

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ХАСАНЗОДА НАСРУЛЛО

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЯХ С ДВУСТОРОННИМ ПОТОКОМ
ЭНЕРГИИ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

Новосибирск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В КОНЦЕПЦИИ SMART GRID И ПУТИ ЕЁ РЕШЕНИЯ	11
1.1 Исторический экскурс возникновения термина Smart Grid и его роль в развитие электрических сетей.....	11
1.2 Технология Smart Grid и её атрибуты	14
1.3 Построение инфраструктуры интеллектуальных сетей с учетом двустороннего потока энергии	17
1.4 Управление электропотреблением в интеллектуальных сетях	20
1.5 Краткий исторический экскурс в развитие ветроэнергетики	23
1.6 Управление генерацией альтернативными ветровыми источниками энергии	28
1.7 Обоснование применения нечеткой логики при проектировании и эксплуатации ветроэнергетических установок.....	33
1.8 Нормативно-правовая база использования альтернативных источников энергии	36
Выводы.....	43
2 ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА.....	44
2.1 Постановка задачи.....	44
2.2 Климат и география побережья Дальнего Востока.....	45
2.3 Ветровые ресурсы островов Русский и Попова	48
2.4 Описание системы электроснабжения острова Русский.....	53
2.5 Выбор гибридного накопителя электроэнергии.....	54

2.6	Математическая модель и оптимизация энергетического баланса генерирующего потребителя.....	61
2.7	Алгоритм и программная реализация предложенного метода оптимизации	71
2.8	Минимизация негативного влияния ветроустановок на окружающую среду	79
	Выводы.....	83
3	ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА	84
3.1	Постановка задачи.....	84
3.2	Оптимизационные алгоритмы для решения поставленной задачи.....	85
3.2.1	Алгоритм роя частиц.....	85
3.2.2	Алгоритм роя пчел	88
3.2.3	Алгоритм роя светлячков	90
3.2.4	Метод градиентного спуска	92
3.3	Отличительные черты используемых алгоритмов.....	92
3.4	Построение базы нечетких правил	94
3.5	Сравнительный анализ алгоритмов роевого интеллекта и градиентного спуска	99
3.6	Алгоритм и программная реализация предложенного метода оптимизации	107
	Выводы.....	112
4	НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	113
4.1	Постановка задачи.....	113

4.2	Нечеткая модель скорости ветра.....	114
4.3	Нечеткая регрессионная модель прогнозирования скорости и направления ветра.....	123
4.4	Оценка мощности ветроустановки на основе прогноза ветрового потока.....	126
4.5	Результаты прогнозирования.....	130
	Выводы.....	138
5	УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРИРУЮЩИМ ПОТРЕБИТЕЛЕМ КАК ЗАДАЧА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ.....	139
5.1	Постановка задачи.....	139
5.2	Понятие оптимального управления.....	139
5.3	Виды машинного обучения. Обучение с подкреплением.....	142
5.4	Понятия и принципы Q-обучения.....	145
5.5	Основы искусственных нейронных сетей.....	147
5.6	Нейросетевое Q-обучение.....	152
5.7	Применение принципов Q-обучения для управления генерирующим потребителем.....	155
	Выводы.....	162
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	163
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	167
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	168
	ПРИЛОЖЕНИЕ А СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ.....	181
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	184

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время все большее значение в электроэнергетике играют альтернативные и возобновляемые источники энергии, которые улучшают экологическую обстановку и позволяют отдельным активным электропотребителям иметь собственные источники генерации энергии. Наряду с этим, взаимосвязи между источниками генерации и электропотребителями усложняются за счет новых требований к балансированию режимов, что объясняется некоторой непредсказуемостью генерации энергии альтернативными источниками, а также необходимостью подключения дополнительных объектов в виде накопителей энергии.

При этом современная тенденция состоит в повышении роли информационных и компьютерных технологий для создания человеко-машинных систем поддержки принятия решений. Эти системы, в свою очередь, должны использовать те или иные методы искусственного интеллекта, которые позволяют выполнить интеллектуализацию режимных и производственных процессов в электроэнергетике. Наибольший интерес представляют новые методы искусственного интеллекта и информационных технологий, основанные на теории нечетких множеств, нечеткой логике, генетических алгоритмах и методах роевого интеллекта, позволяющие оптимизировать электрические режимы и минимизировать материально-финансовые затраты, что существенно повышает энергоэффективность, как отдельных устройств, так и системы в целом.

Таким образом, можно утверждать, что исследование и оптимизация режимов электропотребления в интеллектуальных электрических сетях с учетом подключения альтернативных источников энергии, их распределенности генерации и возможности создания двусторонних потоков энергии требует более высокого уровня интеллектуализации процессов управления в электроэнергетике.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в исследование и разработку интеллектуальных электрических систем и сетей внесли российские и зарубежные ученые: Н.И. Воропай, Н.В. Савина, С.Л. Кужеков, В.И. Гуревич, Б.Б. Кобец, Е.Н. Соснина, S.M. Amin, V.F. Wollenberg, C.W. Gellings, K. Fukushima, C.W. Gelling и другие.

Наряду с этим, развитию и применению альтернативных и возобновляемых источников энергии посвящены работы многих отечественных авторов, таких как: Е.В. Соломин, Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, В.З. Манусов, С.Н. Удалов, Ю.Г. Шакарян, А.А. Бубенчиков и другие.

Объект исследования – электрические сети и системы с активными электропотребителями, двусторонними потоками энергии от альтернативных генерирующих источников.

Предмет исследования – планирование и анализ оптимальных режимов электропотребления генерирующих потребителей в интеллектуальных электрических сетях.

Концепция работы заключается в разработке предложенных моделей и методов оптимизации режимов электропотребления электрических сетей с двусторонним потоком энергии и участием генерирующих потребителей на основе методов искусственного интеллекта.

Цель работы: разработка оптимизационных моделей и методов для интеллектуализации электрических сетей, включающих альтернативные источники энергии с возможностью ее аккумуляции.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнить критический анализ методов разработки интеллектуальных сетей (Smart Grid) и обоснование необходимости применения методов искусственного интеллекта.

2. Обосновать и разработать понятие генерирующего потребителя в концепции интеллектуальных сетей с двусторонним потоком энергии и информации, как подсистем различной природы.

3. Разработать условия оптимального использования альтернативных источников энергии в виде ветроресурсов для прибрежной зоны и островов Дальнего Востока Российской Федерации, как примера локальных систем с двусторонним потоком энергии.

4. Предложить метод оптимизации электропотребления с учетом приоритетности правил управления и применением алгоритмов роевого интеллекта для снижения материальных и финансовых затрат генерирующих потребителей.

5. Разработать математические модели прогнозирования скорости и направления ветра с помощью нечеткой регрессионной модели и вероятностных условий генерируемой мощности ветроустановки.

6. Рассмотреть возможность оптимизация электропотребления генерирующих потребителей, как задачи обучения с подкреплением.

Методы исследования: теория нечетких множеств, методы оптимизации на основе алгоритмов роевого интеллекта, методы анализа и балансирования установившихся режимов электроэнергетических систем, а также методы теории вероятностей и математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Введена концептуальная модель генерирующего потребителя для многоуровневой организации интеллектуальных сетей и их инфраструктуры, позволяющая устанавливать взаимосвязи между элементами и объектами различной природы.

2. Разработана новая математическая модель для генерирующих потребителей с учетом централизованного источника электроснабжения, альтернативных источников энергии и накопителя в виде системы нелинейных алгебраических уравнений, решение которой минимизирует расходы электропотребителя.

3. Показано, что разработанные модификации алгоритмов роевого интеллекта: роя частиц, роя пчел, роя светлячков, адаптированные для

решения задачи оптимизации электропотребления генерирующих потребителей, находят глобальный минимум целевой функции.

4. Разработан метод расстановки приоритетов и параметров правил оптимального управления генерирующим потребителем, отличающийся автоматической адаптацией под изменения внешних условий и учетом взаимодействия генерирующих потребителей между собой.

5. Предложена новая вероятностная оценка мощности ветроэнергетических установок на основе статистической оценки вероятностных характеристик скорости ветрового потока и величины дисперсии его отклонений от математического ожидания на заданном интервале времени.

Практическая значимость и реализация работы:

1. Предложена математическая модель оптимального распределения энергетических ресурсов для генерирующих потребителей островов Русский и Попова за каждый час на суточном интервале времени, с учетом энергии ветроустановок и возможностью ее аккумуляции.

2. Разработаны алгоритм и программная реализация метода оптимизации электропотребления в системе Smart Grid при двустороннем потоке энергии, что подтверждено свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ.

3. Разработаны алгоритм и программная реализация метода оптимизации режимов электропотребления при двусторонних потоках энергии, путем выбора приоритетности правил, на основе алгоритма роевого интеллекта, что подтверждено свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ.

4. Предложенные модели и методы излагаются в курсах «Интеллектуальные электрические сети», «Малая распределенная энергетика», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» Новосибирского государственного технического университета и Таджикского технического университета имени акад. М. С. Осими.

Положения, выносимые на защиту:

1. Введенное понятие генерирующего потребителя (ГП), в интеллектуальных электрических сетях, с двусторонним потоком энергии и информации.

2. Математическая модель оптимального электропотребления в системе, содержащей альтернативные источники энергии и накопители, обеспечивающие двусторонние потоки энергии.

3. Обоснование целесообразности использования алгоритмов роевого интеллекта для выбора оптимальной структуры электропотребления генерирующим потребителем с учетом приоритетности правил.

4. Обоснование возможности оптимизация электропотребления на основе обучения с подкреплением.

5. Модель вероятностной оценки предельной генерируемой мощности с учетом флуктуации ветрового потока.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

- пункт 6 – «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;
- пункт 8 – «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике»;
- пункт 13 – «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов, подтверждается корректным использованием теории электроэнергетических систем, теоретических основ электротехники, теории нечетких множеств и нечеткой логики, а также методов роевого интеллекта, которые теоретически обоснованы, хорошо апробированы и подтвердили правомерность их использования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах и технических совещаниях:

- V международная научно-практическая конференция «Наука в современном мире»: науч. журнал «Архивариус», г. Киев, Украина, 21 января 2016 г.; XXV Международная научно-практическая конференция «Инновационное развитие технических наук в XXI веке»: Международное научное объединение "Prospero" г.Москва, Россия, 26-27 февраля 2016 г.;
- международная научная конференция «Современные технологии и развитие политехнического образования» Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, 19-23 сентября 2016 г.;
- 13th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2018), Harbin, China, May 30-June 1, 2018;
- International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018). Chelyabinsk, Russia, 15-18 May, 2018;
- международная научно-практическая конференция: «Альтернативная и интеллектуальная энергетика», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия, 6-8 декабря 2018.

Публикации. По материалам исследований диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе 5 работ в рецензируемых изданиях из перечня, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 2 работы индексируются в наукометрических базах Web of Science и Scopus, 7 работ в прочих изданиях. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 60 %.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, приложений и списка литературы, включающего в себя 110 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 187 страниц, включая 24 таблиц и 48 рисунков.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В КОНЦЕПЦИИ SMART GRID И ПУТИ ЕЁ РЕШЕНИЯ

1.1 Исторический экскурс возникновения термина Smart Grid и его роль в развитие электрических сетей

В настоящее время во всех странах возрастает потребление электроэнергии, причем электропотребители ожидают возможность выбора поставщиков в условиях конкурентного энергетического рынка, улучшения показателей надежности электроснабжения и снижения тарифов на электроэнергию.

В этих условиях реализация концепции Smart Grid (умных сетей) является наиболее подходящим решением. Электроэнергетическая система (ЭЭС), построенная согласно принципам Smart Grid, передает не только энергию, но и информацию, поэтому потенциальный электропотребитель любого уровня, получает возможность взаимодействовать с ЭЭС: прогнозировать и планировать потребление, выбирать поставщика и влиять на тарифы.

Термин Smart Grid до сих пор не имеет четкого терминологического эквивалента в русском языке. К наиболее распространенным русскоязычным эквивалентным терминам относится «Интеллектуальная сеть энергетики», «Интеллектуальная электроэнергетическая система», «Активно-адаптивная сеть». В настоящее время имеется множество определений Smart Grid, при этом каждая из сторон-участниц процесса (энергокомпания, энергопотребитель, компании решающие вопросы автоматизации энергообъектов, системные интеграторы и другие) видит в Smart Grid свои функции и задачи, и понимает по-своему [1–3].

Впервые термин Smart Grid использован авторами S.M Amin и B.F. Wollenberg в их публикации «к направлению интеллектуальной сети» [4].

Применение этого термина за рубежом было связано с чисто рекламными названиями специальных контроллеров, предназначенных для управления режимом работы и синхронизации автономных ветрогенераторов, отличающихся нестабильным напряжением и частотой, с электрической сетью. Затем термин стал применяться для обозначения микропроцессорных счетчиков электроэнергии, способных самостоятельно накапливать, обрабатывать, оценивать информацию и передавать ее по специальным каналам связи и даже через интернет. В последние годы использование Smart Grid расширилось на системы сбора и обработки информации, мониторинга оборудования в электроэнергетике [5–7].

Формально термин Smart Grid был оформлен в 2007 году в законодательном акте об энергетической независимости и безопасности США. Так была названа технология модернизации национальной электроэнергетической системы с целью защиты, контроля и оптимизации энергопотребления всех элементов и участников сети.

Smart Grid представляет собой автоматизированную систему, обеспечивающую двусторонний поток электрической энергии и коммуникативную информацию между энергообъектами и потребителями за счет применения новейших технологий, инструментов, которые позволяют повысить эффективность работы электросетевого комплекса [8, 9].

Наиболее масштабные программы и проекты разработаны и реализуются в США и странах Евросоюза, Канаде, Австралии, Китае и Корее: так, например, в США такая программа имеет статус национальной и осуществляется при прямой поддержке политического руководства страны, а в странах Европейского Союза для координации работ и выработки единой стратегии развития электроэнергетики в 2004 году создана технологическая платформа Smart Grids – «Европейская энергетическая система будущего», конечной целью, которой является разработка и реализация программы развития Европейской энергетической системы до 2020 года и далее.

Концепции Smart Grid в развитых странах предполагает формирование четкого стратегического видения целей и задач развития электроэнергетических систем, отвечающая новым более высоким требованиям промышленного производства и общества, а также: государства, потребителей, экономики, науки, бизнес-сообщество и других отраслей [10–12]. Она определяет требования к электроэнергетическим системам для реализации концепции, в которой новым технологиям и устройствам отводится роль одного из основных способов и инструментов осуществления прогрессивных преобразований [13, 14].

В России Smart Grid рассматривается как эффективно функционирующая система, в которой при наличии адаптации характеристик оборудования в зависимости от режимной ситуации, выполняется активное взаимодействие генерации и потребления, осуществляемое благодаря встраиваемым современным информационно-диагностическим системам. Предусматривается, что последние должны производить автоматическое управление всеми элементами, включенными в процессы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Такое назначение интеллектуальных сетей должно не только значительно сократить потери электроэнергии, но и позволить более эффективно использовать имеющуюся энергию, интегрировать и распределять энергию из альтернативных источников. Кроме того, в автоматическом режиме диагностировать и устранять возникающие проблемы, поставлять электроэнергию в необходимом количестве, сокращать затраты энергоресурсов с уменьшением выбросов в атмосферу углекислого газа.

На сегодняшний день накоплен некоторый практический опыт по разработке и внедрению технологии Smart Grid и её элементов в ЭЭС России [15, 16].

1.2 Технология Smart Grid и её атрибуты

Следует рассматривать Smart Grid как концепцию инновационного преобразования электроэнергетики на основе целостного системного видения ее роли и места в современном и будущем обществе. Это концепция определяет требования к электроэнергетике, подходы к обеспечению этих требований, принципов и способов осуществления необходимого технологического базиса для реализации концепции, в которой новым технологиям и устройствам отводится роль одного из основных способов и инструментов его осуществления.

Наименованию технологии «Smart» можно приписывать расширенный смысл, исходя из её аббревиатуры, составленной из первых букв английских слов, задающих соответствующие системные критерии качества цели:

S (specific – конкретный, определенный, индивидуальный) *каждая цель должна быть описана как определенный, конкретный результат;*

M (measurable – измеряемый, соизмеримый, количественно оцениваемый) *цель должна быть измеримой с помощью конкретных индикаторов и стандартных процедур измерения;*

A (assignable – объяснимый, имеющий определённую причину, назначаемый, с функцией программирования) *цель должна быть объяснимой, обоснованной, доказанной, жизненно необходимой для субъекта и/или организации;*

R (realistic – реальный, практический, достижимый, приемлемый) *цель должна быть реально достижимой, целесообразной и достаточно объективной;*

T (time-related – связанный со временем, зависящий от времени, динамический) *цель должна быть стратегически определена на временном интервале, иметь конкретные сроки достижения, с контролем ее реализации.*

Основные атрибуты концепции Smart Grid национальной лабораторией энергетических технологий Министерства энергетики США, Европейской комиссией Евросоюза и по мнению авторов, определяются следующим образом:

1. Доступность – организация поставок электроэнергии в необходимых объемах и регламентируемого качества, оплачиваемую потребителем согласно его запросам и требованиям. Сеть должна быть доступна для новых пользователей.

2. Надёжность – способность сохранять работоспособность в течение длительного времени, противостоять различного вида физическим и информационным возмущениям, ограничивать глубину (тяжесть и последствия) отказов функционирования и обеспечивать минимальное время восстановления работоспособности после отказов. Сеть должна гарантировать защищённость и качество электроэнергии в соответствии с требованиями цифрового века.

3. Гибкость – сеть должна подстраиваться под нужды потребителей электроэнергии, быть способна к адаптации при быстрых функциональных изменениях, иметь способность к реконфигурации и развитию.

4. Эффективность – обеспечение повышенного уровня использования энергетических ресурсов различных видов, инноваций и возможностей оборудования на всех этапах производства, передачи и распределения электроэнергии.

5. Обеспечение безопасности – исключение каких-либо происшествий, аварий или катастроф производственного характера опасных для человека и негативно влияющих на окружающую среду, а также обеспечение электробезопасности и конфиденциальности субъекта.

6. Способность к аккумулированию энергии – современные системы электроснабжения должны балансировать потребление и предложение электроэнергии в любой момент времени, обладать достаточно гибким управлением и обеспечивать оптимальную энергоэффективность.

7. Стимулирование активности электропотребителя –

предоставление спектра возможностей потребителю для самостоятельного изменения функциональных и качественных свойств, получаемого вида энергии на основе своих потребностей и технических возможностей генерирующих источников, включая возобновляемых источников энергии.

8. Экономичность – снижение уровня потерь электроэнергии на этапах ее генерации, передачи, распределение и потребления, снижение затрат на развитие и поддержание электроэнергетического комплекса и снижение уровня тарифов на электроэнергию. Наибольшую ценность представляют инновационные технологии и средств коммуникации совместно с эффективным управлением и повышения качества функционирования в концепции Smart Grid.

9. Снижение экологического давления на окружающую среду – переход к новым инновационным решениям, включая технологии сверхпроводимости и зеленой энергетики, обеспечивающих снижение негативно влияющих экологических воздействий до минимального уровня.

Однако в Smart Grid, как показано на Рисунке 1.1, поддерживаются двусторонние потоки электроэнергии и информации, так что покупатели электроэнергии могут приобретать рыночную информацию о состоянии сети и возвращать энергию в сеть. Таким образом, обмен информацией и мощностью становятся более гибкими и повышают эффективность управления мощностью для оптимального распределения электроэнергии. Посредством периодических информационных сообщений центр управления контролирует сеть в режиме реального времени, а генерирующие потребители (ГП), приобретают обновленную информацию о тарифах, также в реальных условиях. Можно считать, что двусторонние потоки электроэнергии и информации являются основой управления мощностью в режиме on-line и многими другими приложениями Smart Grid.

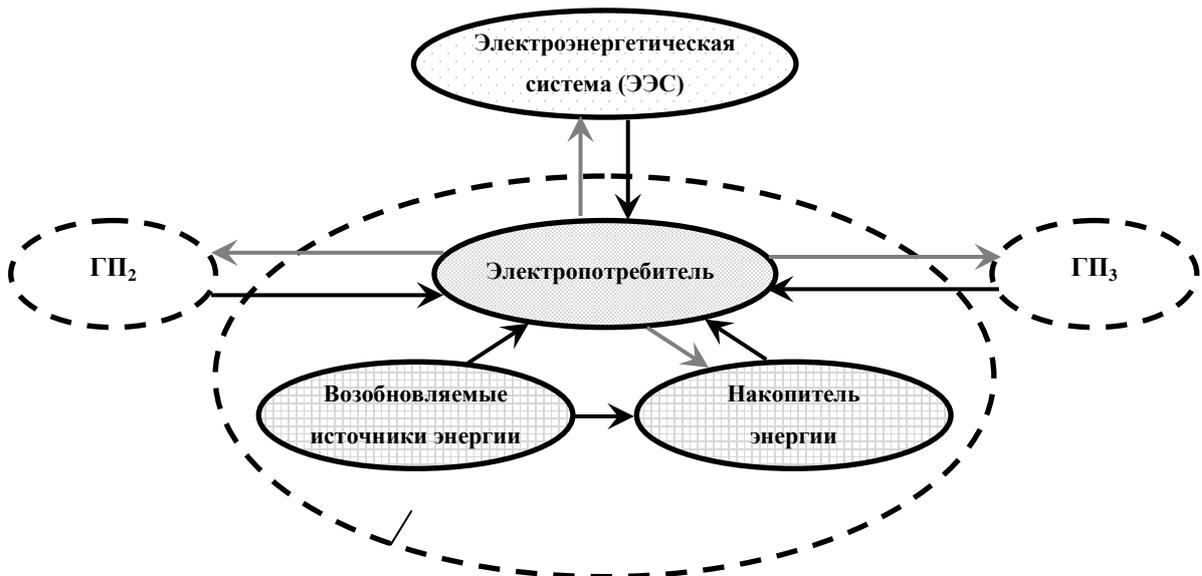


Рисунок 1.1 – Структура интеллектуальной сети

1.3 Построение инфраструктуры интеллектуальных сетей с учетом двустороннего потока энергии

Тенденция к увеличению распределенной генерации позволяет перейти к некоторой интеллектуальной парадигме, так называемой «интернет энергии». Она позволяет генерирующим потребителям оптимальным образом, в соответствии с потребностью электропотребителей распределять электроэнергию по интеллектуальной сети.

Концепция интеллектуальной сети представляет собой общую картину будущей энергосистемы, которая поддерживается интеллектуальными распределенными устройствами и коммуникационными технологиями. В [17] интеллектуальная сеть представляется, как электрические сети, состоящие из локальных сетей, которые представляют собой автономные объекты на основе требований, разных электропотребителей. Предполагаемая выработка электроэнергии и управление возобновляемыми источниками энергии [18] внедрена в качестве системы распределенной электроэнергии, которая взаимодействует с бытовыми потребителями и промышленными заказчиками, имеющими возобновляемые источники энергии и накопители.

Наряду с тем, что интеллектуальная сеть имеет различные типы компонентов: электропотребители, Microgrid (микросеть), энергетические узлы и другие, каждый из компонентов можно рассматривать как генерирующий потребитель. Генерирующий потребитель, является общим термином, относится к системе, которая самостоятельно управляет своими энергетическими ресурсами и возможность двунаправленного обмена энергией с окружающей сетью. ГП может быть таким же простым, как обычный электропотребитель, который самостоятельно управляет своими энергетическими ресурсами (такими как приборы, ВИЭ, системы аккумулирования энергии, электромобили и т. д.).

Генерирующий потребитель может локально генерировать электроэнергию, потреблять или аккумулировать её в системах накопителей электроэнергии для дальнейшего использования. При этом осуществляется возможность двунаправленного обмена энергией, так как электропотребители могут импортировать или экспортировать избыточную энергию в интеллектуальную сеть. С учетом того, что в системе количество электропотребителей увеличивается, значительная доля электроэнергии будет обмениваться локально между генерирующими потребителями.

Возможность автономной работы, способность к агрегированию в слои, статическая и динамическая адаптация интеллектуальных сетей, основанных на генерирующих потребителях, тесно связаны и соответствуют свойствам холонической системы. При этом соответствующим образом можно моделировать каждого генерирующего потребителя, как холона, а всю интеллектуальную сеть как холархию.

Концепция холон (holon), была разработана философом Кестлером (Koestler) [19]. Он придумал слово «holon», объединив греческое слово «holos», что означает «целое», и греческий суффикс «on» - «часть». Холон относится к отдельной логической сущности, которая является как целой, так и частью. Холоны в основном автономны, что позволяет им самостоятельно регулировать свое существование. Холоны могут быть повторно

организованы на разных уровнях агрегирования, чтобы сформировать иерархию саморегулируемых холонов, которая в этом случае называется холархия (holarchy). Диаграмма, представляющая холархию, показана на Рисунке 1.2.

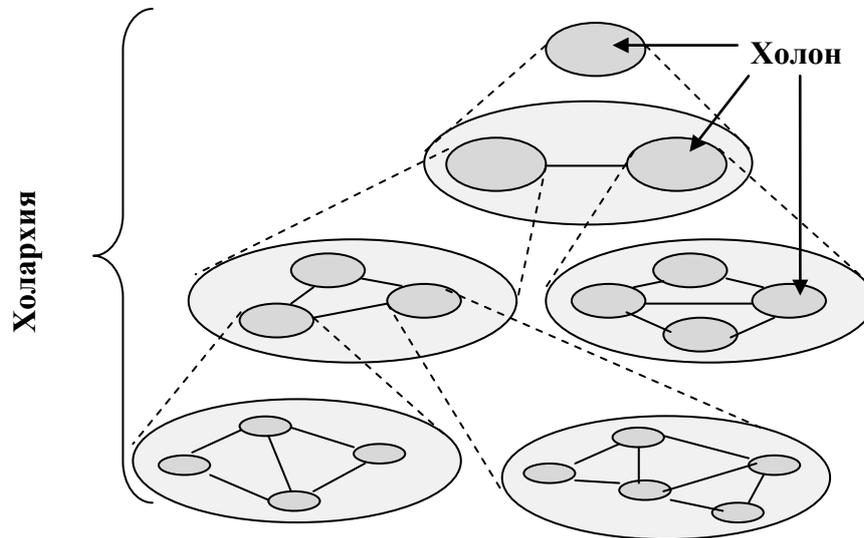


Рисунок 1.2 – Холархия как организация холонов

Холоническая концепция обладает преимуществом и значительными отличительными особенностями по сравнению с иерархическими и агентскими технологиями. В отличие от холархии, в иерархии степень автономности элемента сильно ограничена из-за отношения, ведущего / ведомого, которое существует между слоями объектов [20, 21].

Это способность к автономии ГП-холонов создаёт условия распределённой генерации в интеллектуальной сети, которой в противном случае было бы очень сложно управлять централизованно. Автономия ГП-холонов существенно усложняет координацию интеллектуальной системы, но соответствующие управленческие механизмы могут быть разработаны для достижения желаемых атрибутов интеллектуальной сети. Автономия также способствует энергосбережению в процессе электропотребления.

Аналогичным образом соседние интеллектуальные электрические сети могут сформировать районные электрические сети, как более крупный ГП-холон на следующем уровне агрегирования. Такая кластеризация может быть

повторена на разных уровнях агрегирования, чтобы эффективно адаптироваться к изменениям в окружающей среде (Рисунок 1.3).

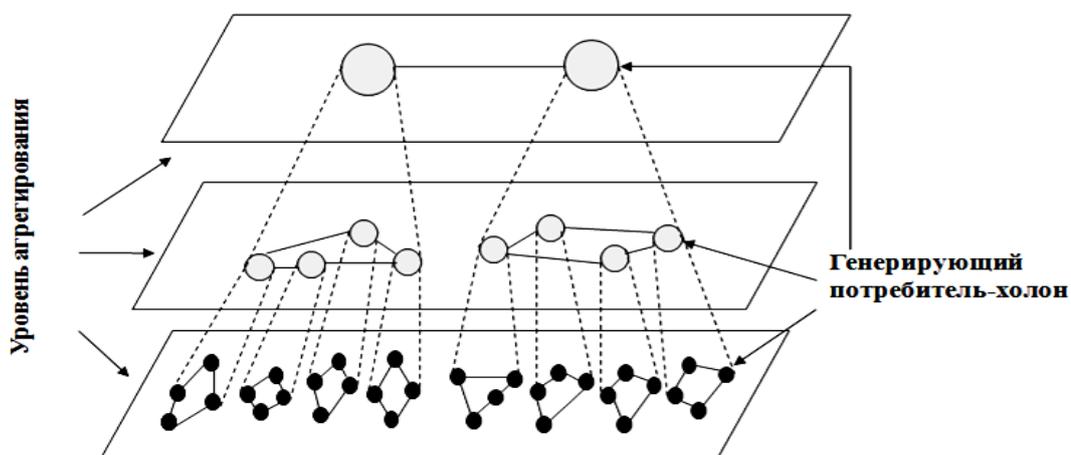


Рисунок 1.3 – Интеллектуальные сети из ГП-холонов

1.4 Управление электропотреблением в интеллектуальных сетях

Как обсуждалось выше, генерирующие потребители могут автономно управлять своими энергетическими ресурсами, в том числе за счет альтернативных источников энергии. Кроме того, группа ГП может сформировать интеллектуальные электрические сети, чтобы локально обмениваться энергией друг с другом. При этом ГП могут иметь дело с основной энергосистемой, как важная и особенная составная часть, чтобы получить более широкие возможности для ведения коллективных заказов и переговоров на энергетическом рынке. В таких энергетических сетях управление графиком нагрузки является достаточно сложной задачей из-за неопределенности различных факторов.

Во-первых, выработки возобновляемых источников энергии для ГП могут быть неустойчивыми в зависимости от переменных погодных условий. Например, производство энергии с помощью ВЭУ зависит от скорости ветра. Изменчивость таких источников энергии приводит к нестабильности генерации энергии со стороны источника питания и некоторой непредсказуемости будущего баланса энергии. Соответственно, сторона,

генерирующая энергию, становится более нестабильной (изменчивой) и менее контролируемой, поскольку все источники, зависящие от погодных условий, подключены к электроэнергетической сети.

Другим фактором является ожидаемое проникновение новых технологий с большими потребностями в электроэнергии. Ожидается, что в ближайшем будущем возрастающая тенденция к электрификации транспортного сектора приведет к массовому присутствию электрифицированных транспортных средств электромобилей (ЭМ). Наличие электромобиля, удваивает средний спрос на электроэнергию домашнего хозяйства [22, 23], поэтому их массовое присутствие оказывает большое влияние на электрическую нагрузку в сети. Потребность в электроэнергии таких устройств, связана с поведением жителей домашних хозяйств (домов). Например, жители домов могут выбрать для зарядки своих ЭМ, как только они вернутся домой с работы вечером. Если несколько домохозяйств, заряжает свои ЭМ одновременно, то спрос на электроэнергию в сети может резко повыситься.

Изменчивость и низкая управляемость со стороны генерации и большие требования к новым устройствам создают различные проблемы. Во-первых, необходимо достаточное количество дорогостоящих и углеродоемких тепловых электростанций наряду с ВИЭ для компенсации их неравномерной генерации. Более того, пики мощности могут привести к повреждению инфраструктуры и дорогостоящей модернизации оборудования. Проблема становится критической, поскольку вероятность того, что домохозяйства одновременно потребляют много электроэнергии из сети или одновременно вводят энергию обратно в сеть, не может быть проигнорирована, так как модели потребления и производства домохозяйств в районе взаимозависимы. Время, когда жители домохозяйств возвращаются с работы и начинают заряжать свои электромобили, и наличие при этом ветровой энергии не взаимосвязаны.

Электроэнергетические сети обладают некоторой гибкостью, которая может быть направлена для смягчения этих проблем. Например, ГП домохозяйства имеют системы накопления электроэнергии, которые могут быть буфером между спросом и предложением электроэнергии. Действительно, системы распределенного накопления энергии становятся все более целесообразными на уровне домашних хозяйств, особенно вместе с неравномерной распределенной генерацией, поскольку они могут повысить гибкость спроса и снизить расходы домашних хозяйств на электроэнергию [24]. Системы накопления энергии могут быть заряжены, когда происходит избыточное производство электроэнергии, так что сохраненная энергия подается позже, когда централизованное электроснабжение недостаточно.

Электромобили также обеспечивают значительную гибкость, учитывая, что они не работают в 95% случаев, более 90% всех транспортных средств, припаркованы в любой момент времени, причем более 25% из них припаркованы дома. Поэтому зарядка может быть удобно перенесена на периоды избытка собственной выработки энергии. Кроме того, технология «автомобиль-сеть» дает возможность возвращения электроэнергии из ЭМ обратно в сеть во время пиковых периодов электропотребления, а также некоторые бытовые приборы, такие как посудомоечная машина, также обеспечивают значительную гибкость в использовании.

Потенциал гибкости ГП можно использовать для достижения, например, такой желаемой цели, как минимизация неравномерности (изменчивости) суточного графика электропотребления в электрической сети. При этом автономные ГП имеют тенденцию и возможность использовать свою гибкость, чтобы эгоистично максимизировать свои индивидуальные выгоды. Таким образом, использование гибкости требует интеллектуальной координации автономных ГП в энергетической сети.

Существуют различные работы, направленные на интеграцию систем накопления электроэнергии и электромобилей в энергосистему. Системы накопления энергии используются для различных целей, таких как

улучшение качества электроэнергии [25, 26], экономическая оптимизация [27, 28] и формирование графика нагрузки [29, 30].

Одним из подходов является централизованная стратегия управления нагрузкой [31], где все энергетические ресурсы запланированы централизованно. Другой подход – это стратегия децентрализованного управления нагрузкой, в рамках которой пользователи сети сотрудничают друг с другом для достижения единой, общей цели [32]. Стратегия управления нагрузкой, в соответствии с которой отдельные части сети используют аналогичные механизмы обучения для адаптации своих индивидуальных графиков нагрузки к прогнозируемому общему графику энергетического оптового рынка.

Влияние внедрения ЭМ на спрос электроэнергии представлено в [33, 34], тогда как его экономические последствия для электрических сетей описаны в [35]. Технические последствия, такие как загрузка трансформатора подстанции, рассматриваются в [36]. В [37] представлена концептуальная структура, включающая техническое управление сетью и рыночную деятельность, которая занимается интеграцией ЭМ в энергосистему.

1.5 Краткий исторический экскурс в развитие ветроэнергетики

Энергия ветра использовалась, по крайней мере, еще три тысячелетия назад. Но до конца девятнадцатого века ветер использовался только в качестве механической силы для перекачки воды или молотбы зерна. Самые ранние упоминаемые мельницы были с вертикальной осью вращения. Эти мельницы имели простую конструкцию: вертикальные бревна крутились под действием ветра, размалывая зерно. Первые письменные описания мельниц горизонтального типа встречаются в исторических документах Персии, Тибета и Китая около 1000 лет до н.э. Из Персии и Ближнего Востока мельницы с горизонтальной осью вращения распространились в Европу. К 1800 году в одной только Франции работало около 20000 ветряных мельниц,

а в Нидерландах 90% мощности, используемых в промышленности, основывалось на энергии ветра. Рост промышленности затем привел к постепенному исчезновению ветряных мельниц, но все же в 1904 году ветровая энергия еще обеспечивала 11% мощности голландской промышленности, а в Германии использовалось более чем 18000 ветряных мельниц.

Популярность ветряных мельниц в США достигла своего пика в период между 1920 и 1930 годами, когда по всей стране было установлено около 600 000 мельниц.

В начале двадцатого века почти повсеместно использование ветра было заменено на двигатели внутреннего сгорания, которые обеспечивали более постоянные выходные значения мощности.

В начале 1970-х, с резким повышением цен на нефть, интерес к использованию энергии ветра вновь возрос [38, 39]. На этот раз, однако, основное внимание было сосредоточено на получении электрической энергии, а не механической [40]. Ветровая энергетика оказалась наиболее привлекательным решением мировых энергетических проблем. Ведь ветроэнергетика не загрязняет окружающую среду и не зависит от цен на ископаемое топливо. Более того, ветровые ресурсы присутствуют в любой части мира и их достаточно, чтобы обеспечить растущий спрос на электроэнергию [41, 42].

Началом ветроэнергетики считается 1890 год, когда в Дании инженером Пол Лакором была построена ветроэнергетическая установка (ВЭУ) мощностью 300 Вт с диаметром в 23 м для выработки электроэнергии. Уже к 1910 году в Дании были введены в эксплуатацию несколько сотен ВЭУ с номинальными мощностями от 5 до 25 кВт.

В 1925 году в США появились коммерческие двух и трех лопастные ВЭУ. Наиболее распространенными марками были «Windcharger» (от 200 до 1200 Вт) и «Jacobs» (от 1,5 до 3 кВт). Ветроэнергетические установки использовались в основном на фермах для зарядки аккумуляторных батарей,

от которых получали питание радиоаппаратура, освещение и малая бытовая техника напряжением 12, 32 и 110 В.

В течение 1910-1940 годов датские инженеры компании «Smidth» работали над улучшением характеристик энергоэффективности ВЭУ для уменьшения дефицита мощности в стране. Построенные в эти годы ВЭУ являются предшественниками современных ветроустановок. Турбины «Smidth» были первыми ВЭУ, в которых использовались современные конструкции, учитывавшие аэродинамические показатели местности. В то же время, американский инженер Палмер Путнам построил в Вермонте самую крупную ВЭУ в компании «Morgan Smidth Co» диаметром 53 метра и мощностью 1250 кВт. Этот рекорд мощности был побит только в 1970 году.

В 1950-е годы Йоханнес Пуль в Дании разработал и установил ВЭУ, выработавшую около 2,2 млн. кВт/ч электроэнергии в период с 1956 по 1967 г. В то же время, немецкий инженер Ульрих Хуттер построил высокоэффективную ВЭУ мощностью 100 кВт в 1957 году.

С течением времени происходит планомерный рост установленной мощности турбин и как следствие геометрических размеров энергетического оборудования, устанавливаемого в гондоле, диаметра ротора, высоты опор. Если в 1980-е годы установленная мощность серийных турбин не превышала 100 кВт, то в настоящее время крупные серийные турбины имеют установленную мощность от 3 до 8 МВт [43].

В докладе международного энергетического агентства (МЭА) «Технологическая дорожная карта ветроэнергетики 2009 года», инвестиционные затраты на строительство и ввод в эксплуатацию наземных установок ветряных генераторов оценивался в диапазоне от 1450 до 2600 долларов США за кВт. В аналогичном докладе от 2013 года, диапазон расширился – от 1110 долларов США за кВт в Китае до 2600 долларов США за кВт в Японии. Данные по США и Западной Европе находятся в середине диапазона – 1600 в США и 1700 в Европе [44].

При этом по данным МЭА, полная приведенная стоимость электроэнергии с учетом всех затрат снизилась в США с 2008 до 2015 года более чем на 30 % [45].

Ветровая энергия неисчерпаема, так как кинетическая энергия движения воздушных масс берет начало в энергии солнечного излучения. Ветряная энергия является внутренним источником энергии любой страны, а также относится к одной из самых экономически эффективных технологий использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), доступных в настоящее время - в среднем 0,02 долл./кВт·ч за электроэнергию, получаемую на новых ветряных электростанциях США [46].

В 2015 году общий объем установленной мощности ветроэнергетики увеличился на 57,4 ГВт – прирост на 22% за 2014 год. За последние пять лет общая мощность ветряной энергетики выросла на 50% [47].

Профильной международной организацией является Всемирная ветроэнергетическая Ассоциация (World Wind Energy Association) и Глобальный Совет по ветроэнергетике (Global Wind Energy Council, GWEC), на сайте которого размещена интерактивная карта размещения ветряных станций (Таблица 1.1) [48].

Таблица 1.1 – Общая мощность и прирост ветроэнергетики в 2014 – 2015 г., ГВт

Страна \ Годы	2014	Прирост в 2015	2015
Китай	114,6	30,8	145,4
США	65,4	8,6	74
Великобритания	12,6	1	13,6
Канада	9,7	1,5	11,2
Франция	9,3	1,1	10,4
Италия	8,7	0,3	9
Бразилия	6	2,8	8,8
Германия	39,2	6	45,2
Индия	22,5	2,6	25,1
Испания	23	0	23
Итого	311	54,7	365,7

Годовая выработка на ветряных электростанциях в 2015 году выросла на 15 % и составила 841 ТВт·ч (3% от всей выработанной энергии). Более половины этого объема пришлось на три страны: США – 190,9 ТВт·ч, Китай – 186,3 ТВт·ч и Германия – 88 ТВт·ч.

Некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику, в частности, на 2015 год в Дании с помощью ветрогенераторов производился 42% вырабатываемого электричества, в Ирландии – 23%, в Португалии – 23,2%, в Испании – более 18%.

Развитие ветроэнергетики происходит также за счет замены старых ветряных турбин на новые, более мощные, эффективные и надежные, с автоматическим управлением. В 2015 году не менее 300 турбин общей мощностью 300 МВт было заменено в Европе, 2 турбины в Японии (0,7 МВт) и одна в Австралии (2 МВт) [43].

Производство ветряных турбин расположено, в основном, в Китае (компания Goldwind, 12,5% мирового рынка за счет поставок на внутренний рынок), в Европе (компания Vestas, Дания, 11,8% рынка) и в США (GE Wind, 9,5%).

Согласно предварительным статистическим данным, опубликованным немецкой Ассоциацией по ветровой энергетике – German Wind Energy Association (BWE), в Германии 2016 были введены в эксплуатацию 156 новых офшорных ветровых турбин общей мощностью 818 МВт, в результате чего общая мощность офшорной ветровой энергетике превысила 4,1 ГВт. Выработка офшорной энергетике выросла на 57% – с 8,3 ТВт·ч в 2015 г. до 13 ТВт·ч в 2016 г.

В декабре 2016 начала работу первая в США морская ветряная станция около Род-Айленда, состоящая из пяти 170-метровых ветряных турбин мощностью 6 МВт каждая [49].

