

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

**Официальные
оппоненты:** **Сальников Василий Герасимович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет водного транспорта», кафедра
«Электроэнергетических систем и
электротехники», профессор

Бубенчиков Антон Анатольевич
кандидат технических наук, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Омский
государственный технический университет»,
кафедра «Электроснабжение промышленных
предприятий», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится «25» апреля 2019 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации https://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=17421

Автореферат разослан «19» февраля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Осинцев Анатолий Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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.

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

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 оптимизации электропотребления генерирующих потребителей как задачи обучения с подкреплением.

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.

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:

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 государственного университета имени акад. М. С. Осими.

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.

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».

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 оптимизации электропотребления на основе обучения с подкреплением.

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

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, 1 работа, индексированная в наукометрической базе Web of Science, 8 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 диссертации. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическое значение работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено состояние проблемы использования альтернативных источников энергии в разработке общей концепции и технологии создания интеллектуальных сетей (Smart Grid), а также связанной с этими процессами инфраструктуры. В настоящее время во всех странах возрастает потребление электроэнергии, причем электропотребителей ожидает 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 этим принципам, 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 относятся «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 этой концепции свои функции и задачи понимает их по-своему.

Вторая глава посвящена оптимальному использованию альтернативных источников энергии в прибрежной зоне Дальнего Востока. Ключевым моментом при этом является использование собственных ветроэнергетических ресурсов, которые достаточно велики в прибрежной зоне Дальнего Востока. Цель исследования состоит в разработке новой математической модели оптимального энергобаланса и электропотребления при участии генерирующих потребителей и альтернативных источников энергии в виде ветроресурсов как интеллектуальной системы с двусторонним потоком энергии с учетом разных ценовых показателей. Предложена система выбора приоритетности источников генерации, обеспечивающая минимизацию материально-финансовых затрат электропотребителя.

Ветровые ресурсы могут существенно отличаться для отдельных участков прибрежной зоны. 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 (Рисунок 1).

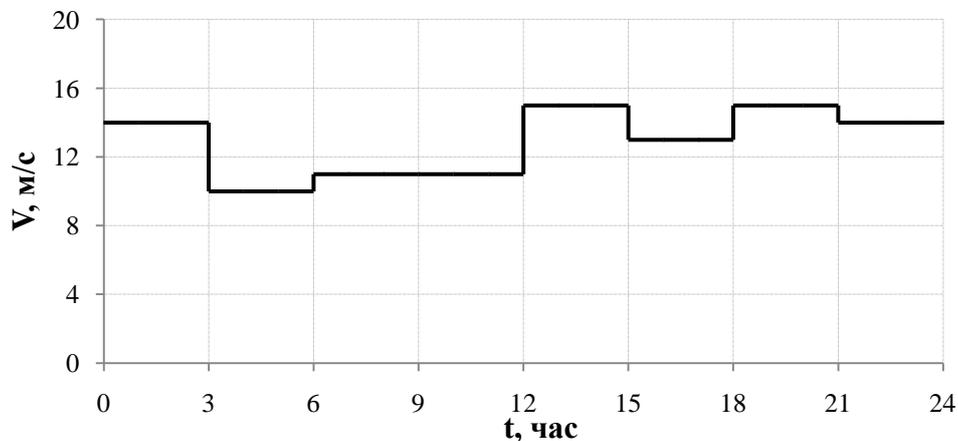


Рисунок 1 – Скорость ветра в прибрежной зоне

Метеорологические данные о скорости ветра на Тихоокеанском побережье России, доказывают целесообразность строительства двух ветроэлектростанций (ветропарков). 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 электропотребителей региона.

Мощность на выходе ветроэнергетической установки (ВЭУ) существенно зависит от скорости ветрового потока. Зависимость между скоростью ветра, проходящего через ометаемую площадь установки A (м^2) и вырабатываемой ВЭУ мощностью выражается следующим образом

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

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 равна

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

где R – радиус ветроколеса, м.

