

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Дякин Николай Валерьевич



ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИМИ И АВТОНОМНО-
НАЗЕМНЫМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ С
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫМИ БАТАРЕЯМИ

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор Резников С.Б.

Москва 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ И АВТОНОМНО-НАЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	10
1.1 Электроэнергетические комплексы космических летательных аппаратов	10
1.2 Электроэнергетические комплексы летательных аппаратов	20
1.3 Электроэнергетические комплексы наземных объектов с установками малой мощности	29
1.4 Анализ стратегий группового управления	43
1.5 Способ реализации перспективных электроэнергетических комплексов	50
Выводы по первой главе	50
2 МНОГОАГЕНТЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ	56
2.1 Классификация функциональных агентов	56
2.2 Активные агенты системы управления	63
Выводы по второй главе	109
3 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	110
3.1 Служебные агенты системы управления.....	110
3.2 Выбор способа управления данными многоагентной системы	119
3.3 Процесс прогнозирования работы активных агентов в многоагентной системе управления.....	131
Выводы по третьей главе	134
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ	135
4.1 Сравнительный анализ методов прогнозирования с использованием компьютерного моделирования	135

Выводы по четвертой главе.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	170

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. При проектировании космических летательных аппаратов (КЛА), в том числе орбитальных станций, первостепенное значение приобретает создание систем электроснабжения и управления ими для обеспечения надежной и эффективной работы КЛА. В настоящее время основу электроснабжения КЛА составляют солнечные батареи и накопители энергии (с перспективой последующего использования ядерных энергетических установок для повышения энерговооруженности КЛА).

Стремление реализовать концепцию «более (полностью) электрифицированного самолета» (БЭС или ПЭС) требует проведения исследований и разработки перспективных электроэнергетических комплексов.

Развитие автономно-наземных (локальных) систем электроснабжения с генерирующими установками, использующими альтернативные источники энергии, является актуальным направлением для России с ее значительными и малоосвоенными территориями Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Рост потребления электрической энергии, а также неравномерный график ее потребления (пиковые значения порой в несколько раз превышают среднемесячные и среднегодовые) ставят задачу рационального использования имеющихся генерирующих мощностей, а также ввод в эксплуатацию новых энергетических установок.

Включение объектов альтернативной энергетики в систему электроснабжения позволяет решать проблемы защиты окружающей среды: снижение выбросов в атмосферу газов при сжигании органического топлива, уменьшение использования водных ресурсов для обеспечения технологических процессов, сокращение землеотводов для строительства ЛЭП и т.д.

Совершенствованию управления системами электроснабжения посвящены исследовательские работы российских и зарубежных организаций и компаний: Московский энергетический институт (Москва), Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск), Институт систем

энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН (ИСЭМ СО РАН), Южно-Российский государственный университет (Новочеркасск), ООО «Силовая электроника» (Москва), Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» (Украина), Самарский государственный технический университет (Самара), ПАО «РусГидро», Siemens (Германия), General Electric (США), Hitachi (Япония), Foshan Snat Energy Electrical Technology (Китай), SMA (Германия), Enercon (Германия), ABB (Швеция) и др., а также научно-исследовательские труды ученых: К.В. Безручко, А.И. Бертинова, Д.А. Бута, Б.И. Врублевского, Ю.А. Захарова, В.И. Идельчика, К.Л. Ковалева, В.Б. Кондратьева, А.А. Кузмина, А.А. Куландина, А.В. Лыкина, Е.В. Машукова, В.И. Мелешина, С.Б. Резникова, С.В. Тимашева, Г.В. Шведова, Д.А. Шевцова и т.д.

Несмотря на большое количество научных исследований, решение проблемы снижения дефицита мощности систем электроснабжения как на КЛА, так и в автономно-наземной электроэнергетике с использованием альтернативных источников энергии, а также создание электроэнергетического комплекса для более (полностью) электрифицированного самолета являются актуальными и востребованными.

В связи с этим данная работа, посвященная совершенствованию управления системами электроснабжения на основе применения многоагентного подхода, является актуальной и имеет несомненный практический интерес.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка многоагентных систем управления авиационно-космическими и автономно-наземными электроэнергетическими комплексами с преобразовательно-накопительными батареями.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ принципов построения существующих и перспективных авиационно-космических и автономно-наземных электроэнергетических комплексов и предпосылок использования многоагентного подхода к их управлению.

2. Разработка структурной схемы многоагентного подхода к управлению электроэнергетическим комплексом (включающим генерацию, накопление и потребление электрической энергии).

3. Разработка метода определения рациональных параметров заряда/разряда аккумуляторных батарей различного типа, реализуемого в многоагентной системе управления.

4. Разработка алгоритма управления электроэнергетическими комплексами для выбранных периодов прогнозирования.

5. Разработка программного обеспечения и моделирование многоагентного управления локального электроэнергетического комплекса с целью проверки полученных теоретических положений.

Объект исследования. Многоагентная система управления авиационно-космическими и автономно-наземными электроэнергетическими комплексами с использованием альтернативных источников энергии.

Предмет исследования.

Эффективность процессов контроля и прогнозирования в многоагентной системе управления электроэнергетическими комплексами

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертационной работе использованы аналитические методы теории электрических цепей, математической статистики и теории вероятности, способы оптимизации, аппроксимации данных, методы автоматического анализа данных и современные программные продукты компьютерного моделирования. Расчеты разработанных математических моделей выполнены с использованием программного пакета MathCad. Для разработки программного

продукта использованы объектно-ориентированный язык программирования Java, специализированная программная среда для разработки многоагентных систем типа Java Agent Development Framework (JADE), универсальные фреймворки типа Spring и Angularjs с открытым исходным кодом.

Научная новизна. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена многоагентная система управления электроэнергетическим комплексом, которая позволяет осуществлять прогнозирование уровня генерации различными электроэнергетическими установками, потребления и перераспределения электроэнергии в комплексе с целью обеспечения гарантированного электроснабжения различных групп потребителей. Оригинальность структуры многоагентного управления электроэнергетическим комплексом подтверждена патентом РФ на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016.

2. Предложено использование метода дерева решений в многоагентной системе управления, что позволяет с заданной точностью прогнозировать генерирование, накопление и потребление электроэнергии.

3. Разработан подход к выбору рациональных параметров заряда/разряда различных типов аккумуляторных батарей в многоагентной системе, учитывающий их особенности и технические характеристики.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработан многоагентный подход в системе управления электроэнергетическим комплексом с большим количеством источников энергии и групп потребителей, который позволяет осуществлять рациональное перераспределение электроэнергии в комплексе и в кратчайшие сроки адаптироваться к изменению количества источников электроэнергии и/или потребителей.

2. Предложен метод выбора рациональных параметров процесса заряда/разряда различных типов аккумуляторных батарей в многоагентной

системе управления электроснабжением потребителей, который позволяет снизить стоимость одного цикла работы аккумуляторных батарей на 13-15%.

3. Разработана компьютерная программа, которая реализует предложенную многоагентную систему управления электроснабжением потребителей. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016617807 от 14.07.2016.

4. Создано программное обеспечение для переносных мобильных устройств, позволяющее отслеживать и анализировать в режиме реального времени протекающие процессы в электроэнергетических комплексах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Многоагентный подход в управлении электроэнергетическими комплексами с установками, работающими на возобновляемых источниках энергии, который позволяет осуществлять прогнозирование процессов генерации, потребления электроэнергии и ее перераспределения по накопителю энергии.

2. Прогнозирование требуемых уровней мощностей генерации и потребления электроэнергии с использованием метода дерева решений, на основе которого строится многоагентное управление электроэнергетическими комплексами.

3. Выбор рациональных параметров заряда/разряда различных типов аккумуляторных батарей, позволяющий снизить стоимость одного цикла работы накопителя.

Реализация результатов диссертационной работы

Теоретические положения диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Электронные, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (МАИ) (национального исследовательского университета) и в НИР ФГУП «ГосНИИАС» по теме «Формирование научно-технического задела в области создания перспективных функциональных систем и агрегатов воздушных судов, интегрированных в общую вычислительную среду бортового оборудования, с

улучшенными характеристиками надежности и энергоэффективности» (договор НИР №16411.1770290019.18.017).

Достоверность полученных результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы проверены и оценены путем использования современных методов исследований, которые соответствуют поставленным в работе целям и задачам. Научные положения, выводы и рекомендации, сформированные в диссертации, подкреплены достоверными данными, представленными в приведенных рисунках и таблицах, с использованием современных методов обработки информации.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVIII международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2012 г.), на двух международных конференциях «Power Conversion and Intelligent Motion Europe» (Нюрнберг, 2012 г. и 2013 г.), на Всероссийской научно-технической конференции «XI научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского» (Москва, 2014 г.), на научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике» (Москва, 2015 г.) и на XLII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2016» (Москва, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, среди которых 5 – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России. Получены патент на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016 и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617807 от 14.07.2016.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 171 страниц, включающих список литературы из 139 наименований, 44 рисунков и 27 таблиц.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ И АВТОНОМНО-НАЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.

1.1 Электроэнергетические комплексы космических летательных аппаратов

Одной из задач при разработке существующих и перспективных космических летательных аппаратов (КЛА) является создание надежных электроэнергетических комплексов (ЭЭК), которые осуществляют генерацию, передачу и перераспределение электрической энергии от основных и/или вспомогательных источников к потребителям для обеспечения электрической энергией установленного на борту оборудования с требуемыми параметрами по роду тока, уровню напряжения, частоте и потребляемой мощности. Анализ технической литературы [1-2, 22-37] показал, что в качестве источников электрической энергии на КЛА могут быть использованы: электрохимические генераторы с водородно-кислородными топливными элементами, солнечные энергетические установки, аккумуляторные батареи, ядерные радиоизотопные или реакторные энергетические установки, а также в будущем термоядерные энергетические установки на базе управляемого синтеза легких ядер.

Электрохимические генераторы с водородно-кислородными топливными элементами обычно применяют при кратковременных полетах КЛА. Рассматриваемые первичные источники электрической энергии имеют существенное достоинство, которое обусловлено высоким показателем по удельной массе. Однако электрохимические генераторы на КЛА не могут эффективно обеспечивать потребителей электрической энергией постоянного тока более 3-4 месяцев.

В настоящее время основным первичным источником электрической энергии на КЛА, которые длительное время работают на геостационарных орбитах, являются солнечные батареи (СБ). Современные технические решения для СБ на основе трехкаскадных GaAs элементах позволяют создавать источники электрической мощности с удельными показателями до 300 Вт/м²

при среднем коэффициенте полезного действия не менее 27 % и условии деградации начальных характеристик в течение 15 лет не более, чем на 15-20 % [22, 23].

При проектировании ЭЭК КЛА на базе СБ необходимо учитывать светотеневую обстановку и неравномерность мощности потребления электрической энергии. В качестве примера на рисунке 1.1 представлена циклограмма возможной мгновенной выходной мощности СБ ($p_{СБ}(t)$) и мгновенной мощности потребления ($p_{П}(t)$) в зависимости от текущего времени t , где T – средний период повторения; $P_{срСБ}$ – средняя возможная выходная мощность СБ за период T ; $P_{срП}$ – средняя мощность потребления за период T .

Из циклограммы, представленной на рисунке 1.1, следует, что среднее значение $P_{срСБ}$ возможной выходной мощности СБ выше среднего значения потребления $P_{срП}$ электрической энергии за период времени T . При этом существуют интервалы времени, при которых из-за периодического естественного затемнения солнечных панелей и неравномерности мощности потребления текущее значение $p_{СБ}(t)$ возможной выходной мощности СБ имеет уровень ниже требуемых значений $p_{П}(t)$. В результате СБ не может обеспечить потребителей требуемым уровнем мощности электрической энергии.

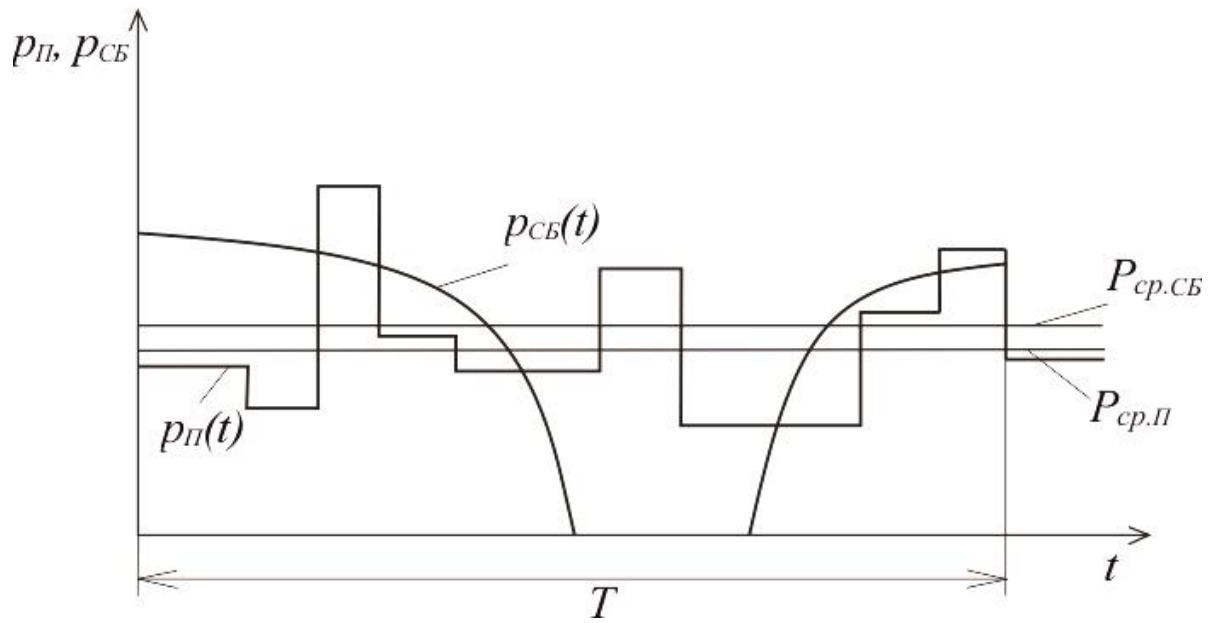


Рисунок 1.1. Циклограмма возможной мгновенной выходной мощности СБ и мгновенной мощности потребления

В связи с этим, в состав ЭЭК КЛА включают химические накопители – аккумуляторные батареи (АБ), которые компенсируют недостаток мощности электрической энергии при периодическом естественном затемнении солнечных батарей или при повышенном потреблении.

В случае, если текущее значение $p_{СБ}(t)$ выходной мощности СБ превышает текущее значение $p_{П}(t)$ мощности потребления, возможный избыток электрической энергии запасается в АБ. Таким образом, ЭЭК КЛА помимо СБ, которые являются основным первичным источником электрической энергии, содержат АБ, осуществляющие функцию буферного накопителя электрической энергии.

Действующая в настоящее время международная космическая станция (МКС), представляет собой многоцелевой космический исследовательский комплекс, который в своем составе может иметь более 10 космических модулей [28-30].

В общем виде структурная схема ЭЭК МКС представлена на рисунке 1.2. На данной схеме:

- СБ1 и СБ3 – солнечные батареи, смонтированные на фермах (А1 и А3);
- АБ2, СП2, К2, И2, Н2.1, Н2.2 и Н2.3 – электрооборудование американского сегмента А2, который содержит стыковочные модули *Uniti* и *Harmony*, научно-лабораторные модули *Destiny*, *Columbus* и «Кибо», жилой с системой жизнеобеспечения модуль *Tranquility* и другие модули;
- СБ4, АБ4, СП4, К4, И4, Н4.1, Н4.2 и Н4.3 – электрооборудование российского сегмента А4, который содержит функционально-грузовой модуль «Заря», служебный модуль «Звезда», стыковочно-грузовой модуль «Рассвет», пилотируемый модуль корабля «Союз» и другие модули.
- ПН4.1 – преобразователь напряжения типа ARCU (*American-to-Russian converter unit*), который осуществляет передачу электрической энергии постоянного тока от американского сегмента А2 с напряжением 124 В в российский сегмент А4 с напряжением 28 В;

– ПН4.2 – преобразователь напряжения типа RACU (*Russian-to-American converter unit*), который осуществляет передачу электрической энергии постоянного тока от российского сегмента А4 с напряжением 28 В в американский сегмент А2 с напряжением 124 В.

Источниками электрической энергии на МКС являются отдельно установленные на фермах А1 и А3 солнечные батареи СБ1 и СБ3, каждая из которых состоит из восьми солнечных панелей с общей мощностью по 62 кВт и с полезной площадью 840 м² [38].

В то же время СБ4 являются вспомогательными источниками электрической энергии, которые при необходимости могут обеспечить автономное функционирование соответствующих модулей российского сегмента А4. Выходная мощность СБ функционально-грузового модуля «Заря» составляет 3 кВт, а служебного модуля «Звезда» – 13,8 кВт.

При этом система электроснабжения МКС имеет шину постоянного тока американского сегмента А2 с номинальным напряжением 124 В и шину постоянного тока российского сегмента А4 с номинальным напряжением 28 В. Обе шины постоянного тока могут работать функционально независимо друг друга. Двухнаправленное энергетическое взаимодействие между шинами постоянного тока с номинальными напряжениями 124 В и 28 В обеспечивают преобразователи напряжения ПН4.1 и ПН4.2.

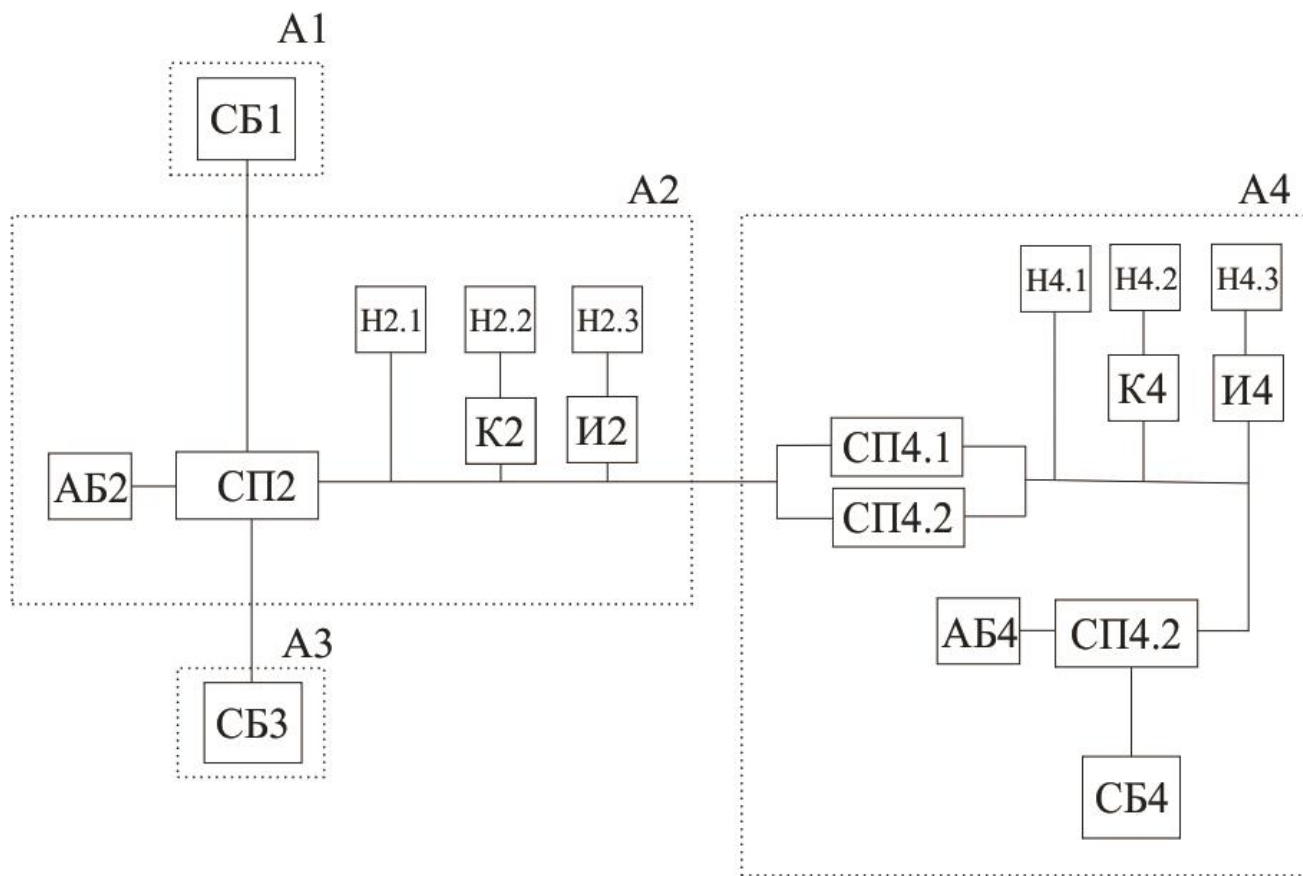


Рисунок 1.2. Схема электроэнергетического комплекса МКС

Следует отметить, что концепция МКС основана на возможности присоединения большого количества модулей, которые могут решать различные научно-исследовательские задачи. При этом КЛА, присоединенные к МКС, могут быть оборудованы собственными источниками электрической энергии, например, модули «Заря» и «Звезда», а в то время как в других могут отсутствовать собственные источники электропитания. К последним можно отнести модули «Рассвет», *Tranquility*, *Destiny*, *Columbus* и «Кибо». Поэтому с увеличением присоединенных модулей, в которых отсутствуют собственные источники электропитания, и, соответственно, повышением мощности потребления на МКС возникает проблема, связанная с ограниченными возможностями по выходной мощности СБ1 и СБ3.

Тенденция роста мощности потребления на КЛА требует поиска новых источников электрической энергии, работающих совместно с СБ. По сравнению с СБ, значительно лучшими удельными параметрами по массе и габаритам, особенно при выходной мощности более 100 кВт, обладают ядерные установки (ЯУ), которые преобразуют тепловую энергию, полученную от распада изотопа или ядерного деления, в электрическую энергию с помощью термоэмиссионных или термоэлектрических преобразователей [5-8, 33-37].

К несомненному достоинству ЯУ следует отнести то, что они генерируют электрическую энергию независимо от расположения КЛА относительно Солнца. Данное обстоятельство позволяет в ЭЭК с ЯУ существенно понизить расчетную емкость АБ, которые имеют относительно большую массу и габариты.

Таким образом, разработка ЭЭК с ЯУ, в качестве основного источника электрической энергии, является перспективным направлением. При этом СБ в таких системах электроснабжения будут играть роль вспомогательных источников электрической энергии.

Впервые 3 апреля 1965 года ЯУ типа SNAP-10A (*System of Nuclear Auxiliary Power*) была запущена на борту американского КЛА *Snapshot*. В ее основы был положен термоэлектрический преобразователь. При массе 440 кг и

тепловой мощности около 40 кВт указанная ЯУ имела выходную мощность до 650 Вт.

Россия, как преемница СССР, имеет богатый опыт в области космической ядерной энергетики. С 1970 года были разработаны и запущены более 30 космических спутников с ЯУ на базе термоэлектрических преобразователей. Первая российская ЯУ типа «Топаз» на базе термоэмиссионного преобразователя была запущена в космос 1 февраля 1987 года [34]. Потенциально такие электроэнергетические установки имеют лучшие удельные технические показатели по массе, габаритам и коэффициенту полезного действия.

Одним из перспективных космических проектов, который в настоящее время реализует РКК «Энергия», является разработка многоорбитального межорбитального буксира типа «Геркулес», который взамен существующих разгонных блоков будет выполнять функцию доставки различных КЛА с низкой орбиты на рабочую высокую орбиту [39-42]. В КЛА типа «Геркулес» планируется использовать ЯУ на базе термоэмиссионного преобразователя мощностью 550 кВт.

В недалеком будущем вполне реально, что будут созданы ЯУ на базе магнетогидродинамического генератора (МГД-генератор) совместно с СБ [8].

В общем случае структурная схема ЭЭК перспективного КЛА на базе ЯУ приведена на рисунке 1.3.

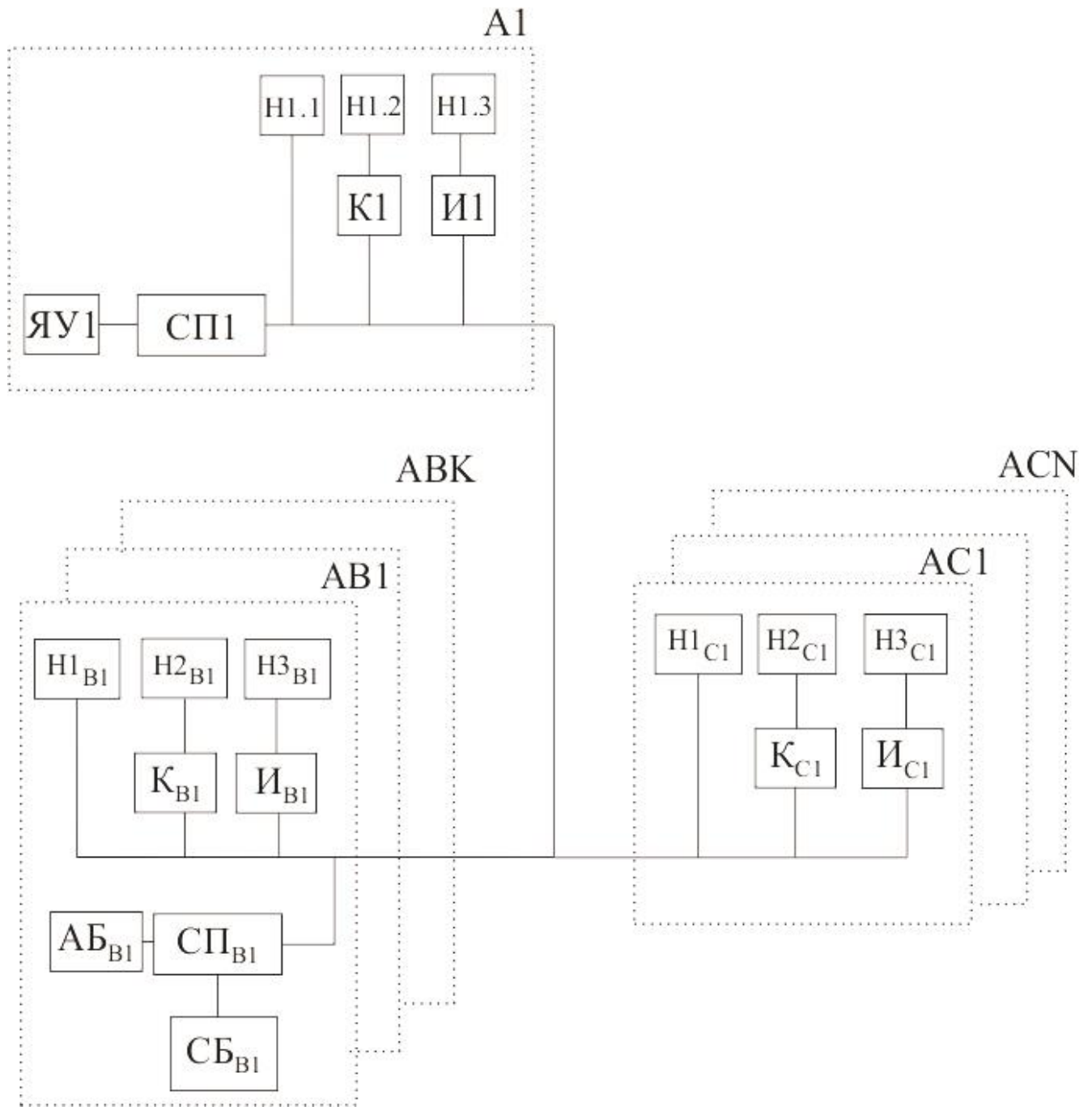


Рисунок 1.3. Схема электроэнергетического комплекса перспективного КЛ на базе ЯУ

На данной схеме (рисунок 1.3):

– ЯУ1, СП1, К1, И1, Н1.1, Н1.2 и Н1.3 – электрооборудование базового энергетического модуля А1;

– СБ_{В1}...СБ_{ВК}, АБ_{В1}...АБ_{ВК}, СП_{В1}...СП_{ВК}, К_{В1}...К_{ВК}, И_{В1}...И_{ВК}, Н1_{В1}...Н1_{ВК}, Н2_{В1}...Н2_{ВК} и Н3_{В1}...Н3_{ВК} – электрооборудование модулей АВ1...АВК, которые могут при необходимости автономно функционировать;

– К_{С1}...К_{СН}, И_{С1}...И_{СН}, Н1_{С1}...Н1_{СН}, Н2_{С1}...Н2_{СН} и Н3_{С1}...Н3_{СН} – электрооборудование модулей АС1...АСН, которые в своем составе не имеют СБ.

В представленной ЭЭК ЯУ выполняет роль основного источника электрической энергии, а СБ_{В1}...СБ_{ВК} представляют собой вспомогательные источники электропитания общей магистральной шины КЛА. Согласование уровней напряжения между ЯУ1, СБ_{В1}...СБ_{ВК}, АБ_{В1}...АБ_{ВК} и нагрузками осуществляют статические преобразователи СП1 и СП_{В1}...СП_{ВК}, конверторы К_{В1}...К_{ВК} и К_{С1}...К_{СН}, инверторы И_{В1}...И_{ВК} и И_{С1}...И_{СН}.

При этом основным целевым назначением СБ_{В1}...СБ_{ВК} и АБ_{В1}...АБ_{ВК} является обеспечение электрической энергией потребителей в случае возможного аварийного режима ЯУ или в случае автономного режима функционирования соответствующего модуля. Указанные цели определяют расчетную мощность СБ_{В1}...СБ_{ВК} и расчетную емкость АБ_{В1}...АБ_{ВК}.