Морская ветроэнергетика - относительно новая технология, и пока не получила должного распространения ввиду высокой стоимости строительства и непростых условий окружающей среды. По некоторым

прогнозам, она выйдет на конкурентный уровень по цене к 2025 году. С развитием технологии морские станции все дальше и глубже отдаляются от берега. В 2014 средняя удаленность от берега присоединенных к сети ветровых станций – 32,9 км, при средней глубине моря 22,4 м, в 2015 средняя удаленность – 43,3 км, глубина – 27,1 м [48]. Поскольку, чем дальше от берега, тем сильнее ветер, перспективнее всего инвестировать в размещение плавающих офшорных станций на столбовидных буйях с полупогружаемыми платформами. Самая большая плавающая станция мощностью 7 МВт находится у берегов Японии. В 2017 году компания Statoil, специализирующаяся на морских ветряных станциях, запускала первого плавучего ветряного парка Peterhead у берегов Шотландии мощностью 30 МВт, в котором использованы инновационные турбины Hylwind, разработанные Statoil. Данная разработка позволит сократить стоимость плавучих офшорных станций на 60–70%. В декабре 2016 года модернизированная морская ветряная турбина, установленная в Датском Национальном центре испытания больших ветрогенераторов в городе Остерлид, за сутки произвела рекордные 216 МВт·ч электроэнергии. Ветряная турбина на 9 МВт компании MHI Vestas Offshore Wind – совместного предприятия Vestas Wind Systems и Mitsubishi Heavy Industries – представляет собой усовершенствованную версию турбины V164-8 МВт, которая была выпущена в апреле 2014 года и установила предыдущий рекорд, выработав 192 МВт·ч энергии за 24 часа.

1.6 Управление генерацией альтернативными ветровыми источниками энергии

Управление и регулирование режимов ветроэнергетических установок существенным образом связаны с режимом электропотребления [50, 51]. С точки зрения экономического эффекта, используемые ВЭУ должны быть по возможности большими: от 1-8 МВт [52]. При этом необходимо учитывать

сложность регулирования мощности, таких ВЭУ из-за большой массы ветроколеса.

Цели управления ветроэнергетическими установками следующие [53]:

- выработка максимальной мощности в условиях вероятностного характера энергоносителя – ветрового потока;
- ограничение частоты вращения для предотвращения механического разрушения установки.

При этом задачи управления состоят в следующем [54]:

- обеспечение автоматической работы без участия персонала;
- обработка и прием сигналов и команд, необходимых для функционирования ВЭУ;
- изменение угла атаки лопасти;
- регулирования скорости вращения ветроколеса в зависимости от характеристик ветрового потока;
- поворот гондолы на необходимый угол;
- поддержание работоспособности при заданных эксплуатационных условиях;
- периодический контроль и диагностика собственных подсистем и оборудования ВЭУ, периодический самоконтроль и диагностика систем и оборудования ВЭУ;
- работа в составе ветроэлектростанций (ВЭС);
- стойкость к помехам.

Следует отметить, что классические системы регулирования не приводят к удовлетворительным результатам, когда исходное описание модели неполное или неточное. При этом тенденция увеличения сложности математической модели, связанное с желанием повысить их адекватность и учесть все большее число различных факторов, не приводит к улучшению регулирования.

Целесообразно воспользоваться методами, которые учитывают неполноту и неточность исходных данных. Именно в таких условиях

нечеткое регулирование оказывается наиболее целесообразным. Нечеткий регулятор функционирует в терминах правил «Если ..., то ...» и, значит, может обеспечить исполнение дружественного и понимаемого человеком представления знаний. Но при этом становится понятно, что использование регулятора нечеткого типа вызывает потери информации, так как не существует единственного преобразования количественной категории в качественное представление.

Поскольку регулирование с использованием нечеткой логики производится по базе правил, составленных по опыту эксперта (эмпирически), необходимо оценивать эффективность данного типа регулирования. Предполагается, что применение теории нечетких множеств в системе регулирования мощности ВЭУ позволит существенно повысить его эффективность, заключающееся в выдаче изначально обоснованных выходных воздействий.

Самым простым методом аэродинамического регулирования мощности ВЭУ является хвостовое регулирование, где хвост действует как флюгер [55]. Когда ветер направлен перпендикулярно ветроколесу, на поверхности хвоста не возникает сил, которые отклоняли бы его в ту или иную сторону. При изменении направления ветра за счет бокового давления гондола ВЭУ разворачивается до тех пор, пока её направление не совпадёт с направлением ветра. В некоторых случаях, при увеличении скорости ветра ветроколесо начинает вращаться с чрезмерной скоростью и это требует вывода ветроустановки в режим ожидания.

Применяются также конструкции лопасти с боковой лопатой, когда оперение лопаты выносится за пределы поверхности, ометаемой ветроколесом. При малых скоростях ветра ветроколесо поворачивается перпендикулярно направлению ветра. При увеличении скорости ветра лобовое давление на лопату растет и становится больше, чем усилие предварительной затяжки пружины между лопатой и хвостовым оперением. Ветроколесо начинает выводиться из-под ветра и при скорости ветра больше

20 м/с полностью становится перпендикулярно основному направлению ветра. В обратное положение при снижении скорости ветра ветроколесо устанавливается силой натяжения пружины [56].

Также одним из самых простых способов установки на ветер является расположение ветроколеса сзади башни. Но данный метод требует соблюдения определенных условий: вылет ветроколеса относительно центральной оси башни должен иметь величину, обеспечивающий надежное установление ветроколеса перпендикулярно направлению ветра. Если расположить ветроколеса позади башни на достаточно большом вылете, то на систему будет действовать аэродинамический момент, действием которого ветроколесо устанавливается позади башни в направлении ветра, так как само ветроколесо, выполняет роль флюгера.

В системах аэродинамического регулирования также применяется виндрозное регулирование, когда небольшое многолопастное ветроколесо - «виндроза» устанавливается на гондоле перпендикулярно плоскости рабочего ветроколеса.

На некотором вылете позади ветроколеса устанавливают два ветрячка, называемые виндрозами, плоскость вращения которых перпендикулярна плоскости вращения ветроколеса и параллельна направлению ветра. Связанная с виндрозами передача, состоящая из конических и цилиндрических передач, поворачивается относительно вертикальной оси, ориентируя ветроколесо по направлению ветра при изменении направлении ветра. Крутящий момент вращающихся виндроз воспринимается передачей. Перемещение продолжается до тех пор, пока положение виндроз не станет параллельно направлению ветра.

Достоинством данного вида поворота гондолы является возможность регулирования скорости вращения, которая достигается выбором передаточного числа между виндрозами и шестерней на башне. Следовательно, угловая скорость поворота гондолы зависит от выбора передачи, а не от случайных порывов ветра.

Достаточно простым и эффективным способом регулирования мощности является срыв воздушного потока. Конфигурация профиля лопасти выбирается такой, что при увеличении скорости ветра происходит срыв воздушного потока (за задней кромкой лопасти возникает турбулентность) и лобовое сопротивление значительно возрастает, в то время как подъемная сила падает [56].

При вращении ветроколеса на лопастях возникает подъемная сила и сила сопротивления. Подъемная сила вращает ветроколесо, а сила сопротивления тормозит это вращение. Смысл регулирования заключается в увеличении силы сопротивления. На лопастях ветроколеса закреплены поворачивающиеся клапаны, которые при рабочих оборотах ветродвигателя держатся параллельно направлению окружной скорости ветроколеса и почти не оказывают сопротивление движению. В данном нормальном положении клапаны удерживаются пружиной.

Большинство методов аэродинамического регулирования применяется для наведения ветроколеса перпендикулярно рабочей плоскости ветроколеса, то есть для максимального использования энергии ветра. Другие методы позволяют также ограничивать мощность при превышении скорости ветра номинального значения. При этом аэродинамическое регулирование является не точным, способным приводить к перегрузке механической части ветроэнергетической установки.

ВЭУ большой мощности (от 1 МВт) снабжаются автоматическими системами управления, которые реализовываются на промышленных регуляторах.

Одним из важных мер по удешевлению стоимости электроэнергии, производимых ветроэнергетическими установками, является максимально возможное использование энергии ветра [57]. При работе ВЭУ без системы регулирования момент, развиваемый ветроколесом, с увеличением скорости ветра может непрерывно расти. При возрастании скорости ветра от 5-6 м/с до 20 м/с мощность воздушного потока увеличивается почти в 16 раз. Это

обстоятельство предъявляет необходимость применения автоматических систем управления.

1.7 Обоснование применения нечеткой логики при проектировании и эксплуатации ветроэнергетических установок

Проектирование ветроэнергетических установок и их эксплуатация связаны с высокой непредсказуемостью возможной скорости ветра и его направления. В связи со сложностью протекающих в объекте процессов, управление ВЭУ, должно осуществляться на основе новых математических моделей, основанных на теории нечетких множеств и нечеткой логики. Традиционно техническая система рассматривается как сложная, если для построения адекватной модели не хватает априорной информации. Это значит, что поведение технической системы существенным образом зависит от факторов, о влиянии которых информация недостаточно. Поэтому в случае, когда объектом управления является сложная система, о ее модели можно сказать лишь то, что неизвестны не только коэффициенты или параметры аналитических выражений, описывающих объект управления, но и аналитические соотношения. Построение содержательной аналитической модели такого объекта, управления достаточно проблематично и поэтому, необходимо вести речь об интеллектуальной системе.

В реальной действительности скорость ветрового потока представляет собой некоторый нестационарный случайный процесс. Это приводит к тому, что выработка мощности ветроэнергетической установкой, также представляет собой некоторую величину с определенной степенью вероятности, что затрудняет создание энергобаланса в системе. Возникает, также задача разработки оптимального выбора структуры электропотребления для систем с возобновляемыми источниками энергии. В связи с этим возникает задача достаточно обоснованно описать реальное текущее состояние потокораспределения в условиях неопределенности

источников генерации, что создает дополнительные трудности при принятии решений, ведения режимов.

Математические модели для описания режимов ветроустановок и их решения необходимо использовать методы теории нечетких множеств, которые могут достаточно адекватно описать модель сопоставления вырабатываемой мощности ВЭУ и мощности потребляемой электрической нагрузкой. Так как мощность ветроустановки определяется кубической зависимостью от скорости ветра, то даже при небольших колебаниях скорости ветра, мощность, вырабатываемая ВЭУ может колебаться в достаточно широком диапазоне мощностей.

Теория нечетких множеств является средством формализации нечетких понятий и отношений. Она основана на некотором обобщенном классическом понятии множества для случаев, когда нет четкой границы между двумя множествами A и B , а элемент a_{it} покидая множество A и переходя во множество B сохраняет некоторую убывающую принадлежность к множеству A . Наряду с этим, принадлежность элемента к множеству B возрастает. Использование нечетких словесных понятий, которыми оперирует лицо, принимающее решение (ветер “умеренный”, или нагрузка потребителя электрической энергии за определенный промежуток времени будет “большая”) позволяет ввести в рассмотрение качественные описания и учесть неопределенность задачи, достигнуть полного описания всех факторов, не поддающихся точному количественному описанию. Таким образом, данный подход позволит получить модель, которая наиболее прозрачно сможет отразить состояние баланса вырабатываемой и потребляемой мощности в условиях неопределенности: непостоянства энергоносителя и особенности потребителя электрической энергии. В процессе принятия решения о ведении режима, включающий определение целей управления, формирования задач, и, наконец, само принятие решений (выбор альтернатив) такая модель сможет достаточно просто описать многоэкранную постановку задачи [58, 59].

Использование алгоритмов нечеткого регулирования актуально при решении задач адаптивного управления, идентификации, управления в многосвязных системах, при классификации и распознавании образов и т.д. Некоторые фирмы (Omron, AEG Modicon, Motorola, Intel и т.д.) начали выпуск контроллеров с аппаратной поддержкой нечеткой логики, часть производителей встраивает поддержку подобных алгоритмов в свои программы (MATLAB, Factory Suit, CubiCalc и т.д.). Алгоритмы нечеткого регулирования встроены и в самую популярную в России SCADA-систему Trace Mode (ver.5.0) фирмы AdAstra и т.д.

Общий принцип работы нечёткого контроллера сводится к следующему [60]: есть список нечётких правил, есть входы контроллера, на которые подаются сигналы, интерпретируемые устройством, как нечёткие. Применяя алгоритмы нечёткого вывода (чаще всего алгоритм Мамдани или Сугэно), контроллер обрабатывает входную информацию и выдаёт список действий объекту управления.

К примеру, на вход контроллера подаётся измеряемая скорость ветра, мощность потребителя электрической энергии, описываемые нечёткими значениями лингвистических переменных. На выходе снимаются управляющие команды, для приоритетных групп - включение на шины ВЭУ или шины ДЭС, для остальных групп - включение или отключение от шин ветроустановки. Работы [61, 62] посвящены описанию применения регулятора напряжения совместно с переключателем ёмкости батареи конденсаторов компенсирующего устройства. Алгоритм работы устройства основан на нечёткой логике совместно с нейронными сетями. К плюсам подобного подхода можно отнести большую гибкость работы – регулятор постоянно «подстраивается» под изменяющиеся параметры работы сети, при этом поддерживаемый режим, оказывается, наиболее близок оптимальному. Недостатками метода являются слишком большая сложность и вытекающая отсюда дороговизна аппаратуры. Большой объём исходной информации о состоянии энергосистемы в предыдущие сутки, что приводит к

необходимости использования большого объёма памяти для нормальной работы контроллера.

В работах [63, 64] описаны общие принципы, на основе которых возможна разработка фаззи-регуляторов. В сущности, в работе были даны описания различных видов нечётких регуляторов в различных областях электротехнических систем: изложены общие принципы функционирования нечётких контроллеров, даны примеры моделей различных регуляторов (управление релейного типа, контролирование уровня генерации реактивной энергии в энергосистеме, регулирование подачи потребителю тепла и т.д.).

1.8 Нормативно-правовая база использования альтернативных источников энергии

Для полноценного и успешного развития возобновляемых источников энергии необходимо государственное регулирование и поддержка государственных структур. Например, Европейские страны с успехом используют стратегию планирования развития возобновляемой энергетики, устанавливая конкретные цели. И это дает более чем хорошие результаты, зачастую планы выполняются с опережением оговоренных цифр. В странах лидерах по доле использования ВИЭ в энергобалансе (Германия, Швеция, Дания) осуществляются государственные программы поддержки возобновляемой энергетики. Грамотная стратегия вкупе с мощной государственной поддержкой и крупными финансовыми вливаниями в сектор ВИЭ позволили Китаю в короткий срок выйти на первое место в мире по использованию альтернативных источников.

В России долгое время не было нормативно-правовой базы регулирования ВИЭ на федеральном уровне, а были только некоторые региональные законы. Анализируя сегодняшнюю ситуацию в отечественной электроэнергетике, можно отметить, что ещё недостаточна государственная заинтересованность и поддержка альтернативных источников энергии.

За несколько лет до кризиса в России были предприняты некоторые попытки создания нормативно-правовой базы развития ВИЭ. В конце 2007 года к Федеральному закону «Об электроэнергетике» от 26.03.2003г. №35-ФЗ были приняты поправки, которые заложили основы развития ВИЭ. В качестве поправок, инициатором которых явилось Российское акционерное общество «Единая Энергетическая Система России» (РАО «ЕЭС России»), выступили принятые в законе статьи, ориентированные на стимулирование развития альтернативной энергетики в стране. Принятые поправки впервые дали определение возобновляемым источникам энергии в законодательстве Российской Федерации (согласно статьи 3, глава 1, Федерального закона) и определили задачи для Правительства по развитию ВИЭ, установили полномочия государственных органов в области регулирования и поддержки ВИЭ.

Согласно статьи 21, главы 5, Федерального закона, предусматривается поддержка использования ВИЭ и предоставление государственных субсидий для снижения стоимости технологического присоединения к электроэнергетической системе, с установленной мощностью не менее 25 МВт. Предусматривается стимулирование ВИЭ путем продажи, генерируемой с их помощью электрической энергии на оптовом рынке по равновесным ценам с учетом надбавки (определяется Правительством) или путем продажи мощности. При этом генерирующий объект должен получить статус квалифицированного генерирующего объекта.

Новые поправки, внесенные в Федеральном законе «Об электроэнергетике», осуществляют стимулирование подключение генерирующих объектов ВИЭ мощностью не менее 25 МВт, включаемых в объединенные энергосистемы. Однако они не относятся к зонам с децентрализованным энергоснабжением, где мощность установок ВИЭ может не достигать и 100 кВт, а экономический эффект от ВИЭ максимален.

Согласно статьи 41, главы 7 Федерального закона гласит о компенсации потерь сетевыми организациями за счет энергии, произведенной генерирующими объектами на базе ВИЭ.

Затем последовал ряд документов, конкретизирующих поставленные в Федеральном законе задачи, например, Постановление Правительства Российской Федерации от 23.01.2015 г. №47 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии». Этот документ утвердил правила квалификации генерирующих объектов, функционирующих на основе применения ВИЭ, уточнил положения по формированию тарифов на электроэнергию, генерируемую с помощью ВИЭ. Правительство РФ постановило Федеральной службе по тарифам утвердить методические указания по установлению цен (тарифов) на электроэнергию, произведенную на генерирующих объектах, функционирующих на основе ВИЭ.

Федеральная антимонопольная служба Российской Федерации выпустила приказ от 30.09.2015 г. №900/15 «Об утверждении методических указаний по установлению цен (тарифов) и (или) предельных (минимальных и (или) максимальных) уровней цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность), произведенную на функционирующих на основе возобновляемых источников энергии квалифицированных генерирующих объектах и приобретаемую в целях компенсации потерь в электрических сетях».

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.01.2009 №1-р «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года» определяет цели и принципы использования ВИЭ, содержит значения целевых объемов генерации и потребления электрической энергии,

произведенной на базе ВИЭ и предлагает меры по достижению данных целевых показателей.

Планируется к 2020 году долю ВИЭ в производстве электроэнергии увеличить до 4,5%, не учитывая крупные ГЭС, и до 19-20% с учетом последних.

По некоторым прогнозам, соотношение генерирующих мощностей в Российской Федерации к 2020 году будет примерно таким:

- доля энергии гидроэлектростанций увеличится с 47 млн. кВт (20,6%) до 57-59 млн. кВт (18,3-19,7%), атомных электростанций с 24 млн. кВт (10,5%) до 35-41 млн. кВт (12,1-12,9%), электростанций с ВИЭ (без больших ГЭС) – с 2,2 млн. кВт. до 25,3 млн. кВт;
- для тепловых станций потребления газа снизится от 69% до 61-66% в 2020 г., потребление угля увеличится от 26,2% до 30-35%;
- генерации на ГЭС мощностью более 25 МВт составит от 168 млрд. кВтч (данные 2010 года) до 284 млрд. кВтч к 2020 году;
- производство теплоэнергии на основе ВИЭ увеличится от 63 млн. ГКал (данные 2010 года) до 121 млн. ГКал в 2020 году.

Для улучшения конкурентных условий генерирующих источников энергии ВИЭ и углеводородных видов органического топлива предполагается следующее:

- принять и регулярно уточнять размеры и сроки действия надбавки, прибавляемой к равновесной цене оптового энергетического рынка для определения цены на генерируемую мощности ВИЭ;
- установить обязанность по приобретению покупателями электрической энергии, произведенной ВИЭ;
- реализовать меры по совершенствованию правового режима использования природных ресурсов для сооружения и эксплуатации электрогенерирующих объектов на основе использования ВИЭ;
- использовать механизмы дополнительной поддержки возобновляемой энергетики;

- разработать комплекс нормативно-правовых документов по внедрению мер поддержки ВИЭ, в первую очередь, надбавки, в механизмы функционирования оптового и розничных рынков электроэнергии, включая регионы, не объединенные в ценовые зоны оптового рынка, а также по их применению в изолированных энергозонах.

Инфраструктурное обеспечение развития производства электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии должно поддерживаться следующим образом:

- повысить качество научного и технологического обслуживания объектов альтернативной энергетики;
- разработать информационную систему оптимального использования различных видов энергии;
- разработать систему нормативно-технической и методической документации по проектированию, строительству и эксплуатации энергетических объектов на базе ВИЭ;
- оказывать поддержку созданию системы стимулирования потребителей электроэнергии;
- улучшить подготовку специалистов в области ВИЭ.

Для реализации намеченных инициатив планируется подготовка ряда нормативно-правовых актов на уровне Правительства Российской Федерации. Все вышеперечисленные документы, безусловно, свидетельствуют о положительной динамике принятия мер в поддержку возобновляемой энергетики, но главным документом, регулирующим все аспекты развития возобновляемой энергетики, безусловно, должен стать Федеральный Закон «О возобновляемых источниках энергии».

Данный закон позволил бы произвести диверсификацию Российской энергетики, установить курс на развитие ВИЭ в России, переориентировать энергетику с консервативного пути развития на путь модернизации и инноваций, дать толчок для развития отечественного энергетического

машиностроения, наладить проектирование и производство высокотехнологичного оборудования для возобновляемой энергетики, что благоприятно сказалось бы на экономике страны и многое другое. В случае принятия закона, должен предусматривать:

- разработку стратегии по увеличению доли ВИЭ в энергетике России, с конкретным целевым планированием и сроками;
- государственное финансирование и поддержку исследований, касающихся возобновляемых источников энергии (с одинаковым приоритетом как традиционных, так и нетрадиционных ВИЭ);
- государственную поддержку коммерческих организаций, занимающихся разработкой и внедрением технологий в сфере ВИЭ (льготы, целевые кредиты, гранты, налоговые послабления);
- государственную поддержку для граждан, изъявивших желание установить в своих домах системы тепло- и электроснабжения на базе ВИЭ (льготы, кредиты, налоговые послабления);
- упрощение формальных процедур и бюрократических барьеров, направленное на создание максимально комфортных условий, как организациям, так и отдельным гражданам для использования ВИЭ.
- назначение особого приоритета внедрению ВИЭ в зонах децентрализованного энергоснабжения;
- подготовку квалифицированных кадров для возобновляемой энергетики, переквалификацию инженерных кадров.

В результате Россия может получить существенное улучшение экономической ситуации в стране: снизится зависимость от мировых цен на топливо, появится фундамент для развития новых отраслей производства, реальные действия по развитию ВИЭ смогут привлечь многомиллионные инвестиции, будут созданы новые рабочие места, улучшится экологическая ситуация в стране, решится проблема сезонного дефицита электроэнергии.

Из вышесказанного, можно отметить, что внедрение и развитие возобновляемой энергетики невозможно без государственной поддержки, и

пример стран Евросоюза, США, Китая – тому подтверждение. Перечислим условия, которые необходимо обеспечить для успешного развития возобновляемой энергетики в России:

- принятие Федерального закона «О возобновляемых источниках энергии». Министерство энергетики располагает проектом такого закона, но действия по его принятию не предприняты до сих пор. Однако сама необходимость существования законодательно-правовой базы для возобновляемой энергетики неоспорима;
- государственное стимулирование развития возобновляемой энергетики. Опыт стран-лидеров в использовании ВИЭ показывает, что государственная поддержка играет ключевую роль в успешном развитии данной отрасли энергетики. Необходимо государственное субсидирование региональных энергетических проектов с использованием ВИЭ, а также тарифное и налоговое регулирование;
- выработка стратегии включения альтернативной энергетике для обеспечения социального и промышленного развития;
- разработка инновационных проектов в области возобновляемых источников энергии, контроль и стимулирование их создания;
- организация отечественных предприятий по производству оборудования для альтернативной энергетики (ветроустановок, солнечных панелей, контроллеров, инверторов и т.д.).

Экономический кризис, несколько замедлит развитие возобновляемой энергетики России, так как вышеперечисленные меры требуют достаточно серьезного финансирования из государственного бюджета. Тем не менее, развитие возобновляемой энергетики будет продолжаться с учетом новых технологических и инновационных решений.

Выводы

1. Показано, что основной тренд развития электроэнергетики в настоящее время лежит на пути интеллектуализации процессов генерации, передачи и распределения электрической энергии. При этом используется термин Smart Grid, который несмотря на некоторые разночтения, трактуется, как интеллектуальные сети.

2. Основные атрибуты концепции Smart Grid в работе определяются следующим образом: доступность, надежность, гибкость, эффективность, обеспечение безопасности, способность к аккумулярованию энергии, стимулирование активности электропотребителя, экономичность и снижение экологического давления на окружающую среду. Отмечено, что интеллектуальные сети, как правило, имеют двусторонние потоки энергии и информации. Эти процессы подлежат более глубокому исследованию.

3. Показано, что скоординированное управление некоторой районной интеллектуальной электрической сети позволяет осуществить существенную гибкость в формировании общего графика электропотребления, снижая его неравномерность на суточном интервале времени. Одновременно с этим, наличие собственной генерации и накопителя энергии у каждого генерирующего потребителя позволяет им активно участвовать и отслеживать свои интересы, как в области финансовых затрат, так и в отношении качества электрической энергии.

4. Анализ методов управления ветроустановками показал, что наиболее эффективным является управление ВЭУ на основе правил продукции «Если, ..., То, ...», с нечеткими переменными.

5. Показано, что для полноценного и успешного развития и использования возобновляемых источников энергии необходимо совершенствовать и разрабатывать новые нормативно-правовые акты, в частности, на подключение альтернативных источников энергии.

2 ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

2.1 Постановка задачи

В настоящее время Дальневосточному региону Российской Федерации уделяется повышенное внимание, как региону опережающего развития. С энергетической точки зрения это требует более полноценного использования топливно-энергетических ресурсов региона, включая альтернативные и возобновляемые источники энергии. Для этих условий показана необходимость планирования оптимальных режимов электропотребления и энергобаланса в интеллектуальной сети, с функцией двустороннего потока энергии.

Ключевым моментом, при этом является использование собственных ветроэнергетических ресурсов, которые достаточно велики в прибрежной зоне Дальнего Востока и на островах Русский и Попова. Цель исследования состоит в разработке новой математической модели оптимального энергобаланса и электропотребления, при участии генерирующих потребителей и альтернативных источников энергии в виде ветроэнергетических ресурсов.

Представлена новая научная концепция интеллектуальной сети с активными (генерирующими) потребителями и двусторонним потоком энергии от альтернативных источников, с функцией её аккумулирования, которая позволяет существенно улучшить энергобаланс и повысить энергоэффективность использования ветроэнергетических ресурсов.

Предложена система выбора приоритетности правил использования источников генерации, обеспечивающая минимизацию материально-финансовых затрат электропотребителя. При этом в качестве универсального метода решения оптимизационной задачи использован метод Ньютона.

2.2 Климат и география побережья Дальнего Востока

Основные характеристики острова Русский. Остров Русский относится к территориальному составу городу Владивосток. Он расположен примерно в двух километрах от берега в заливе Петра Великого, являющегося частью Японского моря (наименьшее расстояние между континентальной частью и островом равно 800 метрам). От полуострова Муравьёва Амурского остров Русский отделён проливом Босфор Восточный. С запада остров омывается водами Амурского залива, а с востока и южной стороны водами Уссурийского залива. На юго-западе остров разделяется от другого острова Попова проливом Старка [65, 66].

Территория острова составляет – 97,6 км², его длина – примерно 18 км и ширина – около 13 км. Население острова составляет – примерно 25000 жителей. Карта острова представлена на Рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Карта острова Русский

Рельеф острова Русский в основном повторяет рельеф южной части Приморья. Гористый рельеф включает в себя 47 сопкок с вершинами, отличающимся разной высотой. Наиболее высокие из них находятся примерно середине острова: Русская (291,2 м), Главная (279,8 м) и Центральная (254,9 м).

Сейсмичность района восточного побережья для строительства промышленных объектов составляет 6 баллов [67]. Однако, по мнению некоторых сейсмологов, действующие сейсмические карты не отражают в полной мере истинную сейсмичность территории побережья. Согласно официальной статистике, за период с 1867 по 2006 г. на территории Приморья произошло 251 землетрясение, из которых восьми балльных было 3, семи балльных 8, шести балльных 7, пяти балльных 2. То есть землетрясение силой 7 и более баллов происходило в среднем один раз в каждые 13 лет.

Категория грунтов рассматриваемой территории по сейсмическим свойствам соответствует категориям грунтов, принятым для определения исходной сейсмичности района (I-III категория). На этом основании сейсмичность площадок размещения ВЭС, при разработке проектировании гибридной системы энергоснабжения острова Русский, может быть отнесена 6-ти балльной шкале.

Климат северо-западной чаты острова Русский отличается от его юго-восточной стороны, которая обращена в сторону открытого моря. В среднем в Приморье продолжительность солнечного дня более 2000 часов в год (Таблица 2.1) [68, 69]. К примеру, во Владивостоке – 2131 часов в год, в п. Пограничном – 2510 часов в год, в Находке – 2400 часов в год (для сравнения: в Москве – 1731 часов в год, в Севастополе – 2340 часов в год, в Новосибирске – 2077 часов в год).

Таблица 2.1 – Характеристики годовой солнечной активности во Владивостоке

Солнечная активность, часов за месяц													
Месяц	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.	Год
Владивосток	192	194	206	186	178	136	125	163	204	205	169	173	2131

Ресурсы солнечной энергетики на побережья Дальнего Востока с учетом технических и экологических ограничивающих условий составляет: тепловой энергии – 16,0 млн. кВт, электрической энергии – 4,9 млн. кВт в то время как установленная мощность энергоисточников в крае составляет 2,7 млн. кВт электрической энергии и 3,9 млн. кВт тепловой энергии [70]. Следовательно, потенциальная мощность солнечной энергетики соизмеримо с установленной мощностью тепловых источников на острове Русский и поэтому имеется хорошая перспектива замещения углеводородных источников на солнечную инсоляцию.

Основные характеристики острова Попова. Остров Попова расположен в заливе Петра Великого Японского моря, в 20 км от Владивостока и в 0,5 км к юго-западу от острова Русский, назван в честь адмирала А.А. Попова. На острове проживает около 3000 человек, в основном в двух посёлках Старк и Попова. Площадь острова 12,4 км², при этом рельеф местности характерен для юга Приморья, а максимальная высота гор над уровнем моря – 158 м. Береговая линия представлена песчаными и галечными пляжами, чередующимися со скалистыми обрывами.

Климат острова схож с климатом Владивостока. Средняя температура января $-12,5^{\circ}$ С, августа $+20,5^{\circ}$ С. Остров Попова, наравне с островом Русским, является излюбленным местом отдыха жителей Владивостока. На острове действует несколько турбаз и баз отдыха, каждое лето разбиваются палаточные лагеря. Лучшее время для отдыха с июля по конец сентября.

Средняя температура воды в августе 22°C [68]. Основные климатические и сейсмические характеристики острова Попова совпадают с характеристиками острова Русский.

2.3 Ветровые ресурсы островов Русский и Попова

Ветровой климат может существенно отличаться для отдельных участков территории островов. В настоящей работе использован архив погоды города Владивостока, как основа статистической базы значений скорости и направления ветра за некоторые месяцы 2017 г., замерами через три часа. Усреднённые значения представлены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Среднемесячные скорости ветра (м/с) через три часа на островах Русский и Попова

Время суток, часы	Месяцы			
	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0	9,5	11,3	11,9	10,8
3	10,2	11,6	11,2	10,7
6	9,3	11,6	11,4	11,2
9	9,9	11,3	10,6	10,8
12	10,2	10,7	10,4	11,5
15	10,9	10,5	10,5	11,4
18	10,2	10,8	10,9	10,6
21	9,7	11,0	11,1	10,5
24	9,5	11,3	11,9	10,8

Метеорологические данные о скорости ветра на Тихоокеанском побережье России (Рисунок 2.2), доказывают целесообразность строительства двух ветроэлектростанций (ветропарков), на островах Русский и Попова [71].

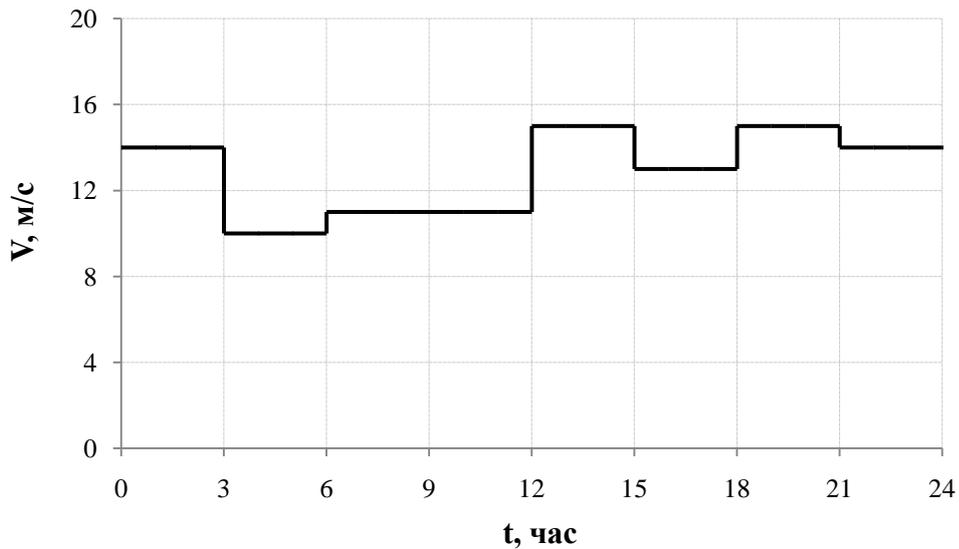


Рисунок 2.2 – Скорость ветра на островах Русский и Попова

Если будут осуществлены планы по развитию концепции интеллектуальной сети, то предусмотрено строительство новых объектов, «Дальневосточная ветроэлектростанция (ВЭС) на островах Русский (до 16 МВт) и Попова (до 20 МВт) с целью обеспечения стабильного централизованного электроснабжения существующих и перспективных потребителей острова Русский и острова Попова [72]. Схема выдачи мощности в сеть электроснабжения островов Русский и Попова показана на Рисунке 2.3.

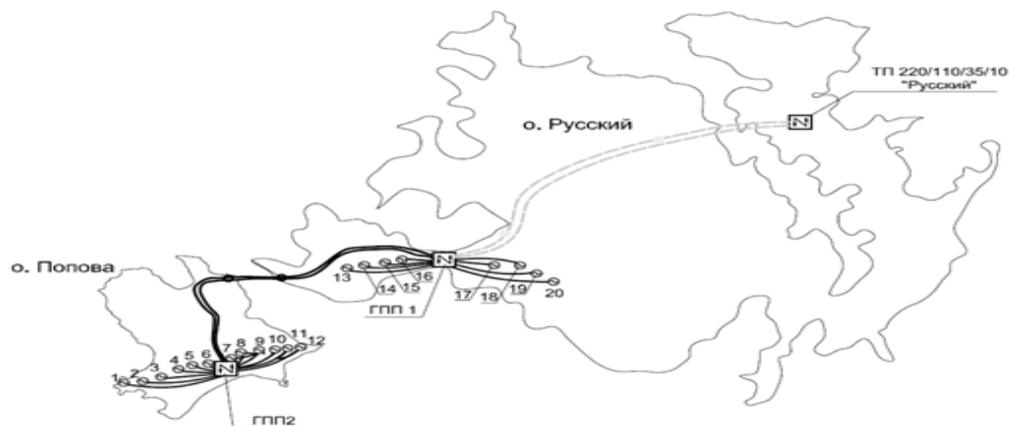


Рисунок 2.3 – Передача мощности к РУ-35кВ подстанция «Русская»

Мощность на выходе ВЭУ напрямую зависит от скорости ветрового потока, который сильно изменяется во времени, от местной погоды и поверхности местности. Зависимость между скоростью ветра, проходящего через ометаемую площадь установки A (м^2) и мощности выражается следующим образом

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность воздушного потока ($\text{кг}/\text{м}^3$), зависящая от температуры и давления воздуха;

A – площадь, ометаемая лопастями;

V – скорость ветра;

C_p – коэффициент эффективности ВЭУ.

Ометаемая поверхность может быть вычислена по формуле

$$A = \pi R^2, \quad (2.2)$$

где R – радиус ветроколеса, м.

Из выражения (2.1) можно заметить, что зависимость между скоростью ветра и мощностью ВЭУ нелинейная, является кубической. В масштабах целого ветрового парка эта взаимосвязь выражается еще сильнее, так как ветропарк представляет собой комплекс ВЭУ, и каждая установка использует разные скорости и направления ветра.

Один из простых методов преобразования скорости ветра в мощность это использование характеристики мощности от производителя конкретной установки. Подобный метод и результаты исследования подробно описаны в работах [73–75]. Необходимо отметить, что данные скорости ветра, получаемые с анемометра на самой установке, либо полученные с метеорологической мачты, установленной на основе ветроэнергетического кадастра, не совсем соответствуют той скорости, которая непосредственно падает в ометаемую площадь установки.

Таким образом, преобразование реальных данных скорости ветра, измеренных в течение года на метеорологической мачте в скорость ветра, которая соответствует уровню высоты оси ступицы ротора можно осуществить с помощью методов экстраполяции, например, степенного закона

$$V_c(t) = V_m(t) \cdot \left(\frac{H}{H_m} \right)^m, \quad (2.3)$$

где V_c – скорость ветра на уровне оси ступицы ротора (м/с);

V_m – скорость ветра на уровне метеомачты (м/с);

H – высота оси ступицы ротора ВЭУ (для данного типа установки она равна 100 м);

H_m – высота метеомачты (10 м);

m – коэффициент сезонности, изменяется по временам года: зима – 0,17, весна – 0,12, лето – 0,17, среднегодовая – 0,26.

Необходимо отметить, что в зависимости от условий и ситуации для подобного преобразования скорости ветра с одного уровня в другой может подойти тот или иной метод экстраполяции. При возможности измерить скорость ветра на уровне оси ступицы ротора ВЭУ необходимость в преобразовании отпадает.

После определения скорости ветра следует выполнить её преобразование в электрическую мощность с помощью характеристики мощности ветроустановки типа WTU 2,05, показанной на Рисунке 2.4.

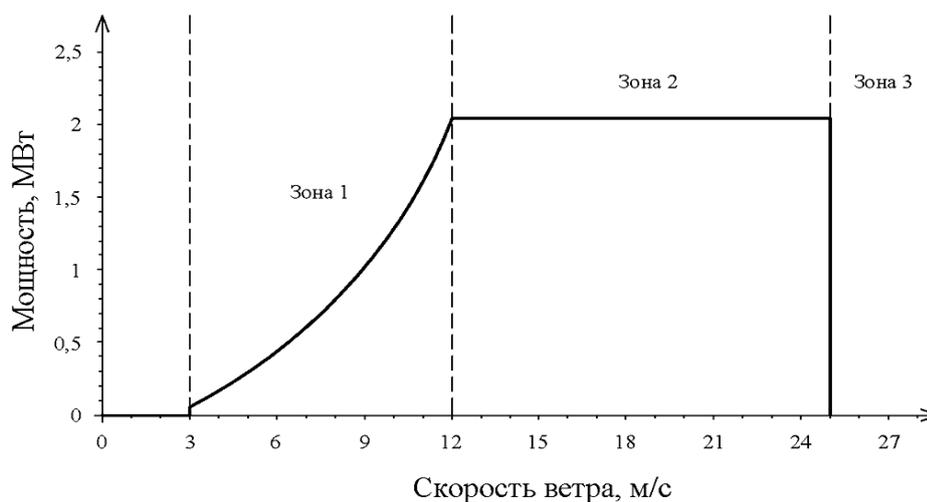


Рисунок 2.4 – Характеристика мощности ВЭУ WTU 2,05 МВт

Как видно, выработка мощности начинается с отметки скорости ветра в 3 м/с и является стартовой позицией в процессе выработки. В диапазоне скоростей от 3 м/с до 12 м/с идет выработка номинальной мощности. Начиная с 12 м/с до 25 м/с, мощность поддерживается на номинальном уровне. Выше последней отметки срабатывает команда отключения установки в целях безопасности. Значения преобразованной мощности ВЭС показано на Рисунке 2.5.

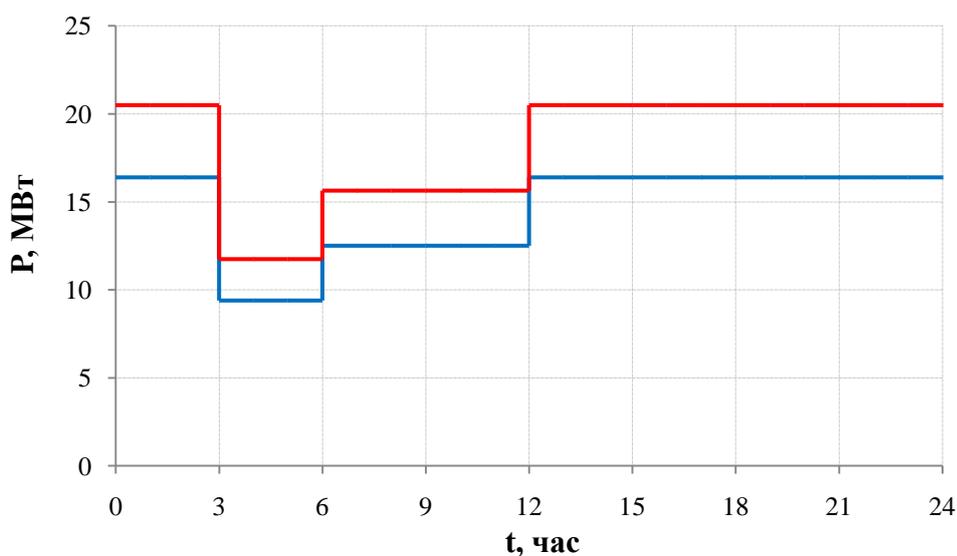


Рисунок 2.5 – Суточные графики выдачи мощности ВЭС (синяя линия о. Русский и красная линия о. Попова)

Мощность, которую выдает ВЭС острова Попова стабилизирована на предельной мощности отдельных ветроустановок WTU 2,05 МВт, так как скорость ветра превышает 12 м/с. В связи с тем, что электропотребление на острове Попова меньше вырабатываемой, избыточная электроэнергия участвует в обмене в качестве двустороннего потока энергии.

2.4 Описание системы электроснабжения острова Русский

Система электроснабжения острова Русский является конечной частью Объединенной энергетической системы «Востока» России. В рамках подготовки к саммиту АТЭС – 2012 была создана инфраструктура распределённой генерации на острове Русский. Она включает в себя три Мини ТЭЦ («Центральная», «Северная», «Океанариум»), оснащенных газовыми турбинами с котлами-утилизаторами Combined Heat and Power, а также подстанции (ПС) «Русская» напряжением 220/110/35 кВ и «Коммунальная» – 35/10 кВ.