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

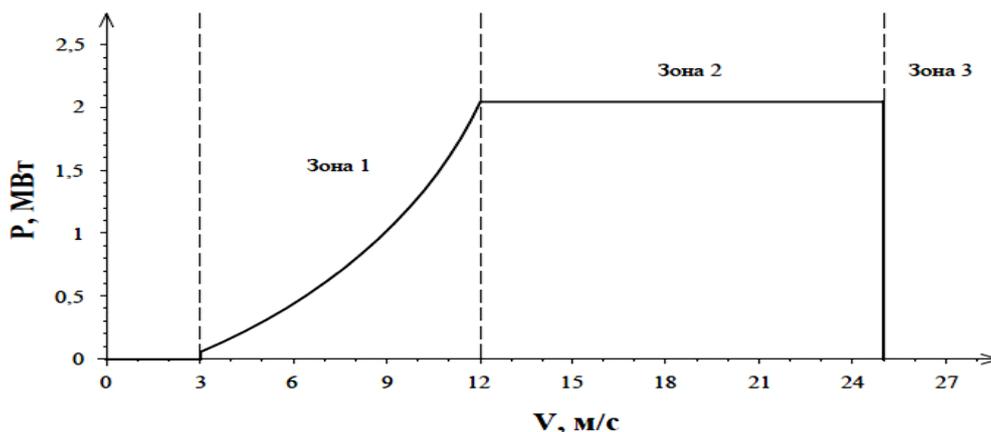


Рисунок 2 – Характеристика мощности ВЭУ WTU 2,05 МВт

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 3.

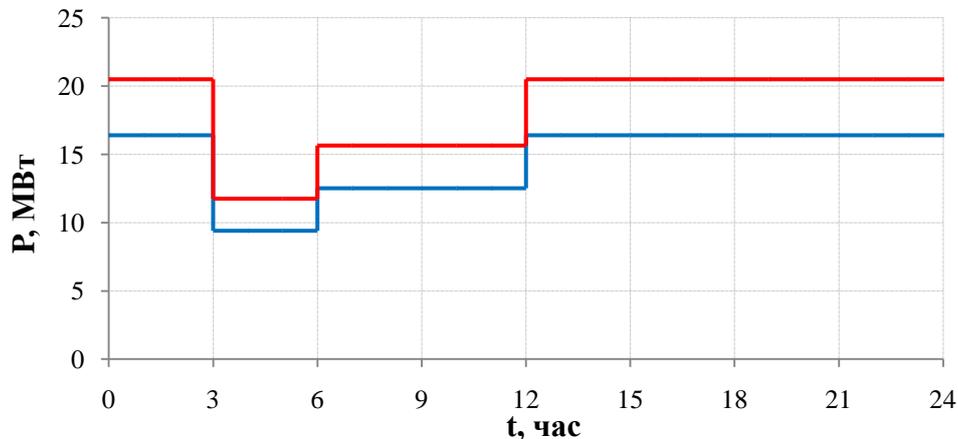


Рисунок 3 – Суточные графики выдачи мощности ВЭС (синяя линия о. Русский и красная линия о. Попова)

Математическая модель и оптимизация энергетического баланса генерирующего потребителя. Для любой электроэнергетической системы неизбежно существует жесткий баланс активной мощности между источниками генерации и потребителями электрической энергии. К этой мощности необходимо прибавить также суммарные потери активной мощности в электрической сети, связанные с технологическим расходом энергии на её передачу. На суточном интервале времени баланс по энергии в интегральной форме можно записать

$$\int_0^{24} P_{ЭС}(t) dt + \int_0^{24} P_{ВЭУ}(t) dt \pm \int_0^{24} P_{Акк.}(t) dt = \int_0^{24} P_{П}(t) dt + \int_0^{24} \sum \Delta P(t) dt, \quad (3)$$

где $P_{ЭС}$ – мощность, которую можно получить от внешнего источника; $P_{ВЭУ}$ – предельная мощность от ВЭУ; $P_{Акк.}$ – мощность аккумулирующего накопителя; $P_{П}$ – мощность электропотребителя; $\sum \Delta P$ – суммарные потери активной мощности в сети.

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 двухзонного 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.