В свою очередь СБ_{В1}...СБ_{ВК} и АБ_{В1}...АБ_{ВК} оказывают влияние на снижение средней мощности потребления от ЯУ и в итоге определяют уменьшение стоимости эксплуатации, массы и габаритов КЛА, что особенно актуально для КЛА. С другой стороны, неуклонный рост мощности потребителей на КЛА определяет проблему, связанную с ограничением по мощности любых электрогенераторных установок.

Как на существующей МКС, так и на перспективных космических станциях с ЯУ проблему ограниченного уровня генерируемой мощности целесообразно решить, используя современные подходы к управлению ЭЭК, при которых будут учтены: наличие большого количества присоединенных модулей, использование

различных по мощности СБ и емкости АБ, изменяющаяся во времени плотность светового солнечного потока и циклическая неравномерность мощности потребления.

1.2 Электроэнергетические комплексы летательных аппаратов

В настоящее время идет непрерывное и лавинообразное увеличение энерговооруженности летательных аппаратов (ЛА) и стремление создать более электрифицированный самолет (БЭС) с перспективой – полностью электрифицированного самолета (ПЭС). На самолете Boeing-787 с двумя маршевыми и вспомогательной силовыми установками (ВСУ) и шестью магистральными стартер-генераторами (мощностью 250 кВт каждый) суммарная установочная мощность электроэнергетического комплекса (ЭЭК) достигает 1,5 МВт. В зарубежных и отечественных источниках рекомендуется использовать встроенные в силовую установку (СУ) безредукторные магнитоэлектрические стартер-генераторы с высокоэнергетическими (редкоземельными) постоянными магнитами на роторе. Напряжение стартер-генератора магнитоэлектрической машины является нестабильным по частоте и амплитуде (360-800 Гц и 115/200 – 250/440 В). Поэтому для параллельного включения магистральных каналов и для удобства статического преобразования в нормированное трехфазное напряжение со стабильными параметрами (400 Гц, 115/200 В) используется звено постоянного повышенного напряжения (ЗППН ± 270 В или ± 540 В). В отечественных источниках предлагается использовать дифференциальное звено постоянных повышенных напряжений (ДЗППН ± 270 В) с заземленным среднепотенциальным выводом.

Помимо магистральных генераторов для аварийного и бесперебойного питания критических потребителей энергии используется традиционная подсистема распределения постоянного низкого напряжения (± 27 В) с подключенными к ней резервными аккумуляторами (в перспективе возможно использование суперконденсаторов).

Для взаимосвязи распределительных устройств (РУ) с вышеуказанными напряжениями (РУ 360 - 800 Гц, РУ 400 Гц и РУ ± 27 В), а также ЗППН (ДЗППН) используются статические вторичные источники электропитания (ВИЭП), в том числе источники бесперебойного питания (ИБП), с различными функциями: выпрямитель, в частности – с коррекцией коэффициента мощности, повышающе-понижающий импульсный конвертор (ИК), инверторы прямоугольного и синусоидальных напряжений (ИПН и ИСН) или/и токов (ИПТ и ИСТ), импульсный преобразователь частоты (ИПЧ) [3,4].

Создание полностью электрифицированного ЛА предоставляет возможность снизить номенклатуру агрегатов (отказ от использования гидравлических и пневматических приводов), а также повысить отказоустойчивость ЛА. По оценкам таких компаний, как «Аэроэлектромаш», «АКБ Якорь» («Технодинамика»), реализация полностью электрифицированного ЛА позволит достичь снижения потребления топлива на 8-12%, полной взлетной массы на 6-10% и времени технического обслуживания на 4-4,5% [5-7].

На рисунке 1.4 представлена структурная схема магистрального канала системы электроснабжения (СЭС) БЭС. На рисунке изображены основные элементы СЭС и потоки энергии между СУ, преобразователями, нагрузкой и накопителями энергии (аккумуляторные батареи и суперконденсаторы).

Структурно-функциональная схема магистрального канала СЭС БЭС (ПЭС)

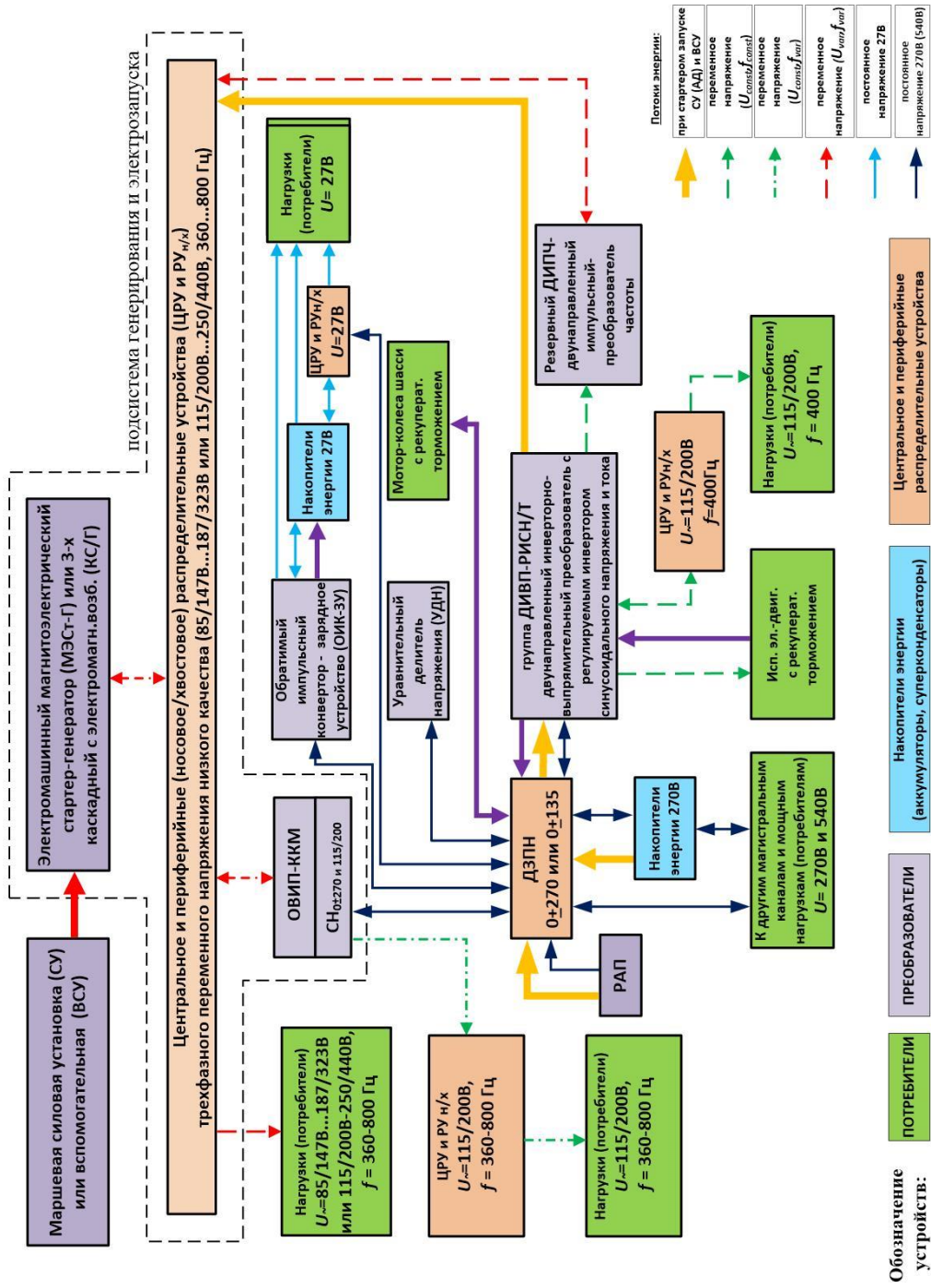


Рисунок 1.4. Структурная функциональная схема магистрального канала СЭС БЭС

Требования к подсистемам генерирования электроэнергии и электрозапуска силовых установок, а также распределения и преобразования электроэнергии СЭС БЭС (ПЭС) сформулированы следующим образом.

Основным требованием к подсистеме генерирования и электрозапуска является исключение гидро- и пневмоприводов постоянной частоты вращения (ППЧВ), имеющих низкие КПД (менее 0,7) надежность и технологичность и требующие частых ремонтно-регламентных работ с длительным простоем самолета. Предпочтительно также исключение электромеханических ППЧВ (в частности с дифференциальным редуктором).

Вторым по значимости требованием является высокая надежность конструкции стартера-генератора, предпочтительно – без редуктора и без собственных подшипников; при этом в случае возбуждения от вращающихся постоянных магнитов – наличие аварийного расцепителя вала для защиты от короткого замыкания в якорной обмотке, а в случае электромагнитного возбуждения через вращающийся выпрямитель – наличие форсировки развозбуждения.

Третьим требованием является выполнение нормативов ГОСТ по параметрам номинальных выходных напряжений подсистемы генерирования: 3-х фазные 360 ... 800 Гц, 115/200 (или 230/400) В; 3-х фазные 400Гц, 115/200 В, ± 270 (или 540) В и ± 27 В при этом предпочтительно использовать все перечисленные напряжения, но со следующим ограничением: напряжение ± 270 (или 540) В на современном этапе использовать только в магистральных промежуточных звеньях постоянного и повышенного напряжения (ЗППН) для параллельного объединения магистральных каналов (по числу силовых установок, включая вспомогательную – ВСУ) для обратимой (двунаправленной) взаимосвязи ЗППН и подсистемы распределения ± 27 В, а также питания индивидуальных (или групповых) мощных потребителей (например, регулируемых инверторов (или конверторов), питающих электромашинные стартеры, исполнительные электродвигатели с рекуперативным торможением (например, мотор-колеса шасси, топливные

насосы, электроимпульсную противообледенительную систему (ЭИ ПОС) и т.п., но не для питания подсистемы распределения ± 270 В (из-за неразработанности к настоящему времени бездуговой контактной и полупроводниковой коммутационной и защитной аппаратуры). При выполнении указанного требования возможно также использование ненормированного 3х-фазного переменного напряжения: 360...800 Гц, 115/200...250/440 В для питания мощных нагрузок нечувствительных к стабильности частоты и амплитуды напряжения (например, нагревательной противообледенительной системы, электропечи буфета и других нагревательных приборов) и резервных мощных вторичных источников электропитания (ВИЭП), увеличивающих степень «живучести» для нагрузок первой категории (жизненно-важных и др.).

К остальным требованиям относятся общеизвестные для авиационной электроэнергетики требования по надежности (включая резервирование), удельной мощности, КПД, качеству электроэнергии, электромагнитной совместимости (ЭМС, включая помехоизлучения и стойкость к мощным электромагнитным импульсам – ЭМИ молний и др.)

К подсистеме распределения электроэнергии сформулированы следующие требования.

Основным требованием к подсистеме распределения электроэнергии является надежность, включающая общеизвестные факторы (безотказность, срок службы, ремонтпригодность, защита от аварийных режимов и др.), так и специфические факторы, относящиеся к авиационно-бортовой аппаратуре: широкий диапазон климатических параметров, радиационная стойкость, стойкость к ЭМИ (молнии и преднамеренных). Это же требование включает в себя необходимость 2-х – 3-х кратного (или более) резервирования каналов (цепей) электропитания жизненно-важных потребителей, защиту от коротких замыканий и обрывов цепей, а также от пожароопасных дуговых (искровых) процессов (с продольными и поперечными дуговыми промежутками). В этой связи предполагается наличие системы (или по меньшей мере – локальных

устройств) диагностики (обнаружения), регулярного мониторинга, прогнозирования, защиты и оповещения персонала, а также мониторинга параметров качества электроэнергии, ненормальных и аварийных режимов. Указанное требование определяет целесообразность поэтапного внедрения (для минимизации рисков) так называемой системы распределения постоянного повышенного напряжения (СППН) при его увязке с развитием элементной базы в авиабортовой силовой электронике.

Вторым по значению требованием, тесно связанным с первым, является обеспечение максимально-рациональной взаимно-независимости («развязанности») магистральных каналов подсистемы распределения и в топологии внутриканальных цепей электропитания большинства потребителей. Указанная «развязанность» является основным фактором обеспечения безотказности электропитания потребителей.

С вышеуказанными двумя требованиями связаны также выбор числа расщепленных жил кабелей и вопросы снижения интенсивности старения кабельной изоляции в цепях переменных и постоянных напряжений.

Третьим требованием является обеспечение возможности минимизации числа преобразовательных каскадов на пути от подсистемы генерирования и/или резервно-аккумуляторных батарей (химических и суперконденсаторных) до каждого существенно значимого потребителя электроэнергии. Указанная минимизация позволяет существенно повысить не только надежность, но и КПД процессов преобразования электроэнергии во всей СЭС. Выполнению этого требования как раз и способствует наличие нескольких видов питающих напряжений в подсистеме генерирования электроэнергии и электрозапуска СУ.

Четвертое требование – оптимизация топологии («трассировки») кабелей, распределительных устройств (центральных – ЦРУ и периферийных (носовых и хвостовых РУ) для каждого вида напряжения по общеизвестным для самолетов критериям оптимизации (массо-энергетическим или обобщающему – взлетной («стартовой») массе).

К отдельной группе требований, относящихся также к подсистеме распределения электроэнергии и электрозапуска СУ, можно отнести следующие требования к статическим (импульсно-полупроводниковым) преобразователям – вторичным источникам электропитания (ВИЭП):

- пригодность схемотехнических решений для реализации модульно-масштабируемой архитектуры с возможностью гибкого наращивания преобразуемой мощности за счет параллельного подключения модулей (с внешними вольтамперными характеристиками «источников тока») и обеспечения технологичности (производственной, монтажной и ремонтно-эксплуатационной);

- стойкость к мощным электромагнитным импульсам (ЭМИ), в частности – исключение цепей для возможных «сквозных сверхтоков» при несанкционированных подключениях к емкостным фильтрам групп (стоек) полупроводниковых ключей (например, из-за воздействия ЭМИ – молнии на управляющие драйверы);

- многофункциональность (в частности – обратимость, т.е. двунаправленность) преобразования, т.е. реализация функций, следующих основным многофункциональным импульсным преобразователям (МИП):

- ОИК (ОНИК или ОТИК) – обратный импульсный конвертор (непосредственный или трансформаторный);

- ОВИП-ККМ-СН – обратимый выпрямительно-инверторный преобразователь с коррекцией коэффициента мощности и стабилизацией напряжений (выпрямлено-дифференциальных и переменного);

- ДИВП-РИСН/Т – двунаправленный инверторно-выпрямительный преобразователь с регулируемым инвертором синусоидального напряжения/тока;

- ДИПЧ – двунаправленный импульсный преобразователь частоты.

Пример структуры однобортовых магистральных каналов СЭС, удовлетворяющей всем вышеперечисленным требованиям, приведен на рисунке 1.5.

Помимо указанных ранее преобразователей здесь присутствуют: центральные распределительные устройства (ЦРУ); дифференциальное звено постоянных повышенных напряжений (ДЗППН 0 ± 270 В); С/К Б – суперконденсаторная батарея ($270 \pm \Delta U_1$); АБ – аккумуляторная батарея ($28 \pm \Delta U_2$); РАП – разъем («розетка») аэродромного питания (0 ± 270 В и ± 27); ИЭП – исполнительный электропривод (с рекуперативным торможением); РУ_{Н/О} и РУ_{Х/О} – периферийные распределительные устройства носового и хвостового отсеков; МЭС/Г – магнитоэлектрический стартер-генератор.

Следовательно, к системе электроснабжения более электрифицированного самолета, а в дальнейшем и полностью электрифицированного самолета, кроме высоких требований по надежности, качеству электроэнергии, предъявляются требования к обеспечению взаимно-независимости электроснабжения большинства потребителей, ее масштабируемости и наличию систем диагностики (обнаружения), регулярного мониторинга, прогнозирования, защиты и оповещения персонала, мониторинга параметров качества электроэнергии, ненормальных и аварийных режимов.

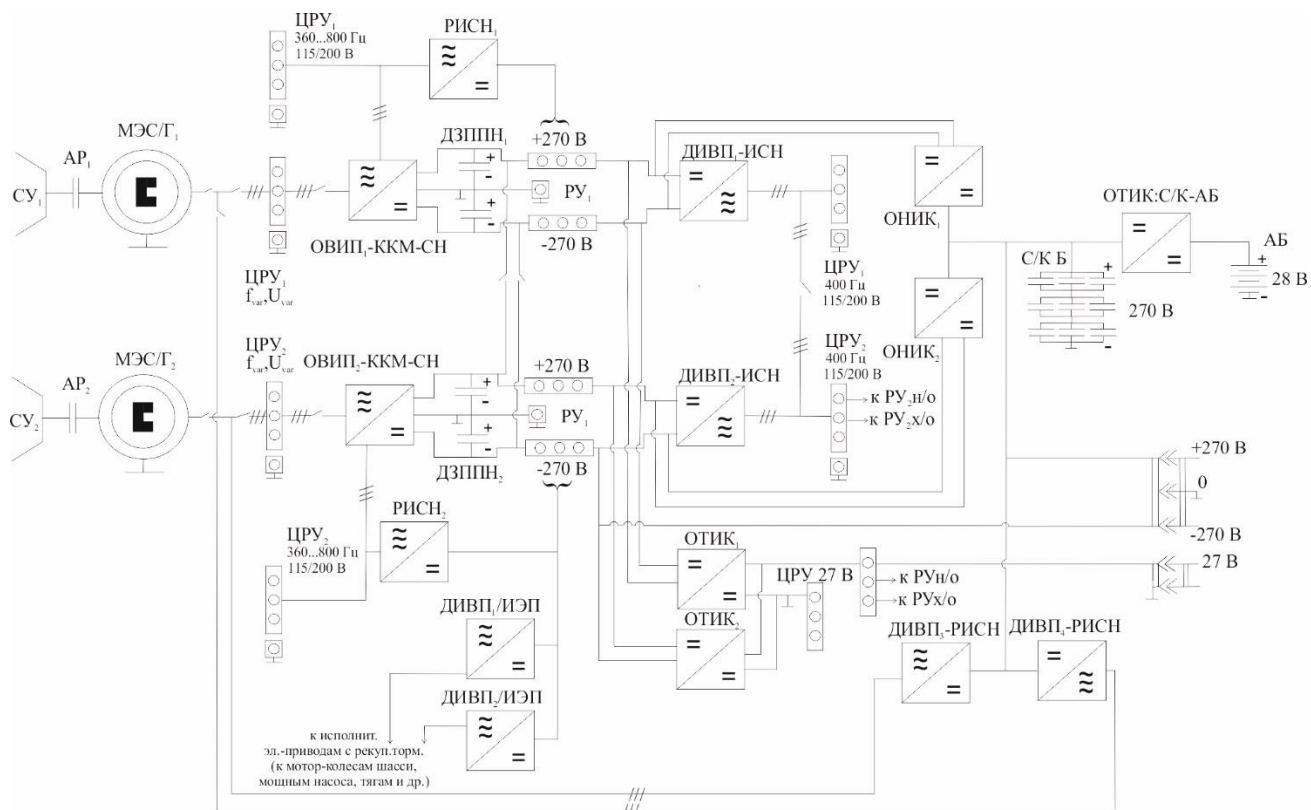


Рисунок 1.5. Структура однобортовых магистральных каналов СЭС с взаимно-независимыми подсистемами

1.3 Электроэнергетические комплексы наземных объектов с установками малой мощности

Аналогично авиационно-космическим комплексам в наземных ЭЭК происходит непрерывный рост мощности потребления, связанный с появлением новых потребителей различного типа [9-21, 43], что приводит к возникновению дефицита электрической энергии.

Дополнительно данную проблему усугубляет неравномерный график потребления электрической энергии, который имеет в том числе и циклический характер с пиками в дневной и провалами в ночной период времени, повышенное потребление в зимний период, в праздничные дни и т. п. При этом мгновенное значение мощности потребления может превышать более чем в 5-7 раз среднегодовое значение, что определяет необходимость увеличения генерируемых мощностей и, соответственно, повышенные затраты на выработку электрической энергии.

Одновременно существующие линии электропередач (ЛЭП) имеют расчетное ограничение пропускной способности по мощности. Строительство новой ЛЭП или ее модернизация с целью повышения пропускной способности старой ЛЭП является длительным по времени и дорогостоящим решением. В связи с этим, в большинстве случаев потребитель вынужден использовать существующие ЛЭП, что ограничивает возможности по увеличению генерирующих мощностей.

Таким образом, исследование и разработка новых наземных ЭЭК и снижение зависимости от магистральной сети является актуальной задачей.

В последнее время широкое внедрение получают электрогенерирующие установки малой мощности (ЭУММ), которые располагают рядом с потребителями электрической энергии. Применение ЭУММ позволяет для потребителей ЭЭК решить проблему дефицита электрической энергии.

К ЭУММ можно отнести энергетические установки, работающие на альтернативных источниках энергии, и малые тепловые электростанции.

Альтернативная энергетика представляет собой производство, передачу, преобразование электрической энергии, полученную за счет использования возобновляемых источников энергии. К возобновляемым (альтернативным) источникам энергии относят: энергию ветра, солнца, океана, биоэнергию, энергию рек, водородную энергетику и геотермальную энергию [44-53].

Одновременно с ЭУММ дальнейшее развитие получают накопители электрической энергии (НЭ), предназначенные для сглаживания графика мощности потребления, в том числе из магистральной сети, при значительных дневных и сезонных колебаниях электрической нагрузки [54-61]. К таким НЭ следует отнести традиционные АБ, а также суперконденсаторы, индукционные и кинетические, накопители электрической энергии.

В настоящее время ветроэнергетические установки (ВЭУ), преобразующие кинетическую энергию ветра в электрическую энергию, получили наиболее широкое применение по сравнению с другими альтернативными источниками электрической энергии. В Дании с помощью ВЭУ вырабатывают более 40%, в Португалии – более 30%, а в Никарагуа – более 20% всей генерирующей электрической энергии соответствующей страны.

К солнечным электроэнергетическим установкам (СЭУ) следует отнести установки, преобразовывающие электромагнитное излучение Солнца в электрическую энергию. По принципу действия эффективность СЭУ существенно зависит от среднегодового уровня электромагнитного излучения Солнца. Существенным ограничением широкого внедрения СЭУ является высокая стоимость 1 кВтч при строительстве солнечной электростанции. Для согласования параметров выходного напряжения с напряжением магистральной сети в СЭУ применяют выходной статический преобразователь (СП).

Малыми гидроэлектростанциями (МГЭС) являются электроэнергетические установки с выходной мощностью до 25 МВт, которые преобразуют кинетическую энергию движения воды в реках в электрическую энергию. Исходя из принципа действия, эффективность МГЭС зависит от напора воды. В

настоящее время МГЭС получили широкое распространение в Италии, Франции, Испании, Германии и других странах.

В случае изменения погодных условий, при которых ВЭУ и СЭУ не смогут обеспечить требуемую мощность для электроснабжения потребителей, в качестве гарантированного источника электрической энергии выступают малые тепловые электростанции. Малыми тепловыми электростанциями (МТЭС) являются электрогенерирующие установки с выходной мощностью до 10 МВт, преобразующие энергию теплоты сжигаемого вещества, например, газа или дизельного топлива, в электрическую энергию с требуемыми параметрами напряжения. Широкая доступность газа и дизельного топлива позволяет с помощью МТЭС наращивать генерирующие мощности локальной сети непосредственно вблизи от потребителей.

К достоинствам МТЭС следует отнести:

- сравнительно высокий коэффициент полезного действия;
- малый срок окупаемости, не превышающий 5 лет при полном использовании генерируемой электрической энергии. В случае полного использования генерируемой электрической энергии и выделяемого тепла срок окупаемости МТЭС составляет не более 3 лет;
- сжатые сроки ввода МТЭС в эксплуатацию. Срок строительства МТЭС с выходной мощностью 2 МВт не превышает 12 месяцев, а мощностью 10 МВт – 18 месяцев.

Большинство МТЭС имеют электромашинный генератор, параметры выходного напряжения которого соответствует напряжению магистральной сети. В последнее время с целью повышения коэффициента полезного действия для согласования параметров выходного напряжения с напряжением магистральной сети на выходе МТЭС устанавливают выходной статический преобразователь (СП). Однако, такие ЭУММ имеют повышенную стоимость.

Таким образом, в перспективе ЭЭК наземных объектов будут содержать различные типы ЭУММ и НЭ с подключением или без него к магистральной сети.

Обобщенная структурная схема локального ЭЭК приведена на рисунке 1.6. На данной схеме указано:

– $A_{11}...A_{1k}$ – сегменты ЭЭК, которые содержат малые тепловые электростанции ($МТЭС_{11}...МТЭС_{1k}$) и группы нагрузок ($H_{11}...H_{1k}$);

– $A_{21}...A_{2m}$ – сегменты ЭЭК, которые содержат солнечные электроэнергетические установки ($СЭУ_{21}...СЭУ_{2m}$), группы соответствующих статических преобразователей $СП_{21}...СП_{2m}$, нагрузок ($H_{21}...H_{2m}$) и аккумуляторных батареи $АБ_{21}...АБ_{2m}$;

– $A_{31}...A_{3n}$ – сегменты ЭЭК, которые содержат малые гидроэлектростанции ($МГЭС_{31}...МГЭС_{3n}$) и группы нагрузок ($H_{31}...H_{3n}$);

– $A_{41}...A_{4p}$ – сегменты ЭЭК, которые содержат накопители электрической энергии ($НЭ_{41}...НЭ_{4p}$) и группы соответствующих статических преобразователей $СП_{41}...СП_{4p}$;

– $A_{51}...A_{5v}$ – сегменты ЭЭК, которые содержат ветроэнергетические установки ($ВЭУ_{51}...ВЭУ_{5v}$) и группы нагрузок ($H_{51}...H_{5v}$).

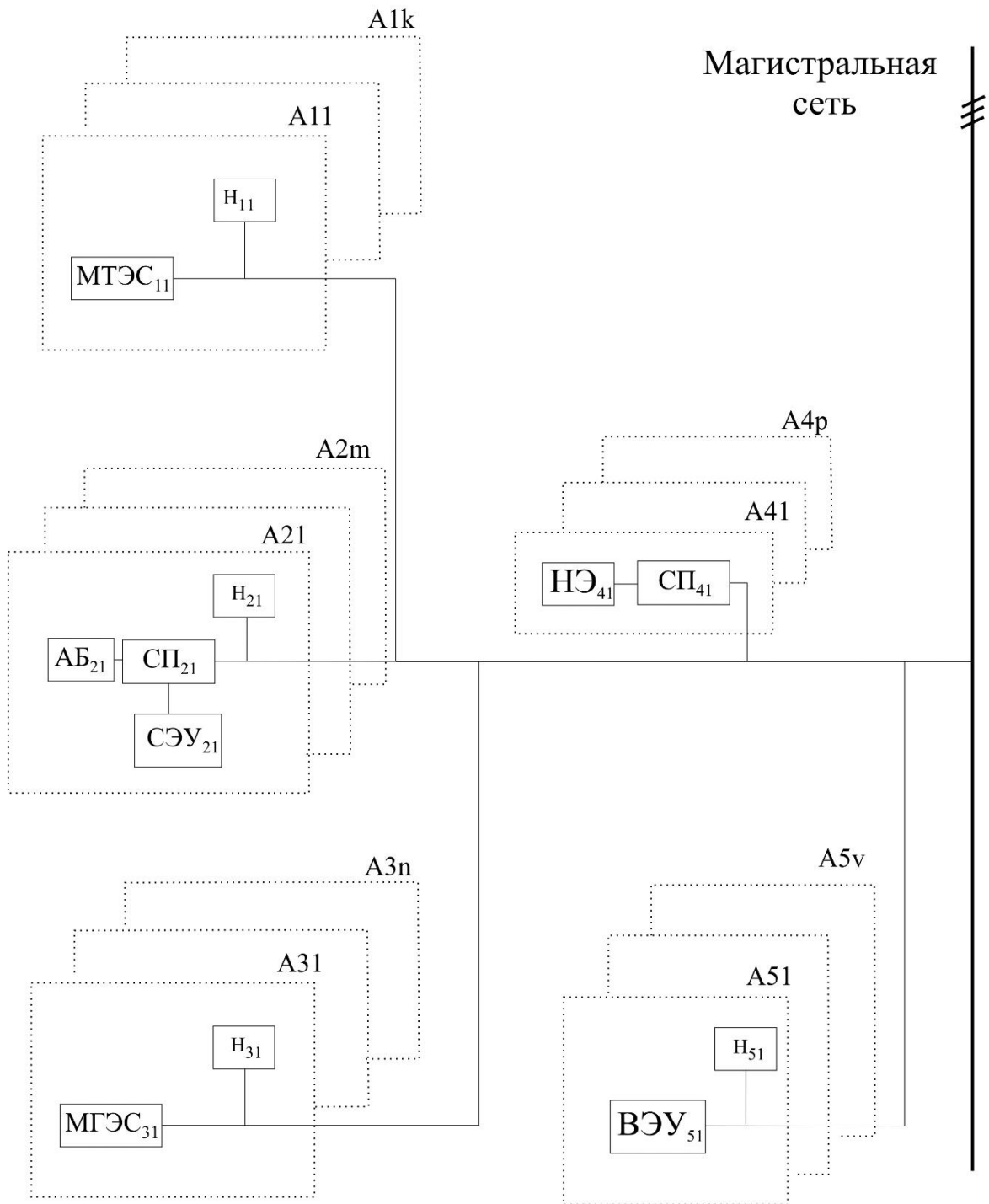


Рисунок 1.6. Схема наземного электроэнергетического комплекса

Приведенная на рисунке 1.6 структурная схема локального ЭЭК функционирует следующим образом.

С одной стороны, магистральная сеть (в случае подключения к ней) обеспечивает гарантированный объем поставки электрической энергии ограниченной средней мощности всем потребителям $H_{11} \dots H_{1k}$, $H_{21} \dots H_{2m}$, $H_{31} \dots H_{3n}$ и $H_{51} \dots H_{5v}$ соответствующих сегментов локального ЭЭК.