Система электроснабжения острова Русский получила инновационное решение для отечественной энергетики, а именно применение подводного трехфазного кабеля из сшитого полиэтилена класса напряжения 220 кВ, проложенного по дну пролива Босфор Восточный. Кабель является частью линии электропередачи 220 кВ ПС «Зеленый Угол» - ПС «Русская», которая соединила новые подстанции 220 кВ материковой части города Владивостока: «Зеленый Угол» и «Патрокл» с подстанцией «Русская».

Вторая электрическая связь ПС «Русская» осуществляется по КВЛ-35кВ, соединяющей подстанции «Эгершельд» – «Русская» и «КЭТ» с отпайкой на участке ПС «Зелёная» – «Русская» с воздушным переходом через пролив Босфор Восточный. От ПС «Русская» до мини ТЭЦ «Центральная» проложено двухцепная КЛ-35 кВ.

Подстанция «Русская» – является источником электроснабжения потребителей острова Русский. На подстанции установлено два

автотрансформатора мощностью по 63 МВА каждый, возведены открытые распределительные устройства 220, 110 и закрытые распределительные устройства 35 кВ.

2.5 Выбор гибридного накопителя электроэнергии

Накопители электроэнергии являются важной составной частью генерирующих потребителей, поскольку позволяют снизить жесткие требования баланса электрической энергии в электроэнергетические системы. При этом накопители должны быть достаточно энергоёмкими и мощными, чтобы выполнять функцию электроаккумуляции на достаточно длительных интервалах времени, например, на суточном интервале, как это рассматривается в данной работе. В настоящее время накопители энергии для долговременного балансирования режимов по активной мощности выполняются в виде аккумуляторов для накопления электроэнергии в периоде избытка мощности и при льготном тарифе (от 23 часа ночью до 7 утра), с последующей выдачи её в систему, когда возникает дефицит мощности. Накопители энергии позволяют повысить управляемость, надежность и экономичность функционирования ЭЭС, в том числе при наличии в ее составе децентрализованных и возобновляемых источников электроэнергии [76].

Накопители электрической энергии решают следующие режимные задачи:

- выравнивание графиков электрической нагрузки и электропотребления в ЭЭС;
- обеспечение гарантированного и надежного электроснабжения, как отдельных подстанций и электрических станций (собственные нужды), так и генерирующих потребителей;

- поддержание стабильных и надежных режимов работы локальных энергосистем с возобновляемыми источниками энергии, а также при связи с ЭЭС и двусторонних потоках энергии.

В настоящее время все большую роль играют, так называемые, гибридные системы накопления электроэнергии, основанные на комбинации долговременных систем накопления энергии – аккумуляторах и кратковременных систем накопления энергии – батарей суперконденсаторов.

Гибридные накопители (ГН) помогают выполнить в ЭЭС следующие функции:

1. Применение гибридных накопителей энергии (ГНЭ) для улучшения электросетевой инфраструктуры, при мощности подстанций 1,5 МВА, 5 МВА, 10 МВА, 20 МВА, 50 МВА и для длительности работы от 3 до 5 часов сутки позволяет достичь следующих преимуществ:

- улучшение показателей качества электроэнергии для конечных электропотребителей;
- снижение количества возможных перерывов электроэнергии путем уменьшения количества отключений;
- повышение эксплуатационной надежности и качества функционирования системы;
- снижения нагрузки в пиковых режимах для высоковольтного электрооборудования и линий;
- снижения эксплуатационных затрат и финансовых расходов на ремонтные работы.

2. Аккумуляирование электроэнергии на интервале времени, когда её стоимость является низкой, например, льготный тариф или избыток ветровой энергии с последующим использованием электроэнергии во время её повышенной стоимости, при установленной мощности ГНЭ 1,5 МВт, 5 МВт, 10 МВт, 20 МВт, 50 МВт и длительности использования от 6 до 12 часов в сутки. Это дает следующие преимущества:

- смягчение жестких условий поддержания баланса между генерацией и электропотреблением в любой момент времени, при условии поддержания номинальной частоты;
- снижение финансовых затрат на эксплуатацию электрических сетей и их инфраструктуру;
- снижение стоимости электроэнергии для конечных электропотребителей;
- высвобождение дополнительных ресурсов для генерации транспорта и распределения электроэнергии.

3. Интеграция с возобновляемыми источниками энергии, в частности, с ВЭУ, при выбранной мощности ГНЭ 1 МВт, 2 МВт, 5 МВт, 10 МВт и длительности работы от 2 до 6 часов в сутки. Это позволяет:

- обеспечить резервную генерацию мощности от возобновляемых источников энергии ВЭУ;
- возможность экспорта электроэнергии и мощности от ГНЭ в пиковые часы графика нагрузки системы;
- улучшение интеграции ВЭУ в системы электропередачи и распределения электроэнергии;
- отложенные финансовые затраты и капиталовложения на реконструкцию и строительство новых объектов электроэнергии.

4. Использование систем ГНЭ конечными электропотребителями, при выбранной соответствующей мощности 1,5 МВт, 5 МВт, 10 МВт 20 МВт и длительности их работы от 1 до 12 часов в сутки, обеспечивает:

- наличие аварийного резерва;
- улучшение показатели качества электроэнергии;
- уменьшение затрат на эксплуатацию электрической сети снижение затрат на потребляемую электрическую энергию;

Управление гибридным накопителем электроэнергии осуществляется с помощью логического контроллера, который даёт формальный протокол для

обеспечения взаимодействия между основными элементами накопителя. Физически он конструируется либо в виде законченного модуля или отдельных конструктивных единиц, что более предпочтительно, при построении многоуровневой системы мониторинга и управления с учетом требований к дополнительным защитам, отказоустойчивости и климатическим условиям. Собственный коэффициент гармоник выходного тока не должен превышать 3% при работе на номинальную нагрузку или сеть без искажений.

Электропотребитель подключается к первичной обмотке трансформатора непосредственно, без коммутационных элементов для обеспечения режима автономной работы от напряжения, формируемым инвертором. Наряду с этим между трансформатором и сетью располагается контактор переключения для разделения режима автономной работы и работы с электрической сетью. Эффективность использования гибридных накопителей электроэнергии для 6 основных характеристик приведены в Таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение параметров аккумулялирования накопителей энергии

№ п/п	Параметр	Аккумуляторные батареи	Суперконденсаторы	Конденсаторы
1	Время зарядки	1–5 ч	0,3–30 с	10^{-3} – 10^{-6} с
2	Время разрядки	0,3–3 ч	0,3–30 с	10^{-3} – 10^{-6} с
3	Удельная энергия, (Втч/кг)	10–100	1–10	< 0,1
4	Количество циклов	1000	> 500000	> 500000
5	Удельная мощность, (Вт/кг)	< 1000	< 10000	< 10000
6	Эффективность зарядки/разрядки	0,7–0,85	0,85–0,98	> 0,95

Анализируя приведённые выше можно заключить, что по 6 основным параметрам суперконденсаторы занимают промежуточное место положение между химическими источниками электрической энергии и обычными

конденсаторами. Из сравнительных характеристик видно, что НЭ в координатах «удельная энергия E (кДж/кг или Вт·час/кг; при этом $3,6 \text{ кДж/кг} = 1 \text{ Вт·час/кг}$) — удельная мощность P (кВт/кг)». На Рисунке 2.6 изображены такие характеристики и области перспективного развития некоторых типов аккумуляторов, ионисторов и конденсаторов с оксидными диэлектриками в логарифмическом масштабе: 1 – область перспективного развития перезаряжаемых химических источников тока (аккумуляторов); 2 – область перспективного развития энергонакопительных конденсаторов с диэлектриками; 3 – область перспективного развития конденсаторов с двойным электрическим слоем [77, 78].

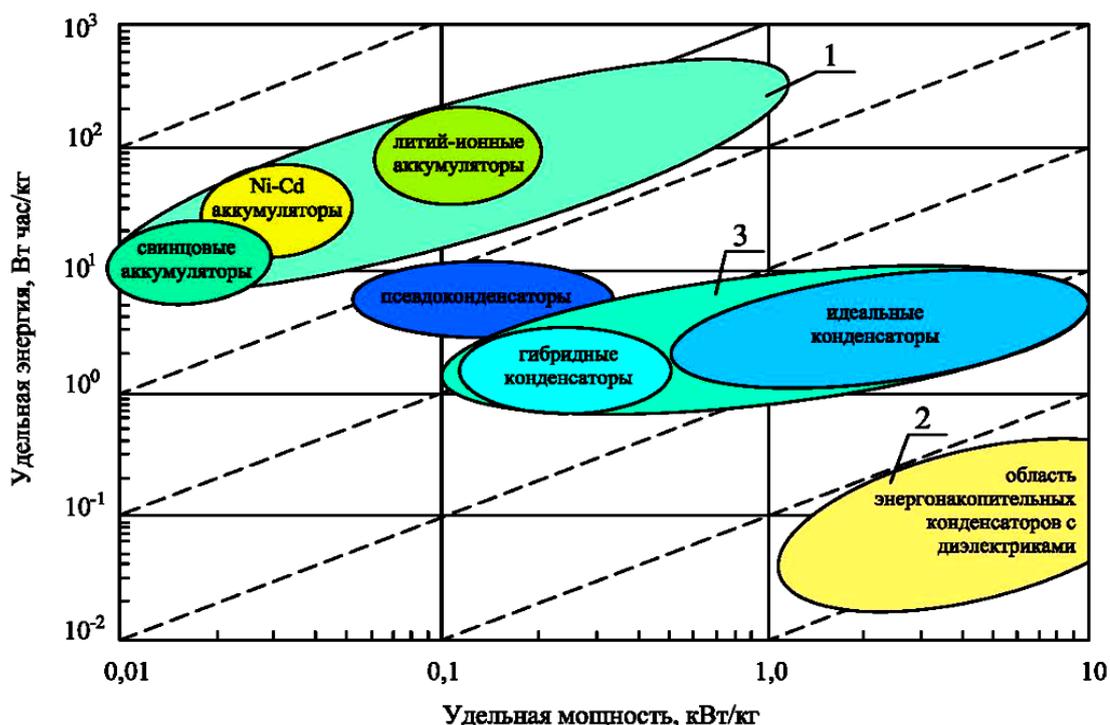


Рисунок 2.6 – Сравнительные характеристики электрохимических накопителей электрической энергии

Гибридный накопитель энергии состоит из трех модулей: аккумуляторной батареи, суперконденсатора и конденсаторов, которые представлены в блок-схеме на Рисунке 2.7.

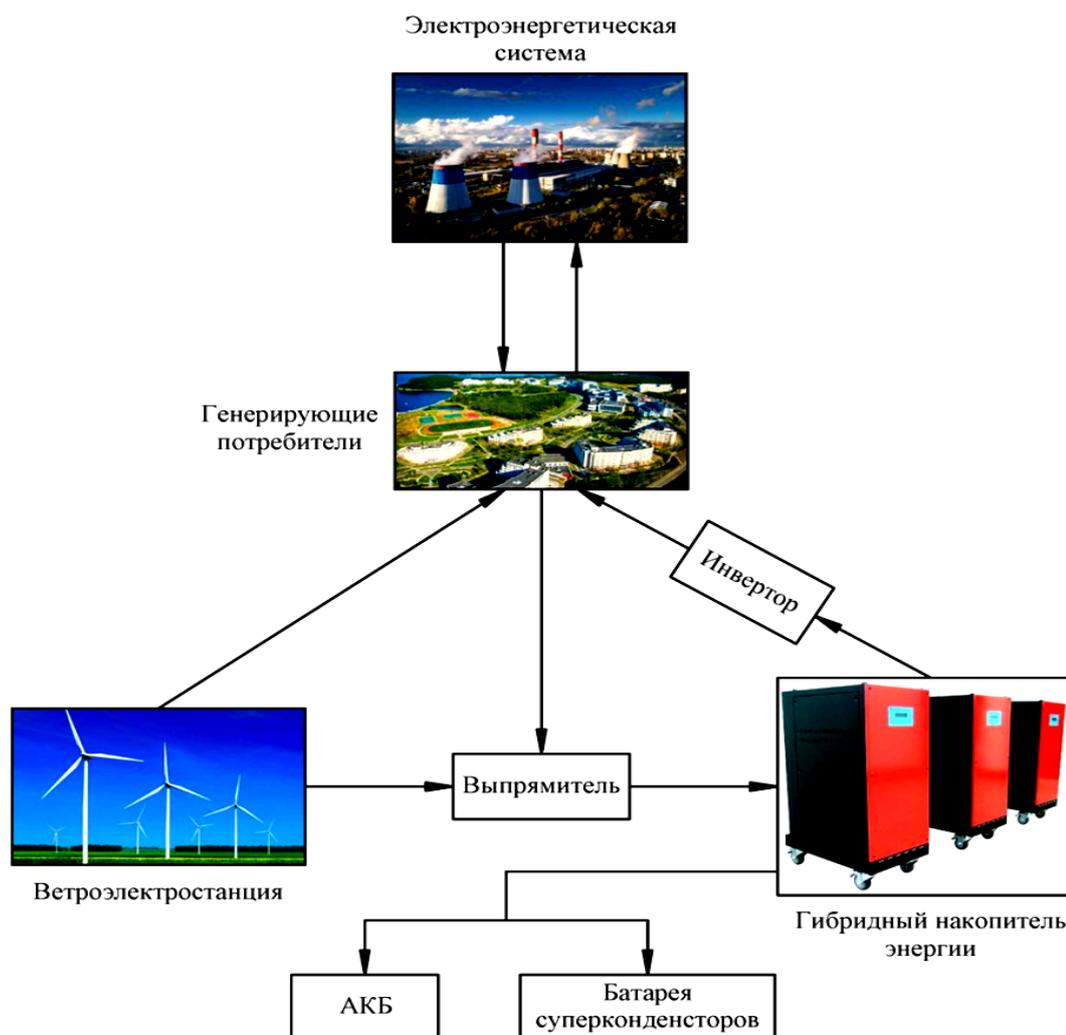


Рисунок 2.7 – Блок-схема генерирующего потребителя с гибридным накопителем энергии

Модуль накопления состоит из аккумуляторного накопителя энергии и суперконденсаторную часть накопителя энергии. Также необходимы дополнительные преобразующие и согласующие устройства силовой электроники, реализующие функции заряда/разряда, контроля и управления. В системах, имеющих подключение к сети, гибридный накопитель должен быть дополнен устройствами согласования с сетью.

Первый модуль – батарея литий-ионных аккумуляторов (в данной работе рассматривалась батарея на основе высокоточных литий - ионных аккумуляторов производства Лиотех *LT-LFP 700P*). В данном модуле происходит накопление электроэнергии из сети в период снижения нагрузки

(например, в ночное время), либо за счет дополнительных источников энергии (возобновляемые источники энергии). В период возрастания нагрузки выше номинального уровня батарея отдает запасенную электроэнергию в сеть для стабилизации напряжения и сглаживания пиковых нагрузок. Дополнительно, батарею литий-ионных аккумуляторов, возможно снабдить устройством интеллектуального управления, способным выполнять следующие функции:

- выравнивать напряжения на отдельных ячейках;
- коммутация модулей и их защиты по мгновенному значению тока с использованием контактора и быстродействующих предохранителей;
- контроль изоляции элементов.

Вероятностный режим генерации мощности ВЭУ показывает, что ГНЭ значительно улучшает работу системы, т.к. они обладают стабилизирующим эффектом. При этом математическая модель НЭ выполнена на основе [79].

Внутренняя энергия аккумуляторной батареи в конце временного интервала

$$W_{Акк.}^k = W_{Акк.}^n + P_{эн} \cdot \Delta t, \quad (2.4)$$

где $W_{Акк.}^k$ – емкость аккумуляторной батареи в начале интервала;

$P_{эн}$ – знакопеременная функция входной мощности ($P_{эн} > 0$ – заряд аккумуляторных батарей, $P_{эн} \leq 0$ – разряд аккумуляторных батарей);

Δt – продолжительность временного интервала.

Внутренняя энергия аккумуляторной батареи

$$W_{Акк.}^n = E_{Акк.}^n \cdot U_{Акк.}^n, \quad (2.5)$$

где $E_{Акк.}^n$ – емкость аккумуляторной батареи в начале интервала Δt .

Внутреннее сопротивление аккумуляторных батарей

$$W_{Акк.} = \frac{(U_{Акк.}^n)^2}{E_{Акк.}^n}. \quad (2.6)$$

2.6 Математическая модель и оптимизация энергетического баланса генерирующего потребителя

Для любой электроэнергетической системы неизбежно существует жесткий баланс активной мощности между мощностью генерируемой, источниками генерации и мощностью, потребляемой электропотребителями. К этой мощности необходимо прибавить также суммарные потери активной мощности в электрической сети, связанные с технологическим расходом энергии на её передачу.

Уравнение баланса мощностей для рассматриваемой системы можно написать в следующем виде

$$P_{ЭС} + P_{ВЭУ} \pm P_{Акк.} = P_{П} + \sum \Delta P, \quad (2.7)$$

где $P_{ЭС}$ – мощность, которую можно получить от внешнего источника;

$P_{ВЭУ}$ – предельная мощность от ВЭУ;

$P_{Акк.}$ – мощность накопителя, аккумуляторной батареи;

$P_{П}$ – мощность электропотребителя;

$\sum \Delta P$ – суммарная потери активной мощности в сети.

На суточном интервале времени баланс по энергии в интегральной форме можно записать

$$\int_0^{24} P_{ЭС}(t) dt + \int_0^{24} P_{ВЭУ}(t) dt \pm \int_0^{24} P_{Акк.}(t) dt = \int_0^{24} P_{П}(t) dt + \int_0^{24} \sum \Delta P(t) dt. \quad (2.8)$$

В концепции двустороннего потока энергии открывается возможность получения электроэнергии в различных соотношениях от трёх возможных источников генерации: энергосистемы, ВЭУ и накопителя. Стоимость этих видов энергии различна и, кроме того, они определяются в зависимости от двух зонного тарифа стоимости электроэнергии энергосистемы. Эффективность принимаемых решений определяется оптимальным соотношением её получения от трёх указанных видов источников энергии,

при различных ценах для каждого часа суточного графика нагрузки. Задача является оптимизационной с непредсказуемой, в некоторой степени, выработкой мощности ВЭУ и заданных ограничениях на возможность аккумулирования энергии накопителем [80].

В качестве исходного примера рассмотрим режимы электропотребления островов Русский и Попова. Примем следующие исходные данные:

- $P_{ГП_i}$ – потребляемая мощность потребителей островов Русский или Попова;
- $P_{ЭС}$ – передаваемая мощность от энергосистемы;
- $P_{\max}^{ВЭУ_i}$ – максимально возможная мощность вырабатываемой ВЭУ островов Русский или Попова, где $0 \leq P_{ном}^{ВЭУ} \leq P_{\max}^{ВЭУ}$;
- $P_{\max}^{Акк.i}$ – максимально передаваемая мощность накопителей островов Русский или Попова, где $0 \leq P_{ном}^{Акк.} \leq P_{\max}^{Акк.}$.

Математическая модель выбора возможных источников энергии для оптимизации расходов ГП за электроэнергию может быть представлена система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), которая на каждом шаге итерационного процесса может быть линеаризована и представляет собой систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для оптимизации расходов за электроэнергию в течение суток выполняется подбор значений из входного вектора вырабатываемой или передаваемой электроэнергии и умножается на матрицу цен. При этом мощность усредняется за каждый час суточного графика электропотребления и, таким образом, численное значение мощности за час совпадает со значением потребленной энергии за этот же час. Основная система уравнений для генерирующего потребителя, при двустороннем потоке энергии приведена ниже

$$\begin{cases} c_{11} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{12} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{13} \cdot P_{\text{Акк.}} = m_1 \\ c_{21} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{22} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{23} \cdot P_{\text{Акк.}} = m_2, \\ c_{31} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{32} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{33} \cdot P_{\text{Акк.}} = m_3 \end{cases} \quad (2.9)$$

где m_i – стоимость потребленной электроэнергии;

$i = 1, 2, 3$ – три возможных источника энергии для генерирующего потребителя.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), на каждом шаге итерации решается методом исключения Гаусса. Прямой ход состоит в обнулении поддиагональных элементов, а обратный ход состоит в решение уравнений с верхней треугольной матрицей, первым находится последнее по номеру неизвестное.

Матрица цен представляет собой матрицу вида

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

При этом диагональные элементы отражают цены на электроэнергию для каждого отдельного генерирующего источника, а не диагональные элементы усреднённую стоимость энергии от двух источников.

В первом варианте оптимизации электропотребления рассматривается только один ГП: либо ГП₁ – остров Русский, либо ГП₂ – остров Попова. В этом случае матрица цен имеет диагональный вид

$$\begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Второй вариант предусматривает возможность взаимного импорта или экспорта между генерирующими потребителями или обоих потребителей с энергосистемой, при этом вид матрицы цен совпадает с (2.11).

где c_{11} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из энергосистемы;

c_{22} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из ВЭС;

c_{33} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из накопителя энергии.

Минимизации расходов генерирующего потребителя достигается путём решения следующей системы уравнений

$$M = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{ij} \cdot P_j \cdot t \rightarrow \min, \quad (2.12)$$

где C – матрица цен возможных источников генерации;

P – вектор электропотребления, состоящий из $(P_{ЭС}, P_{ВЭУ}, P_{Акк})^T$ элементов;

M – суммарный расход за электроэнергию $M = \sum_{i=1}^3 m_i$;

$t = 1$ час.

Во время подбора значений вырабатываемой или передаваемой электроэнергии из входного вектора обязательно должны, выполняться следующие ограничения:

$$0 \leq P_{ч, \max}^{ГП} \leq P_{ЭС}; \quad 0 \leq P_{ВЭУ} \leq P_{\max}^{ВЭУ}; \quad 0 \leq P_{Акк} \leq P_{\max}^{Акк}.$$

На основе предложенной математической модели разработан алгоритм решения поставленной задачи и на его основе осуществлена программная реализация на языке Delphi, который подробно изложен в 2.7.

В качестве контрольного расчета выбран суточный график электропотребления одного из дней зимнего периода с учетом возможной генерации ВЭС и аккумулярование энергии. Из приведённых графиков на Рисунке 2.8 видно при двух зонном тарифе стоимости электроэнергии от энергосистемы ($c_{11} = 3,2$ р.), когда дневной тариф действует с 7 часов утра до 23 часов вечера, а ночной сниженный тариф ($c_{11} = 1,4$ р.), с 23 часов вечера до 7 часов утра оптимальное электропотребление складывается следующим образом:

- аккумулярование энергии необходимо осуществлять при льготном тарифе и во время избытка энергии от ВЭС;

- в период льготного тарифа, при нехватке энергии у ГП, получать и/или аккумулировать энергию от энергосистемы;
- в период дневного тарифа при нехватке энергии у ГП, получать от накопителя и энергосистемы;
- во всех периодах ночного и дневного тарифов предпочтение отдается генерации от ВЭС.

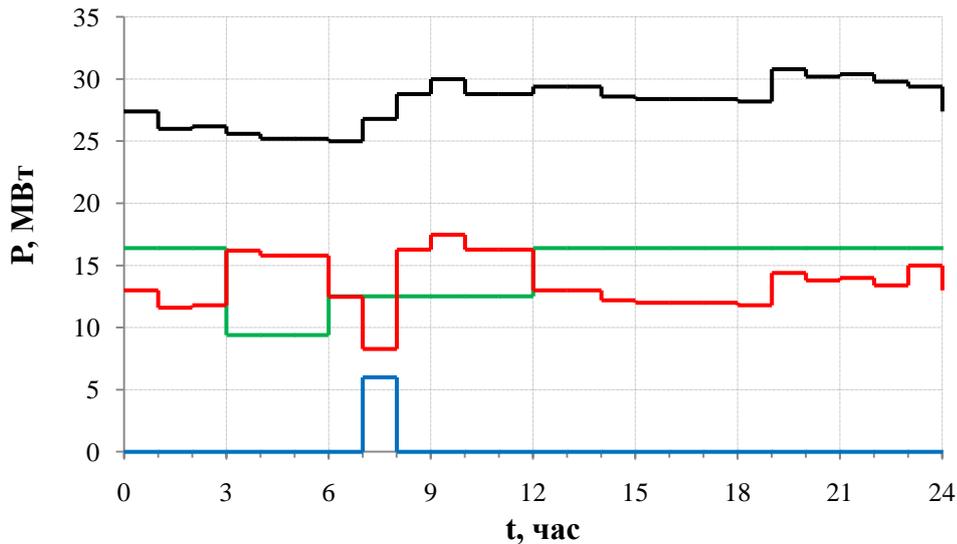


Рисунок 2.8 – График электропотребления ГП₁ ($P_{нагр.}$ – черная линия, $P_{ЭС}$ – красная линия, $P_{ВЭУ}$ – зеленая линия и $P_{Акк.}$ – синяя линия)

С помощью решения оптимизационной задачи минимизируются финансовые затраты от всех источников генерации за каждый час суточного графика, и в целом на суточном времени. График минимальных финансовых затрат за сутки представлен на Рисунке 2.9.

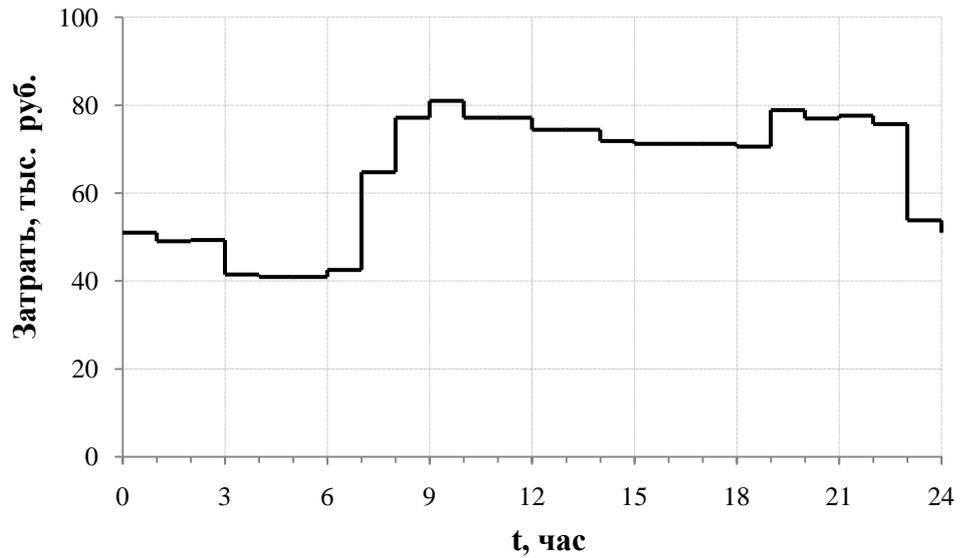


Рисунок 2.9 – Минимальные финансовые затраты ГП₁

Аналогичные расчеты выполнены для ГП₂, который расположен на острове Попова. Графики электропотребления и финансовые затраты представлены на Рисунках 2.10 и 2.11.

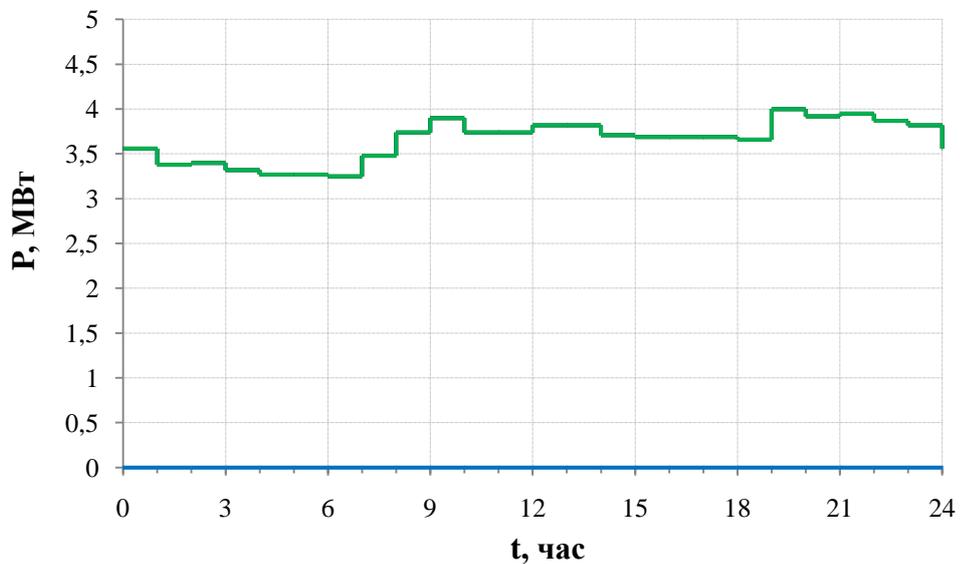


Рисунок 2.10 – График электропотребления ГП₂ ($P_{нагр.}$ – черная линия, $P_{ВЭУ}$ – зеленая линия и $P_{Акк.}$ – синяя линия)

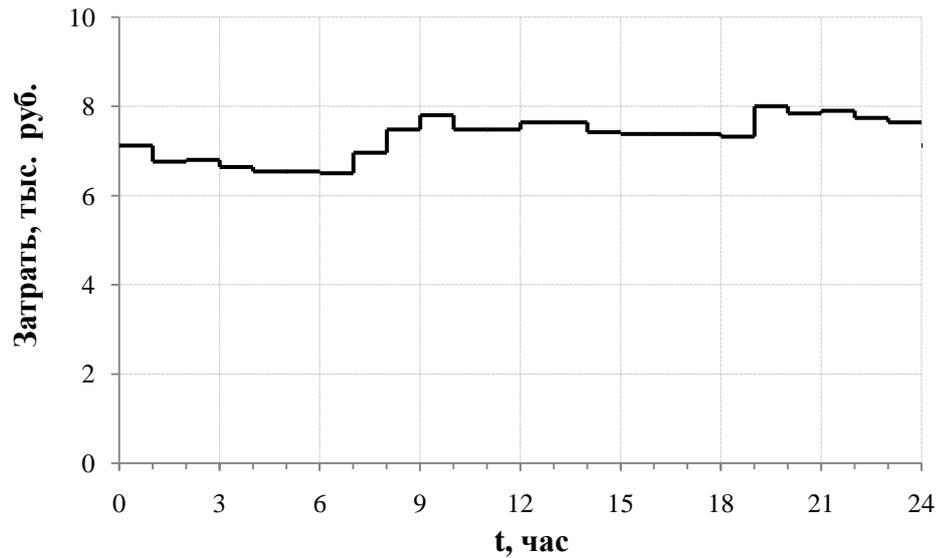


Рисунок 2.11 – Минимальные финансовые затраты ГП₂

В связи с тем, что генерирующие возможности ВЭУ на острове Попова превышают собственное электропотребление, возникает возможность экспортировать некоторую долю электроэнергии в энергосистему. На Рисунке 2.12 представлен график избыточной генерируемой мощности ВЭУ, а на Рисунке 2.13 доход ГП₂ с учетом её экспорта в энергосистему

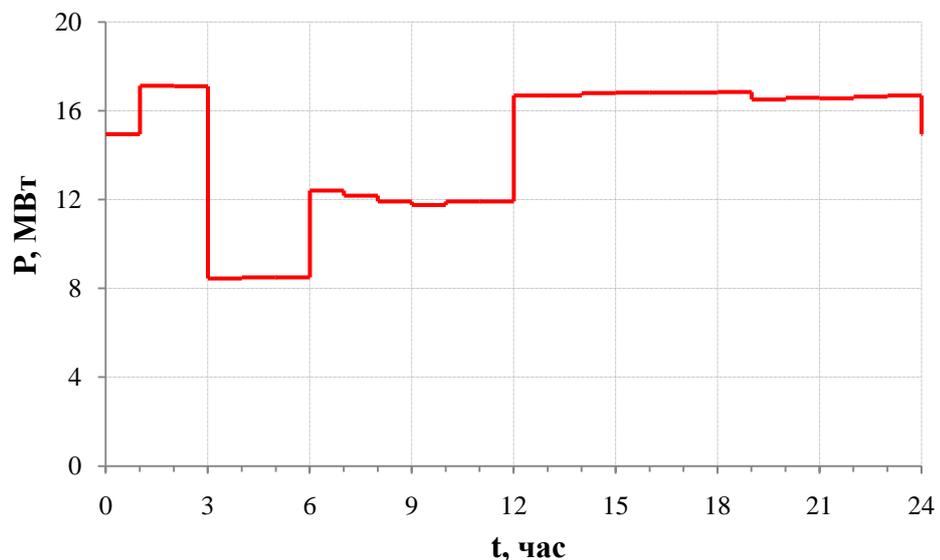


Рисунок 2.12 – График избыточной генерируемой мощности ВЭУ

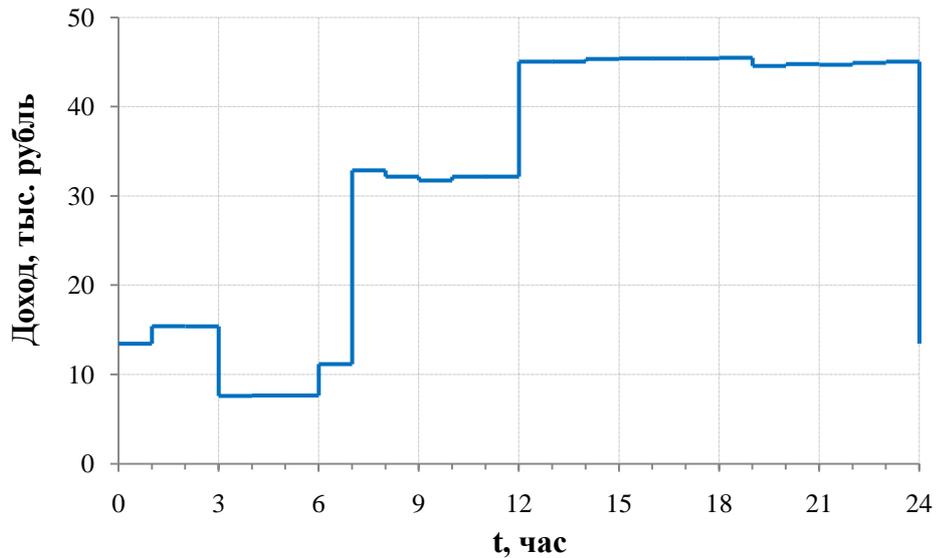


Рисунок 2.13 – Максимальный доход ГП₂ с учетом собственной генерации от ВЭУ

Для условий, когда подключен ГП₂ (остров Попов) со своей ВЭС мощностью до 20 МВт возникает возможность не только минимизации расходов за электроэнергию, но и продажи электроэнергии в энергосистему или осуществлять взаимовыгодный обмен энергией между генерирующими потребителями.

В Таблице 2.4 представлены условия энергетического баланса на суточном интервале с дискретностью четыре часа для генерирующего потребителя – острова Русский. Видно, что заряд аккумулятора целесообразно проводить в начале суток. Использование энергии ветра необходимо осуществлять в утренний и вечерний максимум (8 и 20 часов), чтобы не покупать энергию из энергосистемы. Наряду с этим активный потребитель (ГП₁) сам может поставлять избыточную энергию в энергосистему.

Таблица 2.4 – Электропотребление мощности острова Русский (ГП₁), МВт

Время суток, часы	$P_{\text{наг}}$	$P_{\text{ЭС}}$	$P_{\text{ВЭУ1}}$	$P_{\text{накоп.1}}$	$P_{\text{Акк.1}}$	$ГП_1 \rightarrow ГП_2$	$ГП_1 \rightarrow ЭС$	$ГП_2 \rightarrow ГП_1$
0	27,4	0	16,4	0	0	0	0	13
1	26	0	16,4	2	0	0	0	11,6
2	26,2	0	16,4	4	0	0	0	11,8
3	25,6	7,76	9,4	6	0	0	0	8,44
4	25,2	7,31	9,4	6	0	0	0	8,49
5	25,2	7,31	9,4	6	0	0	0	8,49
6	25	0,08	12,52	6	0	0	0	12,4
7	26,8	0	12,52	6	6	0	0	8,28
8	28,8	4,37	12,52	0	0	0	0	11,91
9	30	5,73	12,52	0	0	0	0	11,75
10	28,8	4,37	12,52	0	0	0	0	11,91
11	28,8	4,37	12,52	0	0	0	0	11,91
12	29,4	0	16,4	0	0	0	0	13
13	29,4	0	16,4	0	0	0	0	13
14	28,6	0	16,4	0	0	0	0	12,2
15	28,4	0	16,4	0	0	0	0	12
16	28,4	0	16,4	0	0	0	0	12
17	28,4	0	16,4	0	0	0	0	12
18	28,2	0	16,4	0	0	0	0	11,8
19	30,8	0	16,4	0	0	0	0	14,4
20	30,2	0	16,4	0	0	0	0	13,8
21	30,4	0	16,4	0	0	0	0	14
22	29,8	0	16,4	0	0	0	0	13,4
23	29,4	0	16,4	0	0	0	0	15

В Таблице 2.5. выполнены аналогичные расчеты для ГП₂ острова Попова. Показано, что в связи незначительной собственной нагрузкой и мощным ветропарком почти всегда имеется избыток энергии за счет, ветра, который может быть направлен по обмену для потребителя ГП₁ и в энергосистему.

Таблица 2.5 – Электропотребление мощности острова Попова (ГП₂), МВт

Время суток, часы	$P_{\text{наг}}$	$P_{\text{ЭС}}$	$P_{\text{ВЭУ2}}$	$P_{\text{накоп.2}}$	$P_{\text{Акк.2}}$	$ГП_2 \rightarrow ГП_1$	$ГП_2 \rightarrow ЭС$	$ГП_1 \rightarrow ГП_2$
0	3,56	0	20,5	0	0	13	1,94	0
1	3,38	0	20,5	2	0	11,6	5,52	0
2	3,4	0	20,5	2	0	11,8	5,3	0
3	3,32	0	11,76	2	0	8,44	0	0
4	3,27	0	11,76	2	0	8,49	0	0
5	3,27	0	11,76	2	0	8,49	0	0
6	3,25	0	15,65	2	0	12,4	0	0
7	3,48	0	15,65	2	0	8,28	3,89	0
8	3,74	0	15,65	2	0	11,91	0	0
9	3,9	0	15,65	2	0	11,75	0	0
10	3,74	0	15,65	2	0	11,91	0	0
11	3,74	0	15,65	2	0	11,91	0	0
12	3,82	0	20,5	2	0	13	3,68	0
13	3,82	0	20,5	2	0	13	3,68	0
14	3,71	0	20,5	2	0	12,2	4,59	0
15	3,69	0	20,5	2	0	12	4,81	0
16	3,69	0	20,5	2	0	12	4,81	0
17	3,69	0	20,5	2	0	12	4,81	0
18	3,66	0	20,5	2	0	11,8	5,04	0
19	4	0	20,5	2	0	14,4	2,1	0
20	3,92	0	20,5	2	0	13,8	2,78	0
21	3,95	0	20,5	2	0	14	2,55	0
22	3,87	0	20,5	2	0	13,4	3,23	0
23	3,82	0	20,5	2	0	15	1,68	0

В Таблице 2.6 приведены оптимальные финансовые затраты при покрытии графика нагрузки из всех возможных источников питания включая возобновляемые источники энергии. Показано, что не смотря на минимизацию расходов генерирующий потребитель (ГП₁) не получает дополнительных доходов, т.к. его собственное электропотребление не может быть покрыто даже при двусторонних потоках энергии.

Таблица 2.6 – Оптимизация затрат на электропотребление, тыс. руб.

Время суток, часы	Минимальный расход ГП ₁	Минимальный расход ГП ₂	Максимальный доход ГП ₁	Максимальный доход ГП ₂	Итого ГП ₁	Итого ГП ₂
0	32,80	11,12	0	19,95	-32,80	+8,83
1	32,80	6,76	0	21,21	-32,80	+14,45
2	32,80	6,8	0	21,29	-32,80	+14,49
3	29,66	6,64	0	11,82	-29,66	+5,18
4	29,03	6,54	0	11,89	-29,03	+5,35
5	29,03	6,54	0	11,89	-29,03	+5,35
6	25,15	6,5	0	17,36	-25,15	+10,86
7	38,24	6,96	0	35,34	-38,24	+28,38
8	39,02	7,48	0	35,73	-39,02	+28,25
9	43,38	7,8	0	35,25	-43,38	+27,45
10	39,02	7,48	0	35,73	-39,02	+28,25
11	39,02	7,48	0	35,73	-39,02	+28,25
12	32,80	7,64	0	48,94	-32,80	+41,30
13	32,80	7,64	0	48,94	-32,80	+41,30
14	32,80	7,42	0	48,99	-32,80	+41,57
15	32,80	7,38	0	48,99	-32,80	+41,61
16	32,80	7,38	0	48,99	32,80	+41,61
17	32,80	7,38	0	48,99	-32,80	+41,61
18	32,80	7,32	0	49,01	-32,80	+41,69
19	32,80	8	0	48,87	-32,80	+40,87
20	32,80	7,84	0	48,91	-32,80	+41,07
21	32,80	7,9	0	48,89	-32,80	+40,99
22	32,80	7,74	0	48,92	-32,80	+41,18
23	32,80	7,64	0	22,51	-32,80	+14,87

2.7 Алгоритм и программная реализация предложенного метода оптимизации

Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС), неразрывно связано с повышением уровня их интеллектуализации. Одно из современного направления этого процесса представляет собой концепция Smart Grid – интеллектуальной сети. При этом возникает важная проблема возможности

электропотребления потребителями не только от внешней ЭЭС, но также от внутренних источников генерации, в качестве которых могут выступать возобновляемые источники энергии и накопители энергии, которые аккумулируют энергию в периоды её избыточности. Для таких электропотребителей введен новый термин «генерирующий потребитель». В концепции двустороннего потока энергии открывается возможность получения электроэнергии от трёх источников: энергосистемы, ветроэнергетической установки или накопителя. Стоимости этих видов энергии различны и, кроме того, они определяются по двум зонам тарифов стоимости энергии энергосистемы.