Математическая модель выбора возможных источников энергии для оптимизации расходов за электроэнергию генерирующего потребителя 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

$$\begin{cases} c_{11} \cdot P_{ЭС} + c_{12} \cdot P_{ВЭУ} + c_{13} \cdot P_{Акк.} = m_1 \\ c_{21} \cdot P_{ЭС} + c_{22} \cdot P_{ВЭУ} + c_{23} \cdot P_{Акк.} = m_2, \\ c_{31} \cdot P_{ЭС} + c_{32} \cdot P_{ВЭУ} + c_{33} \cdot P_{Акк.} = m_3 \end{cases} \quad (4)$$

где m_i – стоимость потребленной электроэнергии; $i=1,2,3$ – три возможных источника энергии для генерирующего потребителя.

Решение системы линейных алгебраических уравнений на каждом шаге итерации определяется методом исключения Гаусса. Прямой ход состоит в обнулении поддиагональных элементов, а обратный ход состоит в решении уравнений с верхней треугольной матрицей. Первым находится последнее по номеру неизвестное.

Матрица цен представляет собой матрицу вида

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

При этом диагональные элементы отражают цены на электроэнергию для каждого отдельного генерирующего источника, а недиагональные 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

$$\begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

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.

Второй вариант предусматривает возможность взаимного импорта или экспорта между генерирующими потребителями или обоих потребителей с энергосистемой, при этом вид матрицы цен совпадает с (6).

Минимизация расходов генерирующего потребителя достигается путём решения следующей системы уравнений

$$M = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{ij} \cdot P_j \cdot t \rightarrow \min, \quad (7)$$

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:

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

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 4 видно, что при двухзонном тарифе стоимости электроэнергии от энергосистемы ($c_{11} = 3,2$ руб.), когда дневной тариф действует с 7 часов утра до 23 часов вечера, а ночной сниженный тариф ($c_{11} = 1,4$ руб.), 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 аккумуляровать 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.

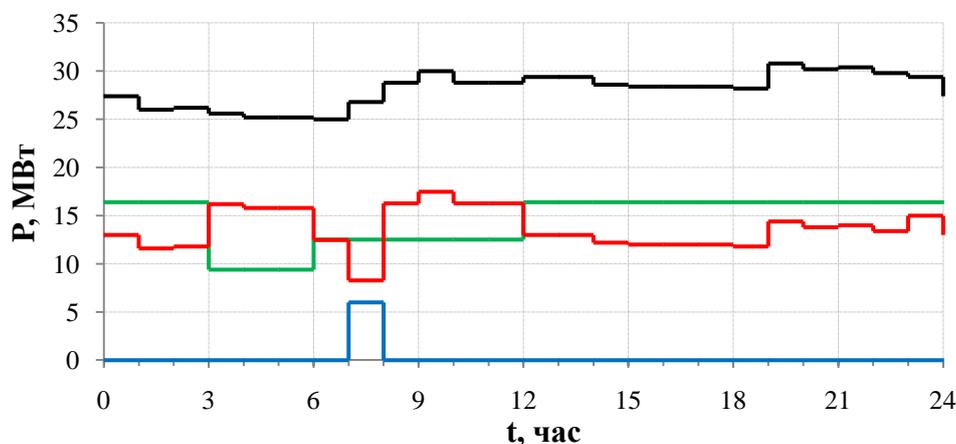


Рисунок 4 – График электропотребления ГП₁ ($P_{нагр}$ – черная линия, $P_{ЭС}$ – красная линия, $P_{ВЭУ}$ – зеленая линия и $P_{Акк}$ – синяя линия)

После 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 5.