С другой стороны, электрическая энергия от МТЭС $_{11} \dots$ МТЭС $_{1k}$, СЭУ $_{21} \dots$ СЭУ $_{2nm}$, МГЭС $_{31} \dots$ МГЭС $_{3n}$ и ВЭУ $_{51} \dots$ ВЭУ $_{5v}$ поступает в первую очередь на собственные нагрузки $H_{11} \dots H_{1k}$, $H_{21} \dots H_{2m}$, $H_{31} \dots H_{3n}$ и $H_{51} \dots H_{5v}$ соответственно, а в случае избытка на все остальные потребители локального ЭЭК. Очевидно, чем больше указанные ЭУММ вырабатывают электрическую энергию, тем меньше локальный ЭЭК потребляет мощность из магистральной сети.

При этом сегменты А41...А4р при пиковых значениях тока ($I_{мс}$) потребления из магистральной сети посредством СП $_{41} \dots$ СП $_{4р}$ передают ранее накопленную энергию НЭ $_{41} \dots$ НЭ $_{4р}$ в локальном ЭЭК. А при снижении тока $I_{мс}$ с помощью СП $_{41} \dots$ СП $_{4р}$ осуществляют накопление энергии в НЭ $_{41} \dots$ НЭ $_{4р}$.

Таким образом, рассматриваемая структурная схема ЭЭК позволяет:

- решить проблему дефицита электрической энергии за счет внедрения в локальный ЭЭК требуемого количества ЭУММ, которые имеют сравнительно малые капитальные затраты и сроки ввода в эксплуатацию;
- снизить пиковые значения мощности потребления из магистральной сети (в случае подключения к ней) посредством применения НЭ в локальном ЭЭК.

Современные ЭЭК содержат сравнительно большое число относительно независимых объектов, имеющих в своем составе собственные источники электрической энергии, СП, АБ и нагрузки. В связи с этим, при проектировании ЭЭК с большим количеством объектов возникает необходимость выбора эффективной стратегии группового управления. Анализ стратегий группового управления приведен в параграфе 1.4 настоящей диссертации.

Рассмотрим один из примеров управления наземным ЭЭК, который включает ЭУММ и НЭ, с целью уменьшения мощности потребления из магистральной сети.

Одной из задач НЭ является выравнивание графика мощности потребления из магистральной сети при значительных дневных и сезонных колебаниях тока (I_H) нагрузки. Очевидно, что при постоянных действующих значениях напряжения (U_c) магистральной сети НЭ обеспечивают сглаживание действующего тока (I_{Π}) потребления.

В связи с этим, при наиболее распространенном алгоритме функционирования таких ЭЭК необходимо ограничивать заданный верхний уровень тока ($I_{\Pi max}$) потребления из магистральной сети посредством передачи электрической энергии от НЭ в локальный ЭЭК. Затем после спада тока I_{Π} в возможно короткие сроки осуществляют восполнение использованной электрической энергии в НЭ. Это делают для того, чтобы быть готовым к возможным следующим пиковым значениям I_H .

Существует много различных вариантов условий, при которых необходимо запасать энергию в НЭ. Одним из вариантов таких условий является снижение тока I_{Π} ниже заданного уровня ($I_{\Pi min}$). При этом осуществляют передачу электрической энергии в НЭ в таком количестве, чтобы уровень тока потребления не превышал заданный уровень $I_{\Pi max}$.

Проанализируем процессы на примере упрощенной схемы ЭЭК, представленного на рисунке 1.7.

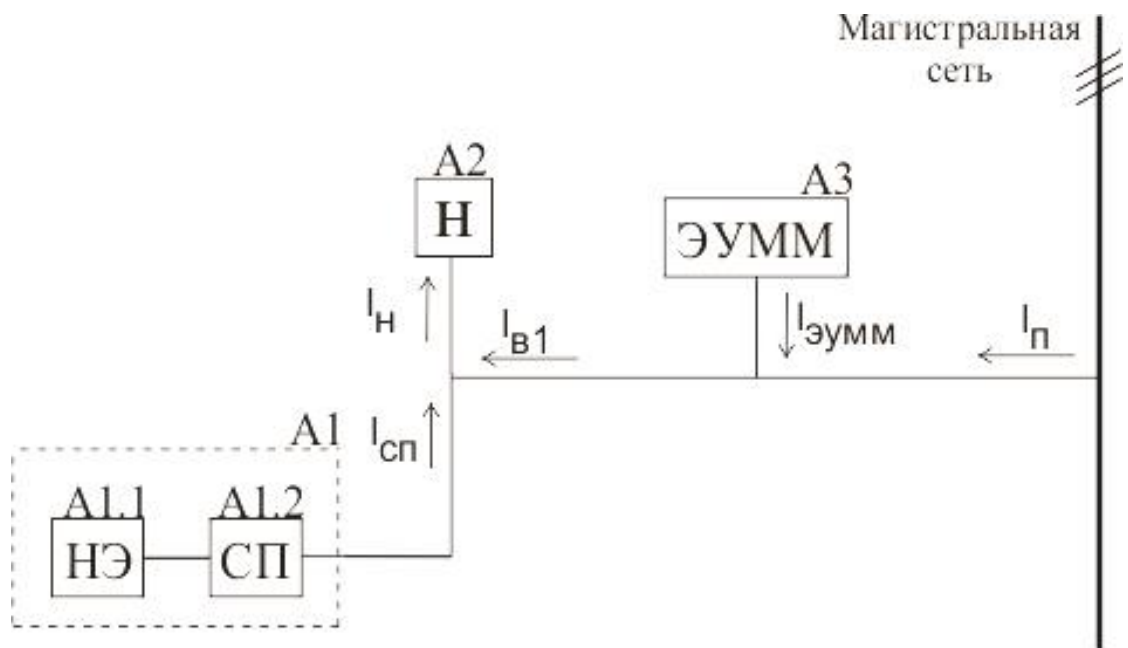


Рисунок 1.7. Упрощенная схема ЭЭК

На данном рисунке:

- $A1$ – сегмент ЭЭК, включающий НЭ с СП;
- $A2$ - группа нагрузок (Н);
- $A3$ - сегмент ЭЭК с ЭУММ;
- $I_{B1}(t)$ - текущее действующее значение тока, который протекает в сегменты $A1$ и $A2$;
- $I_{П}(t)$ - текущее действующее значение тока потребления из магистральной сети;
- $I_{СП}(t)$ - текущее действующее значение выходного тока СП;
- $I_{ЭУММ}(t)$ – текущее действующее значение выходного тока ЭУММ;
- $I_{Н}(t)$ - текущее действующее значение тока нагрузки Н.

Предположим, что при вышерассмотренном алгоритме разряд-заряд НЭ токовые зависимости элементов сегментов от времени имеют кривые, приведенные на рисунке 1.8.

В данном случае $I_{Пmax}$ – заданный уровень максимального действующего значения тока потребления из магистральной сети.

При заданном алгоритме разряд - заряд НЭ в рассматриваемом ЭЭК происходят следующие процессы.

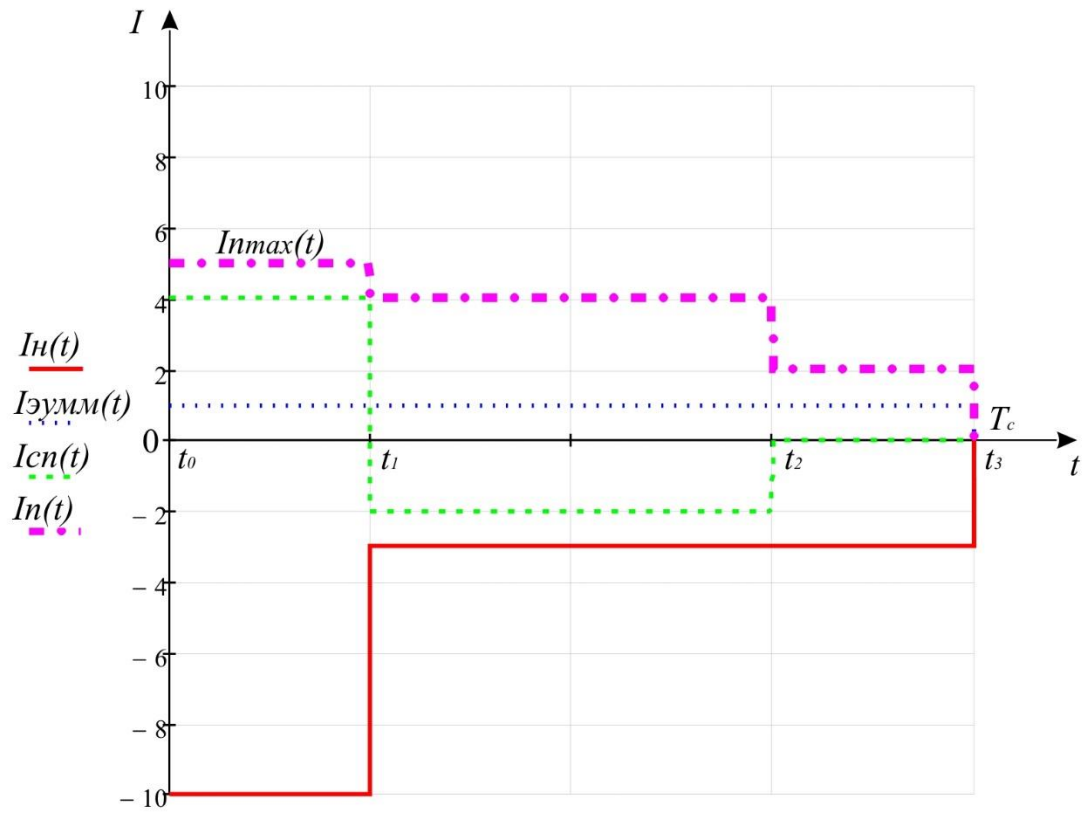


Рисунок 1.8. Токвые зависимости элементов сегментов от времени

На интервале времени от t_0 до t_1 , когда $(I_H(t) - I_{ЭУММ}(t) \geq I_{Пmax})$, выходной ток СП принимает такие положительные значения, чтобы ток потребления $I_{П}(t)$ не превышал заданного уровня $I_{Пmax}$. В этом случае дополнительно происходит передача энергии от НЭ посредством СП в нагрузку, а ток потребления $I_{П}(t)$ равен $I_{Пmax}$. При этом ток потребления определяют как:

$$I_{П1}(t) = I_{Пmax} = I_{H1}(t) - I_{ЭУММ}(t) - I_{СП1}(t) = \quad (1.1)$$

$$= I_{H1} - I_{ЭУММ} - I_{СП1}, \quad (1.2)$$

где

– I_{H1} – принятое для рассматриваемого случая постоянное действующее значение тока нагрузки на интервале времени от t_0 до t_1 ;

– $I_{ЭУММ}$ – принятое для рассматриваемого случая постоянное действующее значение тока ЭУММ на всем периоде T_c ;

– $I_{СП1}$ – действующее значение тока СП на интервале от t_0 до t_1 .

На интервале времени от t_1 до t_2 , когда $(I_H(t) - I_{ЭУММ}(t) < I_{Пmax})$, входной ток СП, посредством которого осуществляют заряд НЭ, принимает такие значения, чтобы ток потребления $I_{П}(t)$ не превышал $I_{Пmax}$. В этом случае дополнительно происходит передача электрической энергии от магистральной сети посредством СП в НЭ и ток потребления определяют из выражения:

$$I_{П2}(t) = I_{H2}(t) - I_{ЭУММ}(t) + I_{СП2}(t) = \quad (1.3)$$

$$= I_{H2} - I_{ЭУММ} + I_{СП2}(t), \text{ где} \quad (1.4)$$

– I_{H2} – принятое для рассматриваемого случая постоянное действующее значение тока нагрузки на интервале времени от t_1 до T_c ;

– $I_{СП2}(t)$ – действующее значение тока СП на интервале от t_1 до t_2 .

Следует заметить, что длительность интервала времени от t_1 до t_2 зависит от величины энергии, которую НЭ передал в нагрузку на интервале времени от t_0 до t_1 , и от энергии, которую может передать магистральная сеть при заданном ограничении $I_{Пmax}$. При идеальных СП и НЭ с учетом баланса мощностей указанный интервал времени вычисляют следующим образом:

$$t_2 - t_1 = \frac{|I_{СП1}|}{|I_{СП2}|} (t_1 - t_0) = \frac{I_{Н1} - I_{ЭУММ} - I_{Пmax}}{I_{Н2} - I_{ЭУММ} + I_{П2}(t)} (t_1 - t_0), \quad (1.5)$$

В момент времени t_2 происходит полный заряд НЭ. В результате на интервале времени от t_2 до конца рассматриваемого периода (T_c), когда ($I_H(t) - I_{ЭУММ}(t) < I_{Пmax}$), выходной ток СП принимает нулевые значения ($I_{СП}(t) = 0$). В этом случае ток потребления вычисляется как:

$$I_{ПЗ}(t) = I_{НЗ}(t) - I_{ЭУММ}(t) = \quad (1.6)$$

$$= I_{НЗ} - I_{ЭУММ} \quad (1.7)$$

Известно, что мощность потребления из магистральной сети ограничена допустимым нагревом в проводах обмоток генераторов электростанций, ЛЭП и силовых трансформаторов подстанций, причиной которого является уровень действующего значения протекающего тока. Очевидно, что чем выше среднеквадратичное значение тока ($I_{В1ск}$) потребления А1 и А2 за период T_c , тем больше действующее значение тока, забираемого из магистральной сети:

$$I_{В1ск} = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} [I_{П}(t) + I_{ЭУММ}(t)]^2 dt} \quad (1.8)$$

С учетом принятых однородных участков кривой тока нагрузки после подстановки (1.2), (1.4) и (1.7) выражение (1.8) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} I_{В1ск} &= \sqrt{\frac{1}{T_c} \left[\int_0^{t_1} (I_{Пmax} - I_{ЭУММ})^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} (I_{Н2} + I_{СП2}(t))^2 dt + \int_{t_2}^{T_c} (I_{Н2})^2 dt \right]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T_c} [(I_{Пmax} - I_{ЭУММ})^2 \Delta t_1 + (I_{Н2} + I_{СП2}(t))^2 \Delta t_2 + I_{Н2}^2 \Delta t_3]}, \quad (1.9) \end{aligned}$$

где $\Delta t_1 = t_1$, $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ и $\Delta t_3 = T_c - \Delta t_1 - \Delta t_2$ – интервалы характерных участков рассматриваемого процесса.

Выражение (1.9) имеет три взаимозависимые переменные $I_{СП2}$, Δt_2 и Δt_3 , которые связаны между собой выражением (1.5). Для поиска условия, при котором ток $I_{В1СК}$ будет иметь минимальные значения, найдем из выражения (1.5) переменную $I_{СП2}$, подставим в выражение (1.9). Затем полученное выражение продифференцируем по Δt_2 для поиска оптимального времени заряда, при котором потребление электроэнергии из магистральной сети будет сведено к минимуму:

$$\left(\frac{1}{T_c} \left((I_{Пmax} - I_{ЭУММ})^2 \Delta t_1 + \left(I_{H2} + \frac{I_{СП1} \Delta t_1}{\Delta t_2} \right)^2 \Delta t_2 + I_{H2}^2 \Delta t_3 \right) \right)' = 0 \quad (1.10)$$

$$\left(\frac{1}{T_c} \left(\frac{I_{H2}^2 \Delta t_2^2 + 2I_{H2} I_{СП1} \Delta t_1 + I_{СП1}^2 \Delta t_1^2}{\Delta t_2} + I_{H2}^2 (T_c - \Delta t_1 - \Delta t_2) \right) \right)' = 0 \quad (1.11)$$

$$I_{СП1}^2 \frac{\Delta t_1^2}{\Delta t_2^2} = 0 \quad (1.12)$$

Выражение (1.12) позволяет теоретически показать, что минимальное действующие значения тока потребления из магистральной сети достигается при неограниченно большом времени заряда НЭ. Однако в случае ЭЭК процесс заряда НЭ имеет следующее ограничение по времени:

$$\Delta t'_2 = T_c - \Delta t_1. \quad (1.13)$$

Потребление тока из магистральной сети будет принимать минимальное значение в случае $\Delta t_2 = \Delta t'_2$. Принимая во внимание вышесказанное, выражение для расчета тока заряда НЭ принимает следующий вид:

$$I_{\text{СП2}} = \frac{I_{\text{СП1}} \Delta t_1}{T_c - \Delta t_1}. \quad (1.14)$$

Таким образом, с целью снижения зависимости (снижение среднеквадратичного значения тока) от магистральной сети необходимо осуществлять прогнозирование длительности заряда НЭ с учетом графика потребления электроэнергии в рассматриваемом ЭЭК, а возможные кратковременные недостатки электрической энергии восполнить за счет электрической энергии из магистральной сети, в случае подключения к ней.

1.4 Анализ стратегий группового управления

Стратегия группового управления (ГУ) подразумевает способ действий по управлению большим количеством различных объектов ЭЭК, перед которыми поставлены общие цели [62-70]. При постановке задач, решаемых в данной диссертационной работе, в качестве рассматриваемых ЭЭК выступают авиационно-космические и автономно-наземные. Главной задачей ГУ является эффективное управление ЭЭК, который должен надежно обеспечивать потребителей электрической энергией.

Большой объем научных исследований по изучению и развитию стратегий ГУ выполнен как в области интеллектуальной робототехники, так и в области информационных систем. Тем не менее, в настоящее время возникли серьезные предпосылки для переноса существующего опыта использования стратегий ГУ на ЭЭК с большим количеством относительно независимых объектов.

При выборе стратегии ГУ предложено использовать следующие критерии:

- точность принятия решения;
- масштабируемость;
- сложность формализации управления;
- надёжность;
- время выработки решения (ВВР).

Критерий точности принятия решения ГУ определяет погрешность между требуемым и полученным результатом поставленной задачи [65]. Примером точности принятия решения является отклонение в рамках ГУ между реальным и прогнозируемым графиком потребления электрической энергии в течение выбранного промежутка времени.

Критерий масштабируемости характеризует свойство ЭЭК при выбранной стратегии ГУ выполнять поставленные задачи в случае увеличения количества объектов [66]. Например, авиационно-космический ЭЭК с выбранной стратегией ГУ будет иметь сравнительно высокий критерий масштабируемости, если при

подключении новых модулей не надо будет менять алгоритм работы и программное обеспечение системы управления.

Критерий сложности формализации управления определяет потенциальные возможности математического и программного описания алгоритма требуемых действий, включая процессы накопления, хранения, обработки исходных и промежуточных данных для выполнения ЭЭК поставленных задач [67].

Критерий надежности характеризует потенциальную способность ЭЭК при выбранной стратегии ГУ сохранять свои технические качества и свойства при выходе из строя тех или иных элементов системы управления [68]. Если выход из строя любого элемента системы управления не повлияет существенно на обеспечение электропитанием основных потребителей, то ЭЭК с выбранной стратегией ГУ имеет высокий критерий надежности.

В качестве критерия ВВР принят интервал времени, в течение которого ЭЭК посредством выбранной стратегии ГУ выполнит конкретную поставленную задачу [62, 63]. Анализ технической литературы показал, что существует целый класс стратегий с централизованным ГУ, который в свою очередь целесообразно подразделить на стратегии единоначального и иерархического управления [69].

При единоначальном ГУ сбор и обработку всех данных от объектов, функции принятия решений и передачи управляющих команд на объекты ЭЭК выполняет центральное управляющее устройство (ЦУУ). С одной стороны, ЦУУ обладает всем объемом входной и выходной информации, что позволяет сравнительно точно выполнять поставленные задачи и достаточно просто формализовать управление. С другой стороны, ЦУУ практически всегда требует изменения алгоритма управления и программного обеспечения при вводе новых объектов, а главное определяет наиболее уязвимое звено ЭЭК, которое требует резервирования.

Иерархическое ГУ представляет собой многоуровневую структуру, состоящую из ЦУУ и локальных управляющих устройств (ЛУУ), которые осуществляют сбор и обработку локальных данных, а также выполнение

делегированных функций принятия решений и передачи управляющих команд на объекты ЭЭК. В этом случае ЭЭК имеет сравнительно высокий уровень масштабируемости, так как изменения в алгоритме управления и программном обеспечении чаще всего связаны с ЛУУ. С другой стороны, наличие ЦУУ определяет потенциальную ненадежность ЭЭК

Другим классом стратегий ГУ является децентрализованное управление, которое целесообразно подразделить на стратегии коллективного и стайного управления.

При коллективном ГУ каждый объект ЭЭК имеет собственное управляющее устройство (УУ), которое осуществляет сбор и обработку данных, функции принятия решений и передачи управляющих команд на собственные объекты. При этом существуют каналы обмена информацией между различными объектами. В этом случае, УУ не обладает всей полнотой информации и, соответственно, ЭЭК с выбранной стратегией имеет средний уровень точности принятия решения и среднюю сложность формализации управления. С другой стороны, отсутствие ЦУУ определяет сравнительно высокий уровни масштабируемости и надежности.

В отличие от коллективного при стайном ГУ отсутствует канал обмена информацией. При такой стратегии УУ владеет информацией только о собственном объекте, что определяют низкий уровень точности принятия решения и высокую сложность формализации управления. При этом отсутствие ЦУУ также определяет сравнительно высокие уровни масштабируемости и надежности.

Следует отметить, что ВВР имеет четкую зависимость от количества объектов для различных классов ГУ [67, 69, 70, 92], что представлено на рисунке 1.9. На данном графике:

- t - время выработки решения (ВВР);
- n - число объектов ЭЭК;

- кривые 1-4 - значение ВВР при единоличном, иерархическом, коллективном и стайном ГУ соответственно.

Как видно из рисунка 1.9 значение ВВР зависит от n при единоначальном и иерархическом ГУ экспоненциально, а при коллективном ГУ - линейно. В тоже время при стайном ГУ значение ВВР вообще не зависит от n . Сравнительный анализ принятых критериев стратегий ГУ представлен в таблице 1.1 [92].

Таблица 1.1 Сравнительный анализ принятых критериев стратегий ГУ

Наименование критерия	Единоначальное ГУ	Иерархическое ГУ	Коллективное ГУ	Стайное ГУ
Уровень точности принятия решения	Высокий	Средний	Низкий	Самый низкий
Уровень масштабируемости	Низкий	Средней	Высокий	Высокий
Уровень формализации управления	Высокий	Средний	Низкий	Низкий
Уровень надежности	Низкий	Низкий	Высокий	Высокий
Зависимость ВВР	Экспоненциальная	Экспоненциальная	Линейная	Не зависит



Рисунок 1.9. Зависимости ВВР от количества объектов для различных классов
ГУ

Обобщенная классификация стратегий ГУ приведена на рисунке 1.10. Анализ таблицы 1.1 показывает, что в перспективных авиационно-космических ЭЭК целесообразно использовать стратегию коллективного ГУ, которая по сравнению со стайным ГУ имеет более высокую точность принятия решения, а по сравнению с централизованными стратегиями ГУ обладает более высокой надежностью.

В автономно-наземных ЭЭК, которые имеют большое количество элементов также целесообразно применять коллективное ГУ, благодаря хорошим показателям ВВР, точности принятия решения, надежности и легкой масштабируемости. Это обусловлено тем, что все достоинства централизованных стратегий при большом количестве элементов ЭЭК существенно теряют значимость по сравнению с ростом ВВР.

Приведенный пример с рассмотренной автономно-наземной ЭЭК в параграфе 1.3 показал необходимость прогнозирования не только потребления электроэнергии, но и работы (заряд/разряд) накопителей энергии, что требует решение задачи по управлению группами элементов комплекса (накопители энергии и генерирующие установки) с учётом графика потребления электроэнергии группами потребителей и/или наличия магистральной сети.

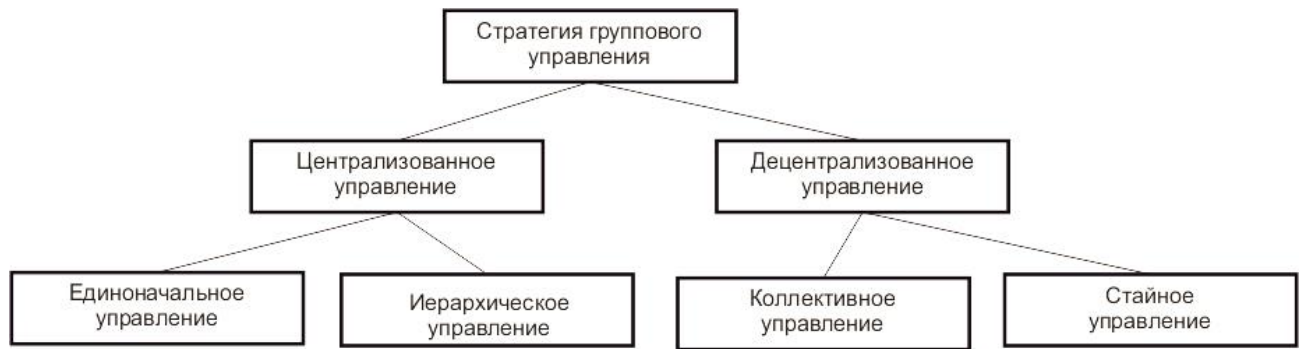


Рисунок 1.10. Обобщенная классификация стратегий ГУ

1.5 Способ реализации перспективных электроэнергетических комплексов

В настоящей диссертационной работе на основе теории коллективного управления получил развитие многоагентный подход для создания системы управления перспективными ЭЭК. Предложенная система управления обладает высокими показателями по точности и времени принятия решения, надежности, легкости масштабирования (расширение системы в кратчайшие сроки); обеспечивает рациональное перераспределение электрической энергии между потребителями и источниками энергии, а также работу генерирующих установок, в том числе с применением альтернативных источников энергии, в номинальном режиме. Оригинальность разработанного многоагентного подхода в ЭЭК подтверждена патентом на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.16.

Новизна предлагаемой системы управления заключается в использовании программно-аппаратного «посредника» – агента между элементами ЭЭК (генерируемые мощности, накопители энергии, потребители) и системы управления, а также в прогнозировании работы комплекса на краткосрочный и долгосрочный периоды времени. Определение понятий агентов и их функционирование в ЭЭК раскрыты во второй главе настоящей диссертационной работы.

Структурная схема многоагентного подхода к управлению ЭЭК представлена на рисунке 1.11 и включает следующие элементы: двунаправленный преобразователь переменного тока в постоянный (А5), блок управления двунаправленным преобразователем (А10), включающий контрольно-измерительный блок, источник постоянного тока (А8) (например, солнечная батарея), накопитель энергии (А6), силовое (распределительное) устройство (А2), группа нагрузок (А3.1, А3.2),

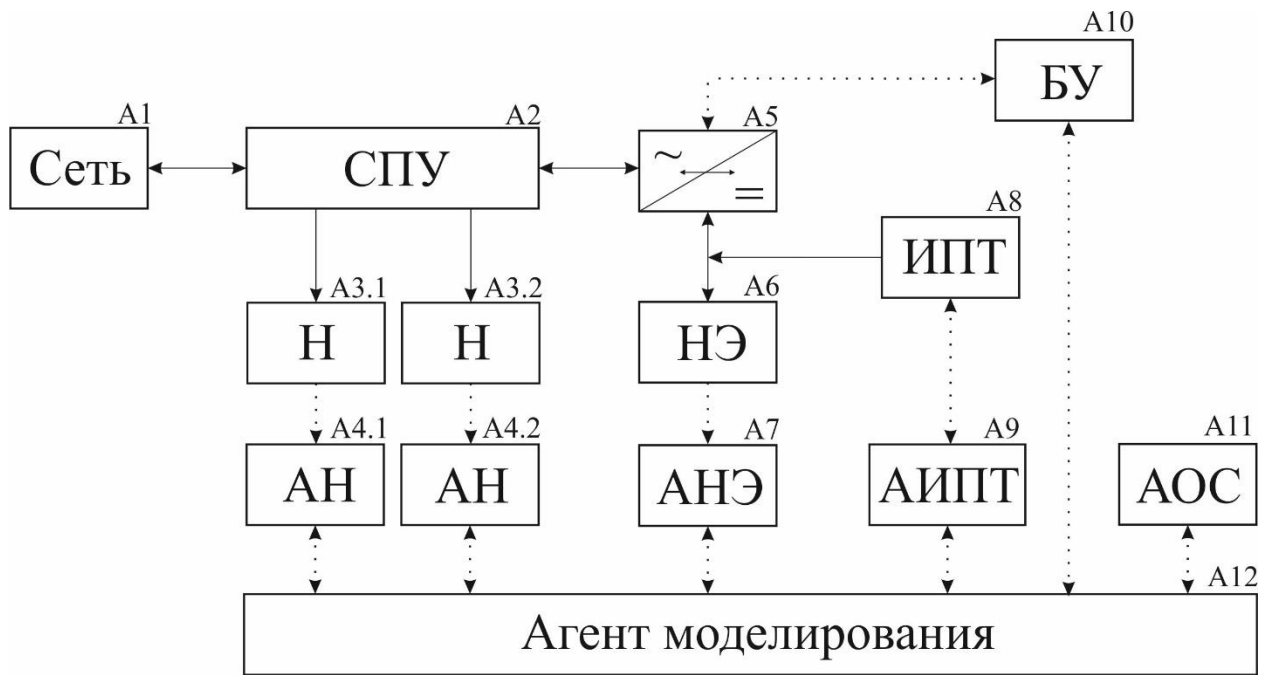


Рисунок 1.11. Структурная схема ЭЭК с многоагентным подходом к управлению

агент нагрузок (A4.1, A4.2), агент накопителя энергии (A7), агент источника постоянного тока (A9), агент окружающей среды (A11), агент моделирования (A12), источник переменного тока (магистральная сеть) (A1). Работа перечисленных агентов рассмотрена во второй и третьей главах диссертации.