Для этой цели было реализовано программное обеспечение на основе разработанных алгоритмов. На первом этапе разработан алгоритм минимизации расходов отдельного генерирующего потребителя в зависимости от условий генерации мощности внутренним источником энергии-ВЭУ (Рисунок 2.14), в зависимости от того $P_{ГП} > P_{ВЭУ}$, то есть имеется дефицит мощности или $P_{ВЭУ} > P_{ГП}$ и тогда имеет место профицит (избыток). Далее если существует избыток мощности генерирующего потребителя $P_{ВЭУ} > P_{ГП}$, то при условии льготного тарифа $h < 7$ выполняется условие пополнения аккумулятора и создаётся запрос на продажу. В противном случае создаётся запрос на покупку электроэнергии, включая электропотребление из накопителя.

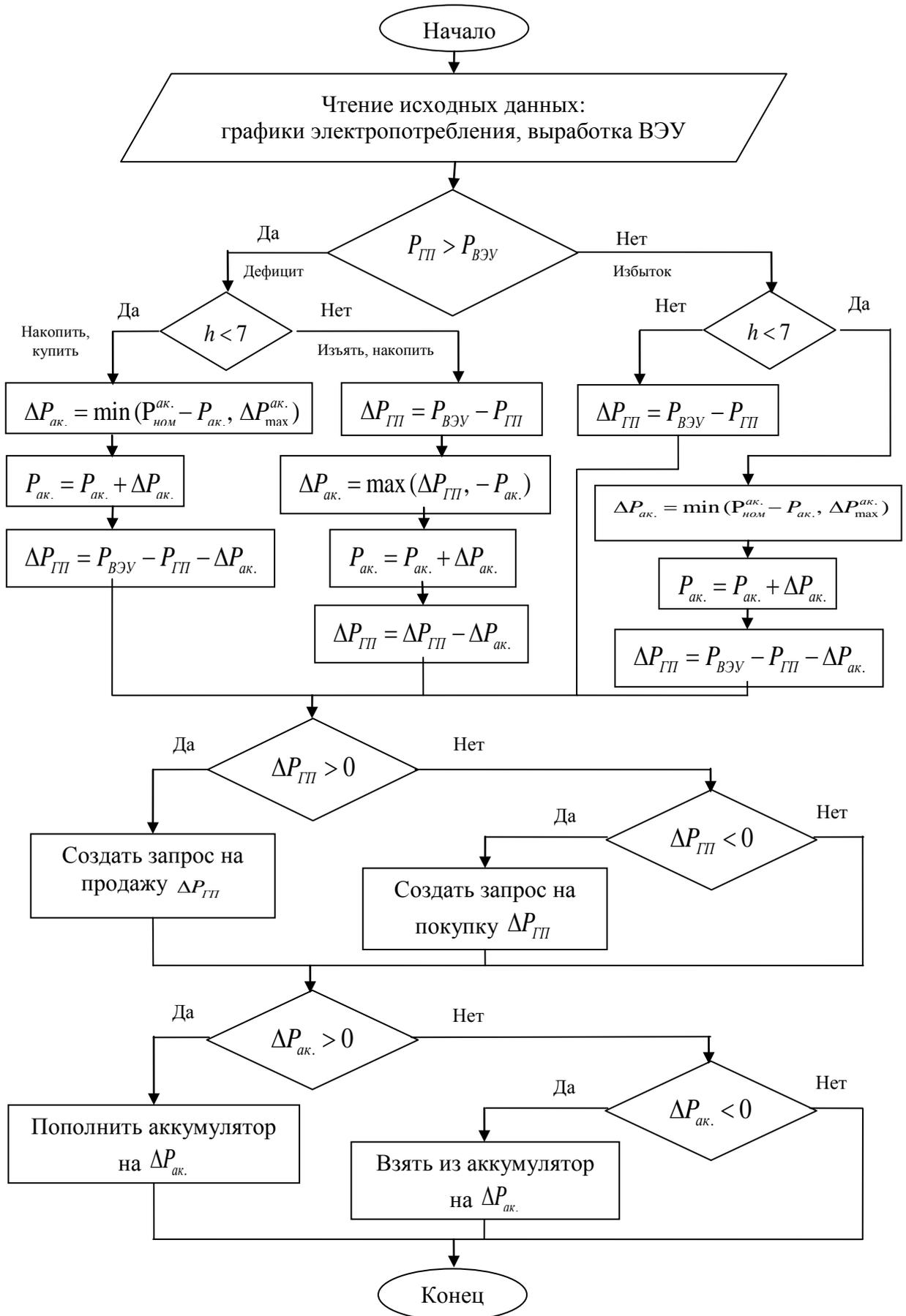


Рисунок 2.14 – Блок-схема алгоритма генерирующего потребителя при внутреннем источнике генерации ВЭУ

Наряду с этим разработан более сложный алгоритм оптимального электропотребления, при участии двух генерирующих потребителей (ГП₁ – остров Русский и ГП₂ – остров Попова). Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 2.15. В зависимости от дефицита или профицита мощности для каждого из ГП, как представлено в блок-схеме алгоритма (Рисунок 2.14), возникает обмен между генерирующими потребителями. В противном случае осуществляется экспорт электроэнергии во внешний источник-энергосистему.

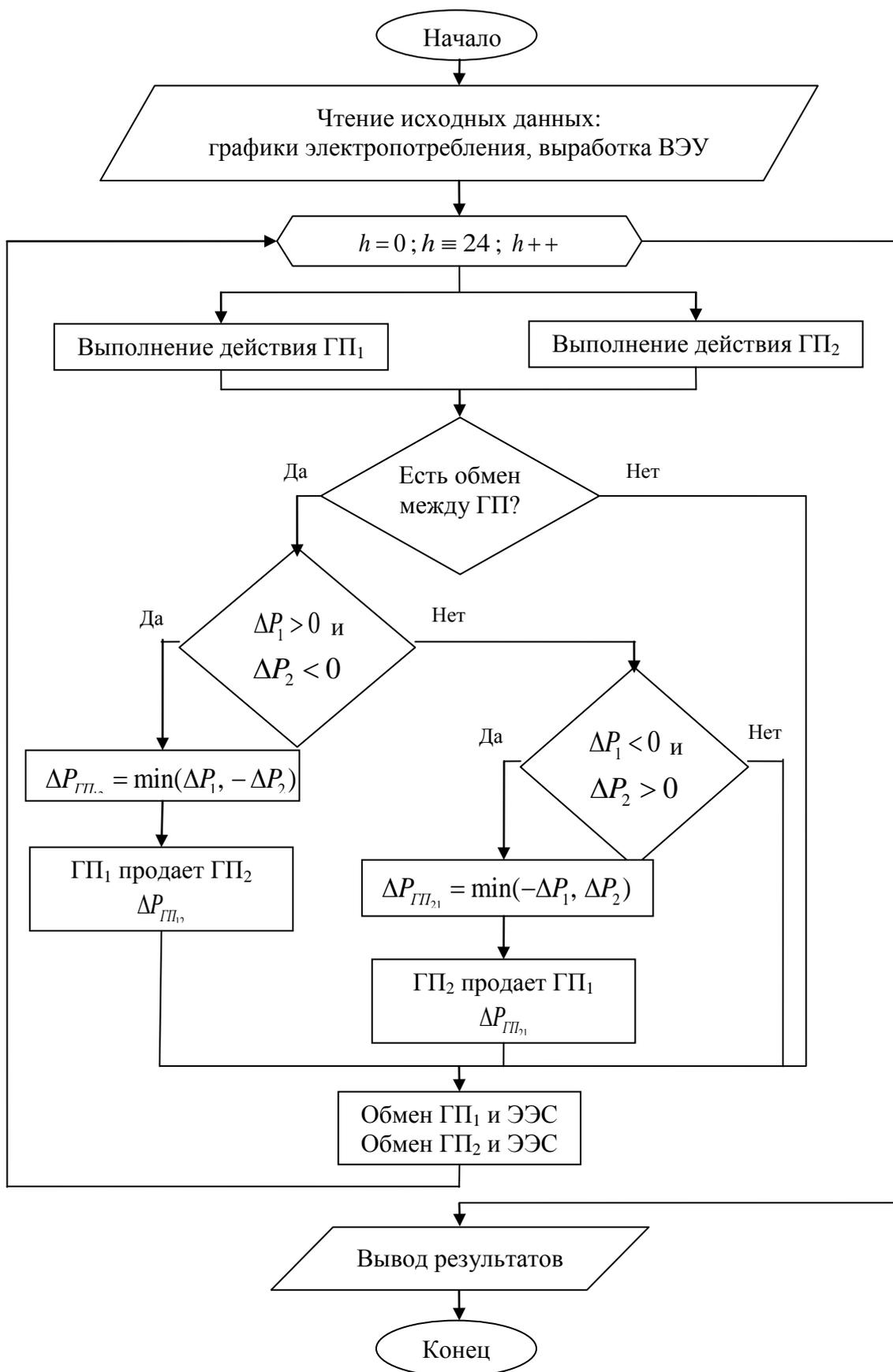


Рисунок 2.15 – Блок схема алгоритма энергетического обмена между генерирующими потребителями и энергосистемой

Данный программный продукт представляет собой систему поддержки принятия решений для минимизации финансовых расходов за потребляемую электроэнергию.

Для первого варианта электропотребления от всех источников генерации на Рисунке 2.16 представлены панели исходных данных, с возможностью их изменения.

Цена электроэнергии за 1 кВт/час

Разница цен

	день	ночь
Система	<input type="text" value="3,2"/>	<input type="text" value="1,4"/>
ВЭУ	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>
Аккумулятор	<input type="text" value="2,2"/>	<input type="text" value="1,6"/>

Матрица цен

день			ночь		
3,2	0	0	1,4	0	0
0	2	0	0	2	0
0	0	2,2	0	0	1,6

Управление аккумулятора

Аккумулятор разряжено

Заряд аккумулятора

Номинальная мощность аккумулятора

Операции

Тип ввода

Ручной ввод

Загрузить из файла

Суммарный расход

Рисунок 2.16 –Интерфейс панели исходных данных

На Рисунке 2.17 представлены полный интерфейс программного обеспечения решения оптимизационной задачи. Аналогичную информацию можно получить по ГП₂ острова Попова. Результаты расчетов представлены на Рисунках 2.8–2.13.

Совместное использование электроэнергии | Электропотребление с учетом собственной генерации ГП | Двухсторонний поток между ГП-ми

Цена электроэнергии за 1 кВт/час

Разница цен 0,2

	день	ночь
Система	3,2	1,4
ВЗУ	2	2
Аккумулятор	2,2	1,6

Составить матрицу цен

Матрица цен

	день			ночь		
	3,2	0	0	1,4	0	0
	0	2	0	0	2	0
	0	0	2,2	0	0	1,6

Управление аккумулятора

Аккумулятор разряжено

Заряд аккумулятора

Номинальная мощность аккумулятора

Операции

Тип ввода

Ручной ввод

Загрузить из файла

Суммарный расход

Исходные данные

Время	Рсис	Ргп1	Рвзг1	Рак1
0	27,40	27,40	16,40	0,00
1	26,00	26,00	16,40	2,00
2	26,20	26,20	16,40	4,00
3	25,60	25,60	9,40	6,00
4	25,20	25,20	9,40	6,00
5	25,20	25,20	9,40	6,00
6	25,00	25,00	12,52	6,00
7	26,80	26,80	12,52	6,00
8	28,80	28,80	12,52	0,00
9	30,00	30,00	12,52	0,00
10	28,80	28,80	12,52	0,00
11	28,80	28,80	12,52	0,00
12	29,40	29,40	16,40	0,00
13	29,40	29,40	16,40	0,00
14	28,60	28,60	16,40	0,00
15	28,40	28,40	16,40	0,00
16	28,40	28,40	16,40	0,00
17	28,40	28,40	16,40	0,00
18	28,20	28,20	16,40	0,00
19	30,80	30,80	16,40	0,00
20	30,20	30,20	16,40	0,00
21	30,40	30,40	16,40	0,00
22	29,80	29,80	16,40	0,00
23	29,40	29,40	16,40	0,00

Результаты

Время	Мил. расх	Рсис	Рвзг1	Рак1	Рвзб
0	51,00	13,00	16,40	0,00	0,00
1	49,04	11,60	16,40	0,00	0,00
2	49,32	11,80	16,40	0,00	0,00
3	41,48	16,20	9,40	0,00	0,00
4	40,92	15,80	9,40	0,00	0,00
5	40,92	15,80	9,40	0,00	0,00
6	42,51	12,48	12,52	0,00	0,00
7	64,74	8,28	12,52	6,00	0,00
8	77,14	16,28	12,52	0,00	0,00
9	80,98	17,48	12,52	0,00	0,00
10	77,14	16,28	12,52	0,00	0,00
11	77,14	16,28	12,52	0,00	0,00
12	74,40	13,00	16,40	0,00	0,00
13	74,40	13,00	16,40	0,00	0,00
14	71,84	12,20	16,40	0,00	0,00
15	71,20	12,00	16,40	0,00	0,00
16	71,20	12,00	16,40	0,00	0,00
17	71,20	12,00	16,40	0,00	0,00
18	70,56	11,80	16,40	0,00	0,00
19	78,88	14,40	16,40	0,00	0,00
20	76,96	13,80	16,40	0,00	0,00
21	77,60	14,00	16,40	0,00	0,00
22	75,68	13,40	16,40	0,00	0,00
23	53,80	15,00	16,40	0,00	0,00

16.08.2018 0:23:48

Рисунок 2.17– Интерфейс разработанной программы

Для третьего варианта электропотребления с возможностью многостороннего обмена энергии (экспорта и импорта), панель исходных данных, с возможностью их изменения представлена на Рисунке 2.18.

Цена покупки электроэнергии Равница цен <input type="text" value="0,2"/>		Матриц цен (покупка)																																
	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>день</td> <td>ночь</td> </tr> <tr> <td>Система</td> <td><input type="text" value="3,2"/></td> <td><input type="text" value="1,4"/></td> </tr> <tr> <td>ВЭУ</td> <td><input type="text" value="2"/></td> <td><input type="text" value="2"/></td> </tr> <tr> <td>Аккумулятор</td> <td><input type="text" value="2,2"/></td> <td><input type="text" value="1,6"/></td> </tr> </table>		день	ночь	Система	<input type="text" value="3,2"/>	<input type="text" value="1,4"/>	ВЭУ	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>	Аккумулятор	<input type="text" value="2,2"/>	<input type="text" value="1,6"/>	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">день</td> <td><input type="text" value="3,20"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="2,00"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="2,20"/></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">ночь</td> <td><input type="text" value="1,40"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="2,00"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/></td> <td><input type="text" value="1,60"/></td> </tr> </table>	день	<input type="text" value="3,20"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="2,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="2,20"/>	ночь	<input type="text" value="1,40"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="2,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="1,60"/>
	день	ночь																																
Система	<input type="text" value="3,2"/>	<input type="text" value="1,4"/>																																
ВЭУ	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>																																
Аккумулятор	<input type="text" value="2,2"/>	<input type="text" value="1,6"/>																																
день	<input type="text" value="3,20"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>																															
	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="2,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>																															
	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="2,20"/>																															
ночь	<input type="text" value="1,40"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>																															
	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="2,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>																															
	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="1,60"/>																															
<input type="button" value="Составить матрицу цен"/>		Тип ввода <input type="radio"/> Ручной ввод <input checked="" type="radio"/> Загрузить из файла <input type="button" value="Загрузить"/>																																
Цена продажи электроэнергии		Операции																																
	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>день</td> <td>ночь</td> </tr> <tr> <td>ГП - система</td> <td><input type="text" value="2,7"/></td> <td><input type="text" value="0,9"/></td> </tr> <tr> <td>ГП - ГП</td> <td><input type="text" value="3"/></td> <td><input type="text" value="1,4"/></td> </tr> </table>		день	ночь	ГП - система	<input type="text" value="2,7"/>	<input type="text" value="0,9"/>	ГП - ГП	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="1,4"/>	<input type="button" value="Вычислить"/> <input type="button" value="Сохранить"/>																							
	день	ночь																																
ГП - система	<input type="text" value="2,7"/>	<input type="text" value="0,9"/>																																
ГП - ГП	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="1,4"/>																																
		<input type="button" value="Очистить"/> <input type="button" value="График"/>																																
Управление аккумулятора 1 <input type="checkbox"/> Аккумулятор разряжено Заряд аккумулятора <input type="text"/> Номинальная мощность аккумулятора <input type="text" value="6"/>		<input type="button" value="Результаты"/>																																
Управление аккумулятора 2 <input type="checkbox"/> Аккумулятор разряжено Заряд аккумулятора <input type="text"/> Номинальная мощность аккумулятора <input type="text" value="2"/>		Расходы и доходы Расход по ГП1 <input type="text"/> Доход по ГП1 <input type="text"/> Расход по ГП2 <input type="text"/> Доход по ГП2 <input type="text"/>																																

Рисунок 2.18 –Интерфейс панели исходных данных

На Рисунке 2.19 представлены панели исходных данных для этого варианта с добавлением суточных графиков электропотребления ГП₁ и ГП₂, с ограничениями на выработку мощности по каждому источнику генерации. Результаты расчетов третьего варианта представлены в Таблицах 2.4–2.6

Цена покупки электроэнергии		Матрица цен (покупка)			Исходные данные							
Разница цен	0,2	3,20	0,00	0,00	Время	Рсис	Ргп1	Рвэу1	Рак1	Ргп2	Рвэу2	Рак2
Система	день 3,2 ночь 1,4	0,00	2,00	0,00	0	27,40	27,40	16,40	0,00	3,56	20,50	0,00
ВЭУ	2 2	0,00	0,00	2,20	1	26,00	26,00	16,40	0,00	3,38	20,50	0,00
Аккумулятор	2,2 1,6	1,40	0,00	0,00	2	26,20	26,20	16,40	0,00	3,40	20,50	0,00
Составить матрицу цен		0,00	2,00	0,00	3	25,60	25,60	9,40	0,00	3,32	11,76	0,00
Цена продажи электроэнергии		0,00	0,00	1,60	4	25,20	25,20	9,40	0,00	3,27	11,76	0,00
ГП - система	день 2,7 ночь 0,9	Тип ввода			5	25,20	25,20	9,40	0,00	3,27	11,76	0,00
ГП - ГП	3 1,4	<input type="radio"/> Ручной ввод <input checked="" type="radio"/> Загрузить из файла			6	25,00	25,00	12,52	0,00	3,25	15,65	0,00
Управление аккумулятора 1		Загрузить			7	26,80	26,80	12,52	0,00	3,48	15,65	0,00
<input type="checkbox"/> Аккумулятор разряжено	Заряд аккумулятора	Операции			8	28,80	28,80	12,52	0,00	3,74	15,65	0,00
Номинальная мощность аккумулятора	6	<input type="button" value="Вычислить"/> <input type="button" value="Сохранить"/> <input type="button" value="Очистить"/> <input type="button" value="График"/>			9	30,00	30,00	12,52	0,00	3,90	15,65	0,00
Управление аккумулятора 2		Результаты			10	28,80	28,80	12,52	0,00	3,74	15,65	0,00
<input type="checkbox"/> Аккумулятор разряжено	Заряд аккумулятора	Расходы и доходы			11	28,80	28,80	12,52	0,00	3,74	15,65	0,00
Номинальная мощность аккумулятора	2	Расход по ГП1			12	29,40	29,40	16,40	0,00	3,82	20,50	0,00
		Доход по ГП1			13	29,40	29,40	16,40	0,00	3,82	20,50	0,00
		Расход по ГП2			14	28,60	28,60	16,40	0,00	3,71	20,50	0,00
		Доход по ГП2			15	28,40	28,40	16,40	0,00	3,69	20,50	0,00
					16	28,40	28,40	16,40	0,00	3,69	20,50	0,00
					17	28,40	28,40	16,40	0,00	3,69	20,50	0,00
					18	28,20	28,20	16,40	0,00	3,66	20,50	0,00
					19	30,80	30,80	16,40	0,00	4,00	20,50	0,00
					20	30,20	30,20	16,40	0,00	3,92	20,50	0,00
					21	30,40	30,40	16,40	0,00	3,95	20,50	0,00
					22	29,80	29,80	16,40	0,00	3,87	20,50	0,00
					23	29,40	29,40	16,40	0,00	3,82	20,50	0,00

Рисунок 2.19 –Интерфейс панели исходных данных, включая суточный график электропотребления

2.8 Минимизация негативного влияния ветроустановок на окружающую среду

В соответствии с законодательством Российской Федерации о природоохранных мероприятиях для использования ВЭС на островах Русский и Попова в своё время были проведены общественные слушания по выполнению требований законодательства, как во время строительства ВЭС, так и в период их дальнейшей эксплуатации.

Эксплуатация ветроэлектростанций и выработка ею электроэнергии не влечет за собой появления каких-либо отходов или выбросов в окружающую среду, а также не ведёт к необратимым или критически важным изменениям в атмосфере, гидросфере и литосфере.

Важным экологическим преимуществом ВЭС, является сокращение выбросов парниковых газов другими источниками энергии за период

эксплуатации ВЭС, который принят в 20 лет. Тепловые электростанции Приморья, работающие, в основном, на бурых углях, имеют КПД 33-35% при процентном содержании углерода в составе угля примерно 0,4. В результате, ожидается снижение выбросов на более чем 670 тысяч тонн CO₂ и 560 тонн оксида серы.

Ветроэнергетическая станция, разгружая топливные мощности, например, на острове Русский газотурбинную электростанцию мощностью 62 МВт либо дизель-электростанцию, позволит сэкономить до 24 000 тонн углеводородного топлива. При строительстве дополнительной ВЭС на острове Русский, кроме решения задачи стабильного электроснабжения объектов различного назначения будут выведены в резерв установленные дизель-генераторы мощностью 1,6 МВт.

Во время работы ВЭУ на расстоянии не ближе 600 м от мест, где постоянно находятся люди (предполагается для острова Попова), уровень звукового давления будет составлять от 36 до 40 Дб(А), когда ветер дует со стороны ВЭУ. Оценка шума ведется по логарифмической шкале в децибелах (Дб), так как человеческое ухо и мозг воспринимают громкость примерно по этому закону (Таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Градация шумов в Дб(А)

Уровень	Соответствие
0	Порог слышимости
30	Шёпот. Фон от растений, преград, при ветре 5-6 м/сек
60	Разговор в комнате
90	Городское движение
120	Рок-концерт
150	Реактивный самолет на расстоянии 10 м

Удвоение звукового давления (мощности) – это повышение индекса на 3. Звук 100 Дб(А) в 2 раза мощнее, чем 97 Дб(А). Звук убывает с квадратом расстояния. При удалении на 200 м шум будет в 4 раза меньше (на 6 Дб(А)), чем при удалении на 100 м (Таблица 2.8). Нужно поставить рядом 10 турбин,

чтобы слышимая (как она воспринимается человеком), громкость удвоилась (10 Дб(А)) на слух.

Таблица 2.8 – Шум при удалении от ВЭС соответствует

Расстояние в диаметрах ротора	Соответствие
1	50-55 Дб(А) – сушилka для одежды
2	44 Дб(А) – тихая жилая комната
6	40 Дб(А) – слабо различается или сливается с фоном

По международным стандартам и соглашениям уровень шума непосредственно в источнике (гондола ВЭС) - 96 – 101 Дб(А). Законодательный порог в Дании 45 Дб(А) на улице и 40 Дб(А) в густозастроенных кварталах. Примерный график снижения шума от расстояния (источник информации – RISO) представлен на Рисунке 2.20.

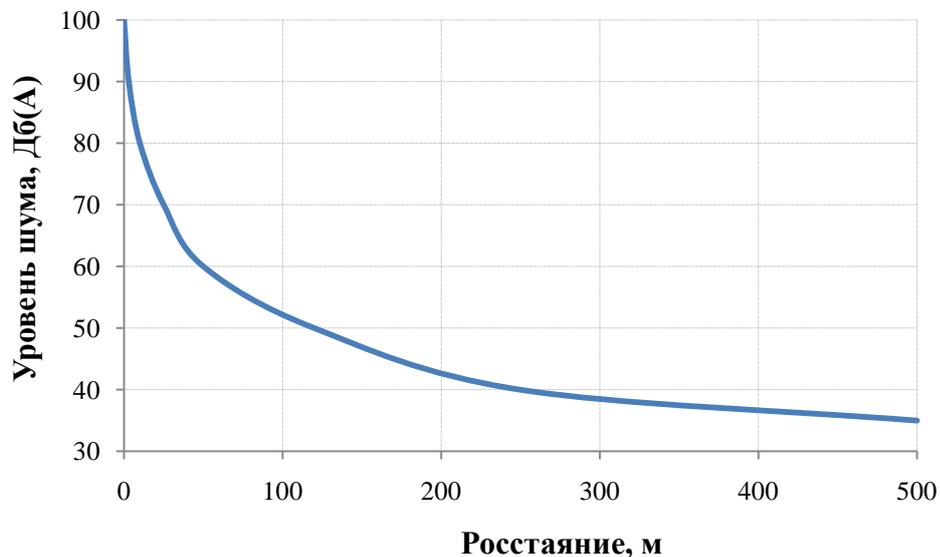


Рисунок 2.20 – Примерный график ослабления шума для стандартной европейской ВЭС 2 МВт

Таким образом, шум от ВЭУ будет представлять собой типичный фоновый уровень сельской местности, соответствующий СанПиН. При установке ВЭС в 1000 м от жилья, и более, что предполагается для острова

Русский, шум не ощущается. В настоящее время уровень шума от ВЭС не считается сколько-нибудь важной проблемой.

При проектировании ВЭС особое внимание должно быть уделено тому, чтобы при строительстве ВЭС не затрагивались важные участки обитания птиц, охраняемые законом заповедные зоны, а также участки пути вдоль основных миграционных маршрутов птиц и ключевые точки совпадения основных миграционных путей птиц, а также участки территорий, которые благодаря корму и характеру их естественной среды привлекают большие скопления птиц.

Грунт, который будет выниматься, при строительстве, в том числе скальный грунт, будут использован в значительной части для нужд инфраструктуры ВЭС. Строительство дорог будет ориентировано на реконструкцию существующих дорог, что улучшит транспортную инфраструктуру островах Русский и Попова. При необходимости, будут построены новые дороги так, чтобы геология и геоморфология территорий подвергались минимальным повреждениям. Таким образом, после строительства ВЭС, не будет оставаться неиспользованные земли, а все отвалы будут культивированы.

Резюмируя сказанное, можно заключить, что строительство и дальнейшая эксплуатация ВЭС не наносит какого-либо заметного вредного воздействия окружающей среде суши и моря.

Выводы

1. Географические и климатические условия прибрежной зоны Дальнего Востока в полной мере позволяют использовать альтернативные источники энергии, в частности, ветровые ресурсы этого региона таковы, что могут обеспечить вытеснение значительной доли углеводородных источников энергии.

2. Предложена математическая модель оптимального распределения энергетических ресурсов для двух генерирующих потребителей, а именно: островов Русский и Попова, с учетом возможной генерации от двух ветроэлектростанций и накопителей энергии для каждого из потребителей. Выполненные расчеты, при интеграции альтернативных источников энергии в систему, что целесообразно оптимальное управление электропотребления за каждый час на суточном интервале времени.

3. Разработаны эффективные алгоритмы оптимизация режимов, как отдельных генерирующих потребителей, так и их совокупности вместе с энергосистемой. Программная реализация этих алгоритмов позволила получить свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

4. Рассмотрена минимизация негативного влияния на окружающую среду значительного использования энергии ветровых потоков от двух ветропарков, включая их шумовое воздействие на жителей ближайших населенных пунктов.

3 ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА

3.1 Постановка задачи

Настоящая глава посвящена решению оптимизационных задач, обусловленных выбором оптимальных режимов электропотребления каждым генерирующим потребителем с возможностью двустороннего потока энергии и её аккумуляции. Предполагается, что генерирующий (активный) потребитель имеет несколько источников генерации, включая альтернативные и возобновляемые источники энергии, с различной стоимостью, а также накопители энергии. В качестве методов решения оптимизационной задачи использованы три модификации алгоритмов роевого интеллекта, а для сравнительного анализа использован также метод градиентного спуска.

Предложена новая идея принятия решений на основе приоритетности правил, которые могут служить основой нечеткого управления. На Рисунке 3.1 представлена схема взаимодействия выбранного алгоритма роевого интеллекта и модели оптимизируемого объекта, что позволяет оценить эффективность применения последовательных этапов отбора оптимального решения с учетом нескольких генерирующих потребителей. Утолщёнными показаны пути, по которым многократно осуществляется обмен вариантами решений от алгоритма к модели и обратно.



Рисунок 3.1 – Общий вид взаимодействия алгоритма роевого интеллекта и модели

Предлагаемый путь взаимодействия алгоритмов роевого интеллекта и модели оптимизационной задачи является достаточно универсальным, так как позволяет быстро корректировать условия задачи или вид модели. Управление уровнем взаимосвязи между задачами оптимизации режимов и алгоритмами ее решения увеличивает гибкость использования алгоритмов роевого интеллекта.

3.2 Оптимизационные алгоритмы для решения поставленной задачи

3.2.1 Алгоритм роя частиц

Алгоритм роя частиц интересен тем, что берет свои истоки не в методах оптимизации, а в методах визуализации. Его первоначальная версия была создана для визуализации движения птиц в стае для задач компьютерной графики. Алгоритм основан на том, что движение каждой птицы описывается рядом простых правил [81]. Алгоритм, позволяющий моделировать поведение стай птиц, вдохновил Дж. Кеннеди, Р. Эберхарта и Ю. Ши на создание принципиально нового метода оптимизации, который во многом основан на тех же эвристических правилах, что и указанный выше алгоритм поведения птиц. Авторы назвали свой метод оптимизацией

роящихся частиц (Particle Swarm Optimization), в русскоязычной литературе принято именовать его алгоритмом роя частиц или методов роя частиц [82–84].

В работе [85] предложена схема, позволяющая стандартизировать описание роевых алгоритмов. Поскольку далее приводятся описания еще двух алгоритмов роевого интеллекта, в работе использована именно эта схема. Согласно нее, алгоритм роя частиц можно записать в виде кортежа

$$PSO = \{S, M, A, P, I, O\}. \quad (3.1)$$

$$\text{Множество частиц } S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\},$$

где $|S|$ – мощность множества, то есть число частиц; на j -м шаге алгоритма i -

я состояние частица i можно представить как $s_{ij} = \{X_{ij}, V_{ij}, X_{ij}^{best}\}$;

$X_{ij} = \{x_{ij}^1, x_{ij}^2, \dots, x_{ij}^l\}$ – вектор варьируемых параметров (положение частицы);

$V_{ij} = \{v_{ij}^1, v_{ij}^2, \dots, v_{ij}^l\}$ – вектор скоростей частицы;

$X_{ij}^{best} = \{b_{ij}^1, b_{ij}^2, \dots, b_{ij}^l\}$ – наилучше с точки зрения критерия оптимизационной задачи положение частицы за время ее перемещений от начала работы алгоритма до текущего шага;

l – количество управляемых переменных решаемой задачи оптимизации.

Средство косвенного обмена информацией между частицами

$M = X_j^{best}$ – наилучше с точки зрения критерия оптимизационной задачи положение среди всех частиц, за время работы алгоритма от начала работы до текущего шага.

Алгоритм (правила перемещения частиц) A.

1. Генерация случайного множества начальных положений частиц

$$X_{i1} = rand(G(X)), i = 1, \dots, |S|,$$

где $rand(G(X))$ – вектор случайных величин, равномерно распределенных в области поиска решения.

$$V_{i1} = rand(-V_{max}, V_{max}), i = 1, \dots, |S|,$$

где $rand(-V_{max}, V_{max})$ – вектор равномерно распределенных случайных величин в диапазоне $(-V_{max}, V_{max})$.

В данной работе используется ограничение максимальной скорости перемещения частиц в пространстве поиска решений; в классическом алгоритме роя частиц такого ограничения нет, вместо этого в каждом шаге снижается значение инерции.

$$X_{i1}^{best} = X_{ij}, i = 1, \dots, |S|.$$

На первом шаге можно выбрать любую позицию в качестве наилучшей, так как она будет обновлена при дальнейших вычислениях целевой функции

$$X_1^{best} = X_{11}.$$

2. Вычисление критерия задачи оптимизации, обновление лучшего положения каждой частицы при необходимости, а также обновление наилучшего найденного решения X_1^{best} .

$$X_{ij}^{best} = X_{ij}, f(X_{ij}) < f(X_{ij}^{best}), i = 1, \dots, |S|.$$

3. Проверка условия завершения алгоритма. В данной работе использовано ограничение по числу шагов алгоритма. Если оно исчерпано, то результатом работы алгоритма является X_{ij}^{best} .

4. Непосредственно изменения положений частиц, то есть генерация новых решений

$$V_{ij+1} = V_{ij}\omega + \alpha_1(X_{ij}^{best} - X_{ij})rnd_1 + \alpha_2(M - X_{ij})rnd_2, i = 1, \dots, |S|, \quad (3.2)$$

$$V_{ij+1} = \begin{cases} V_{ij+1}, -V_{max} \leq V_{ij+1} \leq V_{max} \\ -V_{max}, V_{ij+1} \leq -V_{max} \\ V_{max}, V_{ij+1} \geq V_{max} \end{cases}, i = 1, \dots, |S|;$$

$$X_{ij+1} = \begin{cases} X_{ij} + V_{ij+1}, G(X_{ij} + V_{ij+1}) = 1 \\ X_{ij}, G(X_{ij} + V_{ij+1}) = 0 \end{cases}, i = 1, \dots, |S|,$$

где rnd_1 и rnd_2 – случайные числа, равномерно распределенные в интервале $[0,1)$;

$G(X)$ – обеспечивает проверку на принадлежность X области допустимых значений D .

Вектор $P = \{\alpha_1, \alpha_2, \omega, V_{max}\}$ – свободные параметры алгоритма роя частиц. Параметры α_1 и α_2 определяют, соответственно, степень учета личного и коллективного опыта, соответственно. Параметр ω характеризует инерционные свойства частиц. Параметр V_{max} отвечает за ограничение скоростей частиц.

3.2.2 Алгоритм роя пчел

В 2005 году вышли две работы, посвященные применению эвристик, основанных на поведении медоносных пчел в решении задач оптимизации. В русскоязычной литературе они часто путаются, но следует указать, что это два разных алгоритма: Artificial Bee Colony Algorithm [86] и Bees Algorithm [87]. Эвристические основы обоих алгоритмов следующие. Среди пчел есть разведчики и рабочие. Разведчики находят новые перспективные участки с цветами, а рабочие, ориентируясь на данные о разведенных участках, выполняют сбор нектара. Иными словами есть процесс генерации новых решений и процесс детального изучения окрестностей уже найденных решений. Математические модели в двух указанных алгоритмах отличаются, в настоящей работе используется Bees Algorithm, который назван алгоритмом роя пчел (не колонии).

Согласно уже указанной выше схеме описания алгоритмов роевого интеллекта, можно записать

$$BA = \{S, M, A, P, I, O\}. \quad (3.3)$$

Множество частиц (пчел) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|s|}\}$.

Так как значительное число обозначений совпадает для различных роевых алгоритмов, уже описанные обозначения для роя частиц здесь повторно не приводятся. Состояние частиц $s_{ij} = X_{ij}$.

Средство косвенного обмена информацией между частицами

$$M = \{N_{ij}^b, N_{kj}^g\}, i = 1, \dots, n^b, k = 1, \dots, n^g.$$

Представляет собой список так называемых «лучших» и «перспективных» позиций, найденных частицами на j -м шаге работы алгоритма.

Алгоритм (правила перемещения частиц) A.

1. Генерация случайного множества начальных положений частиц-разведчиков

$$X_{i1} = rand(G(X)), i = 1, \dots, n^s,$$

где n^s – количество частиц-разведчиков.

2. Вычисление критерия задачи оптимизации.

3. Проверка условия завершения алгоритма.

4. Непосредственно изменения положений частиц, то есть генерация новых решений.

4.1. Формирование лучших и перспективных решений (N_{ij}^b, N_{kj}^g) .

4.2. Отправка в окрестности N_{ij}^b, N_{kj}^g частиц-рабочих

$$X_{(i-1)c^b+k j+1} = N_{ij}^b + rnd \cdot rad, i = 1, \dots, n^b, k = 1, \dots, c^b \quad (3.4)$$

$$X_{n^b c^b + (i-1)c^b + k j+1} = N_{ij}^g + rnd \cdot rad, i = 1, \dots, n^g, k = 1, \dots, c^g \quad (3.5)$$

где rnd – вектор, состоящий из l равномерно распределенных случайных величин в интервале от -1 до 1 .

4.3. Отправка разведчиков

$$X_{n^b c^b + n^g c^g + i} = rand(G(X)), i = 1, \dots, n^s.$$

Вектор $P = \{n^s, n^b, n^g, c^b, c^g, rad, rx\}$ – свободные параметры алгоритма роя пчел. Параметр rad задает рассеяние частиц при отправке позиции, то есть размер окрестностей, параметр rx определяет минимальное допустимое расстояние между решениями, выбранными в списки (N_{ij}^b, N_{kj}^g) . Сумма параметров $n^s + n^b c^b + n^g c^g$ равна количеству частиц роя.

3.2.3 Алгоритм роя светлячков

Алгоритм роя светлячков (FFO – Fire Fly Optimization) также относится к роевым алгоритмам. Он был впервые опубликован в работах К. Янга в 2008 году [88]. Его биологическая основа – поведение светлячков, основным эвристическим правилом которого является стремление светлячка двигаться к другим, более ярко светящимся, светлячкам. При этом важно, что видимая для одного светлячка яркость свечения другого светлячка зависит от расстояния между ним.

Согласно уже указанной выше схеме описания алгоритмов роевого интеллекта, можно записать

$$FFO = \{S, M, A, P, I, O\}. \quad (3.6)$$

Множество частиц (светлячков) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|s|}\}$, частица характеризуется состоянием $s_{ij} = X_{ij}$

Средством косвенного обмена информацией между частицами $M = \{f(X_{1j}), f(X_{2j}), \dots, f(X_{|s|j})\}$ – яркости свечений частиц. Свечение определяется согласно критерию оптимальности решаемой задачи.

Алгоритм A определяет перемещение частиц.

1. Генерация начального множества частиц ($j=1$)

$$X_{i1} = rand(G(X)), i = 1, \dots, |S|.$$

2. Проверка условия завершения алгоритма.
3. Вычисление критерия по каждой частице.
4. Непосредственно изменения положений частиц, то есть генерация новых решений

$$X_{ij+1} = X_{ij} + v(X_{ij}, X_{kj}) \cdot (X_{kj} - X_{ij}) + \alpha \cdot rand, \quad (3.7)$$

$$i, k = 1, \dots, |S|, i \neq k,$$

$$X_{ij+1} = \begin{cases} X_{ij} + V_{ij+1}, G(X_{ij} + V_{ij+1}) = 1 \\ X_{ij}, G(X_{ij} + V_{ij+1}) = 0 \end{cases}, i = 1, \dots, |S|.$$

Функция $v(X_{ij}, X_{kj})$ задает зависимость силы притяжения k -ой частицы для i -й частицы на j -м шаге алгоритма

$$v(X_{ij}, X_{kj}) = \begin{cases} \frac{\beta}{1 + \gamma r(X_{ij}, X_{kj})}, m_{kj} < m_{ij} \\ 0, f(X_{kj}) \geq f(X_{ij}) \end{cases}, i = 1, \dots, |S|$$

где $r(X_{ij}, X_{kj})$ – корень квадратный из суммы квадратов разниц координат частиц по каждой оси.

Вектор $P = \{\alpha, \beta, \gamma\}$ – свободные параметры алгоритма. Параметр α определяет степень стохастичности алгоритма, чем он выше, тем сильнее генерируемые на каждом шаге случайные числа влияют на работу алгоритма. Параметры β и γ задают зависимость влияния частиц от расстояния между их позициями в пространстве поиска решений. При значении β , равным нулю, нет коллективного взаимодействия между частицами. А чем выше параметр γ , тем быстрее снижается сила притяжения частиц с увеличением расстояния между их позициями.

3.2.4 Метод градиентного спуска

Методы, использующие градиенты целевой функции для нахождения ее оптимума, является весьма распространенным из-за их достаточно понятной реализации. Метод относится к методам нелинейного программирования и может учитывать ограничения в форме неравенств. Недостаток метода состоит в том, что он определив некоторый локальный экстремум они застревают в нем. Одной из модификаций градиентных методов является метод градиентного спуска, который можно реализовать рекуррентной формулой следующего вида

$$X^{k+1} = X^k - \alpha \cdot \nabla f(X^k), \quad (3.8)$$

где α – коэффициент скорости при градиенте функции $f(X)$.

Можно улучшить условия сходимости метода путем его модификаций в виде алгоритма Ньютона (или Ньютона – Рафсона) с рекуррентной формулой

$$X^{k+1} = X^k - \alpha^k \cdot \nabla^2 f(X^k)^{-1} \cdot \nabla f(X^k). \quad (3.9)$$

Также известны различные модификации данного метода [89, 90] и является объединением алгоритмов Ньютона-Рафсона и градиентного спуска.

3.3 Отличительные черты используемых алгоритмов

Сравнительный анализ различных алгоритмов роевого интеллекта и градиентного спуска позволяет найти некоторые общие и индивидуальные черты каждого из алгоритмов, которые сведены в Таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Индивидуальные особенности используемых алгоритмов

Алгоритм	Особенности
Роя частиц	<ul style="list-style-type: none"> • возможность настраивать отношения между индивидуальным и коллективным опытом, с учетом их приоритетности; • использование градиента; • учитывается инерция соответствующая скорости движения частиц.
Роя пчел	<ul style="list-style-type: none"> • некоторые частицы выполняют случайный поиск, без использования своего и коллективного опыта; • ограничение на собирание всех частиц в окрестности одной точки пространства поиска решений.
Роя светлячков	<ul style="list-style-type: none"> • каждая частица учитывает влияние других частиц, занимающих лучшее положения, чем она; • использование градиента; • взаимное влияние частиц между собой обратно пропорционально расстоянию между ними.
Градиентный спуск	<ul style="list-style-type: none"> • поиск градиента, направления наискорейшего убывания функции; • оптимизация шага в направлении градиента с учетом приближения частицы к экстремуму; • зависимость поиска экстремума от начального приближения; • способность застревать в ближайшем экстремуме.

