,0346	0,1173
5,5	46,7930	0,1909	0,0769	0,0990	0,1784	0,2141	0,1348	0,1314	0,1882	0,1331	0,2870	0,2424	0,1625	0,2562	0,1647	0,0494	0,1673
6	60,7500	0,2673	0,1053	0,1399	0,2422	0,2922	0,1839	0,1793	0,2568	0,2592	0,3888	0,3283	0,2245	0,3478	0,2236	0,0671	0,2337
6,5	77,2383	0,3553	0,1373	0,1874	0,3146	0,3806	0,2396	0,2336	0,3345	0,3955	0,5355	0,4522	0,3028	0,4518	0,2904	0,0871	0,3132

## Продолжение П.В.3.

7	96,4688	0,4476	0,1801	0,2461	0,4097	0,4980	0,3135	0,3056	0,4377	0,6037	0,6946	0,5865	0,3998	0,5882	0,3782	0,1134	0,4135
7,5	118,6523	0,5615	0,2320	0,3175	0,5244	0,6265	0,3943	0,3844	0,5505	0,8438	0,9018	0,7615	0,5183	0,7530	0,4841	0,1452	0,5333
8	144,0000	0,6739	0,2944	0,4032	0,6614	0,7941	0,4998	0,4873	0,6979	1,2114	1,1357	0,9590	0,6612	0,9498	0,6106	0,1832	0,6815
8,5	172,7227	0,7807	0,3608	0,5051	0,8083	0,9930	0,6250	0,6094	0,8727	1,2100	1,1300	1,1279	0,8318	1,1607	0,7462	0,2238	0,7990
9	205,0313	0,9021	0,4465	0,6379	0,9951	1,2029	0,7571	0,7381	1,0571	1,2100	1,1300	1,1200	1,0334	1,1600	0,9185	0,2756	0,9056
9,5	241,1367	1,0514	0,5466	0,7652	1,1912	1,2000	0,9260	0,9028	1,2929	1,2100	1,1300	1,1200	1,2693	1,1600	1,0996	0,3299	1,0130
10	281,2500	1,1925	0,6625	0,9100	1,1900	1,2000	1,1216	1,0935	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,3993	1,0686
10,5	325,5820	1,1925	0,7814	1,1142	1,1900	1,2000	1,1200	1,2893	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,4532	1,1067
11	374,3438	1,1925	0,9317	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,5121	1,1200
11,5	427,7461	1,1925	1,0836	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,5749	1,1344
12	486,0000	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,6299	1,1493
12,5	549,3164	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,6987	1,1539
13	617,9063	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,7563	1,1577
13,5	691,9805	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,8138	1,1616
14	771,7500	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,8891	1,1666
14,5	857,4258	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	1,2600	1,1600	1,0900	0,9672	1,1718
15	949,2188	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,0252	1,1700
15,5	1047,3398	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,1060	1,1700
16	1152,0000	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,1612	1,1700
16,5	1263,4102	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2129	1,1700
17	1381,7813	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2933	1,1700
17,5	1507,3242	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2900	1,1700
18	1640,2500	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2900	1,1700
18,5	1780,7695	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2900	1,1700
19	1929,0938	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2900	1,1700
19,5	2085,4336	1,1925	1,2528	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2900	1,1700
20	2250,0000	1,1925	0,0000	1,1144	1,1900	1,2000	1,1200	1,2800	1,2900	1,2100	1,1300	1,1200	0,0000	1,1600	1,0900	1,2900	1,1700

## Продолжение П.В.3.

## ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 174578

## Мобильная ветроэнергоустановка

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)*

Авторы: *Кончаков Евгений Иванович (RU), Таскин Андрей Васильевич (RU), Рахимов Фирдавс Мирзоумарович (TJ), Силин Николай Витальевич (RU)*

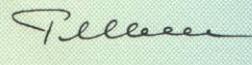
Заявка № 2017103385

Приоритет полезной модели 02 февраля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 20 октября 2017 г.Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 02 февраля 2027 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 184213