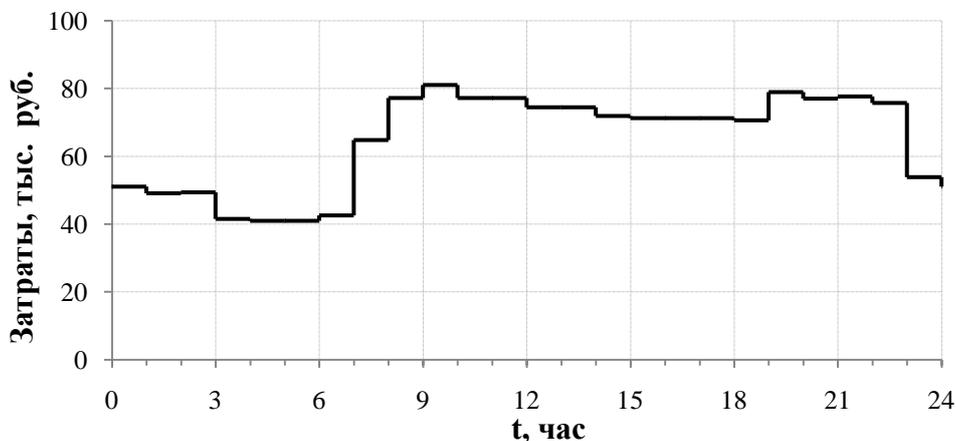


Рисунок 5 – Минимальные финансовые затраты ГП₁

Аналогичные расчеты выполнены для ГП₂, который расположен на острове Попова.

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

В Таблице 1 приведены оптимальные финансовые затраты при покрытии графика нагрузки из всех возможных источников питания, включая возобновляемые источники энергии. Показано, что несмотря 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 1 – Оптимизация затрат на электропотребление за сутки (тыс. руб.)

Минимальный расход ГП ₁	Минимальный расход ГП ₂	Максимальный доход ГП ₁	Максимальный доход ГП ₂	Итого ГП ₁	Итого ГП ₂
803,55	179,38	0	854,14	-803,55	+674,76

В третьей главе рассмотрена оптимизация электропотребления генерирующих потребителей на основе алгоритмов роевого интеллекта. ГП имеет собственные источники энергии, как правило, основанные на альтернативной энергетике, может обмениваться с энергосистемой или соседними ГП. При этом из-за высокой степени неопределенности, присущей выработке альтернативным источникам энергии, требуется в реальном времени принимать решения по

накоплению и обмену электроэнергией. Показано применение роевых алгоритмов для построения оптимальной базы правил для принятия решений.

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 2.

Таблица 2 – 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; • 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; • 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; • способность «застрывать» в ближайшем экстремуме.

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 как FR , тогда задача оптимизации может быть записана

$$Z(FR(X)) \rightarrow \max, \quad (8)$$

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

Поскольку модель оптимизируемой системы и сама база правил могут быть очень сложными, разумно применить алгоритм оптимизации, который способен самостоятельно адаптироваться под условие задачи, исследовать топологию пространства поиска решений. В работе выбран алгоритм роя частиц как один из наиболее эффективных алгоритмов роевого интеллекта, при этом простой в реализации и обладающий высоким быстродействием. На данном этапе применяются правила без нечетких переменных. Правила имеют следующий вид:

ЕСЛИ (условие), ТО (действие)

Условия формируются, исходя из указанных выше наблюдаемых величин. При этом анализ 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 использования двух интервалов, 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.

Сравнительный анализ алгоритмов роевого интеллекта и градиентного спуска. 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, задающих 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.

Рассмотрен вариант, когда возможен экспорт или импорт избыточной/дефицитной электроэнергии между генерирующими потребителями и энергосистемой. Причем приоритет отдается поддержке баланса у генерирующих потребителей. Графическое изображение полученных расходов и доходов генерирующих потребителей (ГП₁ и ГП₂) на суточном интервале времени представлено на Рисунках 6 и 7.

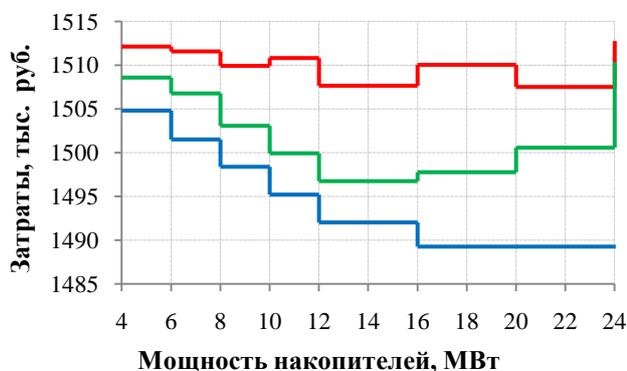


Рисунок 6 – Минимальные затраты ГП₁ учитывая обмен с ГП₁, и ЭЭС (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)



Рисунок 7 – Минимальные затраты и максимальный доход ГП₂, учитывая обмен с ГП₁ и ЭЭС (Роевых алгоритмов – синяя линия, Градиент среднее из 10 – красная линия и Градиент лучшее из 10 – зеленая линия)

В четвертой главе исследованы статистические характеристики ветрового потока и параметры альтернативных источников энергии, которые могут быть представлены в виде лингвистических переменных, то есть слов или текстов вербальной модели. Скорость ветрового потока может быть представлена общепринятой в мире шкалой Бофорта, которая позволяет дать интервальную оценку любой скорости ветра в виде лингвистических переменных, которые, в свою очередь, могут быть формализованы с помощью теории нечетких множеств. При этом управление ВЭУ осуществляется на основе нечетких продукционных правил.