Рассматриваемая ЭЭК функционирует следующим образом. В процессе работы многоагентной системы управления агент нагрузки (A4.1, A4.2) собирает и непрерывно передает агенту моделирования (A12) информацию об уровне потребления электрической энергии в настоящий момент времени и его прогнозируемый график на выбранный период времени. Аналогичным образом агент источника постоянного тока (A9) передает агенту моделирования информацию о текущем уровне генерируемой электроэнергии и его прогнозируемые значения на выбранный промежуток времени. Методы реализации прогнозирования раскрыты в п. 3.3 настоящей диссертационной работы.

Ключевыми агентами, которые определяют оригинальность работы предложенной многоагентной системы, являются агент окружающей среды (A11) и агент моделирования (A12). Агент окружающей среды (A11) получает необходимую для процесса прогнозирования агентами нагрузки (A4.1, A4.2) и источника постоянного (A9) тока информацию о прогнозе погоды от метеорологических служб. При этом агент моделирования (A12) обрабатывает полученную от других агентов информацию, на основании которой перераспределяет электроэнергию в ЭЭК.

Перераспределение энергии в комплексе осуществляется за счет двунаправленного преобразователя (A5) и накопителя энергии (A6), агент которого собирает информацию о текущем уровне накопленной энергии, прогнозирует возможные параметры работы накопителя энергии (время, скорость и уровень передачи накопленной энергии в систему и т.д.) на краткосрочный и долгосрочный периоды времени и передает агенту моделирования (A12).

Двухнаправленный преобразователь с блоком управления (A10), обеспечивает преобразование напряжения постоянного тока в переменное для питания, наравне с источником переменного тока (магистральная сеть) (A1), в случае подключения к нему, потребителей (A4.1, A4.2), которые подключаются к системе через силовое (коммутационное) устройство (A2).

Вместе с тем при внедрении многоагентного подхода в систему управления ЭЭК не существует ограничений по типу и количеству используемых энергетических установок.

Кроме того, неотъемлемой частью реализации многоагентного подхода в управлении ЭЭК является разработка программного продукта, что было сделано в рамках проведенной исследовательской работы. На программный продукт получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016617807 от 14.07.2016.

Применение многоагентного подхода к авиационным электроэнергетическим комплексам подразумевает выделение следующих агентов: агент нагрузки (АН), агент силовой установки (АСУ), агент накопителей энергии (АНЭ) и агент моделирования. Данный подход позволяет прогнозировать различные режимы работы электроэнергетического комплекса при эксплуатации авиационной техники. На рисунке 1.12 представлена структурная схема ЭЭК БЭС с использованием многоагентного подхода к управлению. Расшифровка блоков структурной схемы представлена на странице 26.

Таким образом, предложенный многоагентный подход в ЭЭК позволяет за счет прогнозирования уровня генерации/потребления электрической энергии и разбиения системы управления на агенты рационально перераспределять электрическую энергию.

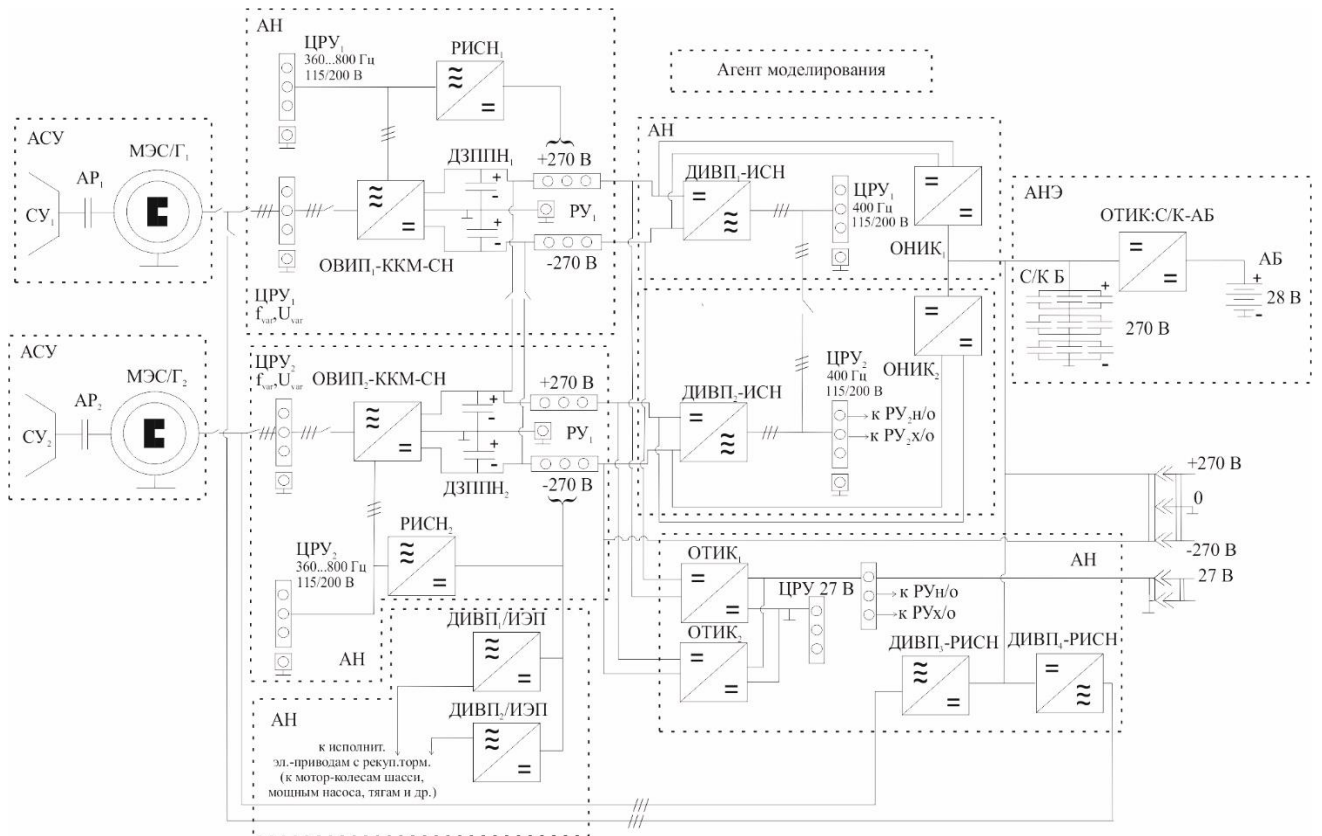


Рисунок 1.12. Структурная схема ЭЭК БЭС с многоагентным подходом к управлению

Выводы по первой главе

1. Проведённый обзор литературы и анализ функционирования существующих и перспективных авиационно-космических и автономно-наземных электроэнергетических комплексов (ЭЭК), включающих различные типы генерирующих установок, показал необходимость учета большого числа факторов: время выработки решения, надежность, точность системы управления и др.

2. Анализ структуры бортовых магистральных каналов системы электроснабжения летательных аппаратов с взаимно-независимыми подсистемами позволил сформулировать основные требования к проектируемым авиационно-космическим ЭЭК.

3. Сравнительный анализ стратегий управления ЭЭК с большим количеством электроэнергетических установок и групп потребителей показал целесообразность использования коллективного группового управления, что обусловлено линейной зависимостью времени выработки решения от числа элементов в системе, высокой надежностью и точностью.

2 МНОГОАГЕНТЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ

2.1 Классификация функциональных агентов

Многоагентный подход к управлению основан на использовании интеллектуального посредника, так называемого агента, который посредством обработки данных от других агентов самостоятельно решает локальные задачи. [71-79].

При этом каждый агент не имеет общего представления о глобальной цели, а решает только собственную локальную задачу. В качестве примера на рисунке 2.1 представлена многоагентная система управления (МСУ), которая содержит множество агентов A_1 - A_{12} . В такой МСУ весь спектр задач по заданным правилам распределяется между всеми агентами. Каждый агент проводит обмен данными с другими агентами, организует сбор собственной информации и осуществляет по индивидуальным алгоритмам решение поставленных задач. При этом сложность архитектуры построения МСУ обусловлена многообразием возможных математических и программных средств, используемых при выполнении задач, поставленных перед агентом, разнообразием вариантов взаимодействия агентов между собой, сложностью описания компонентов внешней среды, в которой функционируют агенты и т.п.

В настоящее время идея многоагентного подхода постепенно находит свое развитие в области управления электроэнергетическими комплексами (ЭЭК) [79-90, 91, 92]. В связи с этим, для реализации поставленной цели по исследованию и разработке управления ЭЭК создается множество агентов и, организуя между ними эффективное информационное взаимодействие, формируется МСУ.

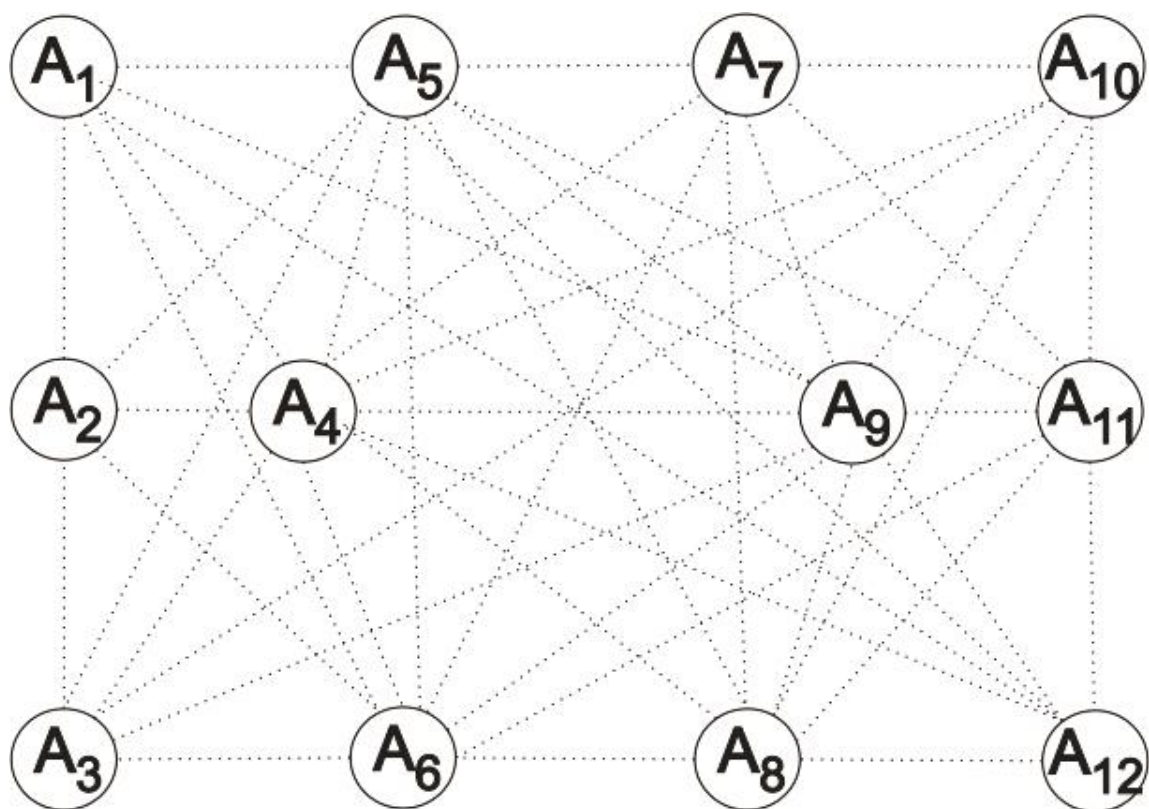


Рисунок 2.1. Пример информационных связей в обобщенной МСУ

Применительно к системам управления ЭЭК идея многоагентного подхода находится еще на начальной стадии становления, что требует научных исследований по формализации основных понятий и компонентов МСУ. Очевидно, что, развивая теорию и внедряя МСУ, при выбранной стратегии коллективного группового управления (ГУ), основанной на использовании общего информационного канала, можно повысить эффективность в управлении ЭЭК.

В связи с этим, в данной диссертационной работе предложено применение МСУ с выбранной стратегией коллективного ГУ как для авиационно-космических, так и для автономно-наземных ЭЭК.

Основополагающим элементом МСУ является агент управления. Агентом управления является программно-аппаратный модуль любого объекта электроэнергетического комплекса, который осуществляет: обмен данными с другими агентами, сбор собственной информации, адаптацию к текущей среде («самообучение») и решение поставленных задач управления по индивидуальному алгоритму.

Предлагается разделить все агенты МСУ на активные и служебные [79-90, 91, 92]. Активные агенты непосредственно участвуют в управлении генерацией, накоплением и потреблением электрической энергии. Служебные агенты выполняют роль вспомогательных элементов МСУ, которые снижают информационную и вычислительную нагрузку на активные агенты.

Перечень активных агентов МСУ применительно к ЭЭК с описанием условных обозначений и основных функций представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Перечень активных агентов МСУ ЭЭК

Название агента	Принятое обозначение	Функции
Агент ветроэнергетической установки	АВЭУ	<ul style="list-style-type: none"> - сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии конкретной ЭУММ; - управление генерацией электрической энергии конкретной ЭУММ; - обмен данными между агентами.
Агент солнечной энергетической установки	АСЭУ	
Агент малых гидроэлектростанций	АМГЭ	
Агент малых тепловых электростанций	АМТЭ	
Агент нагрузки	АН	<ul style="list-style-type: none"> - сбор и хранение в базе данных первичной информации о потреблении электрической энергии данной группой нагрузок; - прогнозирование мощности потребления данной группой нагрузок; - управление процессом потребления электрической энергии данной группой нагрузок; - обмен данными с другими агентами.
Агент накопителей энергии	АНЭ	<ul style="list-style-type: none"> - сбор и хранение в базе данных первичной информации о расходе и накоплении электрической энергии данным НЭ; - управление расходом и накоплением электрической энергии данным НЭ; - прогнозирование расхода и накопления электрической энергии данным НЭ; - обмен данными с другими агентами.
Агент внешней сети	АВС	<ul style="list-style-type: none"> - сбор и хранение в базе данных первичной информации о состоянии магистральной и локальной сети; - управление подключением / отключением магистральной сети и присоединенных ЭУММ; - обмен данными с другими агентами.

Перечень служебных агентов МСУ ЭЭК с описанием условных обозначений и основных функций представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Перечень служебных агентов МСУ ЭЭК

Название агента	Принятое обозначение	Функции
Агент окружающей среды	АОС	<ul style="list-style-type: none"> - сбор и хранение в базе данных первичной информации об окружающей среде (температуре, скорости и направлении ветра, освещенности и т.п.); - прогнозирование параметров окружающей среды; - обмен данными с другими агентами.
Агент моделирования	АМ	<ul style="list-style-type: none"> - моделирование процессов в данной системе электроснабжения; - выработка команд для активных агентов; - обмен данными с другими агентами.

Вышеизложенный многоагентный подход в ЭЭК является оригинальным решением, и его новизна подтверждается патентом на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016 [85].

На рисунке 2.2 представлено взаимодействие агентов МСУ ЭЭК, содержащего набор различных энергетических установок малой мощности (ЭУММ), накопителей энергии (НЭ) и группы нагрузок H_1-H_5 .

В общем виде процесс взаимодействия можно разбить на три фазы. В первой фазе активные агенты МСУ осуществляют сбор и хранение в базе данных первичной информации, полученной посредством использования аппаратно-измерительных средств, соответствующих объектов ЭЭК. При этом каждый активный агент определяет и прогнозирует собственные процессы: генерирования, накопления и потребления электрической энергии. Служебный агент АОС собирает информацию о погодных условиях и отправляет ее активным агентам для прогнозирования рабочих процессов.

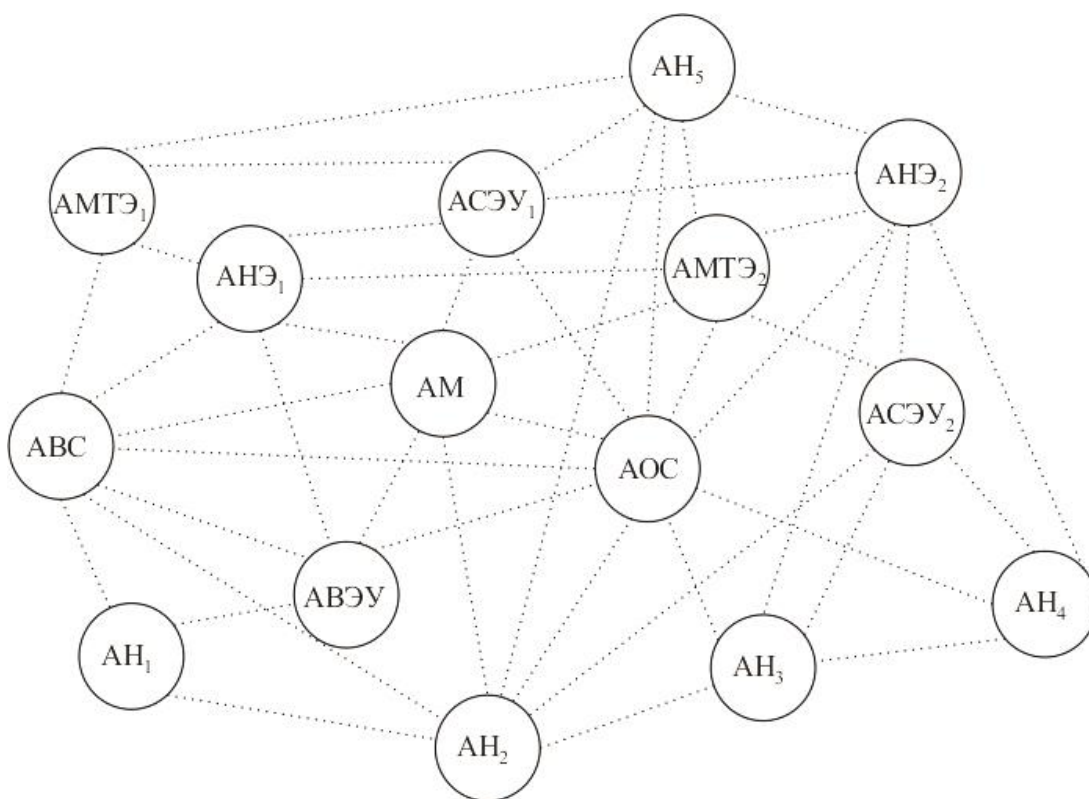


Рисунок 2.2. Взаимодействие агентов МСУ электроэнергетическими комплексами

Во второй фазе АМ получает и обрабатывает данные от агентов МСУ, на базе которых осуществляет моделирование процессов с целью выработки команд для активных агентов. Например, АМ на основе данных АНЭ об остаточном заряде, максимальном токе разряда/заряда, типе НЭ, прогнозируемом графике работы всех генерирующих установок и циклограмм потребления электрической энергии формирует команды процесса заряда/разряда для соответствующих НЭ.

В третьей фазе активные агенты МСУ с учетом команд, полученных от АМ, осуществляют управление соответствующими объектами ЭЭК по заданному алгоритму.

Таким образом, МСУ обеспечивает выполнение основных задач:

- управление в реальном времени процессами генерации, накопления и потребления электрической энергии;

- прогнозирование процессов генерации, накопления и потребления электрической энергии на краткосрочный период времени, что позволяет оптимизировать функционирование ЭУММ и НЭ;

- прогнозирование процессов генерации, накопления и потребления электрической энергии на долгосрочный период времени (свыше одного месяца), что позволяет своевременно нарастить новые или перераспределить существующие мощности без снижения каких-либо последствий для потребителей.

Настоящая работа представляет собой дальнейшее развитие многоагентного подхода применительно к управлению ЭЭК.

2.2 Активные агенты системы управления

2.2.1 Агент ветроэнергетической установки

В составе ЭЭК агент ветроэнергетической установки (АВЭУ) обеспечивает рациональное управление (включая прогнозирование процессов на краткосрочный и долгосрочный периоды времени) ветроэнергетической установкой (ВЭУ) на основе информации, полученной от агента моделирования (АМ) и агента окружающей среды (АОС). Прогнозирование процессов позволяет при высокой зависимости работы ВЭУ от погодных условий сбалансировать необходимый уровень электроэнергии для потребителя за счёт других силовых установок и накопителей энергии.

Одним из основных параметров ветроэнергетической установки является выходная мощность, которая зависит от параметров окружающей среды, в первую очередь – параметров воздушного потока. Мощность воздушного потока определяется следующим образом [93]:

$$P_{в.м} = \frac{1}{2} \rho A v_{в}^3, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность воздуха, $v_{в}$ – скорость ветра, $A = \pi R^2$ – ометаемая площадь (поверхность, описываемая лопастями несущего винта при их вращении), R – радиус ветроколеса.

В общем виде механическая мощность турбины (колеса) ВЭУ зависит от ометаемой площади и коэффициента использования энергии ветра:

$$P_{тр.м} = P_{в.м} c(\lambda, \beta) A, \quad (2.2)$$

где c – коэффициент использования энергии ветра, β – угол поворота лопасти, $\lambda = \frac{\omega r}{v_{в}}$ – коэффициент быстроходности, рассчитываемый как отношение окружной скорости конца лопасти ωr к скорости ветра $v_{в}$ [92-95].

С учетом соотношения (2.1) выражение для определения механической мощности турбины (колеса) ВЭУ принимает вид:

$$P_{тр,m} = \frac{1}{2} \pi \rho c(\lambda, \beta) R^2 v_B^3. \quad (2.3)$$

Математическая модель коэффициента использования энергии описывается следующим образом [5]:

$$c(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda, \quad (2.4)$$

где λ_i – коэффициент связи угла поворота и коэффициента быстроходности;

$c_1 - c_6$ – вспомогательные коэффициенты.

При этом вспомогательные коэффициенты, полученные экспериментальным путем, имеют значения [96]:

$$c_1 = 0,5176, c_2 = 116, c_3 = 0,4, c_4 = 5, c_5 = 21, c_6 = 0,0068.$$

Коэффициент связи λ_i определяет следующее соотношение между углом поворота и коэффициентом быстроходности [96]:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}. \quad (2.5)$$

На рисунке 2.3 представлены зависимости коэффициента использования энергии ветра от коэффициента быстроходности при различных значениях угла поворота лопатки ветроколеса $\beta = 0^\circ, \beta = 1^\circ, \beta = 2^\circ, \beta = 3^\circ$ соответственно. Из приведенного графика видно, что коэффициент использования энергии ветра имеет максимальное значение при $\beta = 0^\circ$.

С учетом данного вывода и после подстановки выражения (2.5) в (2.4) получена зависимость максимального коэффициента использования энергии ветра от коэффициента быстроходности:

$$c_{max}(\lambda) = c_1 \left(\frac{c_2 \lambda}{(1 - 0,035\lambda)} - c_4 \right) e^{\frac{-c_5 \lambda}{1 - 0,035\lambda}} + c_6 \lambda. \quad (2.6)$$

Энергетическую характеристику работы ВЭУ можно разделить на три зоны.

Первая зона характеризует запуск ветроколеса при условии, что скорость ветра превысила необходимое минимальное значение ($v_{min} < v_{cutIn}$).

Во второй зоне ВЭУ выходит на номинальный режим работы, при котором достигается максимальное использование энергии ветра.

Третья зона характеризует превышение скорости ветра от номинального значения, при котором необходимо ограничить отбираемую мощность от ветроколеса. Данное ограничение зависит от допустимого значения максимальной мощности генератора и механической прочности конструкции ветроколеса. При этом выполнение ограничения осуществляют либо путем поворота гондолы или посредством изменения угла поворота лопаток ветроколеса [97].

В качестве примера на рисунке 2.4 построена зависимость механической мощности ВЭУ «V 82 – 1.65MW» компании *Vestas* от скорости ротора при различных скоростях ветра 5, 9, 12, 12,5 м/с соответственно. На графике видно, что с увеличением скорости ветра механическая мощность резко возрастает и начинает превышать расчетную номинальную мощность генератора P_{out} . В этом случае необходимо ограничить отбираемую мощность вышеуказанными методами. На рисунке 2.5 приведена зависимость коэффициента использования ветра от скорости ветра [92].

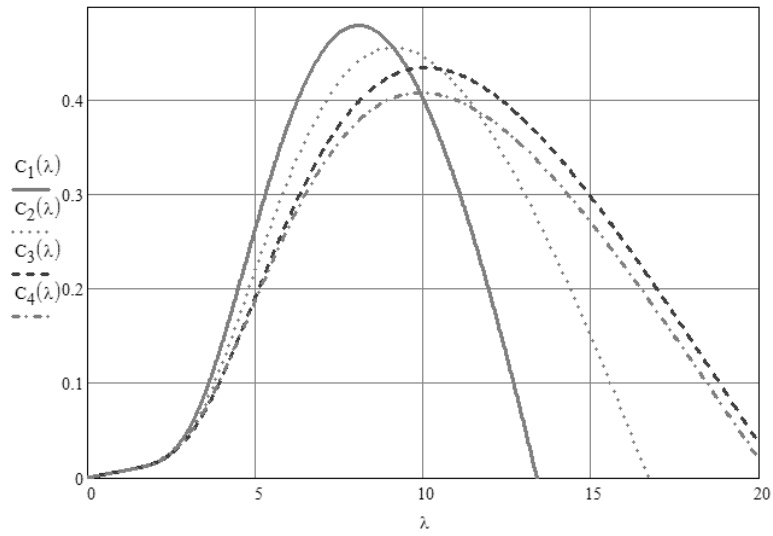


Рисунок 2.3. Зависимость коэффициента использования энергии ветра от коэффициента быстроходности при различных значениях угла поворота лопатки ветроколеса

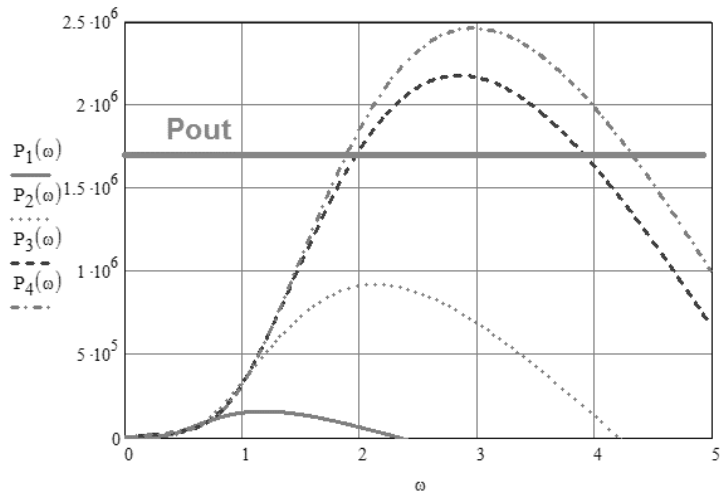


Рисунок 2.4. Зависимость механической мощности ВЭУ «V 82 – 1.65MW» компании Vestas от скорости ротора при различных скоростях ветра

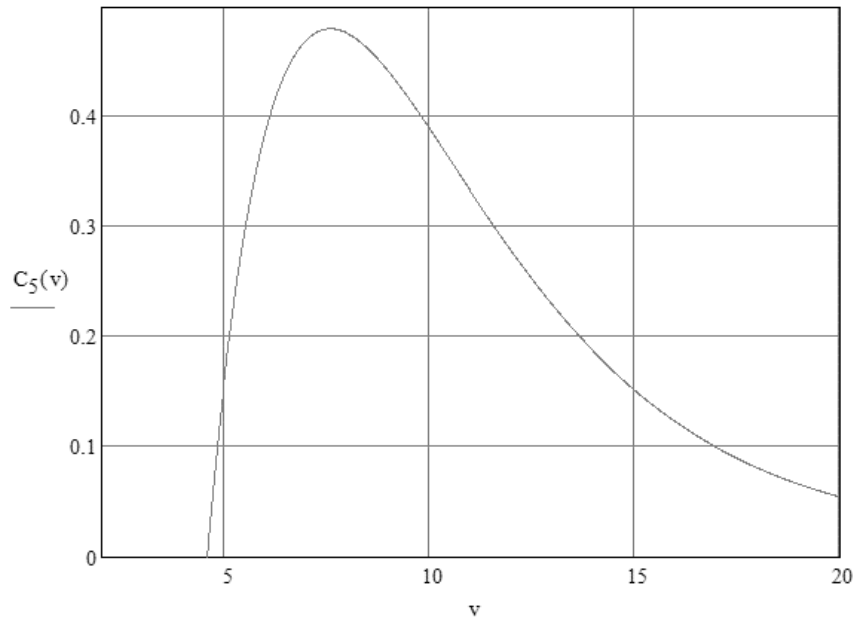


Рисунок 2.5. Зависимость коэффициента использования ветра от его скорости

С учетом выражения (2.3), а также коэффициентов полезного действия механической передачи (η_m) и генератора (η_g) зависимость генерируемой мощности ВЭУ имеет следующий вид:

$$P_{\text{э}} = P_{\text{тр.м}} \eta_m \eta_g = \frac{1}{2} \pi \rho c(\lambda, \beta) R^2 v_{\text{в}}^3 \eta_m \eta_g, \quad (2.7)$$

где $P_{\text{тр.м}}$ – механическая мощность снимаемая с ветроколеса (Вт), c – коэффициент использования энергии ветра, β – угол поворота лопасти (град.), R – радиус ветроколеса (м), λ – коэффициент быстроходности, ρ – плотность воздуха (кг/м^3), $v_{\text{в}}$ – скорость ветра (м/с), $\eta_m \eta_g$ – коэффициенты полезного действия механической передачи генератора.

Модель на основе зависимости электрической мощности от параметров окружающей среды (плотности воздуха, скорости ветра) и конструктивных параметров ветроколеса, которые являются неизменными, позволяет прогнозировать вырабатываемую ВЭУ электрическую энергию на краткосрочный период времени для управления ЭЭК.