Для оптимизационных задач с условиями статической оптимизации, если имеется достаточное время, для расчета можно использовать алгоритмы в явном виде использующие градиент, роя частиц и роя светлячков, так как в этих алгоритмах частицы сходятся в окрестность экстремума и затем шаг их перемещений снижается, алгоритм начинает выполнять в локальный поиск во все уменьшающейся окрестности экстремума. В задачах динамической оптимизации, целесообразно использовать алгоритм роя пчел, так как в нем предусмотрено ограничение от собирания всех частиц в окрестности одного решения и разрешен случайный поиск во всем пространстве решений. Благодаря этому алгоритмы способны быстрее находить новые решения при изменении условий задачи. При необходимости, можно создавать гибридные

алгоритмы роевого интеллекта, которые будут эффективными для решения определенных оптимизационных задач.

3.4 Построение базы нечетких правил

Создание базы нечетких правил выполняется с привлечением экспертов. Однако, правила, предложенные экспертами, могут быть далекими от оптимальных, поскольку человек не всегда может принять во внимание все взаимосвязи в сложной системе, учесть несколько критериев. Кроме того, привлечение экспертов в каждом случае изменения режимов функционирования системы или изменения критериев является слишком долгой и дорогой процедурой.

Возникает задача оптимизации набора нечётких правил, приближенно составленных экспертами. Обозначим множество нечетких правил FR , тогда задача оптимизации может быть записана как [91]

$$Z(FR(X)) \rightarrow \max, \quad (3.10)$$

где $FR(X)$ – база нечетких правил, в которой есть варьируемая (управляемая) часть, представленная в виде вектора X .

$Z(FR(X))$ – критерий оптимальности.

Зависимость $Z(FR(X))$ задается моделью системы.

Наибольшая трудность заключается в определении того, как вектор X будет влиять на базу нечетких правил. В работе [89] предложено назначать правилам веса, влияющие на их значимость в этапе определения выходных функций принадлежности, то есть при определении центра масс по алгоритму Мамдани. Кроме того, можно управлять численными параметрами в самих правилах либо функциями принадлежности входных и выходных переменных.

Поскольку модель оптимизируемой системы и сама база правил могут быть очень сложными, разумно применить алгоритм оптимизации, который

способен самостоятельно адаптироваться под условием задачи, исследовать топологию пространства поиска решений. Как показано в работе [92] такими свойствами обладают алгоритмы роевого интеллекта, рассматривающие задачу оптимизации как черный ящик. В результате их применение наиболее просто и в то же время эффективно. В данной работе выбран алгоритм роя частиц как один из наиболее эффективных алгоритмов роевого интеллекта, при этом простой в реализации и обладающий высокой скоростью работы [83].

Структура используемого набора правил. На данном этапе работы применяются правила без нечетких переменных. Правила имеют следующий вид:

ЕСЛИ (условие), ТО (действие)

Решение, какое действие выбрать, принимается каждый час. Условия формируются исходя из указанных выше наблюдаемых величин. При этом в результате анализа показал, что для формирования достаточного набора правил необходимо формулировать условия путем ответа на два вопроса. Первый из них зависит от выработки ВЭУ и потребностей ГП, второй от времени. Поскольку тариф в течение суток меняется (дневной и ночной период), то решения должны тоже зависеть от времени.

1. Покрывает ли выработка ВЭУ потребность ГП?
2. Длится ли сейчас особый (льготный) период времени?

В модель заложена возможность использовать две интервала, попадание в которые считается особым периодом ($time1 - time2$, $time3 - time4$). Значения этих интервалов являются одними из управляемых переменных. То есть, какие именно интервалы относить к особому периоду, строго не задается, этот параметр является частью настраиваемой (обучаемой) базы правил [93].

В результате возникает четыре возможных предпосылки в условии:

- (потребление ГП > выработки ВЭУ ГП) И НЕ (особый период времени);

- (потребление ГП < выработки ВЭУ ГП) И НЕ (особый период времени);
- (потребление ГП > выработки ВЭУ ГП) И (особый период времени);
- (потребление ГП < выработки ВЭУ ГП) И (особый период времени).

В качестве действий ГП выступают покупка энергии у внешней ЭЭС (или соседнего ГП), продажа во внешнюю ЭЭС (или соседнему ГП), накапливание в аккумуляторе или расход накопленной в аккумуляторе энергии. Поэтому возможны 4 варианта действий:

1. Накопить и продать (доступно только при избытке энергии):

- определить избыток как разность потребления ГП и выработанной ВЭУ мощности

$$dif = power_wind - power_gc;$$

- определить сколько можно накопить (не больше чем свободно в аккумуляторе и не более ограничения на скорость зарядки аккумулятора)

$$accum = \min(max_accum - now_accum, MAX_ACCUM_H);$$

- ограничить накопление коэффициентом $sale_accum$, регулирующим баланс покупки и накопления

$$accum = accum * sale_accum;$$

- обновить количество запасенной энергии

$$now_accum = now_accum + accum;$$

- если после накопления осталась неиспользуемая энергия, то продать ее

$$sale_buy = dif - accum.$$

2. Купить и накопить:

- определить избыток или дефицит как разность потребления ГП и выработанной ВЭУ мощности

$$dif = power_wind - power_gc;$$

- определить сколько можно накопить (не больше чем свободно в аккумуляторе и не более ограничения на скорость зарядки аккумулятора)

$$accum = \min(max_accum - now_accum, max_accum_hour);$$

- ограничить накопление коэффициентом buy_accum, регулирующим баланс продажи и накопления

$$accum = accum * buy_accum;$$

- обновить количество запасенной энергии

$$now_accum = now_accum + accum;$$

- если после накопления осталась неиспользуемая энергия, то продать ее. Если дефицит, то купить

$$sale_buy = dif - accum.$$

3. Продать и использовать накопленное:

- определить избыток или дефицит как разность потребления ГП и выработанной ВЭУ мощности

$$dif = power_wind - power_gc;$$

- определить сколько можно извлечь из аккумулятора (не больше чем накоплено)

$$accum = now_accum;$$

- ограничить накопление коэффициентом sale_unload, регулирующим баланс продажи и использования накопленного

$$accum = accum * sale_unload;$$

- обновить количество запасенной энергии

$$now_accum = now_accum - accum;$$

- если после накопления осталась неиспользуемая энергия, то продать ее. Если дефицит, то купить

$$sale_buy = dif + accum.$$

4. Купить и использовать накопленное (доступно только при дефиците энергии):

- определить дефицит как разность потребления ГП и выработанной ВЭУ мощности

$$dif = power_wind - power_gc;$$

- определить сколько можно извлечь из аккумулятора (не больше чем накоплено и не больше, чем нужно на покрытие дефицита)

$$accum = \min(-dif, now_accum);$$

- ограничить накопление коэффициентом *buy_unload*, регулирующим баланс продажи и использования накопленного

$$accum = accum * buy_unload;$$

- обновить количество запасенной энергии

$$now_accum = now_accum - accum;$$

- если после накопления осталась неиспользуемая энергия, то продать ее. Если дефицит, то купить

$$sale_buy = accum - dif.$$

Второе и третье действие могут быть выполнены при любом из четырех условий. Первое и четвертое только в половине случаев, как указано в скобках у этих действий. В результате имеется $2 \cdot 4 + 2 \cdot 2 = 12$ возможных правил. Например,

ЕСЛИ (потребление ГП > выработка ВЭУ ГП) И НЕ (особый период времени) ТО (Купить и использовать накопленное)

В правилах используются четыре регулировочных коэффициента: *buy_unload*, *sale_unload*, *buy_accum*, *sale_accum*; четыре момента времени, задающие особые периоды: *time1*, *time2*, *time3*, *time4*. Кроме того, для каждого из двенадцати правил имеется свой приоритет pr_i . В совокупности получается $4 + 4 + 12 = 20$ управляемых переменных, которые и образуют вектор X , влияющий на набор правил $FR(X)$ и, в конечном счете критерий оптимальности $Z(FR(X))$. В рассматриваемой системе критерием является максимум прибыли ГП от обмена с внешней системой в течение моделируемого периода времени.

3.5 Сравнительный анализ алгоритмов роевого интеллекта и градиентного спуска

Как показано в работе [92] для применения алгоритма роевого интеллекта достаточно задать отображение позиции частицы $X_{particle}$ в вектор управляемых переменных X . Позиция частиц ограничена по каждому направлению пространства поиска решений от нуля до единицы.

Для перевода первых восьми координат частицы в величины buy_unload , $sale_unload$, buy_accum , $sale_accum$ и $time1$, $time2$, $time3$, $time4$ достаточно умножить соответствующую координату на максимально возможное значение каждой из величин. Для временных переменных, задающий номер часа в сутках, максимальным значением будет 23. Для переменных, задающих баланс между использованием аккумулятора и обменом с внешней системой, максимальное значение равно единице.

Нормированные приоритеты правил сами по себе принимают значения от 0 до 1, поэтому их отображение просто $pr_i = X_{particle\ i+8}$. Прибавление +8 к индексу выполнено, поскольку первые 8 координат частицы отвечают за восемь управляемых переменных buy_unload , $sale_unload$, buy_accum , $sale_accum$ и $time1$, $time2$, $time3$, $time4$. В ходе моделирования ГП известны почасовой график потребления и почасовой график выработки ВЭУ. Поэтому для каждого часа выполняется выбор правила с наивысшим приоритетом и выполнением условия правила. Моделируется действие выбранного правила и оценивается доход или расход денег на обмен энергией с внешней системой с учетом тарифа.

Схема алгоритма оптимизации базы правил выглядит следующим образом:

1. Случайным образом сгенерировать рой – множество частиц.
2. Для каждой частицы выполнить
 - отображение позиции $X_{particle}$ в вектор управляемых переменных X ;

– моделирование генерирующих потребителей с использованием правил $FR(X)$ для вычисления критерия $Z(FR(X))$. При этом наилучшее найденное за все время работы решение сохраняется.

3. Если выполнено заданное число итераций алгоритма, завершить работу, вернув наилучшее найденное решение X , $FR(X)$ и $Z(FR(X))$. Иначе перейти к шагу 4.

4. Обновить позиции частиц согласно используемому алгоритму роевого интеллекта. Перейти к шагу 2.

В работе для оптимизации применены алгоритмы роевого интеллекта: роя частиц, роя пчел и роя светлячков, для которых полученные оптимальные решения полностью совпали. Причем алгоритмы показали стабильную сходимость при 100 частицах и 1000 итерациях: каждый запуск приводит к получению одного и того же решения независимо от начального случайного распределения частиц. С высокой степенью вероятности можно считать, что этот результат свидетельствует о нахождении глобального оптимума задачи.

Для сравнительного анализа исследована эффективность оптимизации с помощью алгоритма градиентного спуска. Применение градиентного спуска по десять раз для каждого варианта условий задачи показало, что он оказывается в различных локальных экстремумах. При этом число расчетов целевой функции, суммарно выполняемых градиентным спуском в десяти запусках, в среднем в 4 раза превысило максимальное количество расчетов целевой функции, которое требовалось алгоритмам роевого интеллекта. Таким образом, роевые алгоритмы показали более высокую точность при меньшем времени работы.

На первоначальном этапе проведена оптимизация затрат на электропотребление всеми указанными выше методами, отдельно для каждого генерирующего потребителя ($ГП_1$ и $ГП_2$), при различной мощности накопителя (от 4 МВт до 24 МВт) (Таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Оптимизация затрат за электропотребление, тыс. руб.

Продажи	Цена ВЭУ, руб. за 1кВт/ч	Мощность накопителей, МВт	Рой частиц, Рой пчел, Рой светлячков		Градиент среднее из 10		Градиент лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума	Отклонение лучшего градиента от оптимума
			ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки	ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки	ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки		
нет	2	4,00	1548,43	175,38	1555,93	175,48	1549,3	175,38	0,4%	0,1%
нет	2	6,00	1545,23	175,38	1556,88	175,61	1554,83	175,38	0,7%	0,6%
нет	2	8,00	1542,03	175,38	1558,21	175,47	1554,83	175,38	0,9%	0,7%
нет	2	10,00	1538,83	175,38	1557,91	175,40	1538,83	175,38	1,1%	0,0%
нет	2	12,00	1535,63	175,38	1554,35	175,60	1554,83	175,38	1,1%	1,1%
нет	2	16,00	1532,43	175,38	1561,99	175,38	1554,83	175,38	1,7%	1,3%
нет	2	20,00	1532,43	175,38	1562,59	175,38	1554,83	175,38	1,8%	1,3%
нет	2	24,00	1532,43	175,38	1557,80	175,95	1543,63	175,38	1,5%	0,7%

Графическое изображение полученных расходов, генерирующих потребителей (ГП₁ и ГП₂) на суточном интервале времени представлены на Рисунках 4.2 и 4.3.

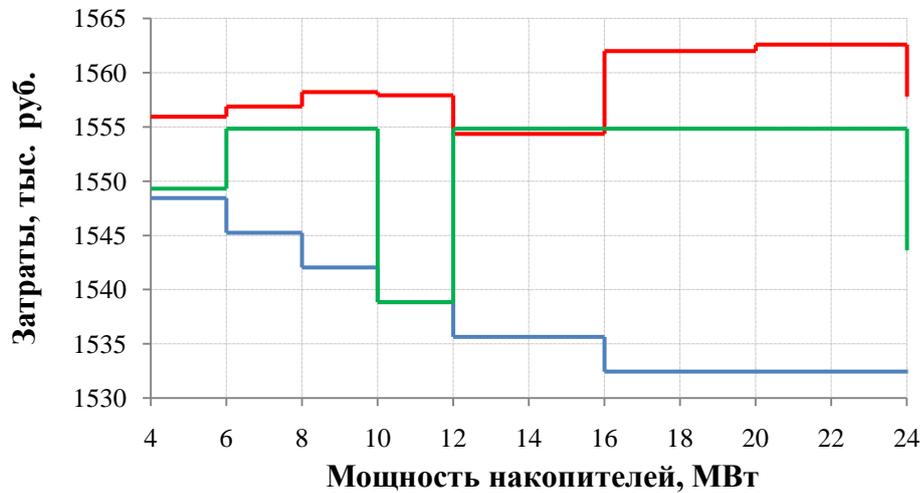


Рисунок 3.2 – Минимальные финансовые затраты ГП₁ (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)

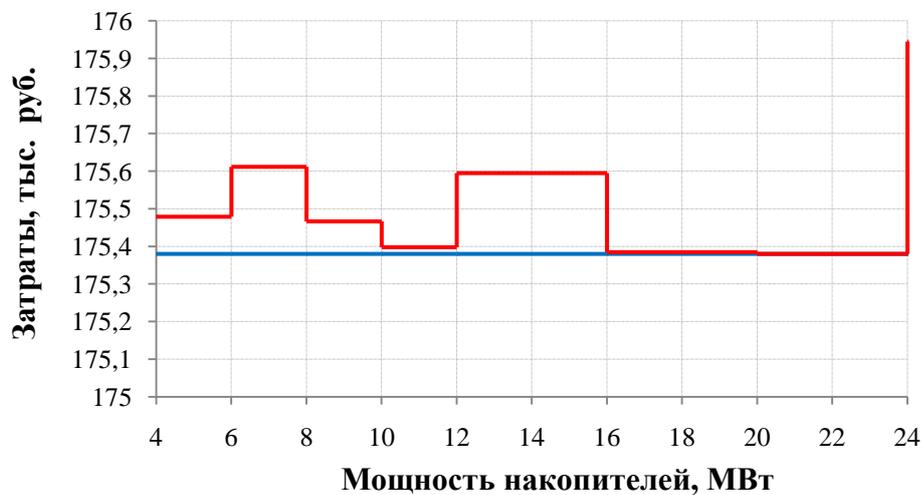


Рисунок 3.3 – Минимальные финансовые затраты ГП₂ (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)

На втором этапе рассмотрен вариант, когда возможен экспорт или импорт избыточной / дефицитной электроэнергии с энергосистемой (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Оптимизация затрат и доход за электроэнергию, тыс. руб.

Продажи	Цена ВЭУ, руб. за 1кВт/ч	Мощность накопителей, МВт	Рой частиц, Рой пчел, Рой светлячков		Градиент среднее из 10		Градиент лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума	Отклонение лучшего градиента от оптимума
			ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки	ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки	ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки		
ЭЭС	2	4,00	1545,83	111,28	1552,64	115,56	1548,47	114,08	0,7%	0,3%
ЭЭС	2	6,00	1542,63	107,28	1552,86	112,35	1554,83	110,48	0,9%	0,9%
ЭЭС	2	8,00	1539,43	104,88	1549,70	108,57	1544,43	106,88	0,8%	0,4%
ЭЭС	2	10,00	1536,23	100,08	1551,40	108,70	1538,86	114,08	1,5%	1,0%
ЭЭС	2	12,00	1533,03	96,48	1549,69	107,99	1535,64	102,08	1,7%	0,5%
ЭЭС	2	16,00	1529,83	92,48	1552,63	100,38	1537,63	96,08	1,9%	0,7%
ЭЭС	2	20,00	1529,83	92,48	1549,20	106,83	1532,69	96,08	2,1%	0,4%
ЭЭС	2	24,00	1529,83	92,48	1554,43	101,22	1554,83	96,08	2,1%	1,8%

Графическое изображение полученных расходов, генерирующих потребителей (ГП₁ и ГП₂) на суточном интервале времени представлены на Рисунках 3.4 и 3.5.

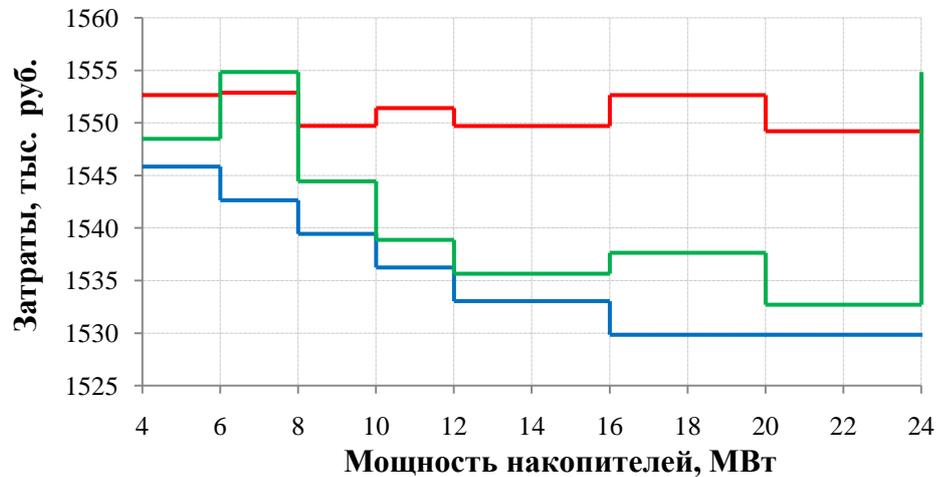


Рисунок 3.4 – Минимальные финансовые затраты ГП₁ с учетом связи с энергосистемой (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)

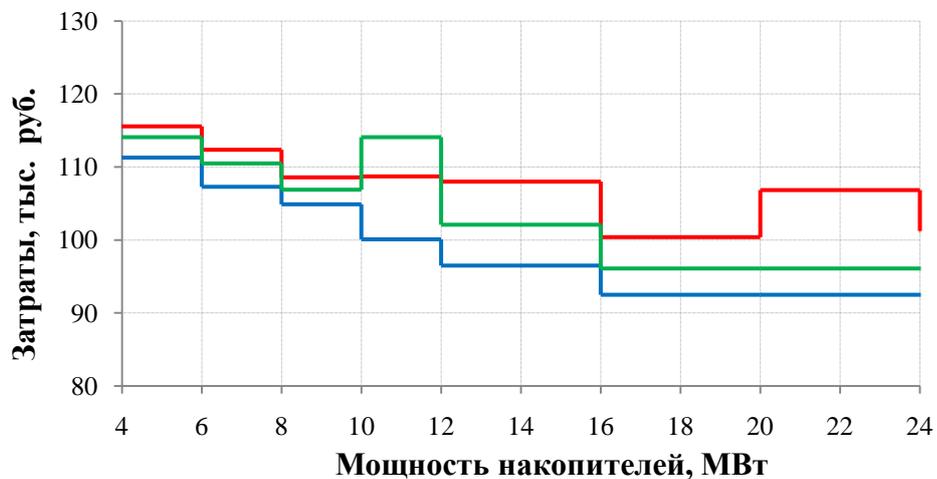


Рисунок 3.5 – Минимальные финансовые затраты ГП₂ с учетом связи с энергосистемой (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)

На третьем этапе рассмотрен вариант, когда возможен экспорт или импорт избыточной / дефицитной электроэнергии между генерирующими потребителями и энергосистемы. При этом приоритет отдается поддержке баланса у генерирующих потребителей (Таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Оптимизация затрат и доход за электроэнергию, тыс. руб.

Продажи	Цена ВЭУ, руб. за 1кВт/ч	Мощность накопителей, МВт	Рой частиц, Рой пчел, Рой светлячков		Градиент среднее из 10		Градиент лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума	Отклонение лучшего градиента от оптимума
			ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки	ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки	ГП ₁ расход сутки	ГП ₂ расход сутки		
ЭЭС или ГП	2	4,00	1504,82	6,30	1512,13	14,46	1508,59	9,30	1,0%	0,4%
ЭЭС или ГП	2	6,00	1501,52	1,96	1511,58	12,03	1506,78	6,49	1,3%	0,7%
ЭЭС или ГП	2	8,00	1498,40	-0,13	1509,92	9,17	1503,08	3,71	1,4%	0,6%
ЭЭС или ГП	2	10,00	1495,22	-2,30	1510,82	7,33	1499,94	0,36	1,7%	0,5%
ЭЭС или ГП	2	12,00	1492,04	-4,47	1507,66	5,05	1496,76	-1,89	1,7%	0,5%
ЭЭС или ГП	2	16,00	1489,28	-6,10	1510,05	9,72	1497,78	-3,31	2,5%	0,8%
ЭЭС или ГП	2	20,00	1489,28	-6,10	1507,52	8,56	1500,58	-2,11	2,2%	1,0%
ЭЭС или ГП	2	24,00	1489,28	-6,10	1512,77	4,46	1510,35	-6,97	2,3%	1,4%

Примечание: знак минус «-», означает доход генерирующего потребителя на суточном интервале времени.

Графическое изображение полученных расходов и доходов генерирующих потребителей (ГП₁ и ГП₂) на суточном интервале времени представлены на Рисунках 3.6 и 3.7.

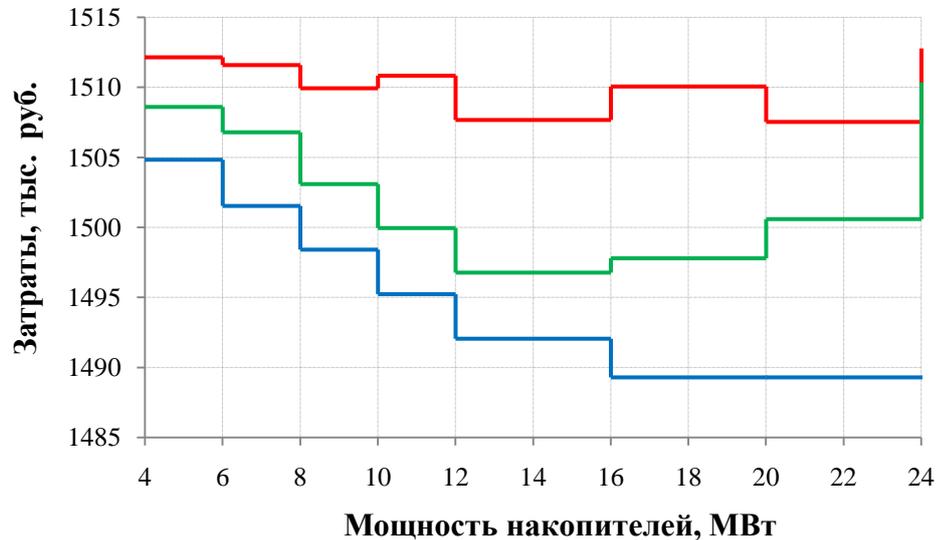


Рисунок 3.6 – Минимальные финансовые затраты ГП₁ с учетом взаимного обмена с ГП₂ и энергосистемой (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)

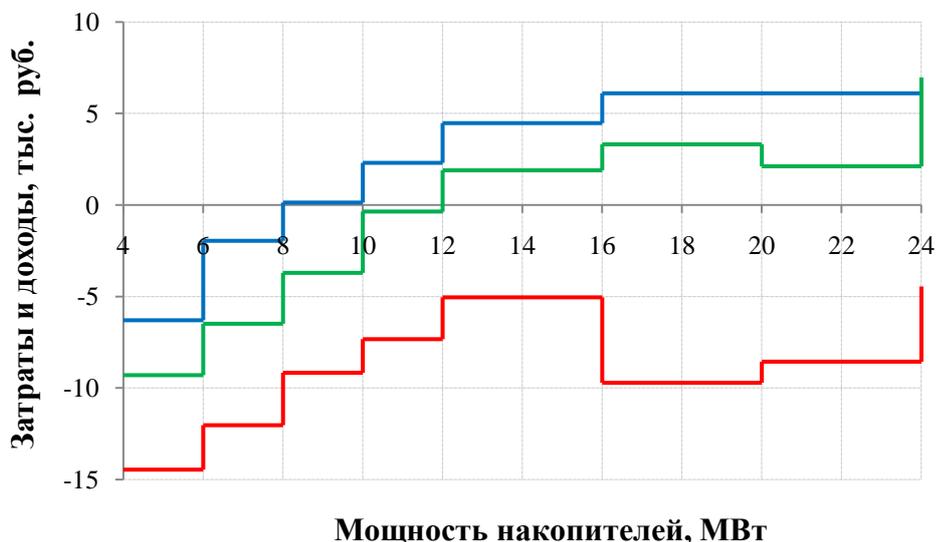


Рисунок 3.7 – Минимальные финансовые затраты и максимальный доход ГП₂ с учетом взаимного обмена с ГП₁ и энергосистемой (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)

3.6 Алгоритм и программная реализация предложенного метода оптимизации

Программа структурно-параметрической оптимизации базы правил вида ЕСЛИ ..., ТО ... в системах распределенных электроэнергетических генерирующих потребителей, представляет собой систему поддержки принятия решений в области управления электроэнергетической системой ГП для минимизации расходов за электроэнергию или максимизацию прибыли от ее продажи. Оптимизация правил выполняется на основе алгоритма роевого интеллекта.

Функционал:

- загрузка данных о потребляемой и вырабатываемой каждым ГП мощности по часам;
- построение базы приоритетных правил для принятия решений о накоплении, покупке или продаже электроэнергии;
- вывод полученных базы правил результатов;
- вывод графиков потребления, генерации, аккумуляирования и обмена электроэнергии генерирующих потребителей.

Алгоритм оптимизации расходов для каждого генерирующего потребителя в отдельности, предполагает последовательность следующих этапов:

- инициализация одного из алгоритмов роевого интеллекта;
- расчет целевой функций;
- перемещение частиц;
- определение целевой функций на новом этапе;
- выбор наилучшего решения.

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 3.8.

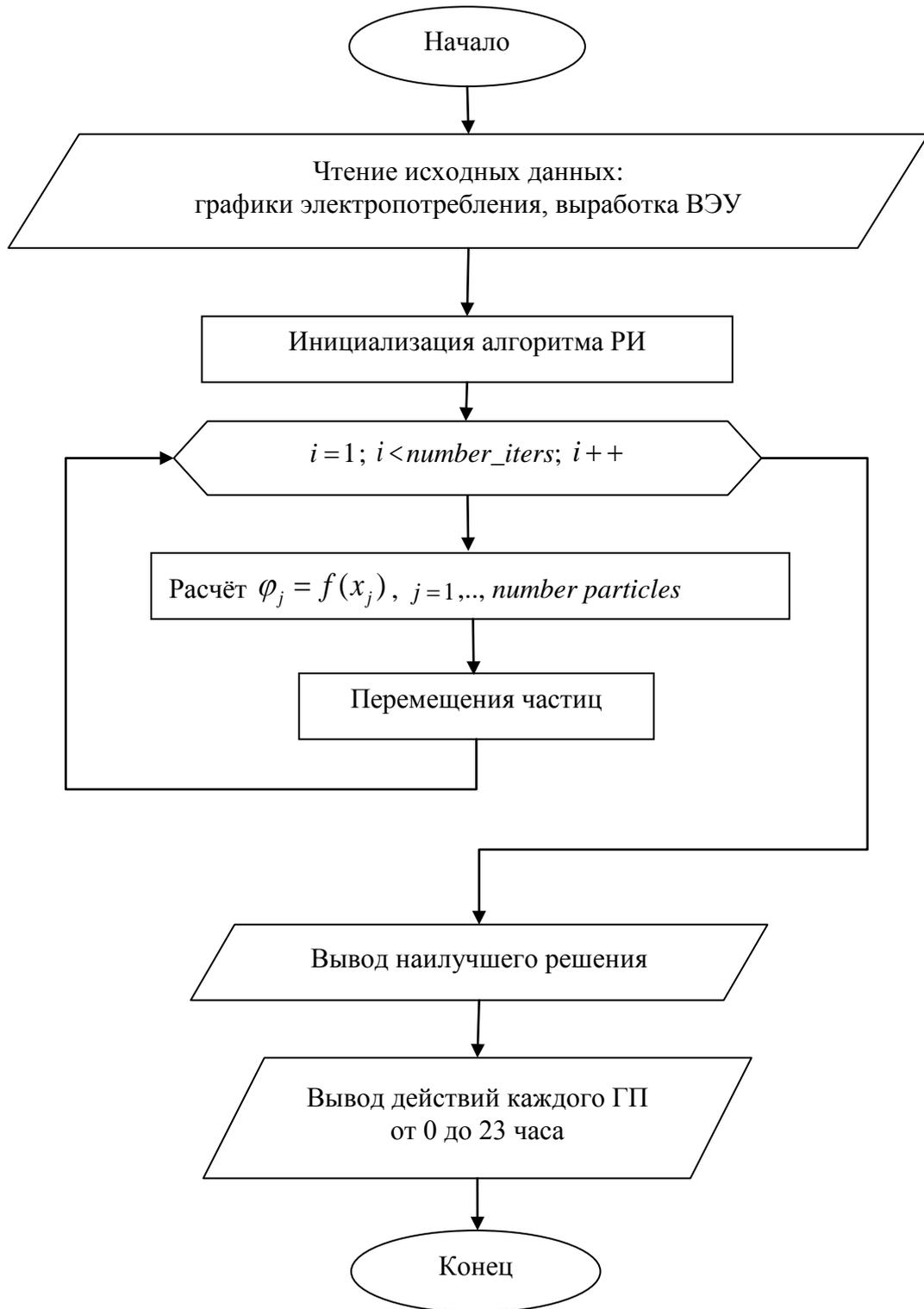


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритма минимизации расходов генерирующего потребителя

Для случая, когда в системе электроснабжения учитывается взаимодействие генерирующих потребителей ($ГП_1$ и $ГП_2$), алгоритм имеет следующую структуру:

- формирование базы правил, относительно условий покупки и продажи электроэнергии;
- сортировка правил по приоритетам;
- выбор действия $ГП_1$ согласно списку правил;
- выбор действия $ГП_2$ согласно списку правил;
- реализация действий $ГП_1$;
- реализация действий $ГП_2$;
- результат взаимодействия $ГП_1$ и $ГП_2$ (итоговый доход или расход каждого из них).

Блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 3.9.

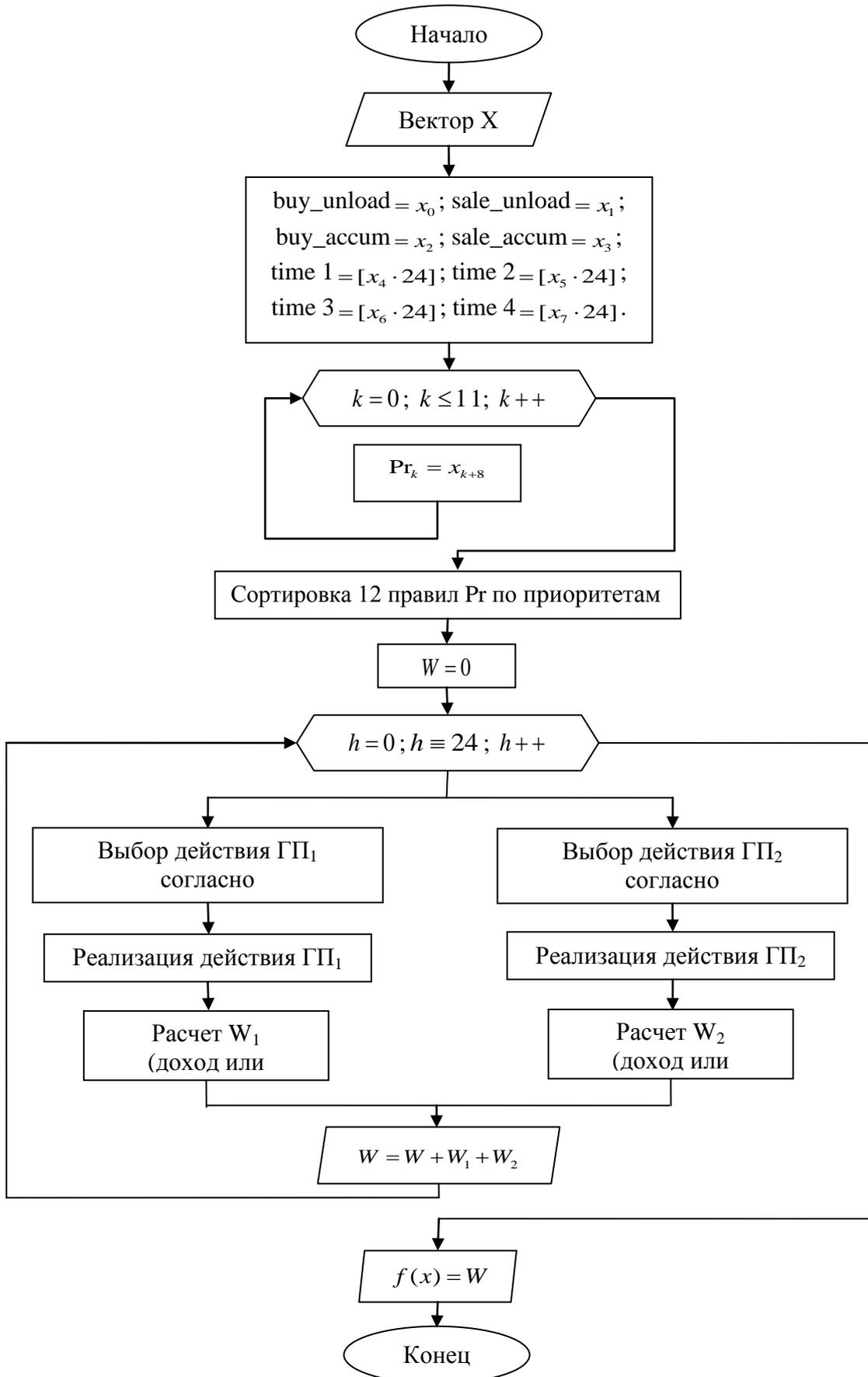


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритма взаимодействия генерирующих потребителей

Программа будет входить в программно-вычислительный комплекс для проведения имитационных расчетов распределенных электроэнергетических систем. Ниже представлен интерфейс, разработанной программы (Рисунок 3.10).

GP_R1_summer GP_R2_summer GP_P_summer	RULES H 15 rule 10 ! 15 GC = 3.69 WP = 21.54 ACC = 13.17 15 SYSTEM BUY = -17.85 ACC UNLOAD = 0 RULES H 16 rule 10 ! 16 GC = 3.69 WP = 19.65 ACC = 13.17 16 SYSTEM BUY = -15.96 ACC UNLOAD = 0 RULES H 17 rule 10 ! 17 GC = 3.69 WP = 11.91 ACC = 13.17 17 SYSTEM BUY = -8.22 ACC UNLOAD = 0 RULES H 18 rule 10 ! 18 GC = 3.66 WP = 6.52 ACC = 13.17 18 SYSTEM BUY = -2.86 ACC UNLOAD = 0 RULES H 19 rule 10 ! 19 GC = 4 WP = 8.95 ACC = 13.17 19 SYSTEM BUY = -4.95 ACC UNLOAD = 0 RULES H 20 rule 10 ! 20 GC = 3.92 WP = 15.46 ACC = 13.17 20 SYSTEM BUY = -11.54 ACC UNLOAD = 0 RULES H 21 rule 10 ! 21 GC = 3.95 WP = 15.46 ACC = 13.17 21 SYSTEM BUY = -11.51 ACC UNLOAD = 0 RULES H 22 rule 10 ! 22 GC = 3.87 WP = 11.91 ACC = 13.17 22 SYSTEM BUY = -8.04 ACC UNLOAD = 0 RULES H 23 rule 6 ! 23 GC = 3.82 WP = 6.52 ACC = 13.17 23 SYSTEM BUY = -0.7 ACC UNLOAD = -2 TOTAL GP = 111.079 1057.34
Add GP	
Clear	
BUY_WIND 2.0	
BUY_ACCUM 0.2	
BUY_SYSTEM 3.2	
BUY_SYSTEM_LITE 1.4	
SALE_SYSTEM 2.7	
SALE_SYSTEM_LITE 0.9	
START_LITE_TARIF 23	
STOP_LITE_TARIF 6	
MAX_ACCUM_H 2.0	
RUN	

Рисунок 3.10 – Интерфейс разработанной программы

Выводы

1. Выполнен системный обзор наиболее известных роевых алгоритмов, как одних из методов искусственного интеллекта. Эти алгоритмы представлены отдельной группой популяционных алгоритмов, в основе которых лежат некоторые базовые принципы коллективного перемещения группы частиц и одновременном обмене информацией между ними, что позволяет осуществлять отбор оптимальных решений.

2. Отдельно представлены модификации алгоритмов роевого интеллекта, а именно: роя частиц, роя пчел и роя светлячков, с указанием их отличительных особенностей и возможности практической реализации.

3. Впервые, выполнено принципиальное сравнение различных модифицированных алгоритмов роевого интеллекта и градиентного спуска, при разных начальных условиях. Доказано, что три алгоритма роевого интеллекта дали одинаковые результаты, что свидетельствует о нахождении ими глобального экстремума, в то время как градиентный спуск застревает в различных локальных экстремумах.

4. Разработан алгоритм и его программная реализация, которые позволяют оптимизировать электропотребление генерирующими потребителями для различных условий использования альтернативных источников энергии с учетом их взаимодействия. Программная реализация этих алгоритмов позволила получить свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

4 НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

4.1 Постановка задачи

Основные параметры ветрового потока и других альтернативных источников энергии могут быть представлены в виде лингвистических переменных, то есть слов или текстов вербальной модели. Скорость ветрового потока обычно представляется общепризнанной в мире шкалой Бофорта, которая позволяет дать интервальную оценку любой скорости ветра в виде лингвистических переменных. В свою очередь эти лингвистические переменные разговорного языка могут быть формализованы с помощью теории нечетких множеств.

На этой основе в работе построена нечеткая регрессионная модель прогнозирования скорости и угла направления ветрового потока. Показано, что на основе этих прогнозных значений на каждые три часа вперед на суточном интервале позволяет предсказать мощность, генерируемую альтернативными источниками энергии. При этом управление ветроэнергетическими установками осуществляется на основе нечетких продукционных правил.

Предложена новая вероятностная модель генерирующей способности ветроэнергетической установки с учетом флуктуации скорости ветрового потока, относительно математического ожидания на заданном интервале времени. Доказано новое аналитическое выражения генерируемой мощности, которое учитывает кубическую зависимость между скоростью ветра и вырабатываемой мощностью ВЭУ, через начальные и центральные моменты второго и третьего порядков случайной величины скорости ветра. Наряду с этим, на основе реальных статистических данных установлены корреляционные зависимости, почасовых значений скорости и угла направления ветрового потока.

4.2 Нечеткая модель скорости ветра

Основные параметры ветрового потока и других параметров альтернативных источников энергии могут быть описаны с помощью лингвистических переменных. Иначе говоря, эти переменные могут быть представлены не только в виде чисел, а также в виде слов и предложений вербальной модели, на естественном языке субъекта. В качестве математического аппарата для согласования разговорного языка субъекта или лица принимающего решения, с формальным языком, характерного для вычислительных процедур необходимо использовать основные понятия и термины теории нечетких множеств.

Для построения нечетких моделей необходимо принять функции принадлежности, той или иной формы, которые определяют смысл лингвистических переменных, лежащих в основе математической модели. Общепринято, что скорость ветрового потока может быть охарактеризована шкалой Бофорта, которая представлена в Таблице 4.1 [74, 94].

Можно отметить, что скорости ветра может быть представлено разными параметрами, а именно: баллами, лингвистическими переменными с оценкой интервалов скорости ветра, для каждой из них и воздействием на ветроустановки [95]. При этом шкале Бофорта выделено 12 основных оценок скорости ветра.

Однако в настоящей работе рассматривается 8 основных лингвистических оценок скорости ветра, начиная с легкого ветра, в связи с тем, что разворот ветротурбин начинается именно с этой скорости и выше. Штиль и отсутствие ветрового потока, когда скорость ветра равно нулю не представляют интереса с энергетической точки зрения. Наряду с этим, такие лингвистические оценки скорости ветра, как шторм и ураган также неприемлемы, поскольку не предусмотрены по механической прочности и вибрационной устойчивости конструктивным исполнением ВЭУ.