## Ветроэнергетическая установка

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)*

Авторы: *Силин Николай Витальевич (RU), Рахимов Фирдавс Мирзоумарович (TJ), Таскин Андрей Васильевич (RU)*

Заявка № 2018114126

Приоритет полезной модели 18 апреля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 18 октября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 18 апреля 2028 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 193425

## Стенд для испытаний вертикальных лопастей

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)*

Авторы: *Силин Николай Витальевич (RU), Аврамцева Маргарита Александровна (RU), Уэно Виктория Валерьевна (RU), Вейна Виталий Сергеевич (RU), Рахимов Фирдавс Мирзоумарович (TJ), Таскин Андрей Васильевич (RU)*

Заявка № 2019123145

Приоритет полезной модели 23 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 29 октября 2019 г.Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 23 июля 2029 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Илиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

на полезную модель

№ 208745

## Лопасть ветродвигателя

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ) (RU)*

Авторы: *Рахимов Фирдавс Мирзоумарович (TJ), Силин Николай Витальевич (RU), Киргизов Алифбек Киргизович (TJ)*

Заявка № 2021122913

Приоритет полезной модели 02 августа 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 января 2022 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 02 августа 2031 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0x756999C0008AEB78543D203DF619A6CD1  
Владелец Ильин Григорий Петрович  
Действителен с 24.12.2021 по 24.12.2022

Г.П. Пелиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 193227

## Устройство для предотвращения образования льда на водной поверхности

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)*

Авторы: *Коровкин Николай Владимирович (RU), Рахимов Фирдавс Мирзоумарович (TJ), Силин Николай Витальевич (RU), Киргизов Алифбек Киргизович (TJ)*

Заявка № 2019125364

Приоритет полезной модели 11 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 17 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 11 августа 2029 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 193703

Устройство для предотвращения образования льда на  
водной поверхности

Патентообладатель: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)**

Авторы: **Коровкин Николай Владимирович (RU), Рахимов Фирдавс Мирзоумарович (TJ), Силин Николай Витальевич (RU)**

Заявка № 2019125363

Приоритет полезной модели 11 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 11 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 11 августа 2029 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



## Приложение Д

## АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор, проректор по учебной работе Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими  
д.т.н. Махмадизода М.М.



2023г.

## Акт

о внедрении результатов диссертационной работы Рахимов Ф. М.  
в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика  
М.С. Осими

Комиссия в составе: председателя комиссии д.т.н. доцента Фохакова А.С., членов комиссии к.т.н. Бозорова Ш.А. и заведующего кафедрой «Электрические станции» к.т.н. доцента Султонзода Ш.М. настоящим подтверждаем, что результаты научного исследования Рахимова Ф.М. на тему «Исследование и разработка локальных электроэнергетических систем на базе вертикально-осевых ветроэнергетических установок карусельного типа», используются в учебном процессе на энергетическом факультете Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Разработанные в диссертационной работе методики определения оптимальных параметров вертикально – осевых ветроэнергетических установок, методик выбора состава и параметров источников при создании локальных электроэнергетических систем расположенных в заданных географических точках местности, а также оценке их работоспособности представляют собой современные подходы эффективного применения возобновляемых источников энергии для электроснабжения удаленных потребителей.

Основные положения и результаты диссертации включены в следующие дисциплины: «Физические основы возобновляемых источников энергии», «Энергетические сооружения и установки нетрадиционных возобновляемых источников энергии», «Режимы работы электроэнергетических систем» и «Режимы работы электрооборудования нетрадиционных возобновляемых источников энергии». Изучение указанных результатов позволяет повысить качество изучения вышеуказанных дисциплин с учетом современных научных и практических требований.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ:

Начальник управления учебной работы

Фохаков А.С.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник управления науки и инновации

Бозоров Ш.А.

Заведующий кафедрой «Электрические станции»

Султонзода Ш.М.