Зная максимальные значения коэффициента использования энергии ветра при заданных значениях скорости ветра, посредством интерполяции дискретных значений мощности $\sum_{i=1}^n P_{\text{э.и}}(t)$ выведена аналитическая функция расчета генерируемой мощности ВЭУ в единицу времени. В качестве метода интерполяции был выбран метод кусочно-полиномиальная интерполяция для предотвращения осциллирующего характера, как это происходит при использовании интерполяционных полиномов высокой степени [98]:

$$P_{\text{э}}(t) = UP_{\text{э.м}}(t), \quad (2.8)$$

где $P_{\text{э.м}}(t)$ – объединение кубических полиномов на каждом интервале $[t_n, t_{n+1}]$.

Кубический полином имеет следующий вид:

$$P_{\text{э.м}}(t) = a_n + b_n(t - t_n) - c_n(t - t_n)^2 + d(t - t_n)^3. \quad (2.9)$$

В режиме первой адаптации агента целесообразно использовать аналитическую функцию (2.8). В дальнейшем, в процессе работы ВЭУ эффективно применять эксплуатационную аналитическую функцию $P_{\text{э.экс}}(t)$ генерируемой мощности ВЭУ, которая основана на полученных в ходе эксплуатации данных $\sum_{j=1}^k P_{\text{э.экс}.j}(t)$. При этом рассматриваемая эксплуатационная аналитическая функция $P_{\text{э.экс}}$ будет уточняться в течение всего времени работы ВЭУ.

Аналитическая функция $P_{\text{э.экс}}(t)$, аналогично (2.8), получена с использованием объединения полиномов $\sum_{j=1}^k P_{\text{э.экс}.j}(t)$ и имеют следующий вид:

$$P_{\text{э.экс}}(t) = UP_{\text{э.экс}.m}(t) \quad (2.10)$$

где $P_{\text{э.экс}.m}(t) = a_n + b_n(t - t_n) - c_n(t - t_n)^2 + d(t - t_n)^3$ – объединение кубических полиномов на каждом интервале $[t_n, t_{n+1}]$.

В случае, если величина рассогласования между функциями $P_{\text{э.экс}}(t)$ и $P_{\text{э}}(t)$, выражаемая через дельта (Δ), превышает заданное значение ξ , то агент начинает использовать выражение (2.10).

При этом с помощью разработанного программного продукта на базе Web-технологий (приложение А) технический специалист или конечный потребитель сможет отслеживать и анализировать работу конкретного агента в реальном времени [88]. На рисунке 2.6 представлен пример разработанной программы для агента ВЭУ. На данном рисунке представлены основные параметры ВЭУ (номинальная выходная мощность в кВт, минимальная, максимальная и номинальная скорости ветра в м/с), а также прогнозируемая выходная мощность (график слева), вырабатываемая ВЭУ на следующие сутки и скорость ветра (график справа). Из графика выходной мощности ВЭУ (график слева) видно, что при повышении номинальной мощности, система ограничивает отбор энергии от ветроколеса для предотвращения механического повреждения конструкции установки [90, 92].



Parameter	Value
Nominal output:	1.650 kW
Cut-in wind speed	3.5 m/s
Cut-out wind speed	20 m/s
Nominal wind speed	13 m/s

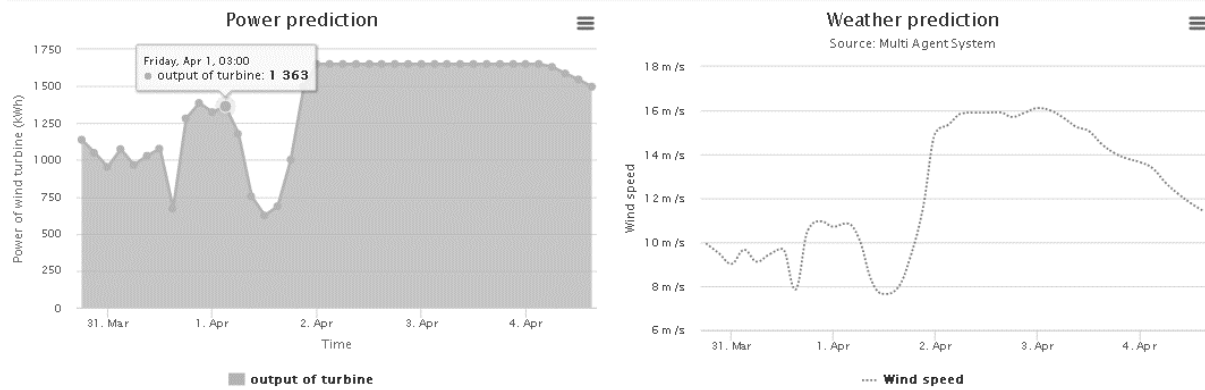


Рисунок 2.6. Пример работы агента ВЭУ

Из приведенного анализа математической модели были определены параметры окружающей среду, которые влияют на генерацию электроэнергии ВЭУ помимо скорости ветра.

В таблице 2.1 представлены основные функции АВЭУ, а также взаимодействие с другими агентами.

Таблица 2.1. Основные функции АВЭУ

Функции	Описание функций в ЭЭЖ
Сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии применительно к ВЭУ	<p>Перечень первичной информации включает в себя следующее:</p> <ul style="list-style-type: none"> - наименование основного оборудования и его заводские технические характеристики; - технические эксплуатационные характеристики основного оборудования на текущий момент; - даты и длительность плановых остановов для проведения технического обслуживания и различных видов ремонта основного оборудования на прогнозируемый период; - хранение за отчетный период данных о скорости ветра, давлении, температуре, выработанной электроэнергии.
Управление генерацией электрической энергии применительно к данной ВЭУ	<ul style="list-style-type: none"> - управление, включая этап прогнозирования выходной мощности на выбранный период времени с использованием данных о скорости ветра, температуре, давлении; - ограничение на превышение расчетной номинальную мощность генератора по параметрам: скорость ветра и технические эксплуатационные характеристики генератора на данный момент.
Обмен данными между агентами	<ul style="list-style-type: none"> - получение от АОС параметров окружающей среды на прогнозируемый и отчетный периоды: скорость ветра, давление, температура, времени года; - передача АМ данных об вырабатываемой электроэнергии на прогнозируемый период.

2.2.2 Агент солнечной энергетической установки

В составе ЭЭК агент солнечной энергетической установки (АСЭУ) обеспечивает рациональное управление солнечной энергетической установкой (СЭУ) на основе информации, полученной от агента моделирования (АМ) и агента окружающей среды (АОС), включая прогнозирование процессов на краткосрочный и долгосрочный периоды времени. Суточное и годовое колебание мощности, генерируемое солнечными батареями, в первоначальном приближении описывается из астрономических соображений [99] и пропорционально косинусу угла ($\cos\Theta$) между нормалью к поверхности панели и падающим светом (инсоляцией):

$$\cos \Theta = \cos \theta_p \cos \theta_s + \sin \theta_p \sin \theta_s \cos(\varphi_p - \varphi_s) \quad (2.11)$$

$$\cos \theta_s = \sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos h \quad (2.12)$$

$$\sin \varphi_s = \frac{-\cos \delta \sin h}{\sin \theta_s} \quad (2.13)$$

$$x = \frac{2\pi n}{365} \quad (2.14)$$

$$h = 15(t - 12) \quad (2.15)$$

$$\delta = 0.302 - 22.93 \cos x - 0.229 \cos 2x - 0.243 \cos 3x + 3.851 \sin x + 0.002 \sin 2x - 0.055 \sin 3x \quad (2.16)$$

где n – день от начала года, δ – отклонение плоскости экватора и солнечного потока, L – широта, h – коэффициент времени суток, φ_p – угол ориентации солнечной панели.

При эксплуатации СЭУ расчетная модель должна быть откалибрована для учета КПД солнечной батареи СЭУ и дополнена изменяющимися во времени коэффициентами затененности от окружающих ее объектов.

Дополнительным фактом, сказывающимся на КПД СЭУ, является облачность, влияние которой представлено на рисунке 2.7. Верхняя кривая отражает ток короткого замыкания на солнечной панели при отсутствии облачности, а нижняя кривая – при высокой облачности. Например, солнечная панель вырабатывает в ясный день электрическую энергию равную 1 кВтч, в то

время как в пасмурный день – 0,25 кВтч. Кроме того, солнечные панели обладают семейством вольтамперных характеристик, зависящих от освещенности. Исследование вольтамперных характеристик позволяет определять точку максимальной мощности на выходе СЭУ (рисунок 2.8) [99-102, 115].

Как уже было сказано, мощность, вырабатываемая солнечной панелью, зависит от инсоляции и имеет следующий вид:

$$P = \frac{P_{max} E}{1000}, \quad (2.17)$$

где P_{max} – максимальная мощность, вырабатываемая солнечной панелью (Вт), E – инсоляция (кВтч/м²).

Значения инсоляции задаются в таблицах для быстрой оценки эффективности солнечной установки от времени года.

Кроме того, при расчете КПД СЭУ учитывается влияние температуры окружающей среды. При повышении температуры окружающей среды КПД резко падает.

Зависимость КПД от температуры окружающей среды для солнечной панели немецкого производства SPP1.1 имеет вид:

$$\eta(t) = \eta(0) - 0.06t, \quad (2.18)$$

где $\eta(0)$ – КПД при нуле градусов по Цельсию солнечной батареи типа SPP1.1 (17.2 %), t – температура в градусах Цельсия.

Для солнечной батареи типа SPP1.1 КПД при нуле градусов равняется 17,2%, а при температуре равной 60 °С КПД снижается до 16,6 % [101].

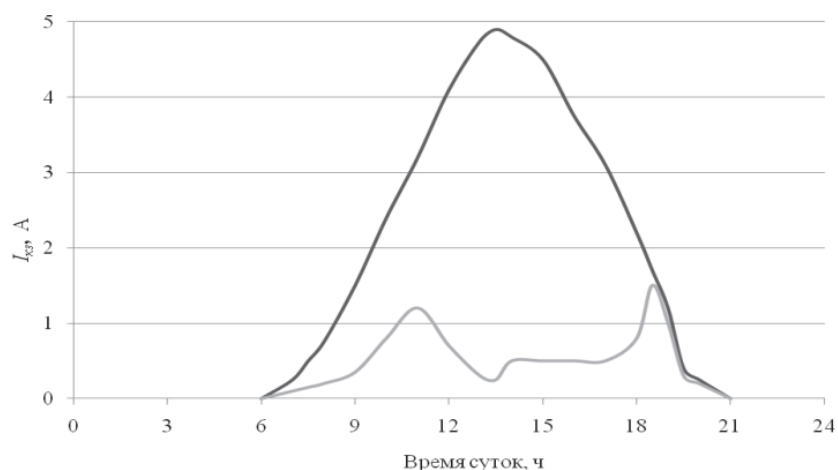


Рисунок 2.7. График тока короткого замыкания солнечной батареи в течение суток при различной облачности

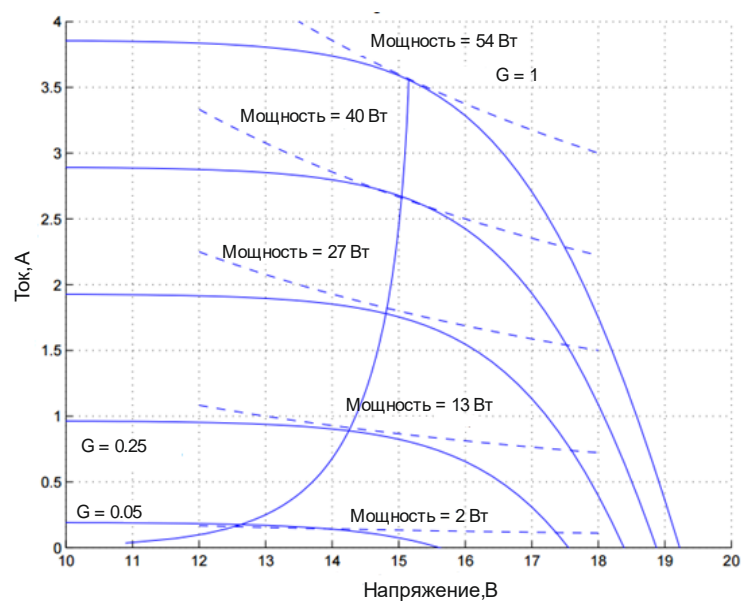


Рисунок 2.8. Вольтамперные характеристики солнечной панели в зависимости от освещенности

Для прогнозирования на краткосрочный период времени АСЭУ во время адаптации МСУ используются аналитические функции 2.17, 2.18. В дальнейшем, когда АСЭУ накопит достаточно информации о СЭУ и влиянии сезонности, облачности и затенения, агент начнет использовать их для прогнозирования выходной мощности солнечной установки на заданный период времени с более высокой точностью.

Из приведенного анализа математической модели были определены параметры окружающей среды, которые влияют на генерацию электроэнергии солнечной энергетической установкой: инсоляция, облачность, температура окружающей среды. В таблице 2.2 представлены основные функции АСЭУ, а также взаимодействие с другими агентами.

Таблица 2.2. Основные функции АСЭУ

Функции	Описание функций в ЭЭК
Сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии применительно к СЭУ	Перечень первичной информации включает в себя следующее: <ul style="list-style-type: none"> - наименование основного оборудования и его заводские технические характеристики; - технические эксплуатационные характеристики основного оборудования на текущий момент; - даты и длительность плановых отключения установки для проведения технического обслуживания и различных видов ремонта основного оборудования на прогнозируемый период; - хранение за отчетный период следующих данных: температуру, уровни влажности воздуха и облачности, количество генерируемой электроэнергии.
Управление генерацией электрической энергии применительно к данной СЭУ	<ul style="list-style-type: none"> - прогнозирование выработки электроэнергии на выбранный период времени с использованием данных об облачности, температуре, времени года и суток; - управление (ориентацией/ поворотом панелей, мощностью и т.д.).
Обмен данными между агентами	<ul style="list-style-type: none"> - получение от АОС параметров окружающей среды на прогнозируемый и отчетный периоды времени; - передача в АМ данных о вырабатываемой электроэнергии на прогнозируемый период времени.

2.2.3 Агент малых гидроэлектростанций

В составе ЭЭК агент малых гидроэлектростанций (АМГЭС) обеспечивает оптимальное управление малой гидроэлектростанцией (МГЭС) на основе информации, полученной от агента моделирования (АМ) и агента окружающей среды (АОС), включая прогнозирование процессов на краткосрочный и долгосрочный периоды времени.

Одним из основных показателей гидротурбины является мощность, которая зависит от напора и расхода воды:

$$P_T = 9,81QH\eta_T, \quad (2.19)$$

где P_T – мощность на валу гидротурбины (кВт), H – напор (м), Q – расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$), η_T – КПД турбины [103].

Малые гидроэлектростанции (МГЭС) классифицируются следующим образом:

- микроГЭС (от 0,1 до 100 кВт);
- миниГЭС (до 1000 кВт);
- малые ГЭС (до 25000 кВт) [104,105];

Если использовать кинетическую энергию потока воды, то скоростной напор описывается следующей зависимостью:

$$H_{\text{сн}} = \frac{\alpha v^2}{2g}, \quad (2.20)$$

где α – коэффициент Кориолиса, v – скорость водного потока.

Расход воды поперечной турбины имеет зависимость:

$$Q = D_{\text{рк}}L_a v, \quad (2.21)$$

где $D_{\text{рк}}$ – диаметр рабочего колеса (м), L_a – длина активной части турбины (м).

Мощность поперечной турбины определяется следующим образом [106,107]:

$$P_T = \frac{\alpha D_{PK} v^3 \eta_T}{2}. \quad (2.22)$$

МГЭС позволяют обеспечить относительно постоянную мощность электроснабжения потребителей, а также является полностью автономной генерирующей станцией.

Относительно постоянная мощность электростанции характеризуется фактором сезонности, которая явно прослеживается на гидрографах рек. На рисунке 2.9 представлены гидрографы реки Ока за последние 50 лет [108]. Пологие участки на гидрографе отражают периоды устойчивой зимней и летней межени (уровень расхода воды остается постоянным). В данные периоды река формируется из подземных и/или дождевых стоков. Пик расхода воды приходится на весеннее половодье [109,110].

Из приведенного примера гидрографа следует, что для дальнейшего прогнозирования на краткосрочный и долгосрочный период АМГЭС необходимо учитывать сезонность и накапливать информацию о расходе воды в реке.

В таблице 2.3 представлены основные функции АМГЭС, а также взаимодействие с другими агентами.

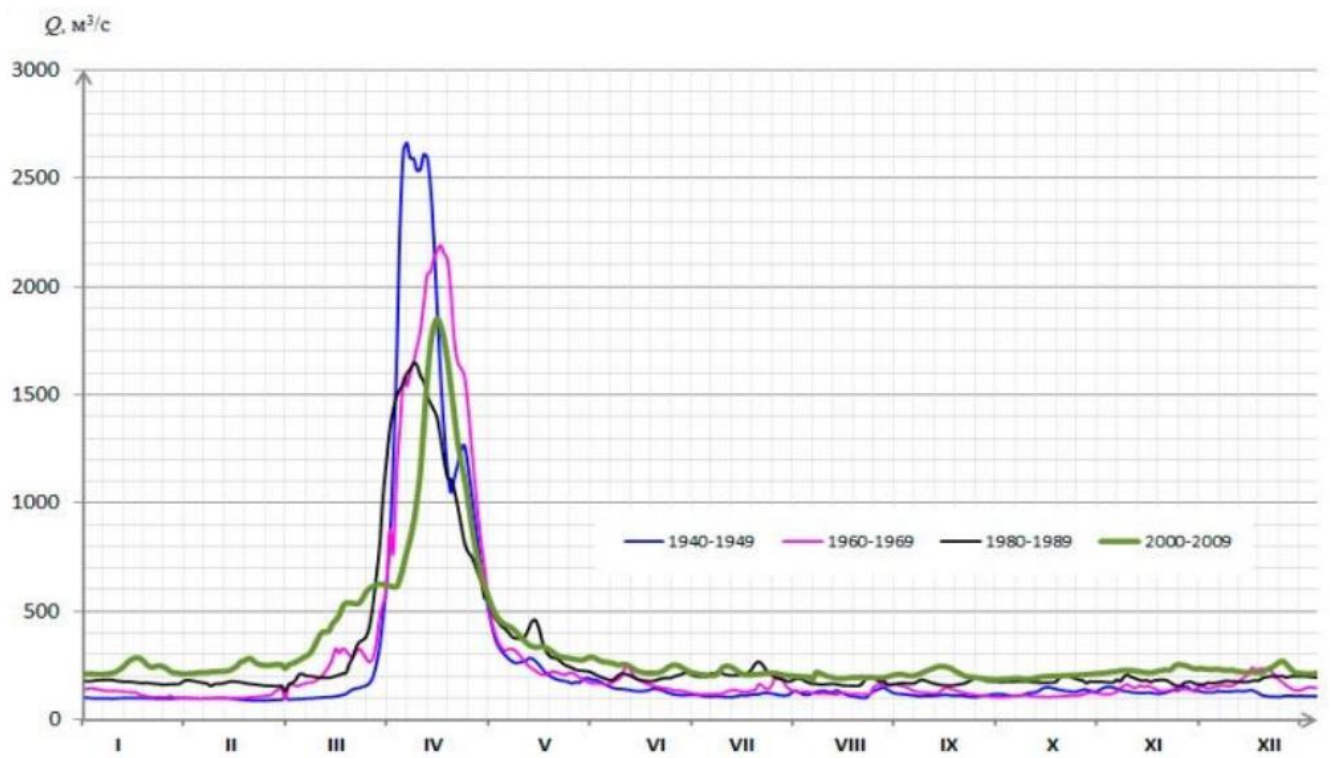


Рисунок 2.9. Гидрографы реки Ока

Таблица 2.3. Основные функции АМГЭС

Функции	Описание функций в ЭЭК
Сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии применительно к МГЭС	<p>Перечень первичной информации включает в себя следующее:</p> <ul style="list-style-type: none"> - наименование основного оборудования и его заводские технические характеристики; - технические эксплуатационные характеристики основного оборудования на текущий момент; - даты и длительность плановых остановов для проведения технического обслуживания и различных видов ремонта основного оборудования на прогнозируемый период; - сохранение за отчетный период данных о скорости водного потока, сезонности, температуре, а также выработанной электроэнергии.
Управление генерацией электрической энергии применительно к данной МГЭС	Управление, включая этап прогнозирования выработки электроэнергии на выбранный период времени с использованием данных о сезонности и расходе воды.
Обмен данными между агентами	<ul style="list-style-type: none"> - получение от АОС данных об окружающей среде на прогнозируемый и отчетный периоды времени; - передача АМ данных об вырабатываемой электроэнергии на прогнозируемый период времени.

2.2.4 Агент малых тепловых электростанций

Под агентом малых тепловых электростанций (АМТЭС) подразумевается энергетические установки (ЭУ) для малой энергетики – электростанций мощностью до 30 МВт с агрегатами единичной мощности до 10 МВт. Электростанции подразделяются на [111]:

- микроэлектростанции мощностью (до 100 кВт);
- миниэлектростанции мощностью (от 100 кВт до 1 МВт);
- малые электростанции мощностью (более 1 МВт).

ЭУ классифицируются по типу используемого топлива: угольные, мазутные, дизельные, газотурбинные, парогазовые. В настоящее время в России функционируют до 50 тысяч различных МТЭС, из них преимущественно дизельные электростанции со средней единичной мощностью равной 340 кВт и суммарной мощностью 17 млн.кВт, что составляет 8 % от общей установленной в России мощности [112].

Отличительной особенностью ЭУ является возможность модульности системы, что позволяет добиться увеличения генерируемой мощности для потребителей. АМТЭС обеспечивает независимую работу ЭУ, расчет стоимости вырабатываемой энергии на основе текущей нагрузки и обмен информацией с другими агентами. Обмен информацией между АМ позволяет моделировать рациональные режимы работы для различных ЭУ на краткосрочный и долгосрочный периоды времени, а также восполнить недостающую мощность от возобновляемых источников энергии, из-за неблагоприятных погодных условий или в случае выхода из строя генерирующих установок.

Одним из основных показателей для малых тепловых электростанций является расход топлива в зависимости от нагрузки. На рисунке 2.10 представлена зависимость расхода топлива дизель-генераторном от нагрузки [113].

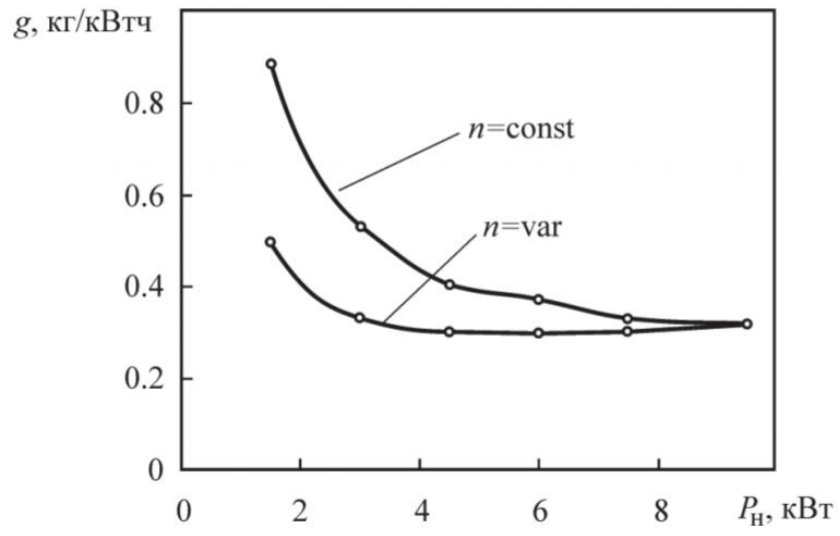


Рисунок 2.10. Зависимость расхода топлива дизель-генератором от нагрузки

Для эффективного использования топлива необходимо обеспечивать нагрузку в пределах от 40% до 75%. При малой нагрузке идет резкое увеличение потребления топлива. Для повышения эффективности установки возможно догружать силовую установку через использование НЭ или смещение нагрузки во времени. Одновременно необходимо учитывать влияние температуры окружающей среды на снижение КПД как для дизельной установки, так и для газотурбинной установки [113, 114].

Из приведенного анализа определены параметры, которые влияют на генерацию малой тепловой электростанцией. В таблице 2.4 представлены основные функции АМТЭС, а также его взаимодействие с другими агентами.

Таблица 2.4. Основные функции АМТЭС

Функции	Описание функций в ЭЭК
Сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии применительно к АМТЭС	Перечень первичной информации включает себя следующее: -наименование основного оборудования и его заводские технические характеристики; -технические эксплуатационные характеристики основного оборудования на текущий момент; - даты и длительность плановых остановов для проведения технического обслуживания и различных видов ремонта основного оборудования на прогнозируемый период; - сохранение за отчетный период следующих данных: расход топлива, нагрузка, температура окружающей среды, количество выработанной электроэнергии.
Управление генерацией электрической энергии применительно к данной АМТЭС	Управление и прогнозирование выработки электроэнергии на выбранный период времени с использованием данных о температуре окружающей среды и времени суток.
Обмен данными между агентами	-получение от АОС параметров окружающей среды на прогнозируемый период времени; -передача АМ данных о вырабатываемой электроэнергии на прогнозируемый период времени.

2.2.5 Агент нагрузки

Каждый потребитель или группа потребителей с одинаковыми характеристиками и требованиями к качеству электроэнергии взаимодействует с агентом нагрузки (АН). При этом АН выполняет следующие задачи: смещение нагрузки потребителя во времени, накопление информации о потреблении электроэнергии в течение дня и обмен информацией с другими агентами для достижения общей цели.

Благодаря смещению нагрузки во времени у МСУ появляется возможность повысить эффективность всей системы и сгладить провалы в потреблении электроэнергии между ночным и дневным временем суток. К примерам смещения нагрузки можно отнести: заряд автомобиля в ночной период времени, работу бытовой техники (стиральной машины, посудомоечная машина и т.д.) и т.д. Одновременно АН, как частный случай для форс-мажорных условий, отвечает за возможность отключения потребителей согласно приоритетам электроснабжения, освобождая дополнительные мощности для восполнения потребностей потребителей с более высоким приоритетом. Помимо управления нагрузкой АН выполняет функции накопления информации о графике потребления электроэнергии в базе данных. Данная функция АН является ключевой для дальнейшего планирования работы всей системы на краткосрочный или долгосрочный периоды времени. На основе полученной информации АН прогнозирует в какой промежуток времени необходимо восполнять в полном объеме требования потребителя в электроэнергии через разные генерирующие установки, а также перераспределить потоки энергии через накопители энергии. Основными параметрами потребителя является мощность, часы максимального потребления электроэнергии и коэффициент приоритета электроснабжения. На рисунке 2.11 представлен график потребления электроэнергии типового многоквартирного дома.

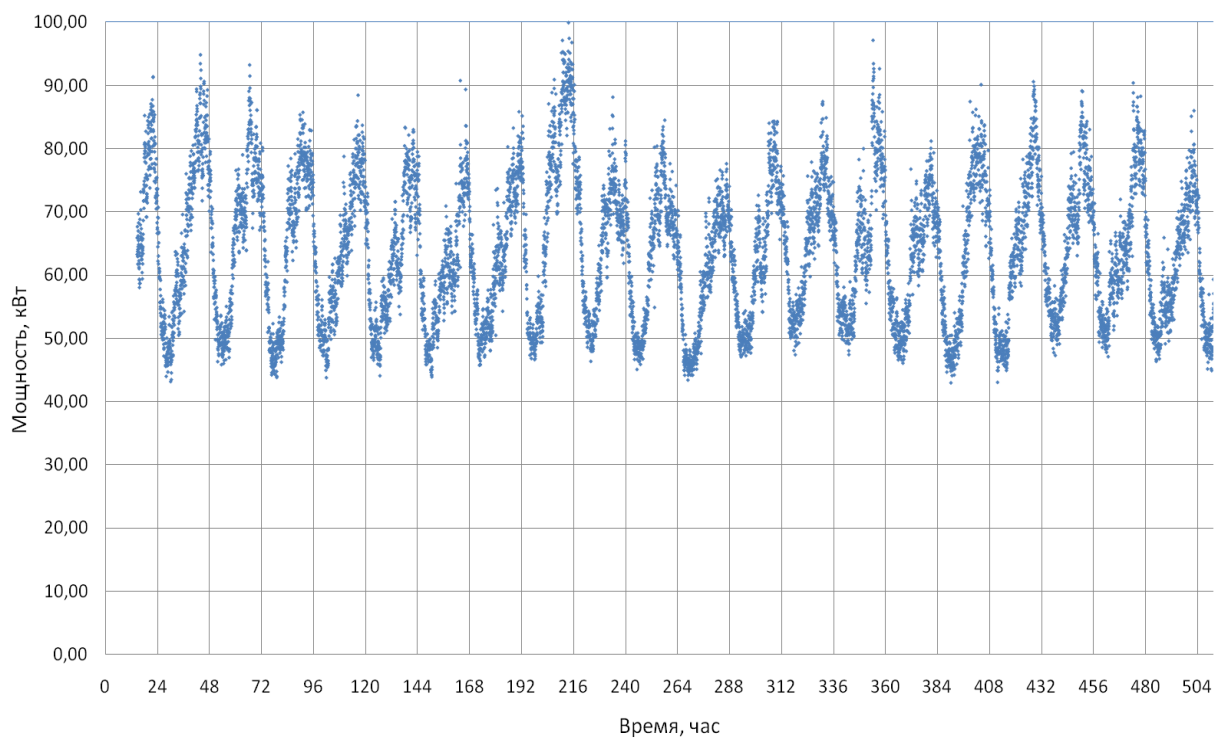


Рисунок 2.11. График потребление электроэнергии типового многоквартирного дома

Данные снимались с шагом в 3 минуты. На представленном рисунке прослеживается зависимость резкого роста и провала потребления электроэнергии между ночным и дневным периодами времени.