Таблица 4.1 – Сила ветра по шкале Бофорта и ее влияние на ветроустановки и условия их работы

Баллы Бофорта	Скорость ветра, м/с	Характеристика силы ветра	Наблюдаемые эффекты действия	Воздействие ветра на ВЭУ	Условия для работы ВЭУ при средней в диапазоне скорости ветра
2	1,8 – 3,6	Легкий	Ветер ощущается лицом, шелестят листья, на воде отчетливое волнение	Отсутствует	Плохие для всех установок
3	3,6 – 5,8	Слабый	Колеблются листья на деревьях, развеваются легкие флаги, на отдельных волнах появляются барашки (гребни)	Начинают вращаться тихоходные ветроколеса	Удовлетворительные для работы насосов и некоторых аэрогенераторов
4	5,8 – 8,5	Умеренный	Колеблются тонкие ветки деревьев, поднимается пыль и клочки бумаги, на воде много барашков	Начинают вращаться колеса аэрогенераторов	Хорошие для аэрогенераторов
5	8,5 – 11	Свежий	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в барашках	Мощность ВЭУ достигает 30% проектной	Очень хорошие
6	11 – 14	Сильный	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пенятся гребни волн	Максимальная мощность	Допустимые
7	14 – 17	Крепкий	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена	Максимальная мощность	Допустимые
8	17 – 21	Очень крепкий	Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра, с волн срываются клочья пены	Ряд ВЭУ отключаются	Предельно допустимые
9	21 – 25	Шторм	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы	Все ВЭУ отключаются	Недопустимые

При представлении скорости ветра в виде некоторых интервальных оценок, например, от 3,6 до 5,8 м/с ветер, как лингвистическая переменная оценивается, как «умеренный».

Для повышения достоверности оценки мощности ветроэнергетических установок воспользуемся нечетким представлением скорости ветра в виде некоторых функции принадлежности. На этой основе представим традиционную шкалу Бофорта в виде соответствующих функций принадлежности лингвистических переменных скорости ветрового потока. Для каждой лингвистической переменной скорости ветра, приведенной шкалы Бофорта, выбраны треугольной функции принадлежности. В этом случае значение принадлежности $\mu = 0,5$ для точек значения силы ветра будут иметь равноценный значение по отношению к соседней лингвистической переменной. При $\mu = 1$ значение скорости в каждом диапазоне будет равно $(V_{\max} + V_{\min}) / 2$.

На этом основании для соответствующих лингвистических переменных скорости ветра, определены значения принадлежности данной лингвистической переменной на ее интервале (Таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Нечеткие переменные, как характеристика силы ветра

Скорость ветра V, м/с	Принадлежность	Характеристика силы ветра
1,8	0,5	Легкий
2,7	1	
3,6	0,5	
3,6	0,5	Слабый
4,7	1	
5,8	0,5	
5,8	0,5	Умеренный
7,15	1	
8,5	0,5	
8,5	0,5	Свежий
9,75	1	
11	0,5	
11	0,5	Сильный
12,5	1	
14	0,5	
14	0,5	Крепкий
15,5	1	
17	0,5	
17	0,5	Очень крепкий
19	1	
21	0,5	

Наиболее удобной формой функций принадлежности для некоторых заданных интервалов является её представление в виде аналитической форме с помощью треугольных $L-R$ (Left-Right) функций [96].

На Рисунке 4.1 эти функции принадлежности представлены для всех лингвистических переменных шкалы Бофорта. При рассмотрении функции принадлежности скорости ветра необходимо учитывать принадлежность на интервале от 0 до 1, поэтому каждое значение лингвистической переменной в своем основании будет иметь значение $\mu = 0$.

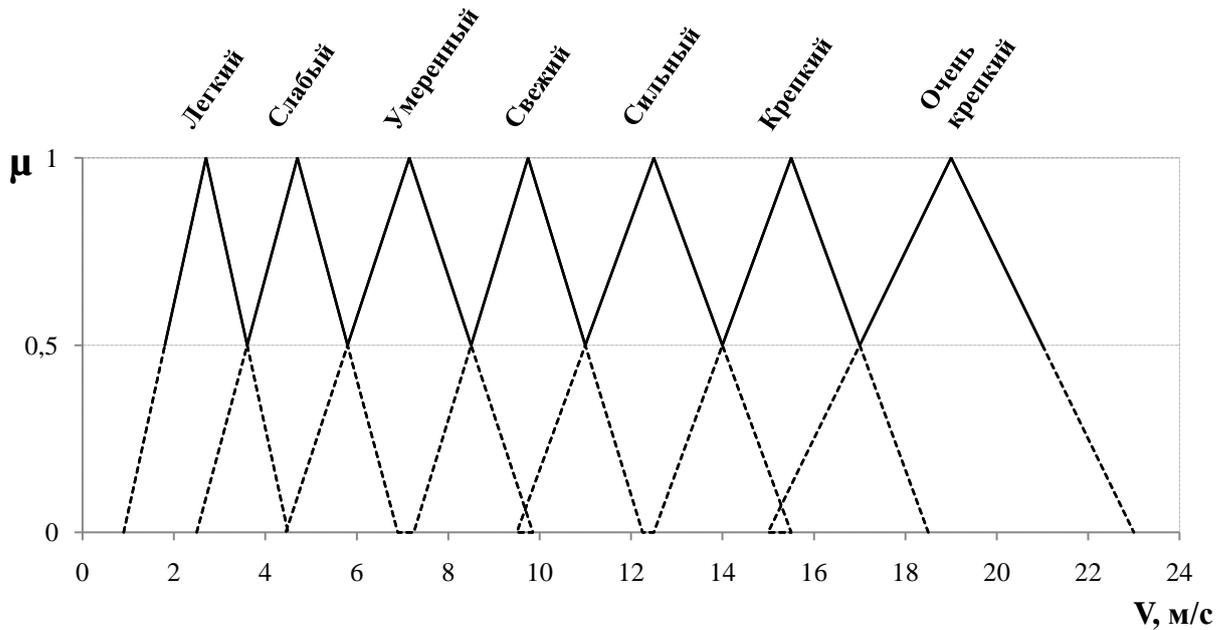


Рисунок 4.1 – Функции принадлежности лингвистических переменных скорости ветра

Аналитическое выражение для L-R – функции имеет вид

$$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & c_i \leq x \leq a_i \\ \frac{x - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq x \leq b_i \\ 1, & x = b_i \\ \frac{c_i - x}{c_i - b_i}, & b_i \leq x \leq c_i \end{cases} . \quad (4.1)$$

где a_i , b_i и c_i – числовые параметры (L-R) – функций.

Параметры a_i и c_i характеризуют основание треугольника, а параметр b_i его вершину (Рисунок 4.2). Как можно заметить, эта функция принадлежности порождает нормальное выпуклое унимодальное нечеткое множество с носителем–интервалом (a_i, c_i) , границами $(a_i, c_i) \setminus \{b_i\}$, ядром $\{b_i\}$ и модой b_i .

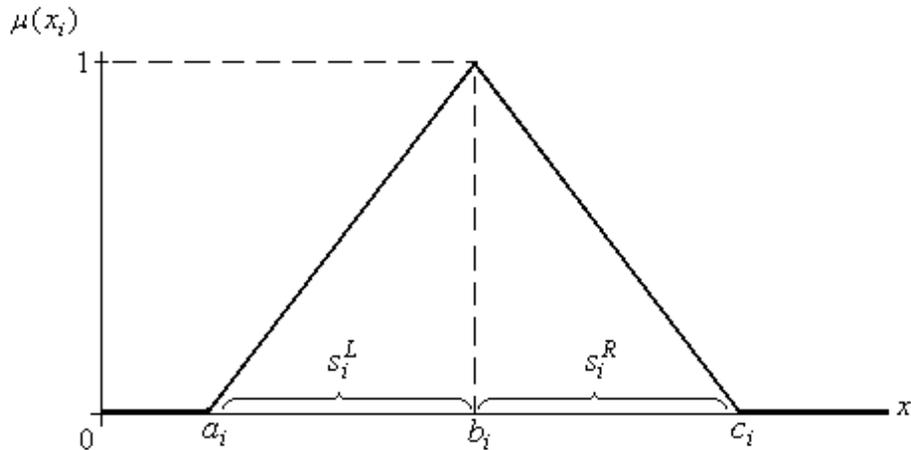


Рисунок 4.2 – График треугольной ($L-R$) функции принадлежности

Для функции принадлежности в виде симметричных треугольников $s_i^L = s_i^R$, причем s_i^L и s_i^R – левосторонний и правосторонний разброс от максимального значения принадлежности.

Для простоты восприятия функции принадлежности скорости ветра, могут быть представлены с помощью коэффициентов a , b и c , которые сведены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Числовые параметры ($L-R$) – функций принадлежности для нечеткой шкалы Бофорта

Характеристика силы ветра	a_i	b_i	c_i
Легкий	0,9	2,7	4,5
Слабый	2,5	4,7	6,9
Умеренный	4,45	7,15	9,85
Свежий	7,25	9,75	12,25
Сильный	9,5	12,5	15,5
Крепкий	12,5	15,5	18,5
Очень крепкий	15	19	23

На основании формулы (4.1) можно определить точные функции принадлежности для каждой лингвистической переменной силы ветра. Они представлены в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Аналитические выражения функций принадлежности для различной силы ветра

Характеристика силы ветра	Функция принадлежности
Легкий	$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & 4,5 \leq x \leq 0,9 \\ \frac{x-0,9}{1,8}, & 0,9 \leq x \leq 2,7 \\ \frac{4,5-x}{1,8}, & 2,7 \leq x \leq 4,5 \end{cases}$
Слабый	$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & 6,9 \leq x \leq 2,5 \\ \frac{x-2,5}{2,2}, & 2,5 \leq x \leq 4,7 \\ \frac{6,9-x}{2,2}, & 4,7 \leq x \leq 6,9 \end{cases}$
Умеренный	$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & 9,85 \leq x \leq 4,45 \\ \frac{x-4,45}{2,7}, & 4,45 \leq x \leq 7,15 \\ \frac{9,85-x}{2,7}, & 7,15 \leq x \leq 9,85 \end{cases}$
Свежий	$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & 12,25 \leq x \leq 7,25 \\ \frac{x-7,25}{2,5}, & 7,25 \leq x \leq 9,75 \\ \frac{12,25-x}{2,5}, & 9,75 \leq x \leq 12,25 \end{cases}$

Сильный	$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & 15,5 \leq x \leq 9,5 \\ \frac{x-9,5}{3}, & 9,5 \leq x \leq 12,5 \\ \frac{15,5-x}{3}, & 12,5 \leq x \leq 15,5 \end{cases}$
Крепкий	$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & 18,5 \leq x \leq 12,5 \\ \frac{x-12,5}{3}, & 12,5 \leq x \leq 15,5 \\ \frac{18,5-x}{3}, & 15,5 \leq x \leq 18,5 \end{cases}$
Очень крепкий	$\mu(x_i) = \begin{cases} 0, & 23 \leq x \leq 15 \\ \frac{x-15}{4}, & 15 \leq x \leq 19 \\ \frac{23-x}{4}, & 19 \leq x \leq 23 \end{cases}$

В реальной действительности, при решении задач в нечетких условиях возникает необходимость разбиения функции принадлежности нечеткого множества на некоторые α – уровни, которые позволяют представить классическое нечеткое множество A множеством α – уровней, $\alpha \in [0; 1]$. В этом случае классическое множество A_α , определяемое по выражению (4.2), называется множеством α - уровней от A

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) \geq \alpha\}. \quad (4.2)$$

Представление треугольной функции принадлежности с помощью α - уровней $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ дано на Рисунке 4.3.

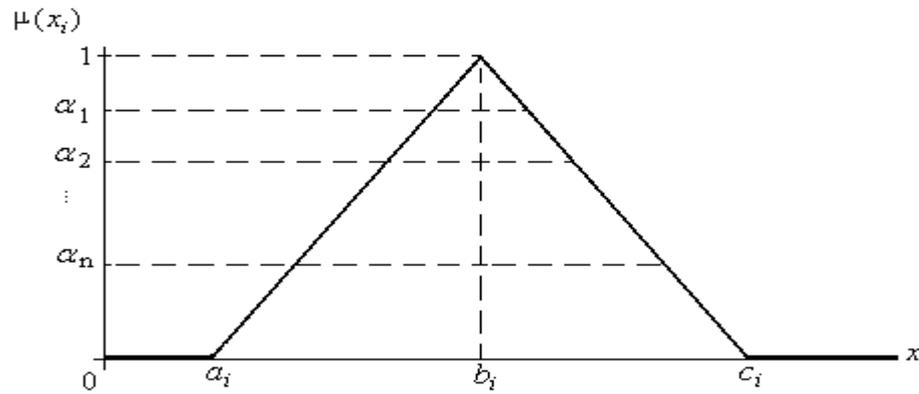


Рисунок 4.3 – Представление функции принадлежности α - уровнями

Для упрощения рассуждений в дальнейшем использованы α - уровни: $\mu_1 = 0$; $\mu_1 = 0,25$; $\mu_1 = 0,5$; $\mu_1 = 0,75$ и $\mu_1 = 1$, которые представлены на Рисунке 4.4. При этом для α - уровня $\mu=0$ в основании треугольных функций принадлежности лежат интервалы скорости ветра для каждой лингвистической переменной шкалы Бофорта, а именно сила ветра: легкий, слабый, умеренный, свежий, сильный, крепкий и очень крепкий.

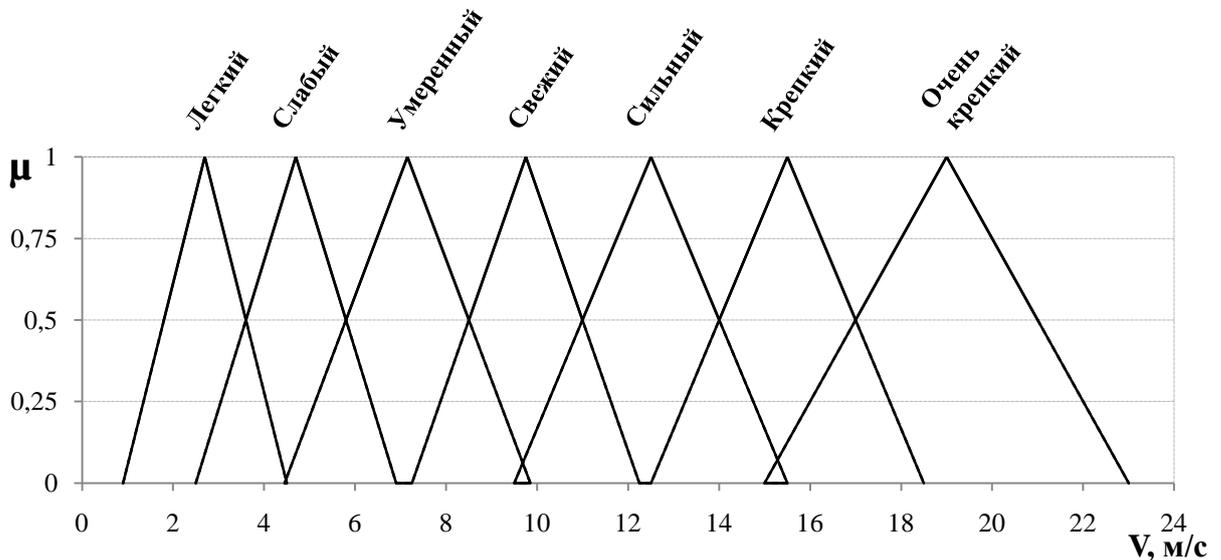


Рисунок 4.4 – Характеристика нечетких значений скорости ветра для различных α - уровней

В общем случае, на всей области определения принадлежности $\mu = (0...1)$, имеем совокупность нечетких множеств X_l , где l – количество лингвистических переменных скоростей ветра.

$$X_i = \{ \langle V_1, \mu_{x_i}(V_1) \rangle, \langle V_2, \mu_{x_i}(V_2) \rangle, \dots, \langle V_n, \mu_{x_i}(V_n) \rangle \}, \quad (4.3)$$

где n – количество уровней принадлежности α_j .

4.3 Нечеткая регрессионная модель прогнозирования скорости и направления ветра

Основные параметры ветрового потока, которые определяют мощность ветроустановки, а именно: скорость и направления ветрового потока могут быть определены на основе прогнозов, как результат обработки некоторой совокупности метеорологических данных. В этих условиях может быть выбрана адекватная модель, основанная на регрессии и нечеткой логики.

Преимущество таких модели состоит в том, что полученное решение представляет собой гладкую функцию, границы действия которой несколько размыты, что снижает требования к точному определению функциональной зависимости $y = f(x)$. Точность аппроксимации может изменяться за счет увеличивая или уменьшая базы нечетких правил.

Прогнозирование на основе нечеткие модели можно представить в виде некоторой базы исходных правил следующего вида [97, 98]

$$IF \ x_1 \in A_{1i} \ \& \ \dots \ \& \ x_n \in A_{ni}, \ THEN \ y = \eta^i(x_j), \ i = \overline{1..m}, \ j = \overline{1..n}, \quad (4.4)$$

где A_{ji} – нечеткое подмножество для переменной x_j с функцией

принадлежности $\mu_{A_{ji}}(x_j)$;

m – число нечетких правил;

n – количество факторов;

$\eta^i(x_j)$ – функция, определяющая локальную зависимость отклика y от

набора регрессий $x = (x_1, \dots, x_n)^T$.

Управляющее воздействие на систему в форме некоторого четкого значения определяется после операции дефаззификации, например, по

формуле центра тяжести, который находится по площади, ограниченной функцией принадлежности, вычисляется по формуле [99]

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i \eta^i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}; \quad \mu_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ji}}(x_j). \quad (4.5)$$

Предложенная модель, которая представлена формулами (4.4) и (4.5) соответствует нечеткой регрессионной модели (Fuzzy Logic Regression) FLR. Построение FLR регрессии для одномерной зависимости осуществляется следующим образом

$$IF \ x \subset A_i, \ THEN \ y = \eta^i(x_j), \ i = \overline{1, m}, \ j = \overline{1, n}, \quad (4.6)$$

где A_i имеет функцию принадлежности $\mu_{A_i}(x)$.

В случае линейной зависимости выходного сигнала (отклика), от фактора функции $\eta^i(x)$ приобретают вид $\eta^i(x_j) = \theta_0^i + \theta_1^i x_j$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, тогда регрессия y по x подчиняется следующему уравнению

$$y_u = \sum_{i=1}^m (\theta_0^i + \theta_1^i x_u) \mu_{A_i}(x_u) + e_u, \quad u = 1, \dots, n. \quad (4.7)$$

При использовании метода наименьших квадратов в глобальном его варианте все неизвестные параметры, входящие в (4.7), оцениваются совместно. Выберем целевую функцию для использования взвешенного метода наименьших квадратов в такой форме

$$S(\theta^i) = (y - X\theta^i)^T W_i (y - X\theta^i) = y^T W_i y - 2\theta^{iT} X^T W_i y + \theta^{iT} X^T W_i X \theta^i, \quad (4.8)$$

где $W_i = \text{diag}(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in})$;

μ_{ij} – значение μ_i в j -ой точке.

Первые частные производные $S(\theta^i)$ по параметрам θ^i имеют вид

$$\frac{\partial S(\theta^i)}{\partial \theta^i} = -2X^T W_i y + 2X^T W_i X \theta^i$$

Приравняв производные нулю, после решения системы уравнений получим

$$\hat{\theta}^i = (X^T W_i X)^{-1} X^T W_i y. \quad (4.9)$$

При моделировании временного ряда скорости ветра можно предположить, что этот ряд, обладает свойством не стационарности. Однако скорость ветра определяется относительно регулярно повторяющимися временными интервалами усиления или ослабления ветрового потока, которые можно моделировать разными локальными моделями. Если наблюдается усиление ветрового потока, так называемый положительный тренд и в условиях ослабления ветра, отрицательный тренд необходимо использовать различные модели на каждом из этих интервалов смены тренда. Самый простой вариант это учесть величину и знак разности $\Delta y = y(t-1) - y(t-2)$. Пусть в зоне отрицательных разностей Δy значение $\mu_1(\Delta y)$ равно 1, а в зоне положительных разностей Δy значение $\mu_2(\Delta y)$ равно 1. Обе этих модели пересекаются в окрестности нулевого значения. Рассмотрим случай двух функций принадлежности, то правила будут такими [100]

$$\begin{aligned} \text{IF } \Delta y \in A_1, \text{ THEN } y^1(t) &= a_1^1 y(t-1) + a_2^1 y(t-2) \\ \text{IF } \Delta y \in A_2, \text{ THEN } y^2(t) &= a_1^2 y(t-1) + a_2^2 y(t-2) \end{aligned} \quad (4.10)$$

В глобальном методе наименьших квадратов в качестве регрессоров будут выступать

$$\begin{aligned} \mu_1(\Delta y) y(t-1), \mu_1(\Delta y) y(t-2), \\ \mu_2(\Delta y) y(t-1), \mu_2(\Delta y) y(t-2) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Таким образом, имеется сумма двух трендов, которая определяется функциями принадлежности восходящего и нисходящего трендов.

4.4 Оценка мощности ветроустановки на основе прогноза ветрового потока

Зависимость между скоростью ветра, проходящего через ометаемую площадь установки A (м^2) и мощности определяется выражением (2.1). Приведённая математическая модель (2.1), является детерминистической, так как она не учитывает вероятностные отклонения от некоторого среднего значения на некотором интервале времени, то есть флуктуацию (колебания), скорости ветрового потока, что имеет место в реальной действительности.

Известно, что при нелинейной зависимости между входным и выходным возмущениями (сигналами), возникает смещения математического ожидания выходного сигнала от дисперсии входного сигнала. Так, например, это наглядно видно, при квадратичной зависимости потерь активной мощности от тока в линиях электропередачи в детерминистическом варианте, при токе I и сопротивлении R , равны:

$$\Delta P_{\text{дет.}} = I^2 \cdot R, \quad (4.12)$$

В стохастической постановке задачи, то есть при учете флуктуации тока потери равны

$$\Delta P_{\text{сто.}} = (\overline{I^2} + D_I) \cdot R = \overline{I^2} \cdot R + D_I \cdot R, \quad (4.13)$$

Иначе говоря, детерминистическое решение является частным случаем от стохастического решения. Подобным образом можно установить вероятностную зависимость между скоростью ветра с учетом её флуктуации и выработкой мощности ветроустановкой.

Разработку новой вероятностной математической модели оценки мощности, вырабатываемой ВЭУ, выполним через начальные и центральные моменты случайной величины, в качестве которой выбрана скорость ветрового потока. Ниже приведено математическое доказательство существования вероятностной зависимости между скоростью ветра и мощности ветроустановки.

В общем случае математическое ожидание некоторой случайной величины X может быть определено следующим образом

$$M[X] = m_x = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n = \sum_{i=1}^N x_i p_i, \quad (4.14)$$

где $M[X]$ – оператор математического ожидания;

x_i – конкретное значение случайной величины X ;

p_i – вероятность этого значения.

Таким образом, $M[X]$ представляет собой «среднее взвешенное значение» случайной величины, причем каждое ее значение учитывается с «весом», пропорциональным вероятности этого значения.

Дисперсия случайной величины X отражает степень рассеивания (разброса) значений случайной величины относительно ее математического ожидания и равна

$$D[X] = D_x = M[X - m_x]^2. \quad (4.15)$$

Так как дисперсия случайной величины имеет размерность квадрата случайной величины, ее использование в инженерных расчетах неудобно, поэтому используется среднеквадратическое отклонение размерность, которого совпадает с размерностью случайной величины и равно

$$\sigma[X] = \sigma_x = \sqrt{D[X]}. \quad (4.16)$$

Среднеквадратическое отклонение характеризует интервал отклонений от математического ожидания. При нормальном законе распределения практически все значения случайной величины будут с вероятностью 0,997, находиться в интервале $[m_x - 3\sigma_x; m_x + 3\sigma_x]$.

Для более подробного описания законов распределения случайной величины, кроме математического ожидания и среднеквадратического отклонения необходимо использовать, так называемые, начальные и центральные моменты высших порядков.

Начальный момент k -го порядка случайной величины X определяется следующим образом

$$\nu_k = M(X^k). \quad (4.17)$$

где k – степень возведения случайной величины.

Например, начальный момент первого порядка равен $M[X]$ и начальный момент второго порядка равен $M[X^2]$

$$\nu_1 = M[X]; \quad \nu_2 = M[X^2]. \quad (4.18)$$

Центральный момент k -го порядка случайной величины X определяется как

$$\mu_k = M[X - m_x]^k. \quad (4.19)$$

Например, центральный момент первого порядка равен нулю, а центральный момент второго порядка равен дисперсии

$$\mu_1 = M[X - m_x] = 0; \quad \mu_2 = M[X - m_x]^2 = D(X) \quad (4.20)$$

Центральный момент третьего порядка можно вычислить, через начальные моменты

$$\begin{aligned} \mu_3 &= M(X - m_x)^3 = M(X^3 - 3 \cdot X^2 \cdot m_x + 3 \cdot X \cdot m_x^2 - m_x^3) = \\ &= m_x^3 - 3 \cdot m_x^2 \cdot m_x + 3 \cdot m_x \cdot m_x^2 + m_x^3 = \nu_3 - 3 \cdot \nu_2 \cdot \nu_1 + 2 \cdot \nu_1^3 = \\ &= \nu_2 \cdot \nu_1 - 3 \cdot \nu_2 \cdot \nu_1 + 2 \cdot \nu_1^3 = 2 \cdot \nu_1^3 - 2 \cdot \nu_2 \cdot \nu_1 \end{aligned}$$

Теперь можно определить математическое ожидание мощности, вырабатываемой ВЭУ вероятностной постановке

$$M[X^3] = M[X^2] \cdot M[X] + K_{X^2, X}, \quad (4.21)$$

где $K_{X^2, X}$ – корреляционный момент.

Или через начальные моменты имеет следующий вид

$$M[X^3] = \nu_2 \cdot \nu_1 + K_{X^2, X}, \quad (4.22)$$

Определим корреляционный момент между X^2 и X , через начальные и центральные моменты случайной величины

$$\begin{aligned} K_{X^2 \cdot X} &= M \left[(X^2 - m_x^2) \cdot (X - m_x) \right] = M \left[X^3 - X^2 \cdot m_x - X \cdot m_x^2 + m_x^2 \cdot m_x \right] = \\ &= M \left[X^3 - 3 \cdot X^2 \cdot m_x + 3 \cdot X \cdot m_x^2 - m_x^3 + 2 \cdot X^2 \cdot m_x - 3 \cdot X \cdot m_x^2 + m_x^3 - X \cdot m_x^2 + m_x^2 \cdot m_x \right] = \\ &= M \left[(X - m_x)^3 + 2 \cdot X^2 \cdot m_x - 3 \cdot X \cdot m_x^2 + m_x^3 - X \cdot m_x^2 + m_x^2 \cdot m_x \right] = \\ &= \mu_3 + 2 \cdot m_x^2 \cdot m_x - 3 \cdot m_x \cdot m_x^2 + m_x^3 - m_x \cdot m_x^2 + m_x \cdot m_x^2 = \\ &= \mu_3 + 2 \cdot m_x^2 \cdot m_x - 2 \cdot m_x^3 = \mu_3 + 2 \cdot \nu_2 \cdot \nu_1 - 2 \cdot \nu_1^3 \end{aligned}$$

В итоге получим, математическое ожидание случайной величины третьего порядка, в нашем случае скорости ветра (V^3) равно

$$\begin{aligned} M \left[X^3 \right] &= \nu_2 \cdot \nu_1 + K_{X^2 \cdot X} = \nu_2 \cdot \nu_1 + \mu_3 + 2 \cdot \nu_2 \cdot \nu_1 - 2 \cdot \nu_1^3 = \\ &= -2 \cdot \nu_1^3 + 3 \cdot \nu_2 \cdot \nu_1 + \mu_3 \end{aligned} \quad (4.23)$$

При этом начальный момент второго порядка можно выразить через центральный момент второго порядка (μ_2) следующим образом

$$\begin{aligned} \nu_2 &= M \left[X^2 \right] = M \left[X \right] \cdot M \left[X \right] + K_{X \cdot X}, \\ K_{X \cdot X} &= M \left[(X - m_x) \cdot (X - m_x) \right] = M \left(X - m_x \right)^2 = \mu_2, \\ \nu_2 &= M \left[X^2 \right] + \mu_2 = \nu_1^2 + \mu_2, \end{aligned}$$

Таким образом, математическое ожидание скорости ветра (V^3) определяется выражением

$$\begin{aligned} M \left[X^3 \right] &= -2 \cdot \nu_1^3 + 3 \cdot \nu_1 \cdot (\nu_1^2 + \mu_2) + \mu_3 = -2 \cdot \nu_1^3 + 3 \cdot \nu_1^3 + \\ &+ 3 \cdot \nu_1 \cdot \mu_2 + \mu_3 = \nu_1^3 + \mu_3 + 3 \cdot \nu_1 \cdot \mu_2 \end{aligned} \quad (4.24)$$

После некоторых преобразований результирующее выражение для математического ожидания (X^3) имеет вид

$$\begin{aligned}
M[X^3] &= \nu_1^3 + 3 \cdot \nu_1 \cdot \mu_2 + \mu_3 = \nu_1^3 + 3 \cdot \nu_1 \cdot \mu_2 + 2 \cdot \nu_1^3 - 2 \cdot \nu_2 \cdot \nu_1 = \\
&= 3 \cdot \nu_1^3 + 3 \cdot \nu_1 \cdot \mu_2 - 2 \cdot \nu_1 \cdot (\nu_1^2 + \mu_2) = 3 \cdot \nu_1^3 + 3 \cdot \nu_1 \cdot \mu_2 - \\
&\quad - 2 \cdot \nu_1^3 - 2 \cdot \nu_1 \cdot \mu_2 = V_1^3 + V_1 \cdot \mu_2
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Тогда для переменной, в качестве которой в нашем случае выступает, скорость ветра получим новую формулу для вероятностной модели ветра

$$M[V^3] = \nu_1^3 + \nu_1 \cdot \mu_2. \tag{4.26}$$

С учетом того, что $\nu_1 = M[V] = \bar{V}$ и $\mu_2 = D[V] = \sigma_V^2$, тогда вероятностная модель для V^3 имеет вид

$$M[V^3] = \bar{V}^3 + \bar{V} \cdot \sigma_V^2. \tag{4.27}$$

Таким образом, мощность ветроустановки в стохастической модели равно

$$P_{\text{сто.}} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot A}{2} \cdot (\bar{V}^3 + \bar{V} \cdot \sigma_V^2). \tag{4.28}$$

При сравнении (2.1) и (4.28) видно, что учет флуктуации скорости ветра, смещает математическое ожидание, вырабатываемой мощности ВЭУ в сторону большего значения. Иначе говоря, флуктуации ветрового потока (скорости ветра) позволяет увеличить вырабатываемую мощность, что обусловлено нелинейной зависимостью мощности от скорости ветра.

4.5 Результаты прогнозирования

Для прогноза на сутки вперед необходимо получить отдельный прогноз для каждого из коэффициентов временных рядов: скорости и направления ветра. Прогноз скорости и направления ветра на сутки вперед, осуществлен с помощью уравнений нечеткой регрессии (4.10) и (4.11).

Полученные результаты прогнозирования скорости ветра представлены в Таблице 4.5, при этом определены вероятностные характеристики

ветрового потока: математическое ожидание (m_x), среднеквадратическое отклонение (σ_x) и дисперсия (D_x). На этой основе с помощью формул (2.1) и (4.28) определены электрические мощности ВЭУ в детерминистической ($P_{дет.}$) и стохастической ($P_{сто.}$) постановке задачи.

Таблица 4.5 – Выработка активной мощности ВЭУ при фактических и прогнозных значениях скорости ветра

Первый день											
Время суток	m_x			D_x		σ_x		$P_{дет.}, \text{МВт}$		$P_{сто.}, \text{МВт}$	
	Ф	П	$\sigma, \%$	Ф	П	Ф	П	Ф	П	Ф	П
0	14	12,2	12,9	13,68	7,88	3,70	2,81	2,05	2,05	2,05	2,05
3	10	13,1	23,7	11,47	12,32	3,39	3,51	1,18	2,05	1,31	2,05
6	11	13,4	17,9	7,69	11,11	2,77	3,33	1,56	2,05	1,66	2,05
9	11	12,6	12,7	11,12	13,73	3,33	3,70	1,56	2,05	1,71	2,05
12	15	11,9	20,7	31,00	12,51	5,57	3,54	2,05	1,98	2,05	2,05
15	13	10,3	20,8	17,49	11,18	4,18	3,34	2,05	1,28	2,05	1,42
18	15	14,7	2,0	28,71	26,24	5,36	5,12	2,05	2,05	2,05	2,05
21	14	10,7	23,6	17,49	8,65	4,18	2,94	2,05	1,44	2,05	1,55
24	14	12,2	12,9	13,68	7,88	3,70	2,81	2,05	2,05	2,05	2,05
Второй день											
Время суток	m_x			D_x		σ_x		$P_{дет.}, \text{МВт}$		$P_{сто.}, \text{МВт}$	
	Ф	П	$\sigma, \%$	Ф	П	Ф	П	Ф	П	Ф	П
0	11	10,1	8,2	7,68	9,45	2,77	3,07	1,56	1,21	1,66	1,32
3	11	10,3	6,4	9,61	10,70	3,10	3,27	1,56	1,28	1,69	1,41
6	9	10,4	13,5	13,80	8,67	3,71	2,94	0,86	1,32	1,00	1,43
9	7	12,8	45,3	27,20	14,42	5,22	3,80	0,40	2,05	0,63	2,05
12	7	15,3	54,2	23,14	33,83	4,81	5,82	0,40	2,05	0,59	2,05
15	9	11,9	24,4	13,42	13,13	3,66	3,62	0,86	1,98	1,00	2,05
18	8	10,8	25,9	18,75	10,77	4,33	3,28	0,60	1,48	0,78	1,62
21	9	12,5	28,0	12,75	10,73	3,57	3,28	0,86	2,05	0,99	2,05
24	11	10,1	8,2	7,68	9,45	2,77	3,07	1,56	1,21	1,66	1,32

Третий день											
Время суток	m_x			D_x		σ_x		$P_{дет.}, МВт$		$P_{сто.}, МВт$	
	Ф	П	$\sigma, \%$	Ф	П	Ф	П	Ф	П	Ф	П
0	11	11,4	3,5	7,68	7,42	2,77	2,72	1,56	1,74	1,66	1,84
3	7	13	46,2	29,27	11,98	5,41	3,46	0,40	2,05	0,64	2,05
6	9	9,7	7,2	13,80	10,74	3,71	3,28	0,86	1,07	1,00	1,20
9	8	9,2	13,0	20,12	14,30	4,49	3,78	0,60	0,92	0,79	1,07
12	9	9,5	5,3	12,90	11,61	3,59	3,41	0,86	1,01	0,99	1,14
15	9	10,1	10,9	13,42	11,30	3,66	3,36	0,86	1,21	1,00	1,35
18	7	10,4	32,7	25,46	10,94	5,05	3,31	0,40	1,32	0,61	1,46
21	9	10,9	17,4	12,75	8,56	3,57	2,93	0,86	1,52	0,99	1,63
24	11	11,4	3,5	7,68	7,42	2,77	2,72	1,56	1,74	1,66	1,84

Из Таблицы 4.5 следует, что погрешность в прогнозировании математического ожидания скорости ветра на три часа вперед составляет от 2 до 54,2%.

На Рисунке 4.5 представлены графики выработки мощности ветроустановки при детерминистической модели ветра (2.1) и вероятностной модели с учетом среднеквадратического отклонения скорости ветра (4.28).

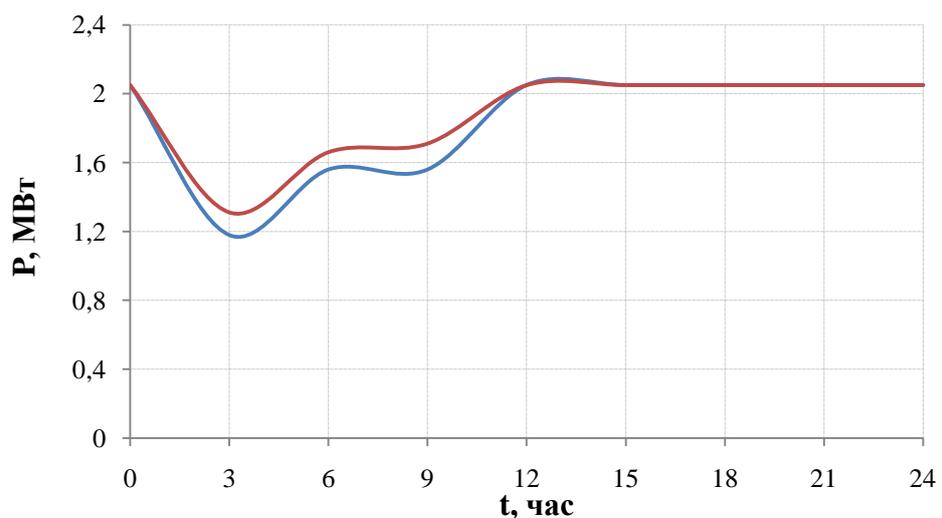


Рисунок 4.5 – Выработка активной мощности ВЭУ на суточном интервале с учетом обеих моделей ($P_{дет.}$ – синяя линия и $P_{сто.}$ – красная линия)

Из графика видно, что при значительных значениях среднеквадратического отклонения скорости ветра от 0 до 12 часов вероятностная модель позволяет учесть некоторую дополнительную мощность от флуктуации скорости ветра.

Далее по формуле (4.29) определим коэффициенты корреляции скорости ветра для первого, второго и третьего дней прогноза. Значения корреляции представлены в Таблице 4.6.

$$r_{t,t+i} = \frac{\overline{x_t \cdot x_{t+i}} - x_t^{cp} \cdot x_{t+i}^{cp}}{\sigma_t \cdot \sigma_{t+i}}, \quad (4.29)$$

Таблица 4.6 – Коэффициенты корреляции

Время суток	Коэффициент корреляции	Скорости ветра, м/с		
		Первый день	Второй день	Третий день
0-3	$r_{t,t+1}$	0,73	0,71	0,71
0-6	$r_{t,t+2}$	0,42	0,41	0,42
0-9	$r_{t,t+3}$	0,34	0,35	0,33
0-12	$r_{t,t+4}$	0,17	0,2	0,19
0-15	$r_{t,t+5}$	0,11	0,13	0,13
0-18	$r_{t,t+6}$	0,07	0,09	0,07
0-21	$r_{t,t+7}$	0,03	0,04	0,03

Графики изменения корреляции в течение трех суток представлены на Рисунке 4.6.

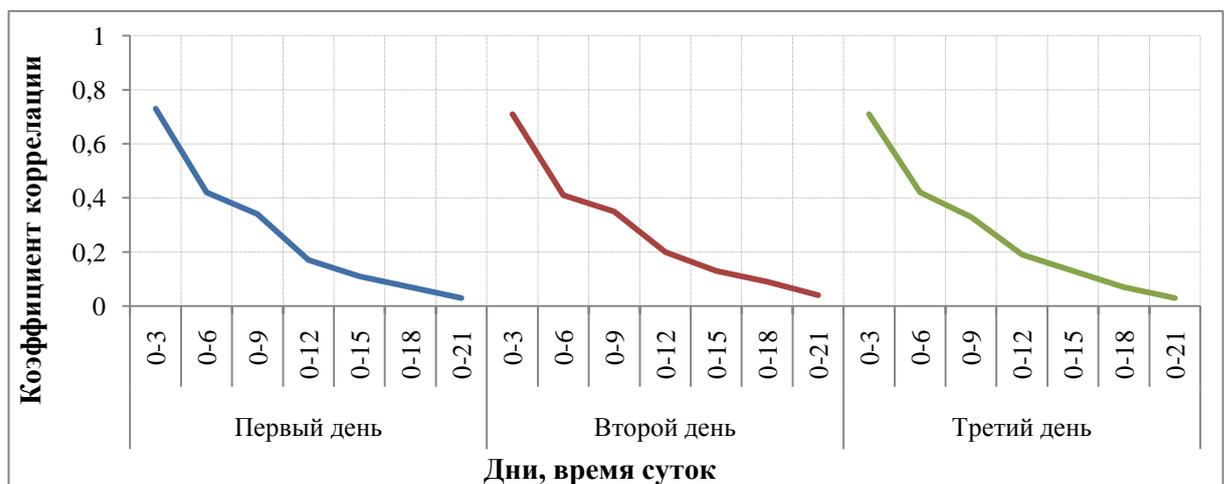


Рисунок 4.6 – Изменение коэффициента корреляции скорости ветра в течение трех суток

Результаты вычисления коэффициентов корреляции показывают, что корреляционные зависимости при переходе от одних суток к другим, практически не изменяются.

Наряду с этим осуществлен прогноз направления ветрового потока в начале, по направлениям сторон света (Таблица 4.7). Далее даны прогнозные значения направления ветра, измеренные в углах (Таблица 4.8). Отсчет угла начинается со стороны Востока от положительного направления оси абсцисс.

Таблица 4.7 – Прогноз направление ветра

Время суток	Первый день		Второй день		Третий день	
	Ф	П	Ф	П	Ф	П
0	С-С-З	С-З	С	С-З	С-З	С-З
3	С-С-З	С-С-З	С	С	Ю	С-З
6	С-С-З	С	С	С	Ю-З	С
9	С-С-З	С-С-В	С	С-С-В	Ю-Ю-В	С-С-В
12	С-С-З	З-З-Ю	С-С-З	С-С-В	Ю	С-С-В
15	С	С-С-З	Ю-Ю-З	С-С-В	Ю-В	Ю-Ю-З
18	С	С-С-З	В-Ю-В	С	Ю	Ю-Ю-З
21	З-С-З	З-З-С	З	С-С-З	Ю-Ю-З	Ю-Ю-З
24	С-С-З	С-З	С	С-З	С-З	С-З

Таблица 4.8 – Прогноз угла направление ветра

Время суток	Первый день			Второй день			Третий день		
	Ф	П	σ , %	Ф	П	σ , %	Ф	П	σ , %
0	112,5	96	14,7	90	97	7,7	135	97	28
3	112,5	102	9,3	90	89	1,1	270	97	64
6	112,5	89	20,9	90	90	0	225	90	60
9	112,5	78	30,7	90	80	11	292,5	81	72,3
12	112,5	215	47,7	112,5	85	24,4	270	86	68
15	90	127	29,1	292,5	75	74,3	315	236	25
18	90	106	15,1	337,5	91	73	270	235	13
21	157,5	158	0,3	180	108	40	247,5	228	7,8
24	112,5	96	14,7	90	97	7,7	135	97	28

Таким образом, в качестве исходной информации для управления ВЭУ могут быть использованы: математическое ожидание (m_x) и среднеквадратическое отклонение (σ_x) скорости ветра, а также направление ветра, что определяет угол поворота гондолы. Это позволяет перейти к управлению ветроэнергетической установки по правилам с учетом функций принадлежности.