Наряду с этим разработана новая вероятностная модель генерирующей способности ветроэнергетической установки с учетом флуктуации скорости ветрового потока относительно математического ожидания на заданном интервале времени. Учитывая кубическую зависимость между скоростью ветра и вырабатываемой мощностью ВЭУ, через начальные и центральные моменты второго и третьего порядков случайной величины скорости ветра доказано новое аналитическое выражения генерируемой мощности.

Основные параметры ветрового потока, которые определяют мощность ветроустановки (скорость и направление 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 логике.

Преимущество такой модели состоит в том, что полученное решение представляет собой гладкую функцию, границы действия которой несколько размыты, что снижает требования к точному определению функциональной зависимости $y = f(x)$.

При использовании двух функций принадлежности правила выглядят следующим образом

$$\begin{aligned} \text{IF } \Delta y \in A_1, \text{ THEN } y^1(t) &= a_1^1 y(t-1) + a_2^1 y(t-2); \\ \text{IF } \Delta y \in A_2, \text{ THEN } y^2(t) &= a_1^2 y(t-1) + a_2^2 y(t-2). \end{aligned} \quad (9)$$

В методе наименьших квадратов в качестве регрессоров будут выступать

$$\begin{aligned} \mu_1(\Delta y) y(t-1), \mu_1(\Delta y) y(t-2); \\ \mu_2(\Delta y) y(t-1), \mu_2(\Delta y) y(t-2). \end{aligned} \quad (10)$$

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

Оценка мощности ВЭУ на основе прогноза ветрового потока. Приведённая математическая модель (1) является детерминистической, так как она не учитывает вероятностные отклонения от среднего значения на некотором интервале времени, то есть флуктуацию скорости ветрового потока, что имеет место в реальной действительности. Известно, что при нелинейной зависимости между входным и выходным возмущениями возникает смещение математического ожидания выходного сигнала от дисперсии входного сигнала.

Разработку новой вероятностной математической модели оценки мощности, вырабатываемой ВЭУ, выполним через начальные и центральные моменты случайной величины, в качестве которой выбрана скорость ветрового потока. Результирующее выражение имеет вид

$$P_{\text{сто.}} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot A}{2} \cdot (\bar{V}^3 + \bar{V} \cdot \sigma_V^2). \quad (11)$$

При сравнении (1) и (11) видно, что учет флуктуация 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.

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 (9) и (10).

Полученные результаты прогнозирования скорости ветра представлены в Таблице 3, 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 (1) и (11) определены электрические мощности ВЭУ в детерминистической ($P_{\text{дет.}}$) и стохастической ($P_{\text{сто.}}$) постановке задачи.

Таблица 3 – Выработка активной мощности ВЭУ при фактических и прогнозных значениях скорости ветра

Время суток	m_x			D_x		σ_x		$P_{\text{дет.}}, \text{МВт}$		$P_{\text{сто.}}, \text{МВт}$	
	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

Из Таблицы 3 следует, что погрешность прогнозирования математического ожидания скорости ветра на три часа вперед составляет от 2 до 23,7%.

На Рисунке 8 представлены графики выработки мощности ветроустановки при детерминистической модели ветра (1) и вероятностной модели с учетом среднеквадратического отклонения скорости ветра (11).