Из графика следует, что максимальная мощность, зафиксированная за три недели, равна 100 кВт, что принимается за 100% потребляемой мощности. Для дальнейшего анализа данных целесообразно совместить три графика потребления электроэнергии за три недели (рисунок 2.12) и провести аппроксимацию дискретных значений для получения аналитической функции. Потребление электроэнергии в каждой квартире многоэтажного дома носит случайный характер, поэтому для аппроксимации целесообразно использование нормального закона распределения непрерывной случайной величины:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.41)$$

где μ – математическое ожидание (среднее значение), σ – среднеквадратическое отклонение (σ^2 – дисперсия) распределения.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.42)$$

где x_i – i -й элемент выборки, \bar{x} – среднее арифметическое выборки.

Аналитическая функция, описывающая потребление электроэнергии за 7 дней, является сумма семи нормальных графиков ($k=7$) распределения Гаусса (рисунок 2.13):

$$f_{Load}(x) = \sum_{k=1}^7 f_k(x) = \sum_{k=1}^7 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.43)$$

Электрическая энергия, потребляемая за неделю, определяется площадью под графиком аналитической функции:

$$w_{Load}(x) = \int f_{Load}(x) dx = \int \sum_{k=1}^7 f_k(x) = \sum_{k=1}^7 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (2.44)$$

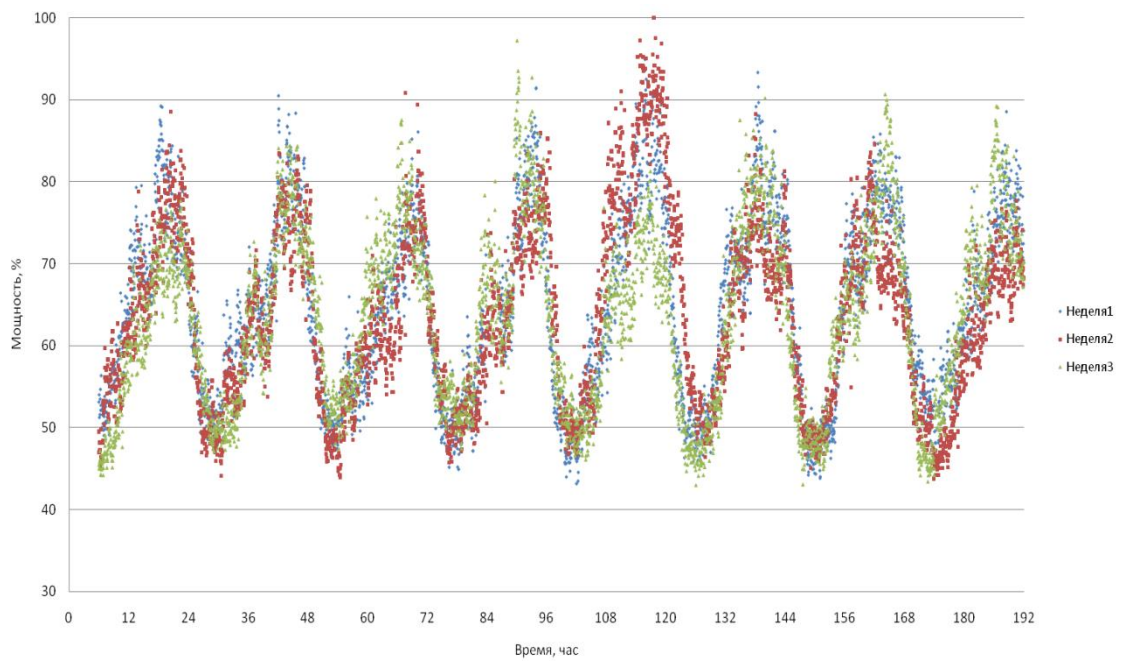


Рисунок 2.12. График потребления электроэнергии за три недели

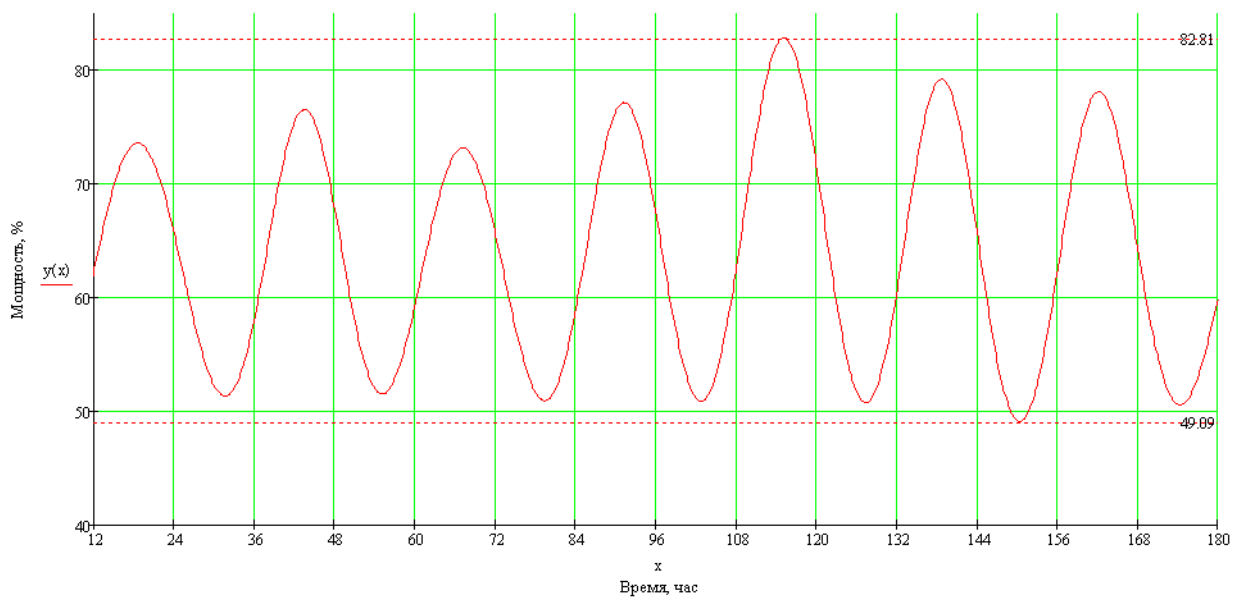


Рисунок 2.13. Аппроксимированный график потребления электроэнергии за три недели

Уравнение (2.44) позволяет аналитически описать потребление электроэнергии для прогнозирования в первые месяцы функционирования МСУ. В этот период АН не располагает достаточными данными для того, чтобы АМ имел возможность на их основе моделировать график потребления электроэнергии уже с учетом температуры окружающего воздуха, выходных и государственных праздников, сезонности и т.д. В таблице 2.5 представлены основные функции АН, а также его взаимодействие с другими агентами.

Таблица 2.5. Основные функции АН

Функции	Описание функций в ЭЭК
Сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии применительно к АН	Перечень первичной информации включает в себя следующее: <ul style="list-style-type: none"> - наименование оборудования и его заводские технические характеристики, в случае нежилого помещения; - технические эксплуатационные характеристики оборудования на текущий момент; - количество проживающих в жилом помещении или сотрудников, в случае нежилого помещения; - средний возраст проживающих в жилом помещении; - средний набор (наименование и потребляемая мощность) бытовой техники на одну квартиру и/или домохозяйства; - хранение за отчетный период следующих данных: мощность потребления, температуру, информацию о праздничных или выходных днях.
Управление генерацией электрической энергии применительно к данной АН	Прогнозирование и управление (смещением нагрузки во времени и т.д.).
Обмен данными между агентами	<ul style="list-style-type: none"> - получение от АОС параметров окружающей среды на прогнозируемый и отчетный периоды времени; - передача АМ данных о потребляемой мощности на прогнозируемый период времени.

2.2.6 Агент накопителей энергии

Главной задачей агента накопителей энергии (АНЭ) является управление процессами заряда и разряда накопителей энергии (НЭ). Но в тоже время АНЭ должен адаптироваться к различным типам НЭ и обеспечивать полиморфизм по отношению ко всей системе. Одновременно АНЭ обеспечивает обмен информацией с другими агентами для прогнозирования заряда/разряда НЭ.

Существует различные виды НЭ, которые классифицируются по способу преобразования энергии (химические, емкостные, механические и т.д.). В свою очередь, каждый НЭ подразделяется по конструктивному исполнению. В качестве примера основного типа НЭ, который будет рассмотрен далее, выбран химический накопитель энергии, который обладает хорошими удельными параметрами. Химический накопитель классифицируется по типу электролита или типу обслуживания (рисунок 2.14). Кислотные аккумуляторные батареи классифицируются по типу обслуживания на малообслуживаемые и герметизированные. В свою очередь литиевые аккумуляторные батареи разделяются по типу электролита на полимерные и жидкие. В таблице 2.6 представлены основные характеристики химических накопителей. Как видно из таблицы литиевые батареи могут аккумулировать на 216% больше энергии на килограмм, чем NiCd и на 337% больше, чем кислотные батареи. Число циклов у NiCd и Li-ion примерно одинаковое, а данный показатель для литиевых батарей сильно варьируется от химического состава. Никель-кадмиевые аккумуляторы практически в два раза меньше времени требуют на заряд, чем литиевые и в 12 раз меньше кислотных. Основным недостатком никель-кадмиевых батарей является наличие эффекта памяти. Для борьбы с данным эффектом регулярно – каждый месяц проводится «тренировочный режим» заряда-разряда [116-120].



Рисунок 2.14. Классификация химических накопителей по типу электролита и уровню обслуживания

Таблица 2.6. Основные характеристики химических накопителей

	NiCd	Li-ion	Li-ion polymer	LiFePO ₄	NiMH	LeadAcid
Удельная плотность энергии (Вт*ч/кг)	45-80	110-160	100-130	90-140	60-120	30-50
Число циклов заряда/разряда (при снижении до 80% от начальной емкости)	1500	500-1200	300-500	2000	300-500	200-300
Время быстрого заряда (часов)	1	2-4	2-4	1	2-4	8-16
Устойчивость к перезаряду	Средняя	Очень низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая
Эффект памяти	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Нет
Саморазряд / месяц (при комнатной температуре)	20%	10%	~10%	~3%	30%	5%
Напряжение элемента (номинальное)	1.25В	3.6В	3.6В	3.2 В	1.25В	2В
Ток нагрузки - пиковый - оптимальный	20С 1С	>2С 1С и ниже	>2С 1С и ниже	3С	5С 0.5С и ниже	5С 0.2С
Температура при эксплуатации (только разряд)	от -40 до 60°С	от -20 до 60°С	от 0 до 60°С	от -10 до 50°С	от -20 до 60°С	от -20 до 60°С
Требования к обслуживанию	Через 30 – 60 дней	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Через 60 – 90 дней	Через 3 – 6 месяцев

Химические НЭ, приведенные в таблице 2.6, имеют различные параметры, которые должны быть учтены АНЭ. Для прогнозирования работы на краткосрочный период для заряда НЭ необходимо анализировать время (быстрого заряда), ток заряда, номинальное напряжение на элементе, а также остаточный заряд в зависимости от типа НЭ. В качестве примера рассмотрим режим заряда кислотного НЭ при постоянном напряжении (рисунок 2.15). В начале процесса заряда НЭ ток, протекающий через элемент, достигает 20% от емкости батареи (0,2С).

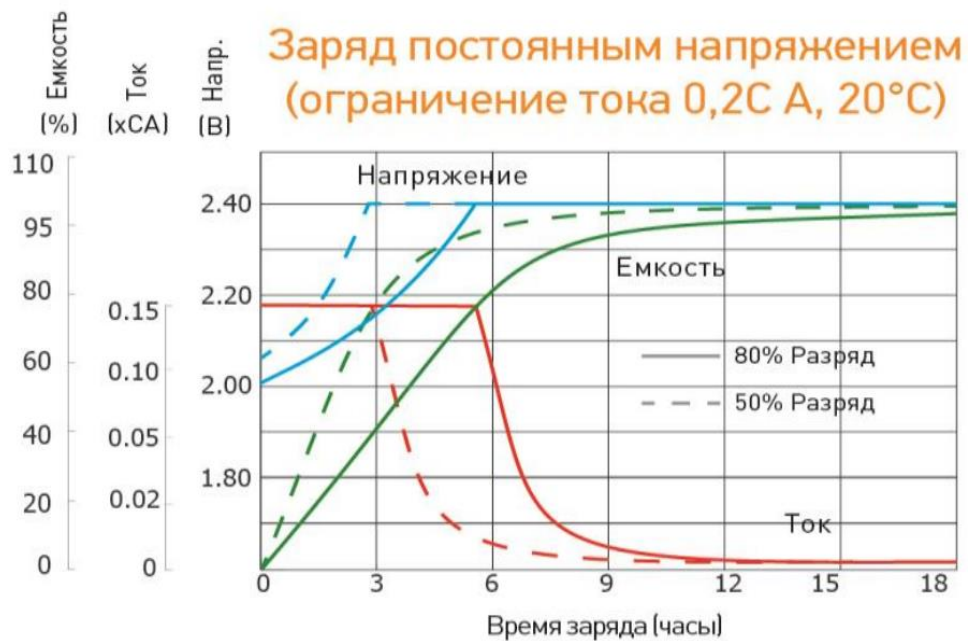


Рисунок 2.15. Режим заряда кислотного НЭ при постоянном напряжении

Одновременно напряжение на элементе постепенно возрастает до номинального значения ($U_{\text{ном}}$). После достижения номинального напряжения на элементе ток по экспоненте спадает практически до нуля и дальнейший процесс заряда происходит при постоянном напряжении.

Из приведенного примера следует сделать вывод, что необходимо учитывать тип накопителя энергии в процессе заряда и функционирования всей системы в процессе аккумуляирования энергии.

Приведенный пример свидетельствует, что существует большое число разных типов АБ, характеристики которых необходимо учитывать в процессе эксплуатации, а также следует подбирать критерии оценки своевременного заряда/разряда НЭ в МСУ.

В данном параграфе представлен способ управления несколькими АНЭ с использованием одного из возможных критериев в ЭЭК – критерия минимальной стоимости 1 кВтч за один цикл (заряда/разряда) ($C_{\text{ц}}$). С целью определения рационального времени заряда/разряда нескольких АНЭ с различными параметрами (по типу и емкости накопителя) определяется их глубина заряда/разряда, что будет изложено ниже [121].

Для одного из АНЭ стоимость цикла заряда/разряда составляет:

$$C_{\text{ц}} = \frac{C_{\text{нэ}}}{N}, \quad (2.45)$$

где $C_{\text{нэ}}$ – стоимость НЭ, N – число циклов заряд/разряд.

При этом необходимо учитывать, что стоимость НЭ включает в себя не только стоимость самого накопителя, но и стоимость оборудования, которое необходимо для функционирования каждого типа НЭ (зарядные устройства, контроллеры заряда/разряда для каждой батареи, стеллажи и т.д.), а также затраты, связанные с обслуживанием, утилизацией и т.д. Например, к литиевым НЭ предъявляются высокие требования по соблюдению сложных процессов

заряда, а также наличие контроллеров для каждого элемента, в отличие от кислотных НЭ, которые в свою очередь обладают низкими удельными показателями по запасаемой энергии и требуют специализированных помещений значительных размеров.

Одним из основных характеристик АБ является зависимость числа циклов от глубины разряда dod (*depth of discharge*).

Зависимость числа циклов от глубины разряда $N(dod)$ имеет нелинейный характер, что иллюстрирует рисунок 2.16 [122]. Как правило, производители НЭ предоставляют данные со значениями числа циклов от глубины разряда или график, полученными экспериментальным путем и с использованием методов теории вероятности [122].

В дальнейшем для описания зависимости $N(dod)$ используется полином третьей степени:

$$y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (2.46)$$

Зависимость $N(dod)$ с использованием полинома третьей степени вида (2.46) для кислотных аккумуляторов описывается следующим образом:

$$N(dod) = 4.085 \cdot 10^3 - 67.438dod - 0.561dod^2 - 2.336 \cdot 10^{-3}dod^3 \quad (2.47)$$

С учетом зависимости числа циклов от глубины разряда – dod выражение (2.45) принимает вид:

$$C_{ц} = \frac{C_{нэ}}{N(dod)}, \quad (2.48)$$

где $N(dod)$ – функция зависимости числа циклов от глубины разряда (dod).

Стоимость одного цикла НЭ (2.48) с учетом (2.47) принимает вид:

$$C_{ц} = \frac{C_{нэ}}{4.085 \cdot 10^3 - 67.438dod - 0.561dod^2 - 2.336 \cdot 10^{-3}dod^3}, \quad (2.49)$$

где $C_{ц}$ – стоимость одного цикла АБ; dod – глубина разряда АБ.

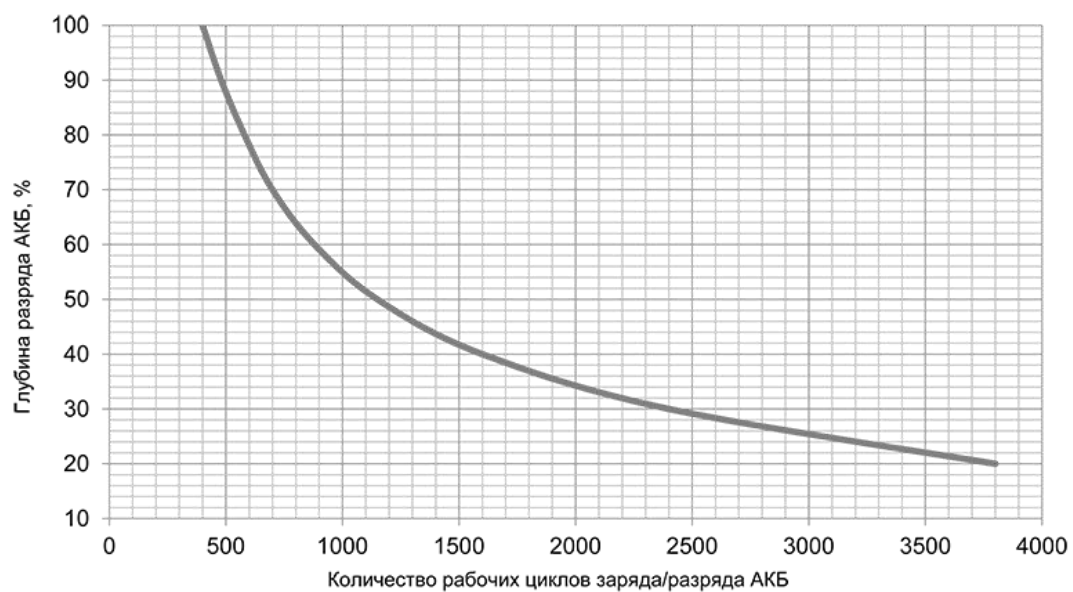


Рисунок 2.16. Зависимость числа циклов аккумуляторной батареи от глубины разряда

Случай когда в ЭЭЖ используется один тип АБ является частным, поэтому научный и практический интерес вызывает ЭЭЖ с АБ различных типов (АБ₁, АБ₂), накапливающие электроэнергию W_1 и W_2 (кВтч) соответственно. Перед МСУ стоит задача в определении рациональной глубины разряда АБ₁, АБ₂ с целью обеспечения потребителей требуемой величиной электроэнергии (W) при минимальной стоимости одного цикла заряд/разряд.

Стоимость цикла АБ₁, АБ₂ с учетом требуемой потребителю энергии имеет вид:

$$C_{\text{ц}} = C_{\text{ц1}} + C_{\text{ц2}} = \frac{C_{\text{нэ1}}}{N_1(\text{dod}_1)} + \frac{C_{\text{нэ2}}}{N_2(\text{dod}_2)} \quad (2.50)$$

где $C_{\text{ц}}$ – стоимость одного цикла АБ₁ и АБ₂; $C_{\text{ц1}}$ – стоимость одного цикла АБ₁; $C_{\text{ц2}}$ – стоимость одного цикла АБ₂; N_1, N_2 – зависимость числа циклов от глубины разряда для АБ₁ и АБ₂; $\text{dod}_1, \text{dod}_2$ – глубина разряда АБ₁ и АБ₂; $C_{\text{нэ1}}, C_{\text{нэ2}}$ – стоимость АБ₁ и АБ₂.

С учетом (2.50) выражение (2.46) принимает следующий вид:

$$C_{\text{ц}} = \frac{C_{\text{нэ1}}}{a_1 + b_1 \text{dod}_1 + c_1 \text{dod}_1^2 + d_1 \text{dod}_1^3} + \frac{C_{\text{нэ2}}}{a_2 + b_2 \text{dod}_2 + c_2 \text{dod}_2^2 + d_2 \text{dod}_2^3} \quad (2.51)$$

Для определения минимальной стоимости одного цикла работы НЭ для передачи потребителю требуемого объема электроэнергии с учетом рациональной глубины разряда АБ₁, АБ₂ предлагается использовать зависимость (2.51) в качестве целевой функции, график которой представлен на рисунке 2.17, где по осям ХУ – глубина разряда АБ₁, АБ₂ соответственно, по оси Z – значение целевой функции (стоимость).

Минимальное значение функции (2.51) определяется с помощью метода сопряженных градиентов математического программирования.

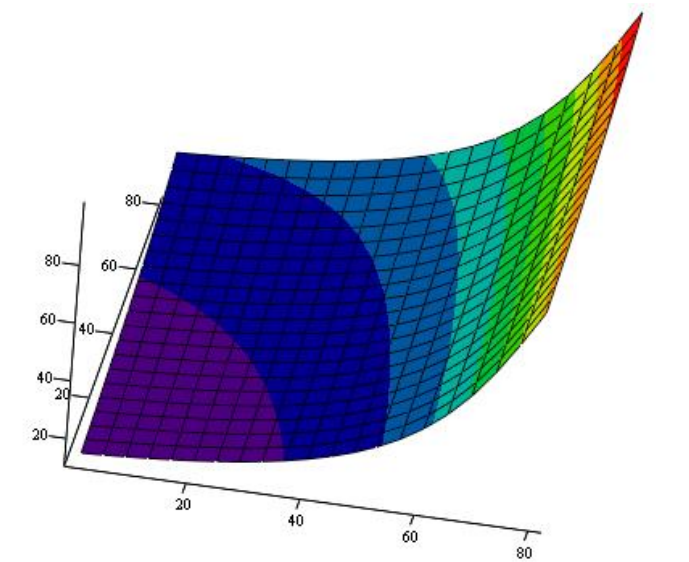


Рисунок 2.17. График целевой функции с учетом глубины разряда двух АБ

Необходимые граничные условия для определения минимума выбранной целевой функции задаются в виде:

$$\begin{cases} W_1 \frac{dod_1}{100} + W_2 \frac{dod_2}{100} = W \\ 0 < dod_1 < 100 \\ 0 < dod_2 < 100 \end{cases} \quad (2.52)$$

где W_1, W_2 – номинальное значение электроэнергии, накапливаемой АБ₁, АБ₂ соответственно; dod_1, dod_2 – глубина разряда АБ₁, АБ₂, W – значение электроэнергии необходимое для потребителя.

Задача по поиску минимума целевой функции (2.51) с учетом граничных условий (2.52) определяется выражениями:

$$\frac{C_{нэ1}}{a_1 + b_1 dod_1 + c_1 dod_1^2 + d_1 dod_1^3} + \frac{C_{нэ2}}{a_2 + b_2 dod_2 + c_2 dod_2^2 + d_2 dod_2^3} \rightarrow \min \quad (2.53)$$

$$\begin{cases} W_1 \frac{dod_1}{100} + W_2 \frac{dod_2}{100} = W \\ 0 < dod_1 < 100 \\ 0 < dod_2 < 100 \end{cases}$$

При этом для локальной системы энергоснабжения с n АБ целевая функция с граничными условиями принимает следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_{нэi}}{a_i + b_i dod_i + c_i dod_i^2 + d_i dod_i^3} \rightarrow \min \quad (2.54)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n W_i \frac{dod_i}{100} = W \\ 0 < dod_1 < 100 \\ \dots \\ 0 < dod_n < 100 \end{cases}$$

Используя предложенный подход к определению рациональной глубины разряда, рассмотрим один из возможных случаев МСУ, состоящей из двух сборок АБ, каждая из которых сформирована из одного из типов АБ. В качестве АБ выбраны литий-железо-фосфатная (далее «LiFePO4») и свинцово-кислотная аккумуляторные батареи. Предполагается, что зависимость числа циклов от глубины разряда у двух сборок АБ различна ($N_1(dod_1) \neq N_2(dod_2)$), а требуемое значение электроэнергии, необходимое потребителю – 60 кВтч. При этом обе батареи имеют номинальную запасаемую энергию равную $W_1 = W_2 = 120$ кВтч. С учетом сделанных допущений задача (2.54) для выбранных типов АБ₁, АБ₂ принимает следующий вид:

$$F(dod_1, dod_2) = F_1(dod_1) + F_2(dod_2)$$

$$F_1(dod_1) = \begin{cases} 0, & dod_1 = 0 \\ \frac{24000}{4.085 \cdot 10^3 - 67.438dod_1 - 0.561dod_1^2 - 2.336 \cdot 10^{-3}dod_1^3}, & dod_1 > 0 \end{cases} \quad (2.55)$$

$$F_2(dod_2) = \begin{cases} 0, & dod_2 = 0 \\ \frac{70000}{8.799 \cdot 10^3 - 121.038dod_2 - 0.361dod_2^2 + 7.758 \cdot 10^{-3}dod_2^3}, & dod_2 > 0 \end{cases}$$

$$F(dod_1, dod_2) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} W_1 \frac{dod_1}{100} + W_2 \frac{dod_2}{100} = W \\ 0 < dod_1 < 100 \\ 0 < dod_2 < 100 \end{cases}$$

С целью упрощения задачи и перехода от поиска локального минимума с граничными условиями к поиску глобального минимума применяется метод штрафных функций.

С учетом введения штрафных функций система уравнений (2.55) преобразуется в следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 & \frac{24000}{4.085 \cdot 10^3 - 67.438dod - 0.561dod^2 - 2.336 \cdot 10^{-3}dod^3} + \\
 & + \frac{70000}{8.799 \cdot 10^3 - 121.038dod_2 - 0.361dod_2^2 + 7.758 \cdot 10^{-3}dod_2^3} \\
 & + r \left[\frac{1}{dod_1} + \frac{1}{dod_1} + \frac{1}{dod_1 - 100} + \frac{1}{dod_2 - 100} \right. \\
 & \left. + \frac{1}{dod_1 - 100} + \frac{1}{dod_2 - 100} + \frac{1}{120 \frac{dod_1}{100} + 120 \frac{dod_2}{100} - 60} \right] \rightarrow \min
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

На рисунке 2.18 представлена целевая функция с учетом граничных условий (2.56) для двух АБ.

После получения рациональных параметров разряда необходимо определить параметры рационального заряда АБ с учетом оставшейся емкости и времени, отводимого на заряд. Целевая функция с граничными условиями для заряда АБ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{C_{нз1}}{a_1 + b_1 \left(\frac{(Q_{n1} - Q_{r1} - kI_1t)}{Q_{n1}} 100 \right) + c_1 \left(\frac{(Q_{n1} - Q_{r1} - kI_1t)}{Q_{n1}} 100 \right)^2 + d_1 \left(\frac{(Q_{n1} - Q_{r1} - kI_1t)}{Q_{n1}} 100 \right)^3} \\
 & + \frac{C_{нз2}}{a_2 + b_2 \left(\frac{(Q_{n2} - Q_{r2} - kI_2t)}{Q_{n2}} 100 \right) + c_2 \left(\frac{(Q_{n2} - Q_{r2} - kI_2t)}{Q_{n2}} 100 \right)^2 + d_2 \left(\frac{(Q_{n2} - Q_{r2} - kI_2t)}{Q_{n2}} 100 \right)^3} \\
 & \rightarrow \min
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1t + I_2t = Q \\ I_1t < kQ_{n1} \\ I_2t < kQ_{n2} \\ 0 < \frac{(Q_{n1} - Q_{r1} - kI_1t)}{Q_{n1}} 100 < 100 \\ 0 < \frac{(Q_{n2} - Q_{r2} - kI_2t)}{Q_{n2}} 100 < 100 \end{array} \right.$$

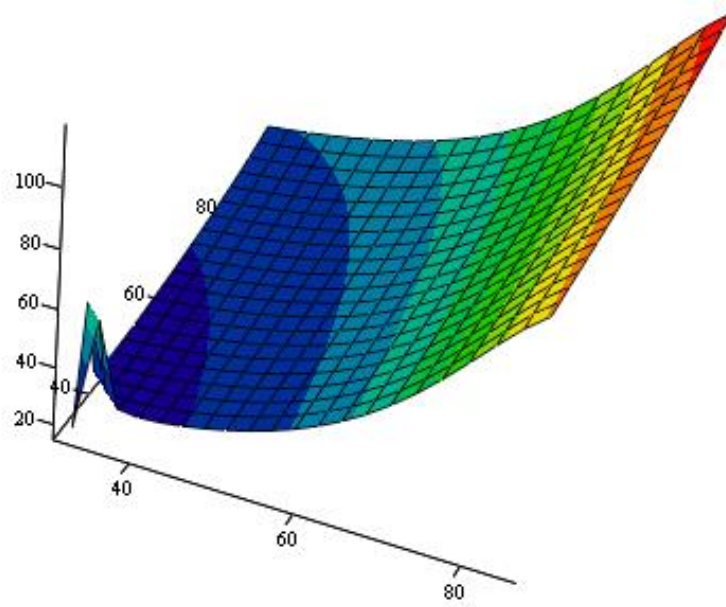


Рисунок 2.18. Целевая функция с учетом граничных условий

В качестве примера использования вышеописанного подхода были найдены токи заряда для выбранных АБ: литий-железо-фосфатной и кислотной батарей. Необходимо выбрать оптимальный заряд накопителей при условии, что максимальное время заряда 1 час и доступная емкость равна 60 Ач. При нахождении целевой функции ток заряда равен 36,27 А и 23,73 А для литий-железо-фосфатных и кислотных АБ соответственно.