Наряду с этим, авторами работы рассмотрено прогнозирование направления ветра и предложены функции принадлежности для отдельных направлений ветра. В качестве базовых направлений приняты основные стороны света: Восток (East)-нулевой отсчет от положительного направления оси абсцисс; Север (North)-положительное направления оси ординат, сдвинутое на 90 градусов против часовой стрелки; Запад (West)-отрицательное направление оси абсцисс, сдвинутое на 180 градусов против часовой стрелки; Юг (South)-отрицательное направление оси ординат, сдвинутое на 180 градусов против часовой стрелки (Рисунок 4.7).

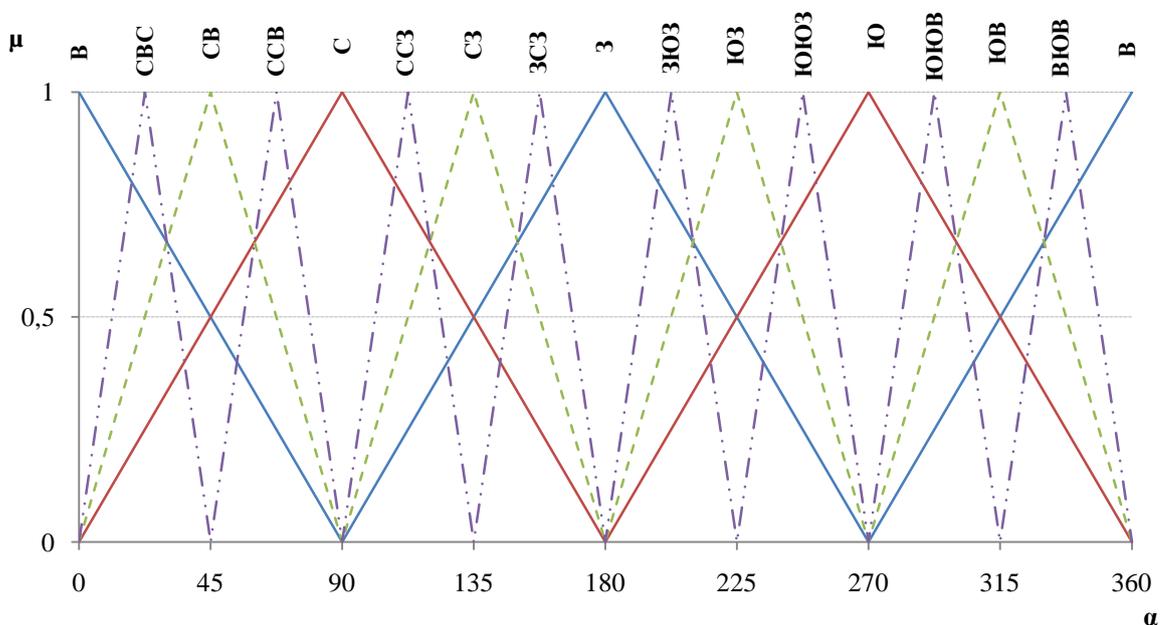


Рисунок 4.7 – Функции принадлежности направления ветра

Такой набор функций принадлежности является приближенным, поэтому введены промежуточные функции принадлежности: Северо-Восток,

Северо-Запад, Юго-Запад и Юго-Восток. Однако, для управления ВЭУ на основе нечеткой логики и этой градации функции принадлежности может быть недостаточно. В связи с этим авторами предлагаются новые градации направления ветров, а именно: Востоко-Северо-Восток (ВСВ), Северо-Северо-Восток (ССВ), Северо-Северо-Запад (ССЗ), Западо-Северо-Запад (ЗСЗ), Западо-Юго-Запад (ЗЮЗ), Юго-Юго-Запад (ЮЮЗ), Юго-Юго-Восток (ЮЮВ) и Востоко-Юго-Восток (ВЮВ). Таким образом, скорость ветра должна быть охарактеризована, как векторная величина, модуль которой определяет скорость ветра, а угол направления ветра (Рисунок 4.8).

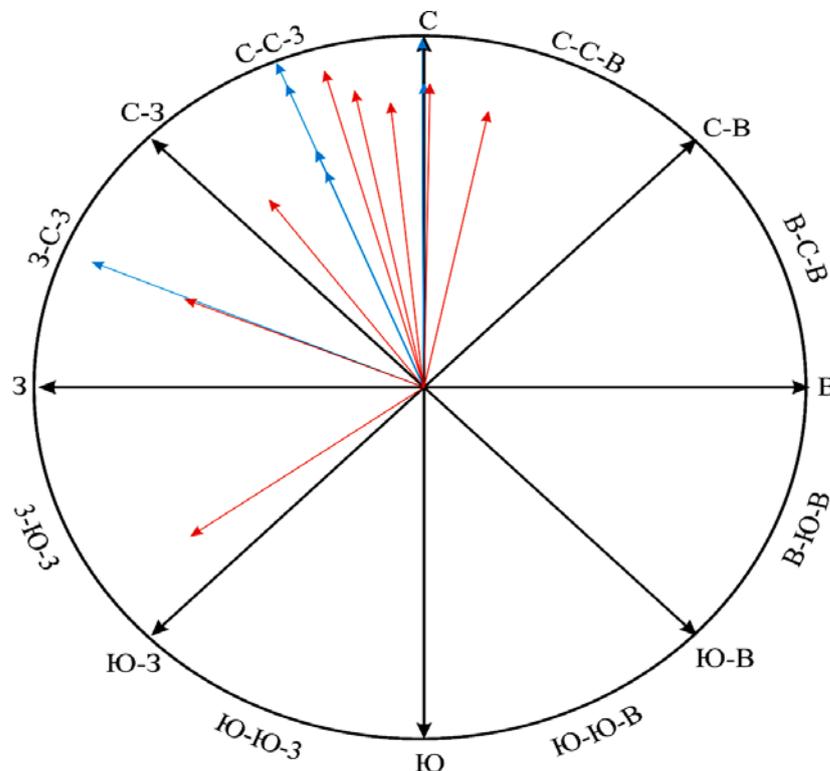


Рисунок 4.8 – Распределение скорости ветра по направлениям (Фактическое значение – синяя линия и Прогнозное значение – красная линия)

Далее по формуле (4.29) определим коэффициента корреляции угла изменения ветра в течение суток, для трех дней прогноза. Результаты представлены в Таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Коэффициенты корреляции

Время суток	Коэффициент автокорреляции	Направления ветра, м/с		
		Первый день	Второй день	Третий день
0-3	$r_{t,t+1}$	0,6	0,59	0,59
0-6	$r_{t,t+2}$	0,36	0,34	0,35
0-9	$r_{t,t+3}$	0,38	0,37	0,37
0-12	$r_{t,t+4}$	0,45	0,44	0,44
0-15	$r_{t,t+5}$	0,29	0,29	0,27
0-18	$r_{t,t+6}$	0,12	0,14	0,1
0-21	$r_{t,t+7}$	0,18	0,18	0,17

Графики изменения корреляции в течение трех суток представлены на Рисунке 4.9.

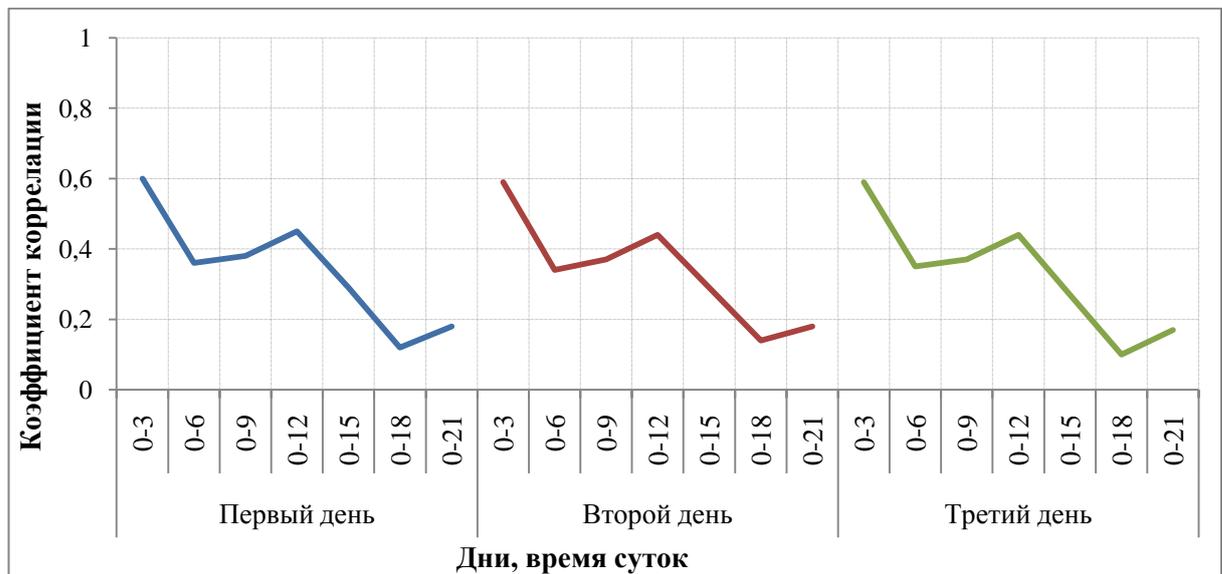


Рисунок 4.9 – Коэффициент корреляции угла направления ветра в течение трех суток

Результаты вычисления коэффициентов корреляции показывают, что корреляционные зависимости при переходе от одних суток к другим, практически не изменяются.

Выводы

1. Определено семейство нечетких функций принадлежности лингвистических переменных скорости ветра по шкале Бофорта в виде треугольных L-R – функций и выведены аналитические выражения характерных функции принадлежности для тех лингвистических переменных скоростей ветра, при которых возможна работа ветроустановок

2. Показано, что прогнозирование скорости ветра и его угла на основе нечеткой регрессии, может быть выполнено с приемлемой точностью на три часа вперед. Это позволяет планировать выработку электроэнергии за счет ветрового потока на суточном интервале и минимизировать расходы генерирующего потребителя. Впервые прогноз скорости ветра дополнен прогнозированием угла его направления, что позволяет на втором этапе выработки мощности ВЭУ осуществлять управление гондолой, в то время как угол атаки лопастей может являться вторичным элементом управления ветроустановкой.

3. Предложена новая математическая модель для оценки максимальной выработки мощности ветроустановки с учетом вероятностных отклонений скорости ветрового потока от его математического ожидания. Показано, что непериодические колебания скорости ветра, позволяют на 6–7% увеличить мощность ветроустановки на величину $(\bar{V} \cdot \sigma_V^2)$. Предложенная модель подана в качестве заявки на полезную модель.

4. Реализация новой математической модели с учетом вероятностного характера ветрового потока позволяет спроектировать дополнительные закрылки на лопастях ВЭУ (флепсы), с помощью которых возможен съём дополнительной мощности ветрового потока.

5 УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРИРУЮЩИМ ПОТРЕБИТЕЛЕМ КАК ЗАДАЧА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

5.1 Постановка задачи

Данная глава посвящена применению нового метода решения задачи управления в условиях неопределенности – Q-обучения, которое относится к обучению с подкреплением. Методы, используемые в предыдущих главах, такие как алгоритмы роевого интеллекта, градиентного спуска, нечеткая логика, относительно хорошо известны как качества инструментов решения различных задач в области энергетики. Метод, о котором речь пойдет в данной главе, требует более подробного изложения, поскольку в русскоязычной литературе он на данный момент освещен недостаточно хорошо, чтобы можно было просто дать читателю ссылки на определенные источники и перейти непосредственно к его применению в интеллектуальных электроэнергетических системах. Поэтому данная глава постепенно подводит к применению Q-обучения. Требуется понимание задачи оптимального управления и основ машинного обучения. Однако современные исследования по Q-обучению в задачах управления сложными системами чаще используют именно нейронные сети [101–103], поскольку они позволяют аппроксимировать зависимости между выбранными управленческими действиями и их итоговой эффективностью, взять на себя построение очень сложных моделей таких систем.

5.2 Понятие оптимального управления

Задача оптимального управления заключается в создании управляющей системы, которая бы реализовывала последовательность воздействий на управляемый объект таким образом, чтобы достичь наилучшего возможного качества, заданного одним или несколькими критериями. Под управляемым объектом (объектом управления) понимается некоторая часть окружающего

мира, на которую субъект управления может целенаправленно воздействовать [104], Рисунок 5.1.

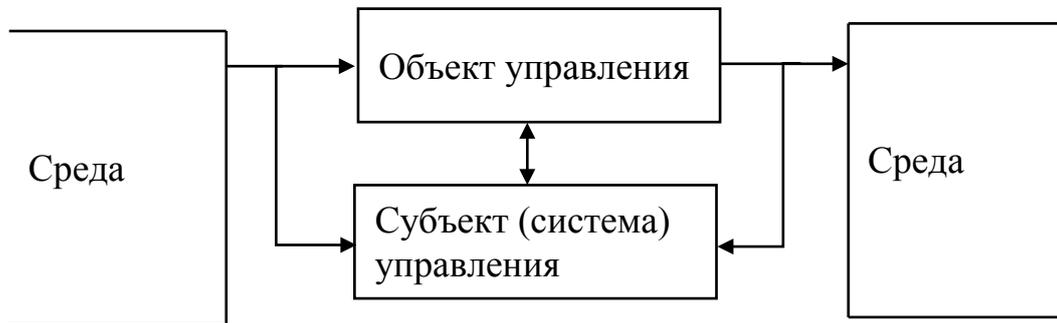


Рисунок 5.1 – Схема взаимодействия объекта, субъекта и среды

Управление всегда происходит в течение некоторого периода времени, при этом управляемый объект переходит из состояние в состояние. Состояние объекта управления характеризуется набором параметров, которые могут изменяться с течением времени: $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$. Таким образом, имеется вектор функций, каждая из которых показывает изменение параметра объекта с течением времени. Эти функции в явном виде, как правило, неизвестны. Кроме того, имеется управляющая система, которая осуществляет управление. Управление может быть также задано как вектор функций $A(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_m(t)\}$. Здесь использованы обозначения S и A , потому что далее будут введены термины из теории Q-обучения «state» и «action», хотя в литературе, посвященной оптимальному управлению, обычно состояние обозначается через Y , а управление через U [105]. И, конечно, S и A в данной главе не связаны с используемыми для описания роевых алгоритмов обозначениями в третьей главе.

Задача оптимального управления может быть в общем виде записана в следующем виде

$$A(t)^{opt} = \operatorname{argmax}_{A(t) \in A_{\text{дон.}}} \int_{t_0}^{t_T} f(t, S(t), A(t)) dt, \quad (5.1)$$

где $A(t)^{opt}$ – искомое оптимальное управление, то есть указания, какие значения в какой момент времени должны принимать параметры управления (когда сколько кому продавать или покупать, запастись в аккумулятор или наоборот);

$A_{don.}$ – область допустимых значений параметров управления;

$f(t, S(t), A(t))$ – функция $n + m + 1$ переменных, задающая некоторым образом выгоду в зависимости от параметров объекта управления, от параметров управления, а так же от состояния окружающей среды (например, для ГП это тариф на электроэнергию в текущее время суток);

t_0 и t_T – заданный диапазон времени, на котором рассматривается управление.

Как было отмечено в третьей главе, модели электроэнергетических систем очень сложны, поэтому в явном аналитическом виде функцию $f(t, S(t), A(t))$ получить обычно нельзя, тем более ее интеграл. Но можно задать ее алгоритмически. В примере для ГП данная функция является кусочно-непрерывной, так как шаг времени равен 1 часу. Зато задачу (5.1) можно записать без интеграла, в виде суммы, а функция $f(t, S(t), A(t))$ является не чем иным как разницей между доходами от продажи электроэнергии генерирующего потребителя и расходами на ее покупку, генерацию и аккумуляцию за один определенный час. Однако, даже в этом случае аналитическое выражение для $f(t, S(t), A(t))$ записать затруднительно, так как цена на электроэнергию является кусочно-постоянной функцией, обмен электроэнергией с соседним генерирующим потребителем зависит от его состояния и управления им. Таким образом, расчет значения $f(t, S(t), A(t))$ необходимо выполнять алгоритмически.

Как показано в выражении (5.1), задача оптимального управления состоит в определении наилучших параметров управления для максимизации критерия. В главе 3 для решения этой задачи применялись алгоритмы

роевого интеллекта для формирования базы правил, которые осуществляли оптимальные управление.

Можно сказать, что алгоритм роевого интеллекта применялся для **обучения** управляющей системы, точнее машинного обучения. Следующий пункт раскрывает виды машинного обучения (machine learning, ML) и указывает особенности **обучения с подкреплением**.

5.3 Виды машинного обучения. Обучение с подкреплением

Можно выделить три вида машинного обучения:

1. Обучение с учителем (supervised learning). Имеется обучающий набор данных (training data set), который представляет собой множество объектов вида $\{X_i, Y_i\} \ i = 1, \dots, n$, где n – количество объектов в обучающей выборке; X_i – входные данные, поступающие на вход обучаемой модели; Y_i – выходные данные, которые требуется получить на выходе модели при подаче на вход X_i . То есть требуется научить модель аппроксимировать зависимость $Y(X)$.

Пример: по измеряемым показателям качества трансформаторного масла определить наличие неисправности. При этом должна быть статистика многих наблюдений за многим трансформаторами. Пусть m – число трансформаторов, k – число снятий показаний с каждого из них. В этом случае размер выборки будет равен $n = mk$. Результаты одного i -го измерения показателей трансформаторного масла – вектор вещественных чисел $X_i = \{\text{электрическая прочность; кислотное число; содержание водорастворимых кислот; температура вспышки в закрытом тигле; наличие механических примесей; цвет; тангенс угла диэлектрических потерь масла; общее газосодержание; наличие растворенного шлама}\}$ [106]. Для каждого набора значений показателей масла должно быть указание наличия обнаруженных при этом неисправностей, вектор бинарных чисел $Y_i = \{\text{межлистовые}$

замыкания статора; перегрев контактов токоведущих шин; перегревы контактных соединений; ...}.

Нужно обучить модель, которая бы по значениям вектора X_i давала оценку наличия неисправностей Y_i . При этом во время обучения для каждого X_i из обучающей выборки известно требуемое выходное значение модели Y_i . Поэтому обучение и называется обучением с учителем, ведь для каждого обучающего примера известен правильный ответ и если модель выдала неправильный результат для примера X_i , то можно вычислить ошибку и скорректировать модель.

Обученная модель в случае успешного прохождения после процедур тестирования может применяться в жизни для диагностики неисправностей.

2. Обучение без учителя (unsupervised learning). Имеется обучающий набор данных (training data set), который представляет собой множество объектов вида $\{X_i\}$, то есть в отличие от обучения с учителем, нет правильных значений выхода модели, поэтому обучение и называется «без учителя». Выход модели нельзя однозначно определить как правильный или неправильный, нет образца для сравнения. Но и сама задача заключается не в построении модели какой-либо зависимости, а в поиске определенных структур в данных, например, групп (кластеров) объектов.

В качестве примера можно рассмотреть ту же задачу обнаружения неисправностей трансформаторного оборудования, но в случае, когда нет статистики – какие признаки, какую неисправностью означали. Есть только множество наборов измерений показателей трансформаторного масла и априори сведения о том, что подавляющее большинство трансформаторов во время измерений не имели неполадок. С помощью обучения без учителя можно найти группу или группы измерений, которые значительно отличаются от всех прочих, таким образом получить модель, которая могла бы затем по измерениям показателей трансформаторного масла определять, что они для данного трансформатора аномально отличаются от нормальных значений и нужно провести диагностику именно этого трансформатора.

3. Обучение с подкреплением (reinforcement learning). Обучаемая модель, называемая в данном виде обучения агентом, взаимодействует с окружающей средой и по реакции среды на свои действия формирует некоторое поведение с целью максимизировать выгоду от взаимодействия со средой или минимизировать потери. Теоретические основы обучения с подкреплением были разработаны в [107] и заключаются в следующем. Рассматривается агент, помещенный во внешнюю среду, и имеющий конечный набор действий, каждое из которых приводит к изменению внешней среды и получению от нее обратной связи. Причем обратная связь может быть позитивной (поощрение) или негативной (наказание). В процессе взаимодействия с внешней средой агент меняет свое поведения, чтобы максимизировать поощрение и минимизировать наказание, то есть обучается.

На первый взгляд можно решить, что обучение с учителем полностью соответствует данному принципу. Но в обучении с учителем всегда в процессе обучения есть правильное, желаемое значение выхода обучаемой модели для каждого образца входных данных. А в обучении с подкреплением такой информации нет, поскольку при взаимодействии агента и среды каждое действие агента (выход модели) рассматривается не само по себе, а с учетом его влияния на последующие события. Иными словами, действие агента может принести большую выгоду в момент совершения, но привести к плохому результату в дальнейшем. В отличие от таких задач, как классификация или обнаружение неисправностей, когда каждое действие (предсказание) на этапе обучения можно сразу же оценить величиной ошибки, в рассматриваемых задачах оптимального управления результат каждого действия зависит еще и от будущих, неизвестных заранее реакций внешней среды и дальнейших действий агента.

5.4 Понятия и принципы Q-обучения

Главное понятие в Q-обучении – функция полезности Q . Введем дополнительные обозначения:

- i – дискретный номер отсчета времени, так как в Q-обучении считается что все действия происходят шаг за шагом, в примере с ГП i – номер часа;
- $s(i)$ – вектор конкретных значений всех параметров состояния $S(t)$ в i -й отсчет времени, например для примера из Таблицы 5.1 в первый час $s(1) = \{26; 16,4; 2,0\}$;
- $a(i)$ – вектор конкретных значений всех параметров управления $A(t)$ в i -й отсчет времени, например для примера из Таблицы 5.1 в первый час $a(1) = \{0; 11,6; 2,0\}$;
- цель – то, к чему, в конечном счете стремятся агент, например для ГП целью является обеспечение собственных потребностей в электроэнергии при наибольшем доходе от обмена электроэнергией с глобальной ЭЭС и соседними ГП;
- $r(i)$ – выгода (reward), которую получает агент, выполнив в состоянии $s(i)$ действие $a(i)$; для примера из таблицы 5.1 ГП потратил на покупку у соседнего ГП $11600 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 1,4 \text{ руб.} / \text{кВт}\cdot\text{ч}$ ($1,4$ – тариф для данного часа), таким образом, $r(1) = 16240 \text{ руб.}$;
- α – фактор скорости обучения, чем он выше, тем сильнее на агента влияет вновь полученный опыт;
- γ – фактор дисконтирования, чем он выше, тем больший приоритет агент будет отдавать долгосрочной выгоде по сравнению с краткосрочной (факторы выделены полужирным чтобы выделялись относительно переменных);
- $Q(s(i), a(i))$ – функция полезности, которая по текущему состоянию $s(i)$ и выбранному действию $a(i)$ дает оценку выгоды действия $a(i)$ в

состоянии $s(i)$ в целом, то есть и в краткосрочной, и в долгосрочной перспективе.

Здесь нужно отметить, что Q-функция не является аналогом f -функции из выражения (5.1), так как f -функция в классической теории оптимального управления дает, во-первых, не оценку, а точное значение выгоды, во-вторых, без учета будущей выгоды, только результат действия в данный момент. В процессе Q-обучения происходит изменение Q-функции (собственно «обучается» именно она) в общем виде по следующей формуле

$$Q(s(i), a(i)) \leftarrow Q(s(i), a(i)) + \alpha \left(r(i) + \gamma \max_{a^*(i) \in A_{\text{доп.}}(i)} Q(s(i+1), a^*(i)) - Q(s(i), a(i)) \right) \quad (5.2)$$

Возникает вопрос, как можно доверять оценке выгоды на много шагов вперед в условиях неопределенности, то есть, когда будущие реакции системы и будущие выбранные действия неизвестны. Действительно, Q-функция дает лишь оценку выгоды, а Q-обучение не гарантирует получение оптимального управления, как и во всех сложных задачах оптимизации электроэнергетических систем, нахождение точного глобального оптимального решения не является целью, нужно за приемлемое время найти решение, удовлетворяющее субъект управления и отвечающее всем ограничениям. Поэтому Q-обучение решает поставленную задачу оптимального управления приближенно, но эффективно с точки зрения практического применения в управлении сложными системами.

Наконец, последний и наиболее интересный вопрос – как в Q-обучении, собственно, происходит выбор действия (управления)? Для этого служит так называемая «политика» в значении «линия поведения», от английского policy. Простейшей политикой является следующая: в данном состоянии $s(i)$ выбрать действие $a(i)$ для которого оценка выгоды максимальна:

$$a(i) = \operatorname{argmax}_{a^*(i) \in A_{\text{дон.}}(i)} Q(s(i), a^*(i)). \quad (5.3)$$

Недостатком такой политики является то, что пока у агента мало данных, Q -функция дает очень низкую точность оценок выгоды и использовать только ее нельзя. Поэтому часто применяется ϵ -жадная политика, на каждом шаге с вероятностью $(1 - \epsilon)$ выбирается действие в соответствии с выражением (5.2), а с вероятностью ϵ – случайное действие путем розыгрыша по жребью с одинаковыми вероятностями выбора для каждого допустимого действия. Величину ϵ с каждой итерацией обучения можно уменьшать, чтобы пока агент имеет мало опыта, он больше «экспериментировал», искал новые варианты действий, а накопив опыт, больше доверял ему, и обучение сосредотачивалось на улучшении уже сформированного управления.

5.5 Основы искусственных нейронных сетей

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются весьма продуктивным дополнением к существующим методам обработки тех или иных статистических данных и формирования на этой основе некоторых существующих или будущих образов. Важным преимуществом искусственных нейронных сетей является способность анализа сложных зависимостей и отношений и причем в режиме автономного (автоматического) обучения или даже самообучения [108].

Нейронные сети нашли значительное практическое применение для решения задач классификации, прогнозирования и управления, и представляют собой исключительно эффективный метод моделирования. Особенно их применение эффективно, когда между входными независимыми переменными и выходными параметрами (часто это прогнозируемые параметры) существует сложная взаимосвязь, которую трудно описать известными статистическими терминами, например, корреляцией.

В самом общем случае многие технические задачи основаны на сложных многомерных преобразованиях входных и выходных переменных. В частности, в электроэнергетике это входные возмущения, обусловленные поведением электроприемников и электропотребителей, а выходные параметры определяются реакцией системы в виде режимных параметров. ИНС широко используются в электроэнергетике для прогнозирования графиков нагрузки, построения регуляторов, мониторинга безопасности, оперативного управления, анализа режимов работы и многих других задач.

Данное отображение можно осуществить, используя теорему А.Н. Колмогорова и В.И. Арнольда, которая гласит о том, что построить многомерное отображение $X \rightarrow Y$ можно путем представления функции многих переменных в виде суперпозиции функций меньшего числа переменных. Ими доказаны следующие теоремы: теорема о возможности представления непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных и теорема о представлении любой непрерывной функции трех переменных в виде суммы функций не более двух переменных.

Далее, на основе этих теорем, была предложена теорема Хехт-Нильсена для нейронных сетей. Из теоремы Хехт-Нильсена следует, что любая многомерная функция нескольких переменных с помощью нейронной сети заданной размерности может быть представлена путем сети с нейронами скрытого слоя и функциями активации нейронов. Про функции активации нейронов выходного слоя из этой теоремы известно только то, что они представляют собой нелинейные функции, которые должны быть монотонно возрастающими.

Функциональным элементом ИНС является нейрон, который можно представить как функцию следующего вида

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right), \quad (5.4)$$

где x_i – значение на i -м входе нейрона;

n – количество входов нейрона;

w_i – вес i -го входа (weight);

b – смещение (bias);

f – нелинейная функция активации;

y – выход нейрона.

Существует множество различных функций активации. Наиболее часто используются функции

- гиперболический тангенс $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$;
- сигмоидальная функция $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$;
- ReLU (rectified linear unit) $f(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$.

При графическом изображении нейрон обычно изображается следующим образом (Рисунок 5.2)

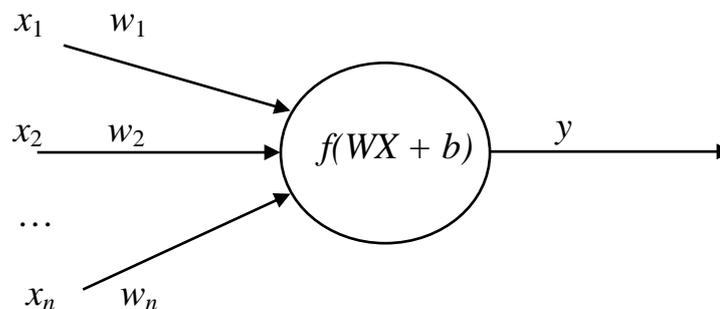


Рисунок 5.2 – Нейрон

Соединение нейронов в сеть может быть выполнено различными способами, существует большое количество архитектур нейронных сетей. В настоящее время для рассматриваемых задач построения моделей сложных зависимостей можно выделить две архитектуры: многослойный перцептрон и сверточная сеть.

Многослойный перцептрон может быть представлен как ряд последовательных слоев, каждый слой представляет собой набор нейронов, не имеющих связей друг с другом. Пример показан на Рисунке 5.3. Сверточная нейронная сеть имеет более сложную структуру. Была впервые предложена в работе [109], в настоящее время благодаря развитию производительности графических процессоров, получила очень широкое распространение и является основной архитектурой в задачах обработки изображений и видео. При этом основные принципы для обеих указанных архитектур одинаковы.

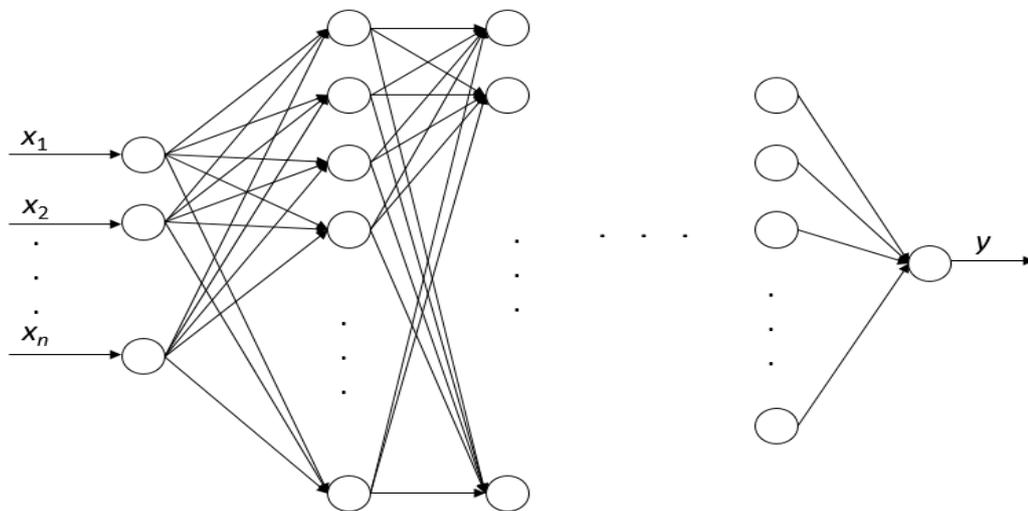


Рисунок 5.3 – Многослойный перцептрон

На Рисунке 5.3, левый слой – входные нейроны, они не имеют функции активации и весов, используются просто, чтобы нагляднее показать является входы ИНС. Прочие нейроны, кроме выходного правого, называют нейронами скрытых слоев, потому что к ни непосредственно не подключены ни входы, ни выходы сети. Выходных нейронов может быть несколько.

Архитектура задает структуру сети, а ее параметры – веса и смещения нейронов, w и b в выражении (5.4) – задаются в процессе обучения. Среди множества методов обучения ИНС следует выделить метод обратного распространения ошибки (Backpropagation), именно он чаще всего используется в Q-обучении.

Основная идея метода обратного распространения ошибки заключается в определении отклонения (ошибки или потери – loss) выходного значения ИНС для текущего обучающего примера от желаемого значения и передачи этого значения от выхода ИНС через все ее слои к входу с коррекцией параметров ИНС для снижения величины этого отклонения. Коррекция параметров ИНС выполняется по алгоритму градиентного спуска. Если обозначить величину отклонения как E , вес связи между i -м и j -м нейроном как w_{ij} , а коэффициент, регулирующий скорость обучения как η , можно записать

$$w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (5.5)$$

При этом для нейронов выходного слоя частная производная в выражении (5.5) вычисляется очевидным образом, используя выражение (5.4), а для прочих нейронов необходимо рекурсивно раскрывать выражение

$$w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y_i} \frac{\partial y_i}{\partial s_i} \frac{\partial s_i}{\partial w_{ij}}, \quad (5.6)$$

где y_i – выход i -го нейрона;

s_i – сумма взвешенных входов и смещения i -го нейрона, то есть аргумент его функции активации.

При этом изменения смещений нейронов (b) выполняются аналогично, можно использовать абсолютно те же самые выражения (5.4), (5.5), рассматривая смещение нейрона как еще один вес при всегда единичном входе, тогда выражение (5.4) можно представить как

$$y = f \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + w_{n+1} \right)$$

Подробное описание метода обратного распространения ошибки можно найти в [107]. Стоит отметить, что разработано большое количество приемов и методик повышения эффективности обучения ИНС, но для

применения аппарата ИНС в решении прикладным задач не обязательно владеть всей существующей теоретической базой, поскольку наиболее эффективные методы уже заложены в программные инструменты для применения ИНС, достаточно понимать основные принципы. Тем более, как показывает практика, даже узкие специалисты по ИНС вынуждены проводить эксперименты для определения подходящих под каждую новую задачу архитектуры, метода обучения и т.д.

5.6 Нейросетевое Q-обучение

Как было показано выше, при Q-обучении для оптимального управления сложными системами необходим учет сложных взаимосвязей, поэтому часто применяются ИНС. Роль ИНС в Q-обучении заключается в том, что Q-функция представляется в виде ИНС, а процесс Q-обучения заключается в этом случае в обучении данной ИНС.

Выходной нейрон также может иметь функцию активации ReLU, а его веса нужно получить уже в процессе обучения. Для обучения представленной ИНС нужно использовать выражение (5.2), а именно его следующую часть

$$r(i) + \gamma \max_{a^*(i) \in A_{\text{дон.}}(i)} Q(s(i+1), a^*(i)) - Q(s(i), a(i)) \quad (5.7)$$

Выражение (5.7) представляет собой не что иное, как отклонение имеющегося выхода ИНС $Q(s(i), a(i))$ от желаемого – суммы краткосрочной выгоды и оценки долгосрочной выгоды, так что можно записать

$$E = \left(r(i) + \gamma \max_{a^*(i) \in A_{\text{дон.}}(i)} Q(s(i+1), a^*(i)) - Q(s(i), a(i)) \right)^2 \quad (5.8)$$

В результате квадрат отклонения разности (5.7) и является мерой ошибки ИНС, которую можно обучать методом обратного распространения ошибки. В Q-обучении в отличие от обучения с учителем, отклонения определяются не как разница выходного значения сети и заданного заранее в

обучающей выборке правильного или желаемого выхода. В Q-обучении в качестве желаемого выхода используется оценка

$$r(i) + \gamma \max_{a^*(i) \in A_{\text{дон.}}(i)} Q(s(i+1), a^*(i)).$$

Это создает феноменальную особенность Q-обучения – выход ИНС используется и непосредственно (как обычно в нейросетевом обучении), и для получения желаемого значения выхода. От внешней среды обучение получает лишь значение краткосрочной выгоды $r(i)$. Тем не менее, этого оказывается достаточно для построения эффективных систем управления сложными системами. В целом алгоритм Q-обучения с использованием ИНС отличается от алгоритма Q-обучения с матричной формой Q-функции лишь шагом 2.3.3 – на нем происходит не расчет и обновление значения соответствующего элемента матрицы, а обновление весов и смещений ИНС путем обратного распространения ошибки.

Рассматриваемая в данной главе в качестве примера задача оптимального управления электропотребления генерирующего потребителя может быть следующим образом решена с помощью Q-обучения и модели Q-функции на основе нейронной сети.

1. Необходимо определить, как задавать состояние ГП. В отличие от примера с комнатами, состояние ГП не является определенным элементом из конечного множества дискретных состояний. Состояние ГП, характеризуется тремя параметрами: собственные потребности ГП в электроэнергии (s_1), выработка электроэнергии энергии ВЭУ ГП (s_2), запас энергии в аккумуляторе (s_3). Кроме того, следует добавить текущее время суток как номер часа (s_4). Поэтому на вход ИНС состояние будет подаваться как вектор из четырех вещественных чисел (очевидно, что дискретный номер часа можно также рассматривать как вещественное число).

2. Необходимо определить, как задавать действие ГП. Эта подзадача несколько сложнее, поскольку в выражении (5.2) присутствует выбор оптимального действия с точки зрения оценки по Q-функции. Если

количество действий невелико, можно просто перебрать каждое, как делалось в примере с комнатами. Но в случае с ГП в исходной постановке задачи действие задается вектором из трех вещественных чисел: количество электроэнергии, которой в ГП обменивается с внешней системой (a_1); количество электроэнергии, которой ГП обменивается с соседним ГП (покупка или продажа) (a_2); количество электроэнергии, которую ГП аккумулирует или расходует из аккумулятора (a_3). В общем случае можно рассматривать задачу выбора оптимального действия как задачу оптимизации и решать ее одним из рассмотренных в главе 3 алгоритмов оптимизации. Но для упрощения, во-первых, выбора оптимального действия, во-вторых, архитектуры ИНС, можно использовать следующие допущения:

- так как обмен электроэнергией с соседним ГП как минимум не менее выгоден, чем с внешней ЭЭС, то для задачи управления можно рассматривать, как будто обмен всегда совершается со внешней ЭЭС, а при его реализации на практике, если есть возможность часть обмена совершить с соседним ГП, всегда выполнять такой обмен – в результате можно убрать из постановки задачи оптимального управления действие a_2 , оно включается в состав действия a_1 ;
- можно использовать в качестве вариантов действий предложенные в третьей главе: накопить и продать (a'_1); купить и накопить (a'_2); продать и использовать накопленное (a'_3); купить и использовать накопленное (a'_4).

В результате имеется четыре возможные действия (a'_1 – a'_4), а конкретные значения параметров управления (a_1 , a_2 , a_3) могут быть определены, как описано в третьей главе.

3. Необходимо определить архитектуру ИНС. Данная задача, как правило, решается путем проведения экспериментов, первоначальную архитектуру можно определить, задав восемь входов (s_1 – s_4 , a'_1 – a'_4), два скрытых слоя, число нейронов в которых определить по правилу

геометрической пирамиды [110]: если число входов ИНС c_{in} , а число выходов c_{out} , то число нейронов первого скрытого слоя следует взять равным $c_{in}(c_{out} / c_{in})^{2/3}$, а второго – $c_{in}(c_{out} / c_{in})^{1/3}$. В рассматриваемом случае число нейронов первого скрытого слоя окажется равным четырем, второго – двум. В качестве функций активации предлагается изначально использовать ReLU.

Архитектура полученной ИНС показана на Рисунке 5.4.

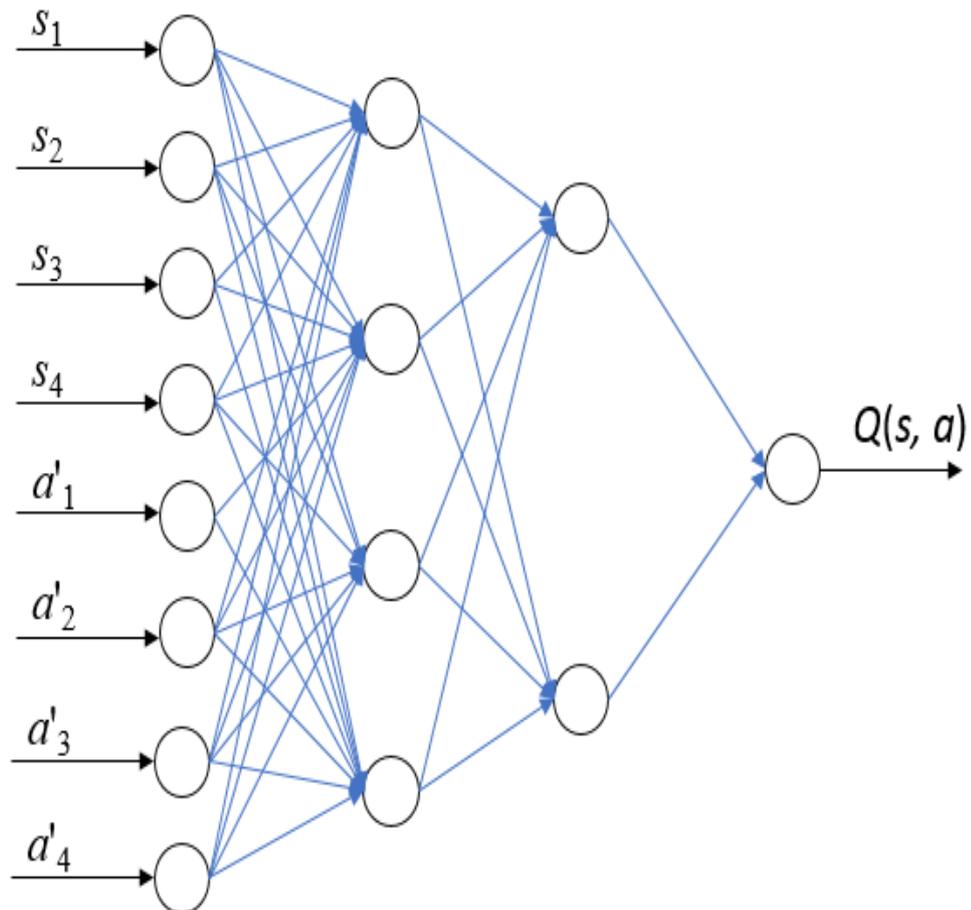


Рисунок 5.4 – ИНС Q-обучения ГП

5.7 Применение принципов Q-обучения для управления генерирующим потребителем

Для генерирующего потребителя параметрами состояния будут являться три величины ($n = 3$):

- собственные потребности ГП в электроэнергии в данный момент (s_1);

- выработка электроэнергии ВЭУ ГП в данный момент (s_2).
- запас энергии в аккумуляторе в данный момент (s_3);

Параметрами управления будут так же 3 величины ($m = 3$, но в общем случае $n \neq m$):

- количество электроэнергии, которой в данный момент ГП обменивается с внешней системой (покупка или продажа) (a_1);
- количество электроэнергии, которой в данный момент ГП обменивается с соседним ГП (покупка или продажа) (a_2);
- количество электроэнергии, которую в данный момент ГП аккумулирует или расходует из аккумулятора (a_3).