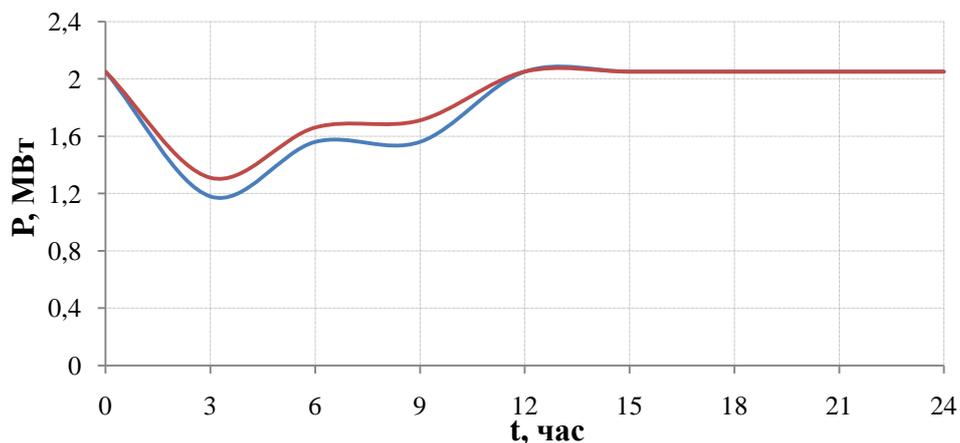


Рисунок 8 – Выработка активной мощности ВЭУ на суточном интервале с учетом обеих моделей ($P_{дет.}$ – синяя линия и $P_{сто.}$ – красная линия)

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.

В пятой главе рассмотрена возможность оптимизации электропотребления в задачах обучения с подкреплением, которая весьма актуальна в решении задач управления с отложенной выгодой или потерями, когда результат каждого решения зависит от будущих неизвестных заранее реакций внешней среды и дальнейших решений. Изложены основные положения обучения с подкреплением применительно к оптимальному управлению генерирующим потребителем. Рассмотрены принципы Q-обучения и его применение. Показано, что Q-обучение является одним из передовых направлений исследований в области искусственного интеллекта.

Управление всегда происходит в течение некоторого периода времени, при этом управляемый объект переходит из одного состояния в другое. При этом состояние объекта 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 $A(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_m(t)\}$.

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

$$A(t)^{opt} = \operatorname{argmax}_{A(t) \in A_{дон.}} \int_{t_0}^{t_r} f(t, S(t), A(t)) dt, \quad (12)$$

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

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 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 поведение, чтобы максимизировать поощрение и минимизировать наказание, то есть обучается.

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

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

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.

С точки зрения процесса обучения с подкреплением, взаиморасположение блоков несколько иное (Рисунок 9).



Рисунок 9 – Управление генерирующим потребителем как обучение с подкреплением

В процессе обучения с подкреплением необходимо сформировать оптимальную модель управления генерирующего потребителя. Для этого необходимо многократно выполнять моделирование ГП во внешней среде и корректировать данную модель управления, что полностью соответствует приведенной выше задаче (12). 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 потребуется 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 .

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении к диссертации содержатся государственные свидетельства о регистрации разработанных программ для ЭВМ и материалы, подтверждающие внедрение данной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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 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.

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 с учетом возможной генерации от двух ветроэлектростанций и накопителей энергии для каждого из потребителей.

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

функций 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

Публикация в издании, входящая в наукометрическую базу данных Web of Science

6. 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.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611533 - (программа «Оптимизация электропотребления в системе Smart Grid при двустороннем потоке энергии»).

8. 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»).

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018663398447 - (программа «Оптимизация режимов электропотребления гибридных энергетических узлов на основе взаимной конвертации возобновляемых источников энергии»).

Материалы международных и всероссийских конференций

10. 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. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», – 2018. – С. 145–146.

11. 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.

12. Хасанзода, Н. Основные положения концепции «Интеллектуальные сети» (Smart Grid) / Н. Хасанзода, А.В. Герасименко // «Электроэнергетика, гидроэнергетика, надёжность и безопасность»: Республиканская научно-практическая конференция ТТУ им. акад. М.С. Осими. Душанбе: «Промэкспо», – 2016. – С.69–71.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Хасанзода, Н. К вопросу внедрения инновационных технологий Smart Grid в энергетические комплексы / Н. Хасанзода // «Инновационное развитие технических наук в XXI веке»: XXV международная научно – практическая конференция, Международное научное объединение «Prospero», Москва, – 2016. – С. 100–103.

17. 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.