Предложенный подход определения глубины разряда/заряда каждой АБ в системе для обеспечения требуемой энергии справедлив только для идеальных АБ. Все химические накопители подвержены множеству внешних факторов, которые влияют на эксплуатационные параметры (емкость, срок службы и т.д.). Одной из основных особенностей батареи является эффект емкости, который характеризуется тем, что при увеличении разрядного тока отдаваемая емкость уменьшается по нелинейному закону [123].

Закон Пейкерта определяет, что зависимость разрядной емкости от тока разряда имеет нелинейный характер и описывается следующим соотношением:

$$Q = \frac{A}{I^{n-1}} \quad (2.58)$$

где Q – отдаваемая емкость; A и n – константы, полученные экспериментальным путем и характеризующие тип АБ [124,125].

Преобразуем выражение (2.55) для двух АБ с учетом закона Пейкерта (2.58):

$$F(I_1, I_2) = F_1(I_1) + F_2(I_2)$$

$$F_1(I_1) = \begin{cases} 0, & I_1 = 0 \\ \frac{C_{нэ1}}{a_1 + b_1 \frac{I_1^\alpha t}{Q_{n1}} + c_1 \left[\frac{I_1^\alpha t}{Q_{n1}} \right]^2 + d_1 \left[\frac{I_1^\alpha t}{Q_{n1}} \right]^3}, & I_1 > 0 \end{cases} \quad (2.59)$$

$$F_2(I_2) = \begin{cases} 0, & I_2 = 0 \\ \frac{C_{\text{нэ}2}}{a_2 + b_2 \frac{I_2^\beta t}{Q_{n2}} + c_2 \left[\frac{I_2^\beta t}{Q_{n2}} \right]^2 + d_2 \left[\frac{I_2^\beta t}{Q_{n2}} \right]^3}, & I_2 > 0 \end{cases}$$

$$F(I_1, I_2) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} I_1^\alpha t < Q_{n1} \\ I_2^\beta t < Q_{n2} \\ I_1 > 0 \\ I_2 > 0 \\ I_1 t + I_2 t = Q \end{cases}$$

где I_1, I_2 – ток разряда АБ₁, АБ₂; t – время разряда; Q_{n1}, Q_{n2} – номинальная емкость АБ₁, АБ₂; Q – требуемая емкость; α, β – коэффициенты Пейкерта, характеризующий тип накопителя.

Представленная целевая функция (2.59) с граничными условиями и учитывающая эффект емкости через закон Пейкерта в общем виде для n -го количества АБ имеет следующий вид:

$$F(I) = \sum_{i=1}^n F_i(I_i)$$

$$F_i(I_i) = \begin{cases} 0, & I_i = 0 \\ \frac{C_{\text{нэ}i}}{a_i + b_i \frac{I_i^\alpha t}{Q_{ni}} + c_1 \left[\frac{I_i^\alpha t}{Q_{ni}} \right]^2 + d_1 \left[\frac{I_i^\alpha t}{Q_{ni}} \right]^3}, & I_i > 0 \end{cases} \quad (2.60)$$

$$F(I_1 \dots I_n) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} I_i^\alpha t < Q_{ni} \\ I_i > 0 \\ \sum_{i=1}^n I_i t = Q \end{cases}$$

При рассмотрении случая, учитывающего емкостной эффект, задача по поиску рационального уровня разряда АБ трансформируется в задачу по поиску тока разряда АБ. Основные параметры для системы из двух типов АБ представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8. Основные параметры системы из двух типов АБ.

	Кислотная АБ	LiFePO ₄ АБ
Емкость (Ач)	200	200
Номинальное напряжение на сборке АБ (В)	420	420
Средняя стоимость 1 кВтч (руб)	24000	60000

Используя ранее выбранные для рассмотрения АБ в МСУ (литий-железо-фосфатные и свинцово-кислотные АБ), целевая функция, график которой представлен на рисунке 2.19, с учетом емкостного эффекта принимает вид:

$$F(I_1, I_2) = F_1(I_1) + F_2(I_2)$$

$$F_1(I_1) = \begin{cases} 0, & I_1 = 0 \\ 24000 & \\ \frac{4.085 \cdot 10^3 - 67.438 \frac{I_1^{1.22 \cdot 1}}{200} 100 - 0.561 \left[\frac{I_1^{1.22 \cdot 1}}{200} 100 \right]^2 - 2.336 \cdot 10^{-3} \left[\frac{I_1^{1.22 \cdot 1}}{200} 100 \right]^3}{}, & I_1 > 0 \end{cases} \quad (2.61)$$

$$F_2(I_2) = \begin{cases} 0, & I_2 = 0 \\ 60000 & \\ \frac{8.799 \cdot 10^3 - 121.038 \frac{I_2^{1.02 \cdot 1}}{200} 100 - 0.361 \left[\frac{I_2^{1.02 \cdot 1}}{200} 100 \right]^2 + 7.758 \cdot 10^{-3} \left[\frac{I_2^{1.02 \cdot 1}}{200} 100 \right]^3}{}, & I_2 > 0 \end{cases}$$

$$F(I_1, I_2) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} I_1^{1.22} t < Q_{n1} \\ I_2^{1.02} t < Q_{n2} \\ I_1 > 0 \\ I_2 > 0 \\ (U_1 I_1 + U_2 I_2) t = W \end{cases}$$

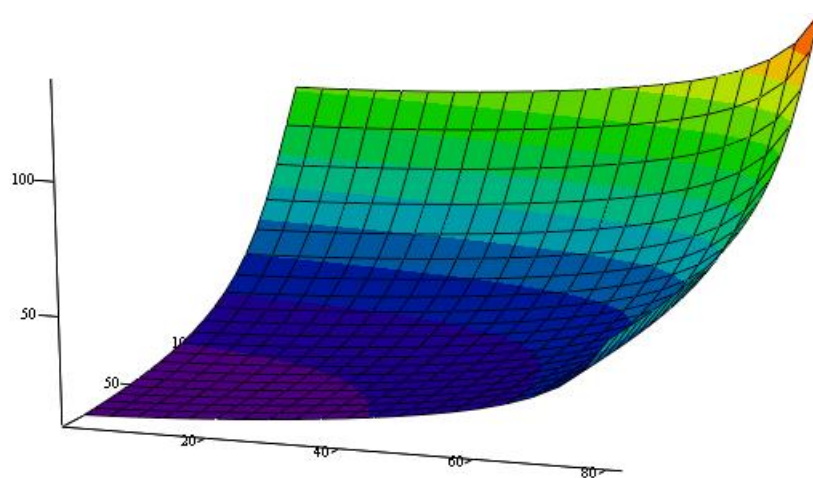


Рисунок 2.19. Целевая функция для двух АБ, зависящая от тока разряда

Минимальное значение целевой функции (2.61) с учетом граничных условий определяется с использованием программного продукта Mathcad. В таблице 2.9 представлены результаты расчета тока разряда для минимального значения стоимости одного цикла заряда/разряда с различными показателями мощности нагрузки.

Таблица 2.9. Результат расчета тока разряда АБ

Мощность (Вт)	Интервал времени (мин)	Ток разряда кислотной АБ (А)	Ток разряда LiFePO ₄ АБ (А)
5000	30	0	23.81
21000	60	0	50
50000	60	41.839	77.209

Если рассматривать систему, не использующую предложенный подход, то стоимость каждого цикла увеличится минимум на 14%, а максимум на 44%, если разряжать только литиевые или кислотные батареи соответственно.

Как указано выше, функционирование химических НЭ определяется многими дополнительными факторами (эффектом восстановления, температурой разряда для моделирования внутренних процессов и т.д.), которые вносят изменения в работу накопителя и которые необходимо учитывать при разработке ЭЭК с использованием рассматриваемых АБ. Перечисленные эффекты необходимо учитывать в случае применения предложенного подхода по определению рациональной работе АБ, что может быть предметом отдельной исследовательской работы.

В таблице 2.10 представлены основные функции АНЭ, а также его взаимодействие с другими агентами.

Таблица 2.10. Основные функции АНЭ

Функции	Описание функций в ЭЭК
Сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии применительно к АНЭ	<p>Перечень первичной информации включает в себя следующее:</p> <ul style="list-style-type: none"> - технические эксплуатационные характеристики оборудования на текущий момент; - даты и длительность плановых отключений для проведения технического обслуживания и различных видов ремонта оборудования на прогнозируемый период; - хранение за отчетный период данных о токе заряда/разряда, емкости, температуре окружающей среды, числе циклов, времени заряда/разряда.
Перераспределение электрической энергии применительно к данной АНЭ	<p>Управление и прогнозирование режимов заряда/разряда на выбранный период времени с использованием данных о температуре окружающей среды, времени суток, нагрузки.</p>
Обмен данными между агентами	<ul style="list-style-type: none"> - получение от АОС параметров окружающей среды на прогнозируемый и отчетный периоды времени; - передача в АМ данных о накопленной энергии на прогнозируемый период времени.

2.2.7 Агент внешней сети

Агент внешней сети (АВС) отвечает за коммутацию ЭЭЖ с внешней (магистральной) сетью, сбор информации о параметрах магистральной сети, а также осуществляет обмен данными между другими агентами.

АВС имеет несколько режимов работы, которые позволяют комплексу работать в изолированном режиме или параллельно с внешней сетью. Комплекс работает параллельно с сетью, если выполняется одно из следующих условий:

- в случае аварийного режима;
- в часы пик потребления электроэнергии и при условии, что все методы регулировки мощности комплекса были применены;
- в случае запроса из внешней сети поставки электроэнергии для поддержания ее функционирования.

Если ни одно из условий не выполняется, то комплекс переходит в изолированный режим. Данный режим позволит максимально повысить качество электроэнергии и снизить зависимость от магистральной сети.

Баланс энергии имеет следующий вид, который учитывает все генерирующие установки, НЭ и потребителей в МСУ:

$$\sum_m P_{nm} = \sum_i P_{mg\dot{e}i} + \sum_j P_{n\dot{e}j} + \sum_k P_{mt\dot{e}k} + \sum_p P_{v\dot{z}yp} + \sum_d P_{mt\dot{e}d} + P_c \quad (2.49)$$

Цель МСУ уменьшить зависимость от магистральной сети:

$$P_c = \sum_m P_{nm} - \sum_i P_{mt\dot{e}i} - \sum_j P_{n\dot{e}j} - \sum_k P_{nk} - \sum_p P_{v\dot{z}yp} - \sum_d P_{c\dot{z}yd} \rightarrow \min \quad (2.50)$$

Как отмечалось ранее, МСУ в период адаптации (в первые месяцы работы) использует аналитические функции (2.7, 2.17, 2.22, 2.43) для краткосрочного прогнозирования до момента, когда активные агенты не накопят достаточно информации, чтобы повысить точность прогноза и учитывать такие параметры, как облачность, сезонность, температуру, скорость ветра, затенение, особенности географического расположения, государственные праздники и т.п.

$$P_c = \sum_m \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \right)_m - \sum_i \left(\frac{\alpha D_{pk} v^3 \eta_r}{2} \right)_i - \sum_j P_{нэj} - \sum_k P_{мтэк} - \sum_p \left(\frac{1}{2} \pi \rho c (\lambda, \beta) R^2 v_B^3 \eta_m \eta_r \right)_p - \sum_d \left(\frac{P_{max} E}{1000} \right)_d. \quad (2.51)$$

В таблице 2.11 представлены основные функции АВС, а также взаимодействие с другими агентами.

Таблица 2.11. Основные функции АВС

Функции	Описание функции в ЭЭК
Сбор и хранение в базе данных первичной информации о генерации электрической энергии применительно к АВС	Перечень первичной информации включает в себя хранение за отчетный период данных о мощности, потребления, температуре окружающей среды.
Управление передачей электрической энергии применительно к данной АВС	Прогнозирование и управление (отключение от магистральной сети и т.д.).
Обмен данными между агентами	- получение от АОС параметров окружающей среды на прогнозный и отчетный периоды времени; - передача АМ данных о мощности магистральной сети на прогнозируемый и отчетный периоды времени.

Чтобы снизить нагрузку на обработку всей информации, которая была накоплена активными агентами, МСУ использует служебный АМ, который позволяет обрабатывать огромный объем данных и находить зависимости между различными параметрами для обеспечения прогнозирования с высокой точностью.

Выводы по второй главе

1. На основе принятого в первой главе настоящей диссертации решения о целесообразности использования коллективного группового управления предложен многоагентный подход к управлению электроэнергетическим комплексом (ЭЭК) с большим количеством источников энергии и групп потребителей. Данный подход позволяет осуществлять рациональное перераспределение электроэнергии в комплексе, снизить потребление электроэнергии из магистральной сети, а также в кратчайшие сроки адаптироваться к изменению количества источников электроэнергии и потребителей.

2. Анализ различных источников электроэнергии и потребителей ЭЭК показал целесообразность их разделения на активные (ветроэнергетические установки, солнечные энергетические установки, малые гидроэлектростанции, малые тепловые электростанции, нагрузка, накопители энергии, внешняя сеть) и служебные (окружающей среды и моделирования) агенты, что позволяет повысить живучесть и масштабируемость комплекса. Кроме того, для прогнозирования генерации и перераспределения электроэнергии в ЭЭК в работе представлены зависимости, характеризующие каждого из агентов.

3. В связи с необходимостью учета особенностей различных типов химических накопителей энергии (аккумуляторных батарей), предложен один из возможных методов выбора рациональных параметров их работы (глубина разряда, ток заряда/разряда), который позволяет минимизировать стоимость одного цикла заряд/разряд группы накопителей.

3 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

3.1 Служебные агенты системы управления

3.1.1 Агент окружающей среды

Одним из ключевых звеньев в структуре многоагентного управления ЭЭЖ является агент окружающей среды (АОС). Данный агент предназначен для сбора в режиме реального времени информации об окружающей среде (скорость ветра, температура, облачность, относительная влажность, давление и т.п.) на краткосрочный и долгосрочный периоды времени. АОС обменивается с другими активными агентами (АН, АВЭУ, АМТЭ, АМГЭ, АСЭУ, АНЭ, АВС) для прогнозирования их работы. Перечень параметров окружающей среды, передаваемых АОС активным агентом МСУ, представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Параметры окружающей среды, передаваемые АОС активным агентам

Агент	Параметры окружающей среды			
	Скорость ветра	Температура	Облачность	Давление
АВЭУ	✓	✓	✗	✓
АСЭУ	✗	✓	✓	✗
АНЭ	✗	✓	✗	✗
АМТЭ	✗	✓	✗	✗
АМГЭ	✗	✓	✗	✗
АН	✗	✓	✓	✗
АВС	✗	✓	✗	✗

Агент окружающей среды с заданной периодичностью или по запросу от других агентов запрашивает данные о погоде у внешних серверов метеорологических служб (веб-сервисы) таких, как *Gismeteo*, *OpenWeatherMap*, *WeatherBug*, *Weather Underground*, *World Weather Online* и т.д. Перечисленные информационные ресурсы позволяют получать данные о погоде с необходимым временным шагом в интересующих районах. Точность прогноза погоды на следующие сутки составляет 95%, а на двое суток вперед – 80%. АОС использует протокол прикладного уровня *Hyper Text Transfer Protocol* (HTTP), тем самым

создавая запрос веб-сервисам метеорологических служб о передаче данных по погоде. Веб-сервисы формируют ответ с необходимой информацией в форматах *eXtensible Markup Language* (XML) или *JavaScript Object Notation* (JSON). Пример работы (запрос/ответ) АОС с веб-сервисами метеорологических служб представлен на рисунке 3.1.

/Запрос:

<http://api.openweathermap.org/data/2.5/forecast?q=moscow,ru&APPID=198295911a7386658050fd89788ea258&units=metric>

/Ответ:

```
"city": {      "id": 524901,"name": "Moscow",
"coord": {"lon": 37.615555,"lat": 55.75222},
"country": "RU"},
"cod": "200",
"message": 0.0052,
"cnt": 40,
"list": [{"dt": 1485712800,
          "main": {"temp": -9.95,"temp_min": -11.61,"temp_max": -9.95, "pressure": 1028.1,
                  "sea_level": 1050.06,"grnd_level": 1028.1,"humidity": 85,"temp_kf": 1.67},
          "weather": [{"id": 800,"main": "Clear","description": "clear sky","icon": "01n"}      ],
          "clouds": {"all": 76},
          "wind": {"speed": 3.32, "deg": 205.001},
          "snow": {"3h": 0.02},
          "dt_txt": "2017-01-29 18:00:00"      }
```

Рисунок 3.1. Пример запроса/ответа АОС к веб-сервису метеорологической службы

Непрерывный обмен данными между внешними серверами метеорологических служб и активными агентами позволяет системе управления скорректировать работу ЭЭК с применением установок на возобновляемых источниках энергии.

Программный продукт, разработанный и описанный в параграфе 2.2 с примером интерфейса (рисунок 2.6), дополнен функцией по отображению в графическом виде информации об окружающей среде, которая передается активным агентам (приложение А) [88]. Одной из возможностей разработанного программного продукта является использование мобильных переносных устройств, поддерживающие браузеры *Internet Explorer, Chrome, Firefox*, для получения основной информации о протекающих процессах в системе (рисунок 3.2) [90].

В таблице 3.2 представлены основные функции АОС и перечень агентов с которыми он обменивается информацией.

Таблица 3.2. Основные функции АОС

Функции	Описание функций в ЭЭК
Обмен данными между активными агентами	АОС предоставляет информацию об окружающей среде активным агентам (АН, АВЭУ, АМТЭ, АМГЭС, АСЭУ, АНЭ, АВС) для их функционирования и планирования выработки, потребления и накопления электроэнергии на заданный период времени.

Multi Agent System (MAS)

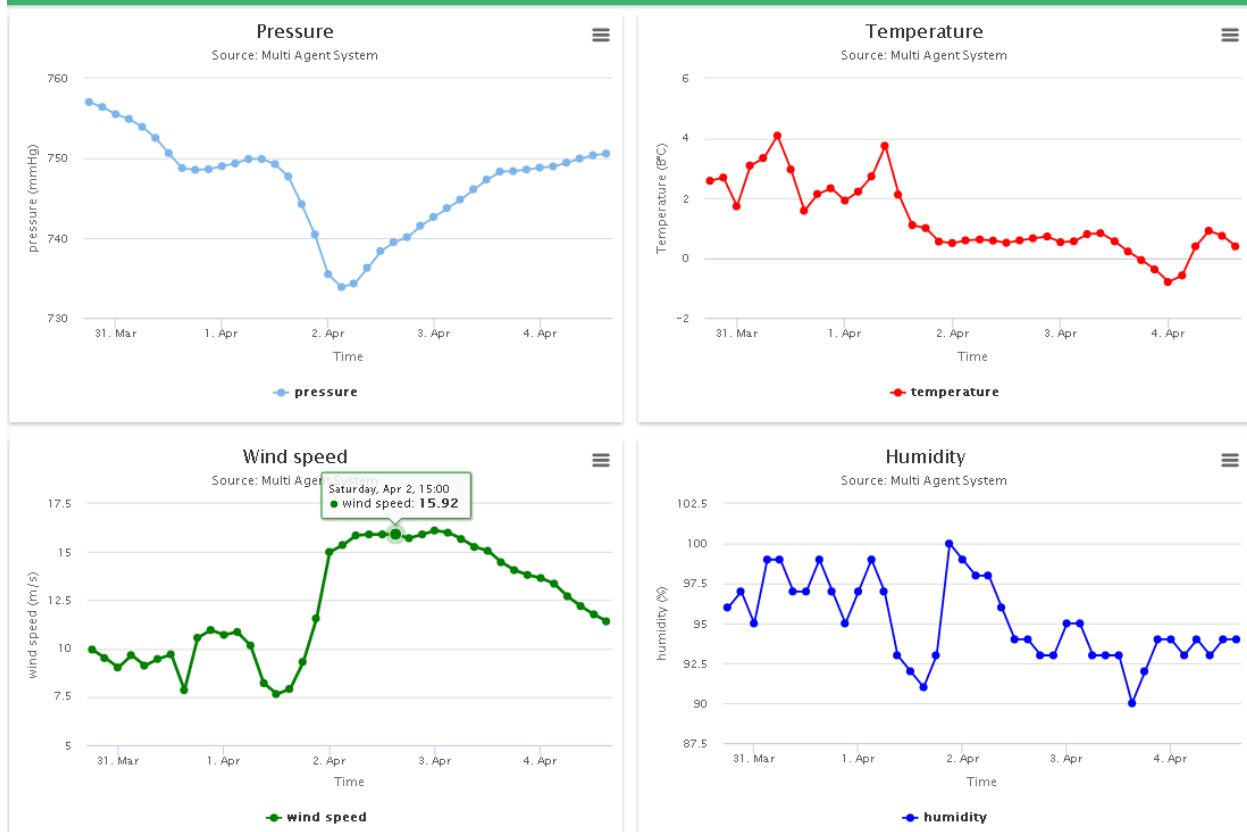


Рисунок 3.2. Графическое представление информации по погоде с использованием разработанного программного продукта

3.1.2 Агент моделирования

Агент моделирования (АМ) обеспечивает в МСУ прогнозирование уровня генерации электрической энергии установками, ее накопления для обеспечения работы энергетических установок в номинальном режиме, а также гарантированного электроснабжения потребителей с учетом полученного в ходе функционирования МСУ графика потребления электроэнергии. В рассматриваемой МСУ приоритет генерации электрической энергии отдается альтернативным источникам энергии.

Процесс работы АМ схематично представлен на рисунке 3.3, который состоит из шести пронумерованных этапов. На первом этапе АМ запрашивает у реестра энергетических установок («Реестр ЭУ») перечень функционирующих в рассматриваемый период времени энергетических установок. Под реестром понимается структурированные в виде таблиц данные, включающие информацию о действующих элементах МСУ. Например, в случае выхода из строя активного агента (например, для регламентных работ на ветрогенераторе) данный агент исключается из реестра. Использование реестров позволяет исключить хранение, обработку избыточной информации в каждом из агентов и развязать информационные потоки между АМ и другими агентами, что способствует повышению гибкости и масштабируемости системы.

На втором этапе после получения из реестра информации о функционирующих активных агентах АМ формирует им запросы для прогнозирования возможного уровня генерации электрической энергии с учетом погодных условий.

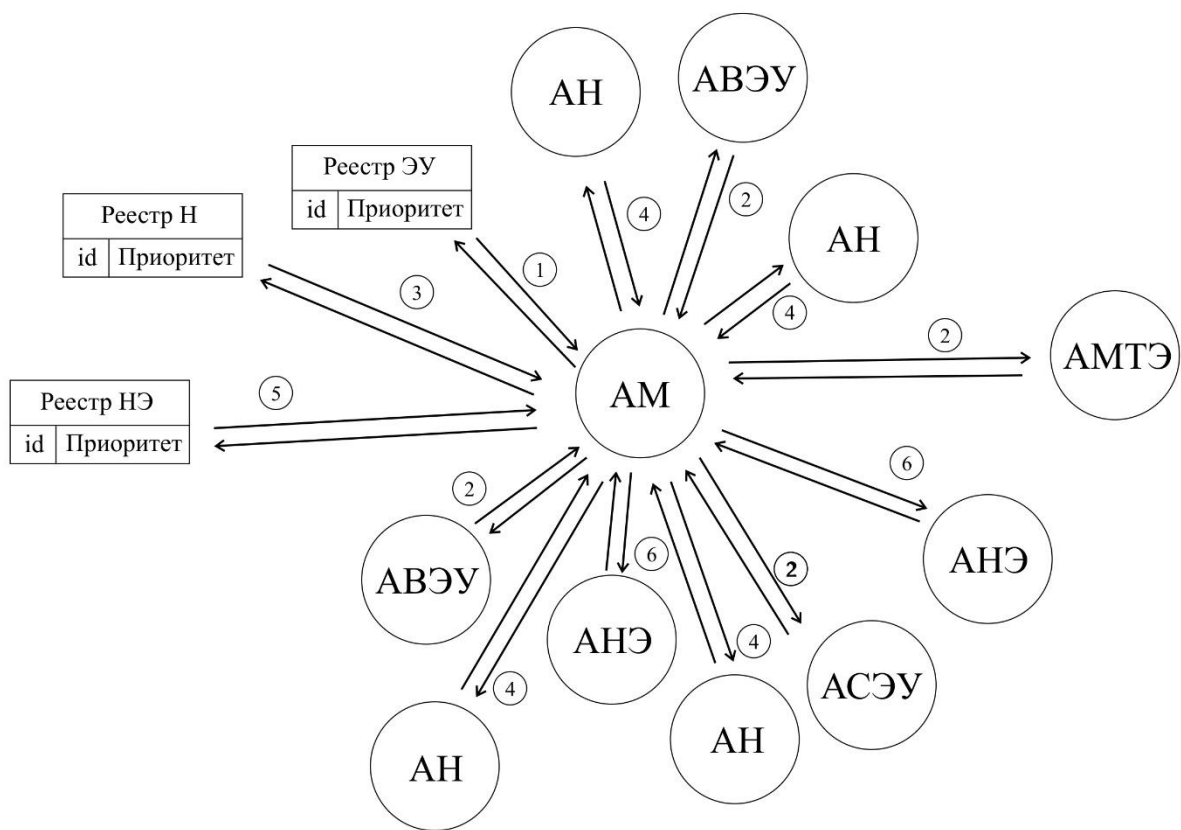


Рисунок 3.3. Взаимодействие активных агентов в режиме прогнозирования

На третьем этапе АМ из реестра нагрузок («Реестр Н») получает информацию об агентах нагрузки (АН) и перечень функционирующих потребителей на прогнозируемый период времени.

На четвертом этапе АМ формирует запрос АН для прогнозирования графика потребления электроэнергии в ЭЭК.

На пятом и шестом этапах работы АМ получает информацию о функционирующих накопителях энергии из реестра накопителей энергии («Реестр НЭ») и формирует запрос агентам накопителей энергии с целью прогнозирования объема энергии, накапливаемой и передаваемой в ЭЭК. На завершающей стадии работы после сбора всей информации от агентов АМ прогнозирует работу агента малых тепловых электростанций (АМТЭ), агента внешней сети (АВС) и агента накопителей энергии (АНЭ) с учетом разработанного алгоритма заряда/разряда аккумуляторных батарей, описанного во второй главе. На рисунке 3.4 представлена блок-схема алгоритма прогнозирования генерации, потребления и накопления электроэнергии в МСУ.

В таблице 3.3 представлены основные функции АМ и перечень агентов, с которыми он обменивается информацией.

Таблица 3.3 Основные функции АМ

Функции	Описание функций в ЭЭК
Управление генерацией электрической энергии применительно к данному АМ	Прогнозирование работы всей системы для перераспределения электроэнергии согласно прогнозу потребления энергии от АН.
Обмен данными между агентами	АМ перераспределяет электрическую энергии для более рационального накопления и генерации в зависимости от погодных условий, которые влияют на работу установок на альтернативных источниках энергии, а также от графика потребления. АМ обменивается информацией со следующими агентами: АН, АВЭУ, АМТЭ, АМГЭ, АСЭУ, АНЭ, АВС.

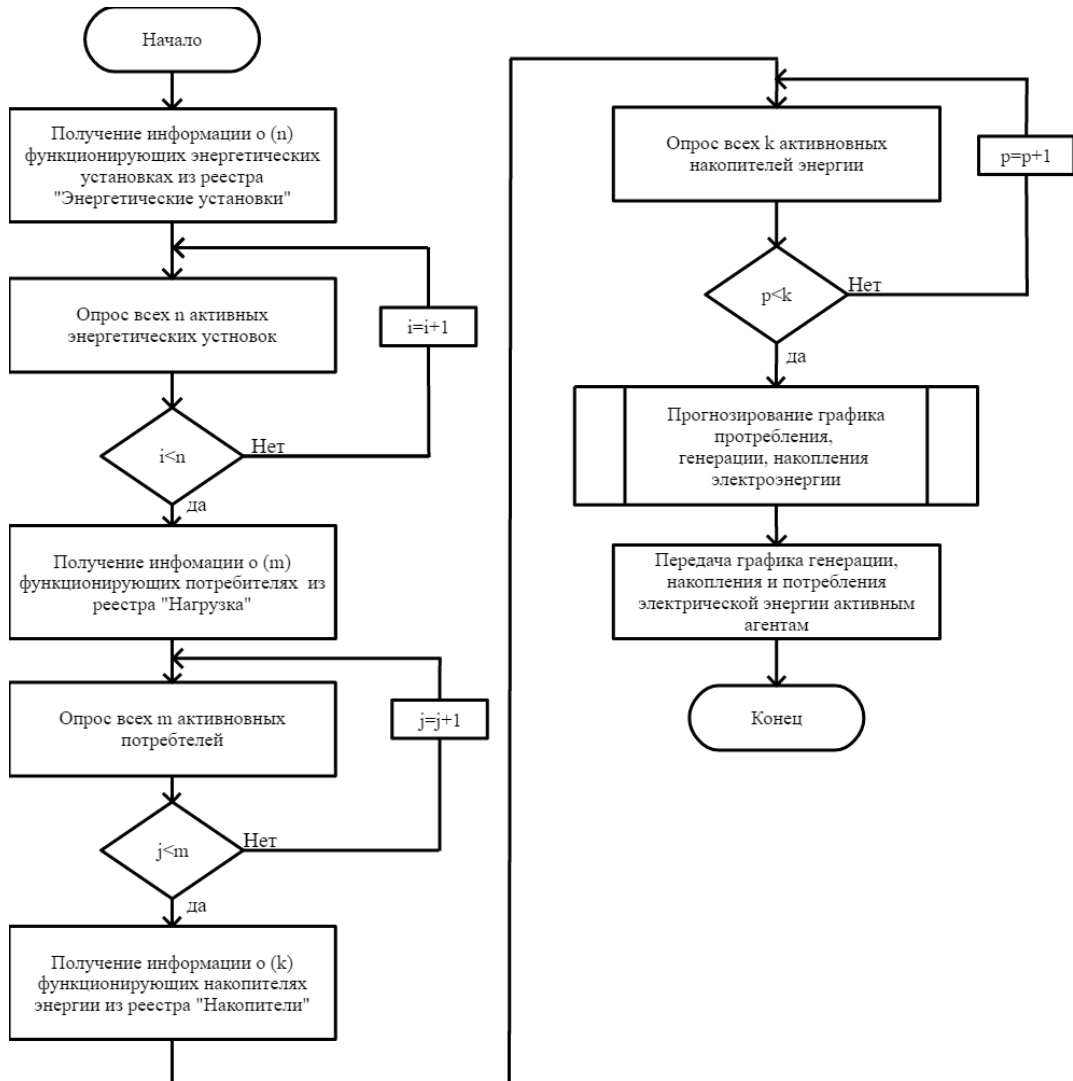


Рисунок 3.4. Блок - схема алгоритма прогнозирования генерации, потребления и накопления электроэнергии

3.2 Выбор способа управления данными многоагентной системы

Функционирование МСУ ЭЭК электроснабжения сопровождается сбором и накоплением большого объема информации о потребителях, генерирующих установках, внешней сети и т.д., соответствующих активных агентов МСУ в базе данных (БД). Накопленную информацию предлагается обрабатывать, используя методы «машинного обучения», для выявления зависимостей между данными, которые необходимы в управлении МСУ, что нашло отражение в патенте на полезную модель № RU 168 811 U1 от 15.07.2016, полученного по результатам научной работы в рамках настоящей диссертации [85].