В данной задаче шаг времени положен равным одному часу. Так что за сутки имеется 24 значения по каждому из трех параметров состояния ГП и 24 значения по каждому из трех параметров управления. Пример приведен в Таблицах 5.1 и 5.2, для обоих островов Русский и Попова.

При этом управление не влияет на параметры состояния, связанные с собственными потребностями ГП и выработкой ВЭУ, но непосредственно влияют на количество энергии в аккумуляторе.

Таблица 5.1 – Пример значений параметров состояния и управления генерирующего потребителя (ГП₁)

Время суток, часы	s_1	s_2	s_3	a_1	a_2	a_3
0	27,4	16,4	0	0	13	2
1	26	16,4	2	0	11,6	2
2	26,2	16,4	4	0	11,8	2
3	25,6	9,4	6	7,76	8,44	0
4	25,2	9,4	6	7,31	8,49	0
5	25,2	9,4	6	7,31	8,49	0
6	25	12,52	6	0,08	12,4	0
7	26,8	12,52	6	0	8,28	-6
8	28,8	12,52	0	4,37	11,91	0
9	30	12,52	0	5,73	11,75	0
10	28,8	12,52	0	4,37	11,91	0
11	28,8	12,52	0	4,37	11,91	0
12	29,4	16,4	0	0	13	0
13	29,4	16,4	0	0	13	0
14	28,6	16,4	0	0	12,2	0
15	28,4	16,4	0	0	12	0
16	28,4	16,4	0	0	12	0
17	28,4	16,4	0	0	12	0
18	28,2	16,4	0	0	11,8	0
19	30,8	16,4	0	0	14,4	0
20	30,2	16,4	0	0	13,8	0
21	30,4	16,4	0	0	14	0
22	29,8	16,4	0	0	13,4	0
23	29,4	16,4	0	0	15	0

Таблица 5.2 – Пример значений параметров состояния и управления генерирующего потребителя (ГП₂)

Время суток, часы	s_1	s_2	s_3	a_1	a_2	a_3
0	3,56	20,5	0	-1,94	-13	2
1	3,38	20,5	2	-5,52	-11,6	0
2	3,4	20,5	2	-5,3	-11,8	0
3	3,32	11,76	2	0	-8,44	0
4	3,27	11,76	2	0	-8,49	0
5	3,27	11,76	2	0	-8,49	0
6	3,25	15,65	2	0	-12,4	0
7	3,48	15,65	2	-3,89	-8,28	0
8	3,74	15,65	2	0	-11,91	0
9	3,9	15,65	2	0	-11,75	0
10	3,74	15,65	2	0	-11,91	0
11	3,74	15,65	2	0	-11,91	0
12	3,82	20,5	2	-3,68	-13	0
13	3,82	20,5	2	-3,68	-13	0
14	3,71	20,5	2	-4,59	-12,2	0
15	3,69	20,5	2	-4,81	-12	0
16	3,69	20,5	2	-4,81	-12	0
17	3,69	20,5	2	-4,81	-12	0
18	3,66	20,5	2	-5,04	-11,8	0
19	4	20,5	2	-2,1	-14,4	0
20	3,92	20,5	2	-2,78	-13,8	0
21	3,95	20,5	2	-2,55	-14	0
22	3,87	20,5	2	-3,23	-13,4	0
23	3,82	20,5	2	-1,68	-15	0

Оптимизацию электропотребления генерирующих потребителей можно рассмотреть в терминах обучения с подкреплением. Если на данный момент потребитель имеет избыток вырабатываемой электроэнергии, он может продать ее во внешнюю систему или накопить в аккумуляторе. При этом мгновенное поощрение выше у продажи электроэнергии, но в будущем

потребитель может столкнуться с дефицитом электроэнергии и вынужден будет покупать ее у внешней системы. Если же накопить электроэнергию, то при дефиците покупать ее не придется.

В поставленной задаче агентом следует рассматривать не генерирующий потребитель целиком, а только систему управления потоками потребляемой, генерируемой и накапливаемой электроэнергии. При этом внешнюю среду можно разделить на две части: подсистемы ГП и электроэнергетические системы, с которыми генерирующий потребитель может взаимодействовать:

1. Подсистемы ГП:

- собственные источники электроэнергии ГП, такие как ВЭУ;
- собственные потребители ГП;
- подсистема аккумулирования.

2. Электроэнергетические системы вне ГП:

- глобальная ЭЭС страны или региона;
- локальные соседние ЭЭС (другие ГП, с которыми есть прямые каналы обмена электроэнергией).

Указанная структура показана на Рисунке 5.5. Стрелки показывают потоки электроэнергии и их возможные направления.

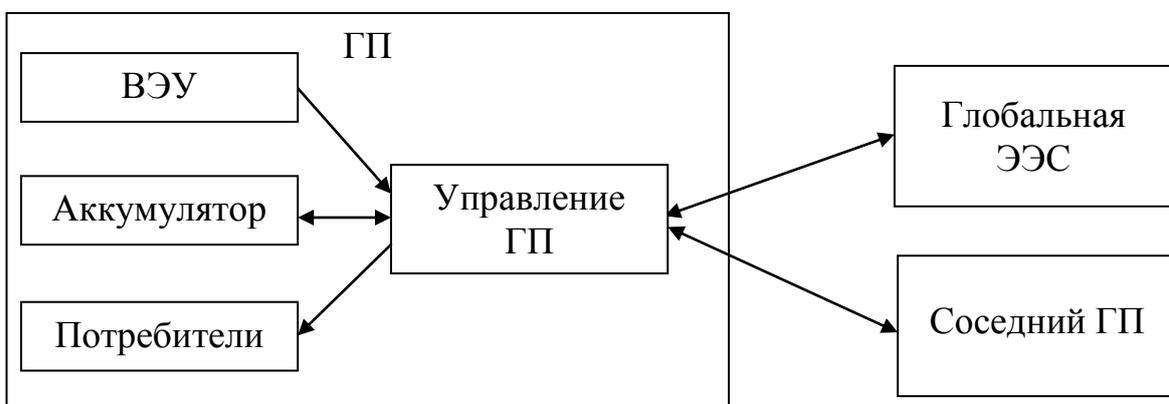


Рисунок 5.5 – Потоки электроэнергии внутри генерирующего потребителя и внешней средой

С точки зрения процесса обучения с подкреплением, взаиморасположение блоков несколько иное (Рисунок 5.6).

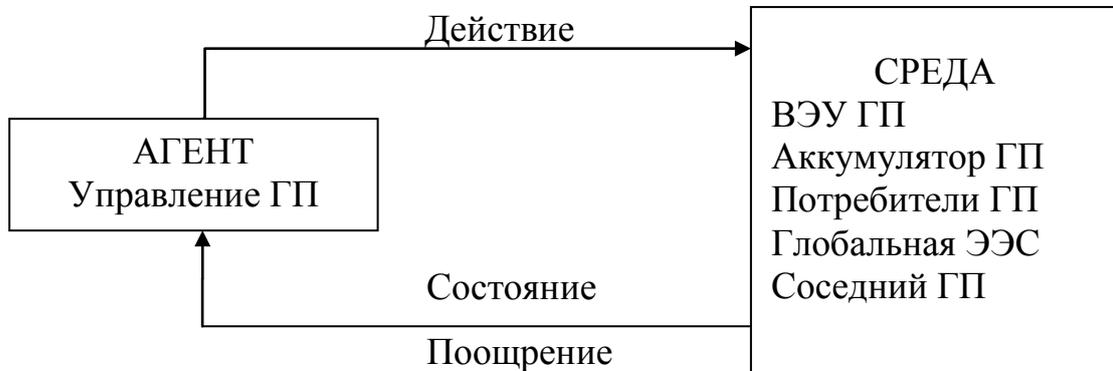


Рисунок 5.6 – Управление генерирующий потребитель как обучение с подкреплением

В данном случае предполагается, что временной шаг управления составляет один час. Агенту доступны следующие действия:

1. С ВЭУ:

- взять заданное количество электроэнергии от ВЭУ (от нуля до полной выработки мощности ВЭУ в данный час).

2. С аккумулятором:

- взять заданное количество электроэнергии от аккумулятора (от нуля до его текущего заряда);
- накопить в аккумулятор заданное количество электроэнергии (от нуля до максимальной возможной с учетом емкости).

3. С соседним ГП и глобальной ЭЭС:

- продать заданное количество электроэнергии;
- купить заданное количество электроэнергии.

С потребителем альтернатив нет, каждый час необходимо обеспечить его потребности в полном объеме.

Обмен с соседним генерирующим потребителем или глобальной ЭЭС с точки зрения альтернатив достаточно прост, что выгоднее, как при покупке,

так и при продаже электроэнергии. Поэтому, если ГП решает продать электроэнергию, то продает соседнему генерирующему потребителю в данный час столько, сколько он готов купить. Или же покупает у соседнего генерирующего потребителя в данный час столько, сколько он готов продать. Оставшийся избыток (дефицит) продается (покупается) у глобальной ЭЭС.

Агент воспринимает текущее состояние среды через наблюдения. В данном случае к наблюдениям относятся:

- текущее количество заряда аккумулятора;
- время суток (номер часа);
- потребности ГП на электроэнергию в данный час;
- выработка ВЭУ в данный час.

В процессе обучения с подкреплением необходимо сформировать оптимальную модель управления генерирующего потребителя, многократно выполняя моделирование ГП во внешней среде и корректируя данную модель управления. Что полностью соответствует приведенной выше задаче оптимального управления (5.1). В главе 3 для этого были применены алгоритмы роевого интеллекта, но для их применения потребовалось вначале вручную написать набор правил управления генерирующего потребителя в виде конструкций *ЕСЛИ Условие, ТО Действие*, а с помощью роевого интеллекта только определить численные пороги, используемые в правилах и приоритеты выборы правил. Для рассматриваемой задачи управления ГП создание правил не вызывает больших затруднений, однако в более сложных системах создание правил может быть слишком трудоемкой и сложной задачей для человека, так как потребуются учесть множество факторов и взаимосвязей. Как раз в таких случаях на помощь приходят методы обучения с подкреплением, которые позволяют человеку задать только набор доступных действий A и набор признаков, которые характеризуют состояние агента и среды S .

Выводы

1. Оптимальное управление электропотреблением для генерирующих потребителей в условиях неопределенности требует использования методов искусственного интеллекта, которые способны за счет самоорганизации и самообучения, во-первых, строить модели взаимодействия объекта управления с внешней средой, во-вторых, учитывать получаемый опыт для формирования прогнозов о будущей эффективности того или иного управляемого воздействия.

2. Теория обучения с подкреплением разработана для решения именно таких задач управления и находится на стыке исследований в областях теории искусственных нейронных сетей, методов оптимизации, теории поддержки и принятия решений на основе широкого использования методов искусственного интеллекта.

3. Рассмотрена возможность применения теории искусственных нейронных сетей, с учетом повышения производительности вычислительной техники и совершенствования методов обучения ИНС для решения задачи обучения с подкреплением, в частности, за счет, их применения в Q-обучении. Оно позволяет по наблюдениям потерь и приобретений на каждом шаге приближенно построить функцию, которая давала бы оценку общей, долгосрочной выгоды того или иного действия в зависимости от параметров текущего состояния объекта управления.

4. Показано, что управление генерирующими потребителями в интеллектуальной электрической сети с двусторонним потоком энергии, сочетании с теорией оптимального управления на основе метода и модификации Q-обучения с использованием искусственных нейронных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что основной тренд развития электроэнергетики в настоящее время лежит на пути интеллектуализации процессов генерации, передачи и распределения электрической энергии. При этом используется термин Smart Grid, который несмотря на некоторые разночтения, трактуется, как интеллектуальные сети. Основные атрибуты концепции Smart Grid в работе определяются следующим образом: доступность, надежность, гибкость, эффективность, обеспечение безопасности, способность к аккумулированию энергии, стимулирование активности электропотребителя, экономичность и снижение экологического давления на окружающую среду. Отмечено, что интеллектуальные сети, как правило, имеют двусторонние потоки энергии и информации. Эти процессы подлежат более глубокому исследованию.

2. Показано, что скоординированное управление некоторой районной интеллектуальной электрической сети позволяет осуществить существенную гибкость в формировании общего графика электропотребления, снижая его неравномерность на суточном интервале времени. Одновременно с этим, наличие собственной генерации и накопителя энергии у каждого генерирующего потребителя позволяет им активно участвовать и отслеживать свои интересы, как в области финансовых затрат, так и в отношении качества электрической энергии.

3. Географические и климатические условия прибрежной зоны Дальнего Востока в полной мере позволяют использовать альтернативные источники энергии, в частности, ветровые ресурсы этого региона таковы, что могут обеспечить вытеснение значительной доли углеводородных источников энергии. Предложена математическая модель оптимального распределения энергетических ресурсов для двух генерирующих потребителей, а именно: островов Русский и Попова, с учетом возможной генерации от двух ветроэлектростанций и накопителей энергии для каждого

из потребителей. Выполненные расчеты, при интеграции альтернативных источников энергии в систему, что целесообразно оптимальное управление электропотребления за каждый час на суточном интервале времени.

4. Разработаны эффективные алгоритмы оптимизация режимов, как отдельных генерирующих потребителей, так и их совокупности вместе с энергосистемой. Программная реализация этих алгоритмов позволила получить свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Рассмотрена минимизация негативного влияния на окружающую среду значительного использования энергии ветровых потоков от двух ветропарков, включая их шумовое воздействие на жителей ближайших населенных пунктов.

5. Выполнен системный обзор наиболее известных роевых алгоритмов, как одних из методов искусственного интеллекта. Эти алгоритмы представлены отдельной группой популяционных алгоритмов, в основе которых лежат некоторые базовые принципы коллективного перемещения группы частиц и одновременном обмене информацией между ними, что позволяет осуществлять отбор оптимальных решений. Отдельно представлены модификации алгоритмов роевого интеллекта, а именно: роя частиц, роя пчел и роя светлячков, с указанием их отличительных особенностей и возможности практической реализации.

6. Впервые, проведено принципиальное сравнение различных модифицированных алгоритмов роевого интеллекта и градиентного спуска, при разных начальных условиях. Доказано, что три алгоритма роевого интеллекта дали одинаковые результаты, что свидетельствует о нахождении ими глобального экстремума, в то время как градиентный спуск застревает в различных локальных экстремумах. Разработан алгоритм и его программная реализация, которые позволяют оптимизировать электропотребление генерирующими потребителями для различных условий использования альтернативных источников энергии с учетом их взаимодействия.

Программная реализация этих алгоритмов позволила получить свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

7. Определено семейство нечетких функций принадлежности лингвистических переменных скорости ветра по шкале Бофорта в виде треугольных L-R – функций и выведены аналитические выражения характерных функции принадлежности для тех лингвистических переменных скоростей ветра, при которых возможна работа ветроустановок. Показано, что прогнозирование скорости ветра и его угла на основе нечеткой регрессии, может быть выполнено с приемлемой точностью на три часа вперед. Это позволяет планировать выработку электроэнергии за счет ветрового потока на суточном интервале и минимизировать расходы генерирующего потребителя. Впервые прогноз скорости ветра дополнен прогнозированием угла его направления, что позволяет на втором этапе выработки мощности ВЭУ осуществлять управление гондолой, в то время как угол атаки лопастей может являться вторичным элементом управления ветроустановкой.

8. Предложена новая математическая модель для оценки максимальной выработки мощности ветроустановки с учетом вероятностных отклонений скорости ветрового потока от его математического ожидания. Показано, что непериодические колебания скорости ветра, позволяют на 6–7% увеличить мощность ветроустановки на величину $(\bar{V} \cdot \sigma_V^2)$. Предложенная модель подана в качестве заявки на полезную модель. Реализация новой математической модели с учетом вероятностного характера ветрового потока позволяет спроектировать дополнительные закрылки на лопастях ВЭУ (флепсы), с помощью которых возможен съём дополнительной мощности ветрового потока.

9. Оптимальное управление электропотреблением для генерирующих потребителей в условиях неопределенности требует использования методов искусственного интеллекта, которые способны за счет самоорганизации и самообучения, во-первых, строить модели взаимодействия объекта

управления с внешней средой, во-вторых, учитывать получаемый опыт для формирования прогнозов о будущей эффективности того или иного управляемого воздействия. Теория обучения с подкреплением разработана для решения именно таких задач управления и находится на стыке исследований в областях теории искусственных нейронных сетей, методов оптимизации, теории поддержки и принятия решений на основе широкого использования методов искусственного интеллекта.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЭЭС – электроэнергетическая система.

ВИЭ – возобновляемый источник энергии.

ВЭУ – ветроэнергетическая установка.

ВЭС – ветроэлектростанция.

ГП – генерирующий потребитель.

МЭА – международное энергетическое агентство.

ЭМ – электромобиль.

КХ – контрольный холон.

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль.

АТЭС – Азиатско-Тихоокеанское экономическое сотрудничество.

КПД – коэффициент полезного действия.

ГНЭ – гибридный накопитель энергии.

НЭ – накопитель энергии.

СНАУ – система нелинейных алгебраических уравнений.

СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений.

РИ – роевой интеллект.

ИНС – искусственная нейронная сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tuballa, M.L. A review of the development of Smart Grid technologies / M.L. Tuballa, M.L. Abundo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 3. – P. 710–725.
2. Гуревич, В. И. Интеллектуальные сети: новые перспективы или новые проблемы? Ч. 1. / В. И. Гуревич // *Электротехнический рынок*. – 2010. – №. 6. – С. 62–66.
3. Волобуев, В.В. Что такое Smart Grid? Каковы перспективы развития технологий Смарт Грид в России / В. В. Волобуев// [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.rsci.ru/sti/3755/208683.php>. – Загл. с экрана.
4. Amin, S.M. Toward a Smart Grid. / S.M. Amin, B.F. Wollenberg // *IEEE P&E Magazine*. – 2005. – Vol. 3. – no. 5. – P. 34–41.
5. Brown, R.E. Impact of Smart Grid on Distribution System Design / R.E. Brown // *In Proc. IEEE PES General Meeting*. – 2008. – P. 1–4.
6. Хасанзода, Н. К вопросу внедрения инновационных технологий Smart Grid в энергетические комплексы / Н. Хасанзода // *Инновационное развитие технических наук в XXI веке. Международное научное объединение "Prospero"*, Москва. – 2016. – С. 100–103.
7. Negeri, E. Smart integration of electric vehicles in an energy community / E. Negeri, N. Baken // *In Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*. – 2012. – P. 25–32.
8. Гуревич, В.И. Интеллектуальные сети: новые перспективы или новые проблемы? Ч. 2. / В. И. Гуревич // *Электротехнический рынок*. – 2011. – №1-2. – С. 90-97.
9. Хасанзода, Н. Основные положения концепции «интеллектуальные сети» (Smart Grid) / Н. Хасанзода, А.В. Герасименко// *Электроэнергетика, гидроэнергетика, надёжность и безопасность: материалы республ. науч.-практ. конф. Таджик. техн. ун-т им. акад. М.С. Осими. Душанбе, 24 декабря – 2016 г.* – Душанбе. – 2016. – С.69–71.

10. Ледин, С.С. Развитие промышленных стандартов внутри и межсистемного обмена данными интеллектуальных энергетических систем / С.С. Ледин, А.В. Игнатичев // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – №10. – С. 39–43.

11. Савина Н.В. Инновационное развитие электроэнергетики на основе технологий Smart Grid / Н.В. Савина. – Благовещенск: Издательство АмГУ, 2014. – 136 с.

12. Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

13. Gellings, C. Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid / C. Gellings, G. Horst, M. McGranaghan, P. Myrda, B. Seal, O. Siddiqui, & B. Neenan. – EPRI Technical report, 2011. – 162 p.

14. Хасанзода, Н. К вопросу внедрения инновационных технологий Smart Grid 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, Владивосток, ДВФУ. – 2016. – С. 382–386.

15. Основные положения Концепции развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью, «Научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы по разработке концепции ААС». Научно-технический отчёт, Том 1. – 2010.

16. Отчёт о разработке стратегической программы исследований технологической платформы «Интеллектуальная энергетическая система России». Российское Энергетическое Агенство, Москва. – 2012.

17. Tsoukalas, L. From smart grids to an energy internet: Assumptions, architectures and requirements / L. Tsoukalas, R. Gao // 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. – 2008. – P. 94–98.

18. Huang, A. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet / A. Huang, M. Crow, G. Heydt, J. Zheng, S. Dale // *Proceedings of the IEEE*. – 2011. – Vol. 91. – P. 133–148.
19. Koestler, A. *The Ghost in the Machine* (1990 reprint edition) / A. Koestler. – Penguin Group, 400 p. ISBN 0-14-019192-5.
20. Хасанзода, Н. Холонический подход для интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid при двустороннем потоке энергии / В.З. Манусов, Н. Хасанзода // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2017. – №3-4. – С. 206–211.
21. Giret, A. Holons and agents / A. Giret and V. Botti // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2004. – Vol. 15. – no. 5. – P. 645–659.
22. Хасанзода, Н. Построение холонической инфраструктуры интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid с учетом двустороннего потока энергии / В.З. Манусов, Н. Хасанзода // *Problems of the Regional Energetics: E-Journal*. – 2017. – № 3 (35). – С. 76–85.
23. Ipakchi, A. Grid of the future / A. Ipakchi, F. Albuyeh // *IEEE Power and Energy Magazine*. – 2009. – P. 52–62.
24. Mulder, G. Electricity storage for grid-connected household dwellings with PV panels / G. Mulder, F. D. Ridder, D. Six // *Solar Energy*. – 2010. – Vol. 84. – P. 1284–1293.
25. Kottick, D. Battery energy storage for frequency regulation in an island power system / D. Kottick, M. Blau, and D. EEdelstein // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 1993. – Vol. 8. – no. 3. – P. 455–459.
26. Ribeiro, P. F. Energy storage systems for advanced power applications / P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu // *Proceedings of the IEEE*. – 2001. – Vol. 89. – P. 1744–1756.
27. Ahlert, K. Sensitivity analysis of the economic benefits from electricity storage at the end consumer level / K. Ahlert, C. V. Dinther // *IEEE Transactions on Power Tech*. – 2009. – P. 1–8.

28. Cau, T. D. H. Multiple distributed energy storage scheduling using constructive evolutionary programming / T. D. H. Cau, R. J. Kaye // Proceedings of IEEE Power Engineering Society International Conference. – 2002. – Vol. 22. – P. 402–407.

29. Chacra, F. A. Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation / F. A. Chacra, P. Bastard, G. Fleury, R. Clavreul // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – Vol. 20. – no. 2. – P. 684–691.

30. Sobieski, D. W. An economic assessment of battery storage in electric utility systems / D. W. Sobieski and M. P. Bhavaraju // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1985. – Vol. 104. – no. 12. – P. 3453–3459.

31. Tsikalakis, A. G. Centralized control for optimizing microgrids operation / A. G. Tsikalakis, N. D. Hatziargyriou // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2011. – P. 1–11.

32. Mohsenian-Rad, A. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid / A. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, A. Leon-Garcia // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2010. – Vol. 1. – no. 3. – P. 320–331.

33. Denholm, P. An evaluation of utility system impacts and benefits of optimally dispatched plug-in hybrid electric vehicles / P. Denholm, W. Short. – National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Technical Report, 2006. – 25 p.

34. Scott, M. J. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids. Part II and Economic assessment / M. J. Scott, M. Kintner-Meyer, D. Elliott, W. Warwick // Pacific North West National Laboratory, Richland, WA, PNNL-SA-61687. – 2007. – P. 1–18.

35. Hadley, S. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation / S. Hadley, A. Tsvetkova. – Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, Report ORNL/TM-2007/150, 2008. – 71 p.

36. Roe, C. Power system level impacts of PHEVs / C. Roe, F. Evangelos, J. Meisel, S. Meliopoulos, T. Overbye // in Proceedings of 42nd Hawaii International Conference on System Sciences. – 2009. – P. 1–10.

37. Lopes, J. A. P. Using vehicle-to-grid to maximize the integration of intermittent renewable energy resources in islanded electric grids / J. A. P. Lopes, P. M. R. Almeida, and F. J. Soares // International Conference on Clean Electrical Power. – 2009. – P. 290–295.

38. Голицын, М.В. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицын, А.М. Голицын, Н.В. Пронина. – Москва: Наука, 2004. – 159 с.

39. Кармишин, А.В. Ветер и его использование / А.В. Кармишин. – М. Л.: Госиздат Техничко-теоретической литературы, 1951. – 65 с.

40. Лабейш, В.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / В.Г. Лабейш. – Санкт Петербург: СЗТУ, 2003. – 79 с.

41. Сироткин, Е.А. Состояние развития мировой ветроиндустрии / Сироткин Е.А., Е.В. Соломин, и др. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», (ISJAEE). – 2014 – № 05 (145). – С. 20–25.

42. Хасанзода, Н. 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, Владивосток, ДВФУ. – 2016. – С. 391–393.

43. Global wind report council. GWEC. 2015 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf. – Загл. с экрана.

44. Technology Roadmap, Wind energy. IEA. 2013 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf – Загл. с экрана.

45. Next Generation Wind and Solar Power. IEA. 2016 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Next_Generation_Windand_Solar_PowerFrom_Cost_to_ValueFull_Report.pdf – Загл. с экрана.

46. Минэнерго США wind energy [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges> – Загл. с экрана.

47. Renewable capacity statistics. IRENA. 2017 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2017.pdf – Загл. с экрана.

48. Renewables 2016 Global Status Report. REN21. 2016 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf – Загл. с экрана.

49. Начала работу первая в США морская ветряная электростанция. 2016 [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: http://www.ruscable.ru/news/2016/12/15/Nachala_rabotu_pervaya_v_SSHA_morskaya_vetryanaya/ – Загл. с экрана.

50. Хасанзода, Н. Оценка эффективности функционирования распределительных сетей при оптимизации режимов электроэнергетических систем / Н. Хасанзода // Наука в современном мире. V Международная научно – практическая конференция, науч. журнал «Архивариус», Киев. – 2016. – Ч. II. – С.9–13.

51. Хасанзода, Н. Особенности решения режимных задач в распределительных сетях / Н. Хасанзода // Современные технологии и развитие политехнического образования [Электронный ресурс]: Международная научная конференция, Владивосток, ДВФУ. – 2016. – С.398–402.

52. Лукутин, Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии / Б.В. Лукутин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
53. Харитонов В.П. Основы ветроэнергетики / В.П. Харитонов. – Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 340 с.
54. Дьяков, А.Ф. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития / А.Ф. Дьяков, Э.М. Перминов, Ю.Г. Шакарян. – Москва: Издательство МЭИ, 1996. – 220 с.
55. Лукутин, Б.В. Перспективы возобновляемой энергетики Кемеровской области / Б.В. Лукутин. – Кемерово: ГУ «Кузбасский центр энергосбережения», 2008. – 237 с.
56. Лукутин, Б.В. Режимы работы асинхронного генератора ветроэнергоустановки / Б.В. Лукутин, А.И. Муравлев // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – №7-8/1. – С. 166–172.
57. Кирпичникова, И.М. Ветроэнергетические установки. Расчет параметров компонентов / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин. – Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 71с.
58. Орловский, С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. – Москва: Наука, 1981. – 206 с.
59. Богатырев, Л.Л. Решение электроэнергетических задач в условиях неопределенности / Л.Л. Богатырев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995. – 115 с.
60. Круглов, В.В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – Москва: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 224 с.
61. Kasztenny, B. Fuzzy logic controller for on-load transformer tap changer / B. Kasztenny, E. Rosolowski, J. Izykowski, M.M. Saha, B. Hillstrom // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13. – P. 164–170.
62. Yuan-Yih, H. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power voltage control in a distribution

substation / H. Yuan-Yih, L. Feng-Chang // IEEE Transactions on Power Systems. – 1998. – Vol. 13. – P. 1265–1271.

63. Фортов, В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Попель. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2015 –447 с.

64. Роза, А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы / А. Роза. – Москва: ИД «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.

65. Русский остров. Географические названия России. Институт географии РАН [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://www.igras.ru/> – Загл. с экрана.

66. Ивашинников, Ю.К. Физическая география Дальнего Востока / Ю.К. Ивашинников. – Владивосток: Дальневосточный университет, 1999. – 324 с.

67. СНиП II-7-81 [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://www.vashdom.ru/snip/II-7-81/> – Загл. с экрана.

68. Особенности климата Приморья [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: www.primogoda.ru/articles/sezonnye_osobennosti/osobennosti_klimata_primorya – Загл. с экрана.

69. Ильин, А.К. Нетрадиционная энергетика в Приморском крае: ресурсы и технические возможности / А.К. Ильин, О.П. Ковалев. – Владивосток: Дальневосточная российская академия наук, 1994. – 220 с.

70. Министерство энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/vie/> – Загл. с экрана.

71. Расписание погоды. Архив погоды во Владивостоке [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=31960&lang=ru – Загл. с экрана.

72. Хасанзода, Н. Создание интегрированной системы электроснабжения острова Русский и управление её режимами / В.З. Манусов, Н. Хасанзода, Дж.С. Ахъёев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – №1-2. – С. 142–145.

73. Твайделл, Д. Возобновляемые источники энергии / Д. Твайделл, А. Уэйр. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 393 с.
74. Удалов, С.Н. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики / С.Н. Удалов, В.З. Манусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.
75. Khasanzoda, N. Using Wind Resources of Far East in Smart Grid Technology with the Optimum Two-Way Energy Flow / V.Z. Manusov, N. Khasanzoda, B.V. Palagushkin // The 13th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2018). – 2018. – P. 713–718.
76. Колесников, А. А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии / А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. А. Кузьменко. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. – 354 с.
77. Родионов, В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – Москва: ЭНАС, 2010. – 352 с.
78. Баранов, Н.Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии / Н. Н. Баранов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. – 385 с.
79. Tremblay, O. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application /O. Tremblay, L. Dessaint // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – Vol. 3. – P. 1–10.
80. Хасанзода, Н. Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним потоком энергии / В.З. Манусов, Н. Хасанзода, Ш.А. Бобоев // Научный вестник НГТУ. – 2018. – №3. – С. 175–190.
81. Reynolds, C.F. A Distributed Behavioral Model / C.F Reynolds, Herds, and Schools // Computer Graphics. –1987. Vol. 21. – no. 4. – P. 25–34.
82. Eberhart, R.C. New Optimizer Using Particle Swarm Theory / R.C. Eberhart, J. Kennedy // VI International Symposium on Micro Machine and Human Science, Japan. – 1995. – P. 39–43.

83. Kennedy, J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R.C. Eberhart // International Conference on Neural Networks (ICNN'95). Perth, WA, Australia. – 1995. – P. 1942–1948.

84. Shi, Y. A modified particle swarm optimizer / Y. Shi, R. Eberhart // IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, AK, USA. – 1998. – P. 69–73.

85. Матренин, П.В. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта / П. В. Матренин, В. Г. Секаев // Программная инженерия.– 2013. – № 12. – С. 39-45.

86. Karaboga, D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report-tr06 [Электронный ресурс] / D. Karaboga. – Turkey, Kayseri: Erciyes University, 2005. – 10 p. – Режим доступа: http://www.dmi.unict.it/mpavone/nc-cs/materiale/tr06_2005.pdf. – Загл. с экрана.

87. Pham, D.T. The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems / D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Коç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi. – 2005. – 40 p. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/260985621_The_Bees_Algorithm_Technical_Note – Загл. с экрана.

88. Yang, X. Firefly algorithm, Stochastic Test Function and Design Optimization / X. Yang // International Journal of Bio-Inspired Computation. – 2010. – Vol. 2. – no. 2. – P. 78–84.

89. Manusov, V.Z. Optimization of Fuzzy Controller of a Wind Power Plant Based on the Swarm Intelligence / V.Z. Manusov, P.V. Matrenin // XIII International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia. – 2016. –Vol. 1. – part 4. – P. 293–298.

90. Marquardt, D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D.W. Marquardt // Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics. – 1963. – Vol. 11. – no. 2. – P. 431–441.

91. Хасанзода, Н. Оптимизация энергоэффективности ветровых ресурсов дальнего востока на основе алгоритма роевого интеллекта / В.З. Манусов, Н. Хасанзода // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», (ISJAEE). – 2018. – № 19-21. – С. 12–22.

92. Матренин, П.В. Описание и реализация алгоритмов роевого интеллекта с использованием системного подхода / П.В. Матренин // Программная инженерия. – 2015. – № 3. – С. 27–34.

93. Хасанзода, Н. Повышение энергоэффективности ветроэнергетических установок на основе роевого интеллекта / В. З. Манусов, Н. Хасанзода, П. В. Матренин // Новое в российской электроэнергетике: науч.-техн. электрон. журн. – 2018. – № 10. – С. 36–43.

94. Удалов, С.Н. Возобновляемые источники энергии / С.Н. Удалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 458 с.

95. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде; пер. с англ. Н.И. Ринго; под ред.: Н.Н. Моисеева, С.А. Орловского. – Москва: Мир, 1976. – 165 с.

96. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – Москва: Радио и связь, 1982. – 432 с.

97. Takagi T. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – no. 1. – pp. 116–132.

98. Хасанзода, Н. Оценка мощности ветроэлектростанции на основе нечеткой регрессионной модели прогнозирования скорости и направления ветра [Электронный ресурс] / В. З. Манусов, Н. Хасанзода, Г. В. Иванов // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: материалы междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 6-8 дек. 2018 г., ВГТУ. – 2018. – С. 145–146.

99. Попов, А.А. Глобальное и локальное оценивание параметров регрессионных моделей при использовании концепции нечетких систем / А.А. Попов, А.А. Холдонов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – 4 (82). – С. 56-66

100. Манусов, В.З. Повышение степени интеграции ветроэнергетических станций в энергосистему путем использования у системного оператора математических моделей прогнозирования ветра и электропотребления / В.З. Манусов, А.А. Холдонов, К.Н. Бойко, Ш.К. Халдаров // Problems of the Regional Energetics: E-Journal. – 2017. – № 3 (35). – С. 45–57.

101. Wei, C. An Adaptive Network-Based Reinforcement Learning Method for MPPT Control of PMSG Wind Energy Conversion Systems / C. Wei, Z. Zhang, W. Qiao, L. Qu // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. – Vol. 31. – no. 11. – P. 7837–7848.

102. Matiisen, T. Demystifying Deep Reinforcement Learning // Computational Neuroscience Lab. 2015. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://neuro.cs.ut.ee/demystifying-deep-reinforcement-learning> – Загл. с экрана.

103. Luo, B. Model-Free Optimal Tracking Control via Critic-Only Q-Learning / B. Luo, D. Liu, T. Huang, D. Wang // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2016. – Vol. 27. – no. 10. – P. 2134–2144.

104. Растригин, Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растригин. – Москва: Сов. радио, 1980. – 232 с.

105. Ногин, В.Д. Введение в оптимальное управление / В.Д. Ногин – СПб: Изд-во «ИУТАС», 2008 г. – 92 с.

106. Хальясмаа, А.И. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций / А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин, Д.А. Глушков — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 64 с.

107. Гельфанд, И.М. О некоторых классах игр и игр автоматов / И.М. Гельфанд [и др.] // Докл. АН СССР. – 1963. – Том 152. – № 4. – С. 845–848.

108. Манусов, В.З. Нейронные сети: прогнозирование электрической нагрузки и потерь мощности в электрических сетях. От романтики к прагматике / В.З. Манусов, С.В. Родыгина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 303 с.

109. LeCun, Y. Back propagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, et. al. // Neural Computation. – 1989. – Vol. 1(4). – P. 541–551.

110. Palit A.K., Popovic D. Computational Intelligence in Time Series Forecasting: Theory and Engineering Applications. – London: Springer, 2005. 382 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018611533

Программа «ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
В СИСТЕМЕ SMART GRID ПРИ ДВУСТОРОННЕМ
ПОТОКЕ ЭНЕРГИЙ»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
(RU)*

Авторы: *Бобоев Шараф Асрорович (TJ), Хасанзода Насрулло (TJ),
Манусов Вадим Зиновьевич (RU)*

Заявка № 2017663021

Дата поступления 13 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616447

**Программа «ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ДВУСТОРОННИХ ПОТОКАХ
ЭНЕРГИИ, ПУТЕМ ВЫБОРА ПРИОРИТЕТНОСТИ ПРАВИЛ
НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
(RU)**

Авторы: **Матренин Павел Викторович (RU), Манусов Вадим
Зиновьевич (RU), Хасанзода Насрулло (TJ)**

Заявка № 2018611835

Дата поступления 26 февраля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 июня 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018663398

**Программа «ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УЗЛОВ НА ОСНОВЕ ВЗАИМНОЙ КОНВЕРТАЦИИ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
(RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № **2018660533**

Дата поступления **01 октября 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **26 октября 2018 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивашев



Авторы: **Бобоев Шараф Асрорович (ТJ), Манусов Вадим Зиновьевич (RU), Хасанзода Насрулло (ТJ), Киргизов Алифбек Киргизович (ТJ), Султонов Шерхон Муртазокулович (ТJ)**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

д.т.н., доцент

С.В. Брованов

«23» октября 2018 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Н. Хасанзода в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационной работы Н. Хасанзода на тему «Оптимизация режимов электропотребления в интеллектуальных сетях с двусторонним потоком энергии методами искусственного интеллекта» в учебный процесс кафедры «Систем электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета.

Разработанные в диссертационной работе модели и методы оптимальных режимов электропотребления электрических сетей с двусторонним потоком энергии с участием генерирующих потребителей излагаются в дисциплинах «Интеллектуальные электрические сети», «Интеллектуальные системы электроснабжения», «Малая распределенная энергетика» и «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии». Материалы диссертационной работы успешно используются при написании выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций, а также в исследованиях аспирантов.

Заведующий кафедрой ЭЭС
к.т.н., доцент

Д.А. Павлюченко

ШИРКАТИ САҲОМИИ
ХОЛДИНГИИ КУШОДАИ
«**БАРҚИ ТОҶИК**»



OPEN STOCK
HOLDING COMPANY
«**BARQI TOJIK**»

734026, ш. Душанбе, хиёбони Исмоили Сомонӣ, 64 734026, Dushanbe, Ismoil Somoni avenue, 64
☎ +992 372 235-86-68, факс/fax(10992372) 235-86-92, Сомона/saut www.barkitajik.tj, E-Mail:barki.tajik@gmail.com

№ _____
Ба _____ аз _____

Акт

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Н. Хасанзода

Полученные результаты в диссертационной работе Н. Хасанзода на тему «Оптимизация режимов электропотребления в интеллектуальных сетях с двусторонним потоком энергии методами искусственного интеллекта», рассмотрены и обсуждены на техническом совете ОАХК «Барки Тоҷик».

Энергетическая компания рассматривает возможность использования альтернативных и возобновляемых источников в качестве распределенной генерации и основы для двусторонних потоков энергии с целью повышения качества электроснабжения электропотребителей.

Предложенный в работе метод оптимального электропотребления генерирующим потребителям представляет значительный интерес и может быть реализован в ближайшей перспективе с учетом развития и использования альтернативных источников энергии.



Менеджер по планированию
и технологии Департамента

Р. Шарипов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика М.С. Осими

34042, Душанбе, просп. академиков Рахмоновых, 10, Тел.: (+992 37) 221-35-11,
Факс: (+992 37) 221-71-35. E-mail: rector.ttu@mail.ru, Web: www.ttu.tj

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ТТУ им. акад. М.С. Осими

д.т.н., профессор

Олиазода Хайдар Одина

« 21 » 04 2019г.



А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы Н. Хасанзода: «Оптимизация режимов электропотребления в интеллектуальных сетях с двусторонним потоком энергии методами искусственного интеллекта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Комиссия в составе: председателя д.т.н., и.о. профессора Саидзода Р.Х. и членов комиссии к.т.н., доцента Фохакова А.С., декана энергетического факультета к.т.н., доцента Касобова Л.С., и зав. каф. «Электрические станции», к.т.н., Султонова Ш.М. свидетельствует о том, что следующие результаты диссертационной работы аспиранта Новосибирского государственного технического университета Н. Хасанзода, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в учебном процессе на энергетическом факультете Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Модели и методы анализа и планирования режимов интеллектуальных сетей, при двустороннем потоке энергии за счет альтернативных источников энергии излагаются для магистров энергетического факультета в

дисциплинах: «Оптимизация энергосистем», «Моделирование систем и процессов в энергетике». Это позволяет существенно расширить кругозор и эрудицию будущих специалистов электроэнергетиков.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ.

Проректор по учебной работе, первый проректор,
д.т.н., и.о. профессора

/ **Р.Х. Саидзода**

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник Учебно-методического управления,
к.т.н., доцент

/ **А.С. Фохаков**

Декан энергетического факультета, к.т.н., доцент /

/ **Л.С. Касобов**

Зав. кафедрой «Электрические станции» к.т.н.

/ **Ш.М. Султонов**

Подписи Саидзода Р.Х., Фохакова А.С., Касобова Л.С. и Султонова Ш.М.

ЗАВЕРЯЮ

Начальник отдела кадров
и специальных работ



/ **С.Т. Бадурдинов**

Документ соответствует установленным требованиям.

Технический секретарь

/ **М.М. Якубова**