Рассмотрим некоторые общие положения поиска таких зависимостей. Исходными данными для поиска зависимости является множество объектов (X) и множество ответов (Y). Между множествами объектов (X) и ответов (Y) существует зависимость ($X \rightarrow Y$). Под объектом понимаются любые данные, которые характеризуются различными признаками ($f_j, j = 1 \dots n$) [90, 126-129].

Пусть вектор ($f_1(x), \dots, f_n(x)$) является признаковым описанием объектов x_i . Тогда матрица векторов для дальнейшего анализа имеет вид:

$$F = \begin{pmatrix} f_1(x_1) & \dots & f_n(x_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ f_1(x_i) & \dots & f_n(x_i) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

В зависимости от типов ответов выделяют задачи: классификации (если множество ответов (Y) принимает значение конечного множества непересекающихся классов M ($Y = \{1 \dots M\}$) и регрессии (если множество ответов (Y) принимает значения на множестве действительных чисел R).

Для решения выбранных задач создается модель алгоритмов A , которая позволяет описать зависимость между данными:

$$A = \{g(x, \theta) | \theta \in \Theta\}, \quad (3.2)$$

где g – функция описывающая зависимость между данными, которую необходимо определить с некоторой точностью θ .

Для создания алгоритма A и последующей его проверки формируются две независимые выборки на основе эмпирических данных (матрицы векторов объектов и векторов ответов) – «обучающая» и «тестовая» соответственно. Алгоритм A (3.3) максимально точно описывает зависимость между данными с использованием методов «машинного обучения» [90, 129].

$$\begin{pmatrix} f_1(x_1) & \dots & f_n(x_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ f_1(x_i) & \dots & f_n(x_i) \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_i \end{pmatrix} \rightarrow A. \quad (3.3)$$

После получения алгоритма A осуществляется его проверка на точность с использованием «тестовой выборки».

Алгоритм A может быть создан с помощью одного из следующих методов:

- классификационные правила;
- деревья решений;
- математические функции [130].

Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки, которые необходимо учитывать при анализе большого объема данных в зависимости от рассматриваемой области. С целью оценки перечисленных методов были выбраны следующие показатели:

1. Коэффициент корреляции (*Correlation coefficient*):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}}; \quad (3.4)$$

2. Средняя абсолютная ошибка (*Mean Absolute Error, MAE*):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i); \quad (3.5)$$

3. Средняя квадратичная ошибка (*Root Mean Squared Error, RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}; \quad (3.6)$$

4. Относительная абсолютная погрешность (*Relative Absolute Error, RAE*):

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|f_i - y_i|)}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)}; \quad (3.7)$$

5. Относительное среднеквадратичное отклонение (*Root Relative Squared Error, RRSE*):

$$RRSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}}; \quad (3.8)$$

где $f(x_i)$ – значение зависимой переменной, полученной с использованием алгоритма A , y_i – значение в тестовой выборке.

В качестве инструмента для анализа способов создания алгоритма A использовалось программное обеспечение *Weka* [131]. Например, исходными данными ВЭУ для анализа являются: скорость ветра, давление, температура и мощность установки, распределение которых представлено на рисунке 3.5.

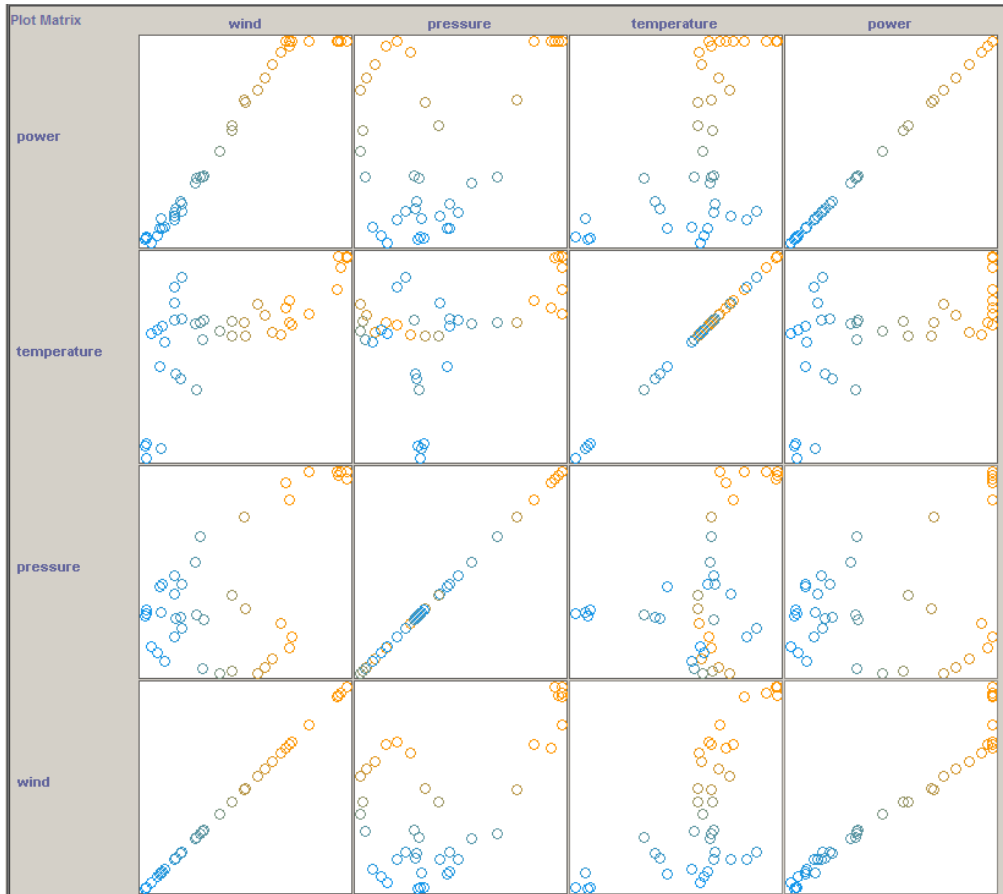


Рисунок 3.5. Распределение исходных данных для ВЭУ

Первоначально для создания алгоритма A рассмотрим метод построения математической функции, позволяющий находить функциональную зависимость с минимальной степенью ошибки [130]:

$$\min_{f \in F} R(f) = \min_{f \in F} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c(y_i, f(x_i)), \quad (3.9)$$

где F – множество всех возможных функций; $c(y_i, f(x_i))$ – функция потерь, в которой $f(x_i)$ – значение зависимой переменной, полученной с использованием алгоритма, y_i – значение в тестовой выборке.

Для построения математической функции рассмотрены следующие методы: линейной регрессии, опорных векторов, многослойного перцептрона [126-130].

Линейная регрессия. Задача линейной регрессии заключается в поиске линейной функции вида:

$$f(\bar{x}) = (\bar{x} \cdot \bar{\omega}) + b, \quad (3.10)$$

где $\bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$ – вектор атрибутов, $\bar{\omega} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \dots \\ \omega_n \end{pmatrix}$ – вектор весов атрибутов.

Достоинством линейной регрессии является простота вычислений, а недостатком – чувствительность к «выбросам». Линейная функция для исходного набора данных (рисунок 3.5) представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} power = 229.703 \cdot wind + (-31.8242) \cdot pressure + (-7.8359) \cdot \\ temperature + 2058.4 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Основные показатели метода линейной регрессии согласно (3.4) – (3.8) принимают следующие значения:

Коэффициент корреляции	0,9745
Средняя абсолютная ошибка	36,4281
Средняя квадратичная ошибка	46,7977
Относительная абсолютная погрешность	18,2271 %
Относительное среднеквадратичное отклонение	21,7523 %
Число исходных данных	100

Метод опорных векторов. Метод опорных векторов позволяет решать задачи классификации и регрессии. Метод заключается в построении разделяющей гиперплоскости в пространстве признаков.

Основные показатели метода опорных векторов согласно (3.4) – (3.8) принимают следующие значения:

Коэффициент корреляции	0,9637
Средняя абсолютная ошибка	39,9501
Средняя квадратичная ошибка	56,4083
Относительная абсолютная погрешность	19,9893 %
Относительное среднеквадратичное отклонение	26,2194 %
Число исходных данных	100

Многослойный перцептрон. Данный метод предусматривает использование понятий нейронных сетей. Нейрон – основной элемент нейронной сети, который является сумматором с варьируемыми весовыми коэффициентами. Перцептрон – элементарный линейный сумматор. Узел – отдельный нейрон, имеющий несколько входных сигналов и один выходной сигнал. Слой – множество нейронов (узлов), имеющих общие входные и выходные сигналы. Многослойный

перцептрон – однонаправленная нейронная сеть при отсутствии связей между нейронами одного слоя. Переобучение – явление при использовании нейронных сетей, когда созданная модель на основе «обучающей выборки» плохо работает с «тестовой выборкой», не участвующей в «обучении».

Основные показатели метода многослойного перцептрона согласно (3.4) – (3.8) принимают следующие значения:

Коэффициент корреляции	0,9976
Средняя абсолютная ошибка	11,6438
Средняя квадратичная ошибка	14,4171
Относительная абсолютная погрешность	5,826 %
Относительное среднеквадратичное отклонение	6,7013 %
Число исходных данных	100

Таким образом, создание алгоритма A с использованием метода многослойного перцептрона рационально применять для решения задач с высокой точностью. При этом главными недостатками данного метода являются низкая интерпретируемость модели и переобучение.

Рассмотрим два других метода по созданию алгоритма A – классификационные правила и деревья решений. Данные методы обладают существенными преимуществами: легкость интерпретации полученных данных и доступность работы с ними.

Дерево решений – частный случай графов, состоящее из «корня, узлов и листьев» [132-133]. Подход по созданию алгоритма A с использованием дерева решений требует определения следующих понятий:

1. Корнем дерева называется узел, который не имеет родителей (узлов, находящихся на более высоком уровне).
2. Любой узел может иметь несколько ребер, который соединяется с узлами более низкого уровня называемые потомками.

3. Листовым узлом (листом) называется узел, не имеющий потомков.

Существуют различные алгоритмы построения дерева решений, среди которых основными являются: ID3, C4.5, M5, CART.

В качестве алгоритма построения дерева решений был выбран алгоритм M5, разработанный Джоном Р. Квинланом (*John R. Quinlan*).

Дерево решений строится рекурсивно – сверху вниз и в каждом узле выбирается наибольшее расчетного значения усеченного среднеквадратического отклонения SDR (*Standard Deviation Reduction*):

$$SDR = sd(T) - \sum_i \frac{T_i}{T} sd(T_i), \text{ где} \quad (3.12)$$

$$sd = \sqrt{\frac{\sum(x-\mu)^2}{n}}. \quad (3.13)$$

В случае, когда SDR принимает значение меньше выбранного значения ζ или количество подмножества меньше определенного числа, то дальнейшее разбиение на узлы прекращается и данное множество становится листом дерева решений [133].

Для реализации предложенного многоагентного управления ЭЭК на рисунке 3.6 представлен пример созданного дерева решений для прогнозирования выработки электроэнергии ВЭУ на основе накопленной информации за время функционирования системы. В качестве тестовых данных была взята выборка из 100 подмножеств, которые содержат данные о скорости ветра, давлении, температуре и энергии выработанной ВЭУ (рисунок 3.5). Представленное на рисунке 3.6 дерево решений позволяет проиллюстрировать особенность работы данного алгоритма [90].

В случае использования большого объема данных эффективность дерева решений резко падает ввиду его «разрастания». Для повышения эффективности данного метода применяется механизм «отсечения деревьев» (*pruning*). В листах дерева решений происходит линейная регрессия, которая максимально точно сглаживает разброс значений после усечения дерева. Линейная регрессия в листах усеченного дерева для данного примера имеет следующий вид:

$$LM \text{ num: } 1 \text{ power} = 210,4863 \cdot \text{wind} + (-13,4457) \cdot \text{pressure} + 531,7884$$

$$LM \text{ num: } 2 \text{ power} = 186,4865 \cdot \text{wind} + (-15,0755) \cdot \text{pressure} + +964,4998$$

$$LM \text{ num: } 3 \text{ power} = 138,5774 \cdot \text{wind} + (-15,0755) \cdot \text{pressure} + 1535,6499$$

Кроме того, любое дерево решений можно представить в виде классификационных правил, состоящих из условий «если/то» и имеющих следующий вид:


```

wind <= 9.42 :
| wind <= 8.36 :
| | wind <= 7.33 :
| | | wind <= 6.54 :
| | | | wind <= 6.305 : LM1 (2/4.772%)
| | | | wind > 6.305 : LM2 (2/2.833%)
| | | | wind > 6.54 :
| | | | | wind <= 6.985 : LM3 (3/5.474%)
| | | | | wind > 6.985 : LM4 (2/1.491%)
| | | wind > 7.33 :
| | | | wind <= 7.805 :
| | | | | pressure <= 101.069 :
| | | | | | wind <= 7.635 : LM5 (2/2.684%)
| | | | | | wind > 7.635 : LM6 (2/2.386%)
| | | | | | pressure > 101.069 : LM7 (2/2.088%)
| | | | | wind > 7.805 :
| | | | | | wind <= 8.06 :
| | | | | | | wind <= 7.91 : LM8 (2/5.667%)
| | | | | | | wind > 7.91 : LM9 (2/2.386%)
| | | | | | | wind > 8.06 : LM10 (4/2.79%)
| | | wind > 8.36 :
| | | | wind <= 9.035 :
| | | | | wind <= 8.855 :
| | | | | | wind <= 8.485 : LM11 (3/6.286%)
| | | | | | wind > 8.485 : LM12 (8/4.736%)
| | | | | | wind > 8.855 : LM13 (7/4.493%)
| | | | | wind > 9.035 :
| | | | | | pressure <= 100.862 :
| | | | | | | temperature <= -13.95 : LM14 (3/8.423%)
| | | | | | | temperature > -13.95 : LM15 (2/0.447%)
| | | | | | | pressure > 100.862 : LM16 (9/4.51%)
wind > 9.42 :
| wind <= 11.26 :
| | wind <= 10.355 :
| | | wind <= 9.935 :
| | | | wind <= 9.665 : LM17 (7/3.673%)
| | | | wind > 9.665 :
| | | | | temperature <= -21.88 : LM18 (3/5.95%)
| | | | | temperature > -21.88 : LM19 (6/2.633%)
| | | | | wind > 9.935 :
| | | | | | wind <= 10.065 : LM20 (5/3.694%)
| | | | | | wind > 10.065 : LM21 (7/3.524%)
| | | | | wind > 10.355 :
| | | | | | wind <= 10.645 :
| | | | | | | pressure <= 101.047 :
| | | | | | | | wind <= 10.49 : LM22 (4/3.631%)
| | | | | | | | wind > 10.49 : LM23 (3/3.042%)
| | | | | | | | pressure > 101.047 : LM24 (3/6.011%)
| | | | | | | | wind > 10.645 :
| | | | | | | | | wind <= 10.91 :
| | | | | | | | | | pressure <= 100.862 : LM25 (3/6.036%)
| | | | | | | | | | pressure > 100.862 : LM26 (3/1.828%)
| | | | | | | | | | wind > 10.91 :
| | | | | | | | | | | wind <= 11.045 : LM27 (2/1.044%)
| | | | | | | | | | | wind > 11.045 : LM28 (2/5.368%)
| | | | | | | | | | | wind > 11.26 : LM29 (17/2.211%)

```

Основные показатели метода дерева решений согласно (3.4) – (3.8) принимают следующие значения:

Коэффициент корреляции	0,9901
Средняя абсолютная ошибка	23,0109
Средняя квадратичная ошибка	29,3387
Относительная абсолютная погрешность	11,8961 %
Относительное среднеквадратичное отклонение	14,083 %
Число исходных данных	100

Безусловно, точность результатов, полученных с помощью дерева решений, зависит от количества используемых данных, которые необходимо накапливать в течение длительного промежутка времени. В таблице 3.4 представлены результаты работы дерева решений при разном количестве исходных данных.

Таблица 3.4. Влияние числа используемых данных на точность дерева решений

Количество используемых данных	100	200	400
Относительная абсолютная погрешность, %	11,864	7,327	4,020
Относительное среднеквадратичное отклонение, %	14,081	8,326	4,346

Проведенный анализ методов поиска зависимостей между исходными данными многоагентной системы показал целесообразность применения метода дерева решений. Этот выбор обусловлен наличием относительно высокой точности получаемых результатов, а также относительно невысокой сложности и длительности настройки алгоритма дерева решений. Например, использование нейронных сетей требует в 10 раз больше времени на настройку, чем выбранный метод дерева решений [134]. Кроме того, при точности прогноза погоды на следующие сутки 95% и 80% – на двое суток вперед метод дерева решений является предпочтительным для прогнозирования работы установок на альтернативных источниках энергии с учетом точности прогноза погоды.

3.3 Процесс прогнозирования работы активных агентов в многоагентной системе управления

Рассмотрим работу одного из активных агентов МСУ агента ветроэнергетической установки (АВЭУ) с применением метода дерева решений на заданный период времени.

В связи с отсутствием ранее накопленной информации о работе МСУ ЭЭК на первом этапе для прогнозирования генерации, потребления и накопления электрической энергии используются аналитические зависимости функционирования активных агентов, указанные во второй главе диссертации. В последующем, после накопления достаточной информации МСУ переходит к работе с использованием метода дерева решений.

На рисунке 3.7 представлена диаграмма деятельности (*activity diagram*) МСУ на примере прогнозирования выходной мощности ВЭУ, которая реализована в разработанном программном продукте МСУ, приведенном в параграфе 2.2.

В рассматриваемом примере принимают участие три агента АМ, АВЭУ, АОС. При поступлении запроса на АВЭУ агент инициирует создание двух параллельных информационных потоков, которые обеспечивают сбор информации о погодных условиях и поиск оптимальной модели для расчета выходной мощности ВЭУ. Первый информационный поток формируется с запроса к АОС, который собирает информацию о погодных условиях из веб-сервисом метеорологических служб. После получения информации о погоде АОС формирует ответ АВЭУ с погодными данными, замыкая первый информационный поток [90].

Параллельно с первым функционирует второй поток, который обеспечивает обмен информацией между АВЭУ и АМ. АВЭУ формирует второй информационный поток для запроса о поиске модели на основе накопленных данных с помощью метода дерева решений.

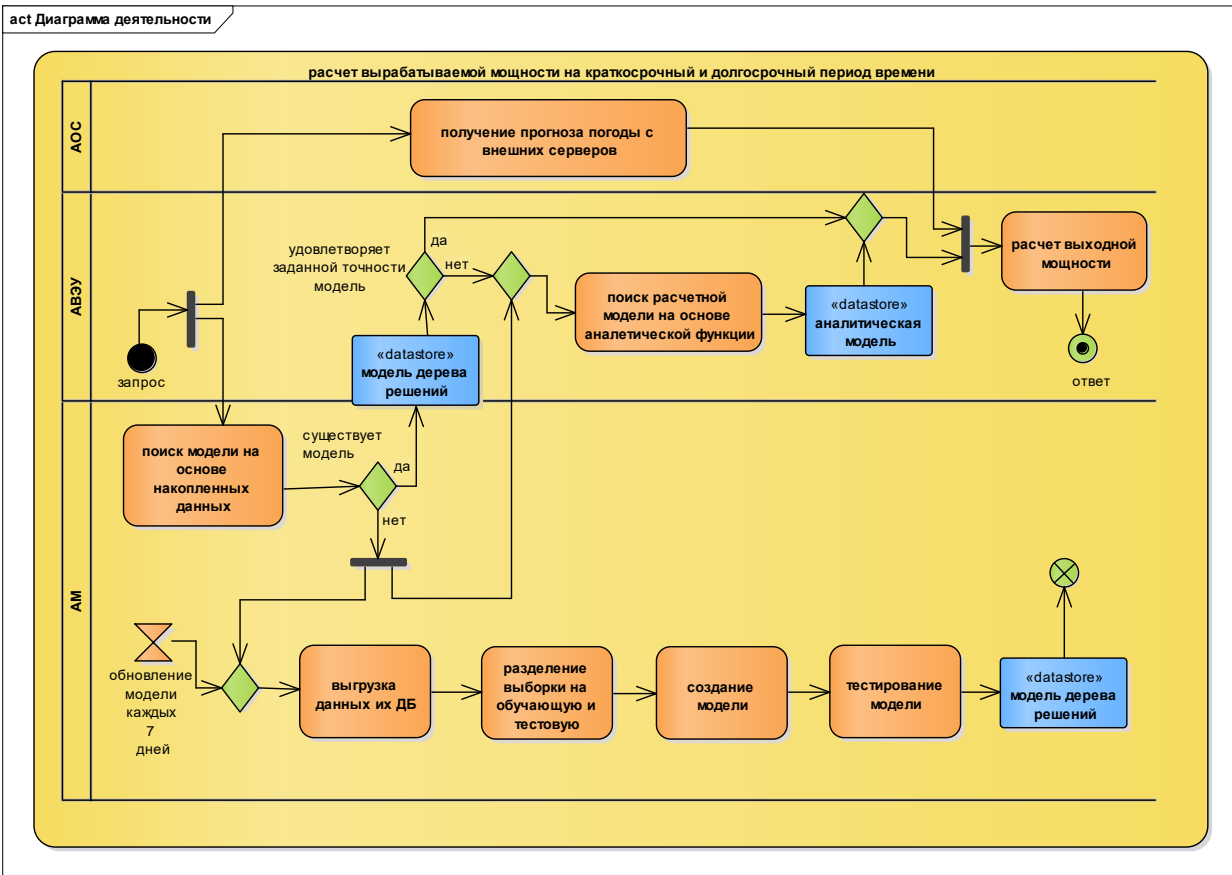


Рисунок 3.7. Диаграмма деятельности МСУ на примере АВЭУ

В случае, если модель не была найдена, АМ запускает процесс для ее создания, первым шагом которого является выгрузка накопленной информации из базы данных и разделения ее на обучающую и тестовую выборки. На основе обучающей выборки АМ создает модель, которая максимально точно описывает зависимость между собранными данными. Следующим шагом является оценка точности разработанной модели на тестовой выборке и последующее ее сохранение.

Выгрузка, обработка данных является ресурсоемким процессом и требует достаточно много времени, поэтому АВЭУ при получении отрицательного ответа о существовании модели АМ инициализирует процесс поиска модели на основе аналитической функции, описанных во второй главе. Если модель была найдена АМ, АВЭУ оценивает ее точность и, в случае выполнения требований по точности, осуществляется расчет выходной мощности на основе модели, полученной с помощью метода дерева решений.

На завершающем этапе работы МСУ происходит синхронизация двух информационных потоков для расчета выходной мощности на основе выбранной модели (аналитической или дерева решений) согласно актуальным погодным условиями, полученным от АОС.

С целью обеспечения заданной точности предложенный алгоритм позволяет в автоматическом режиме переключаться между различными методами прогнозирования, основываясь на накопленных в процессе работы ЭЭЖ данных.

Выводы по третьей главе

1. Внедрение служебных агентов, как элементов многоагентной системы управления, позволяет обмениваться информацией о погоде на выбранный период времени с веб-сервисами метеорологических служб с целью прогнозирования потребления, генерации и накопления электрической энергии в электроэнергетическом комплексе (ЭЭК) с альтернативными источниками энергии.

2. Проведённый анализ методов прогнозирования с использованием выбранных критериев (точность, уровень интерпретируемости, степень сложности настройки), позволяет сделать вывод о целесообразности использования метода дерева решений для обработки накопленной информации в разработанной системе управления.

3. В случае отсутствия накопленной информации о работе ЭЭК, для прогнозирования генерации, потребления и накопления электрической энергии разработанная многоагентная система управления (МСУ) использует аналитические зависимости функционирования активных агентов, указанные во второй главе диссертации. В последующем, после накопления достаточной информации, с целью повышения точности прогнозирования МСУ переходит на работу с использованием метода дерева решений.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ

4.1 Сравнительный анализ методов прогнозирования с использованием компьютерного моделирования

Разработанная многоагентная система управления (МСУ) предназначена для перераспределения электроэнергии, генерируемой малыми тепловыми электростанциями и установками на альтернативных источниках энергии, между потребителями с помощью накопителей энергии (НЭ). МСУ позволяет реализовать выравнивание графика потребления электроэнергии в течение дня.

С целью подтверждения положений диссертационной работы проведено моделирование МСУ на примере малого электроэнергетического комплекса (МЭЭК) в составе: группы потребителей (общей мощностью 10 кВт), энергетические установки, в том числе использующие альтернативные источники энергии и накопители энергии. Создание МЭЭК предусматривает три этапа: анализ графика потребления, выбор энергетических установок и определение накопителей энергии для гарантируемого электроснабжения потребителей.

На первом этапе проводится моделирование нагрузки с использованием вероятностно-статистической модели, которая описывает математически потребление электроэнергии в течение выбранного временного промежутка, и анализ графика потребления [135].

На втором этапе осуществляется выбор ветроэнергетической установки (ВЭУ), которая обеспечивает необходимую потребителю мощность, и ее конструктивных характеристик (в первую очередь радиус ветроколеса). Согласно методическим указаниям РД 52.04.275-89 для выбора ВЭУ достаточно использовать архивные данные метеорологических наблюдений [136]. В связи с этим произведена выборка данных за 5 лет из архива метеорологических наблюдений для района, где потенциально возможна установка ВЭУ в качестве источника энергии для МЭЭК, со средней годовой скоростью ветра в 5,8 м/с.

Одной из основных характеристик ВЭУ является повторяемость скорости ветра, которая описывается функцией Вейбулла-Генденко [137,138]:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}, \quad (4.1)$$

где c – параметр масштаба, k – параметр формы, $F(V)$ – функция интегральной повторяемости скорости ветра, которая характеризует вероятность скорости равной или ниже V .

После выполнения дифференцирования выражения (4.1), плотность распределения скорости ветра определяется следующим соотношением:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}. \quad (4.2)$$

Зная вероятность распределения, определяется повторяемость скорости ветра на интересующем интервале скоростей ветра:

$$P(V_1 < V < V_2) = F(V_2) - F(V_1) = e^{-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_2}{c}\right)^k} \quad (4.3)$$

На основе вероятностного анализа повторяемости скорости ветра рассчитывается среднегодовая энергия, которую выработает ВЭУ:

$$W = T \sum_{j=1}^n P_j(V) N_j(V) \quad (4.4)$$

где P_j – вероятность повторения скорости ветра, N_j – выходная мощность ветрогенератора, T – время работы ветрогенератора.

Для обеспечения гарантированного электроснабжения потребителей используется дизельный генератор, который обеспечивает снабжение электроэнергией потребителей в случае штиля или нехватки электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, и который выбирается с учетом покрытия максимальной потребляемой электрической мощности МЭЭК.

Основным параметром эффективности использования силовой установки является удельный расход топлива [139]:

$$G_T = K_{xx} G_H + (1 - K_{xx}) G_H \frac{P_T}{P_H}, \quad (4.5)$$

где G_T, G_H – номинальный и фактический расход топлива; K_{xx} – коэффициент холостого хода; P_T, P_H – номинальная и фактическая мощность.

Последним этапом создания МЭЭК является выбор НЭ, которые позволяют накапливать электроэнергию в случае превышения мощности, вырабатываемой ВЭУ, над нагрузкой. Кроме того, использование НЭ в системе электроснабжения позволяет повысить эффективность дизельного генератора за счет его работы в номинальном режиме, исключая частые режимы включения и выключения генератора, приводящие к износу оборудования.

На рисунке 4.1 представлена функциональная схема МЭЭК с шиной постоянного тока, которая включает следующие элементы:

1. Ветроэнергетическая установка (А1);
2. Выпрямитель (А2, А7);
3. Конвертор (А5);
4. Инвертор (А3);
5. Аккумуляторная батарея (А6);
6. Нагрузка (А4).

ВЭУ (А1) выполняет роль основного источника энергии в МЭЭК, которая подключается к линии постоянного тока через выпрямитель (А2). Дизельный генератор подключается к шине постоянного тока через выпрямитель (А7). Аккумуляторная батарея (А6) в системе осуществляет перераспределение электроэнергии между ночным и дневным промежутками времени. Конвертор (А5) обеспечивает согласование уровней напряжений между АБ (А6) и шиной постоянного тока. Инвертор (А3) преобразует постоянный ток в переменный с частотой 50 Гц для питания электроэнергией потребителей.

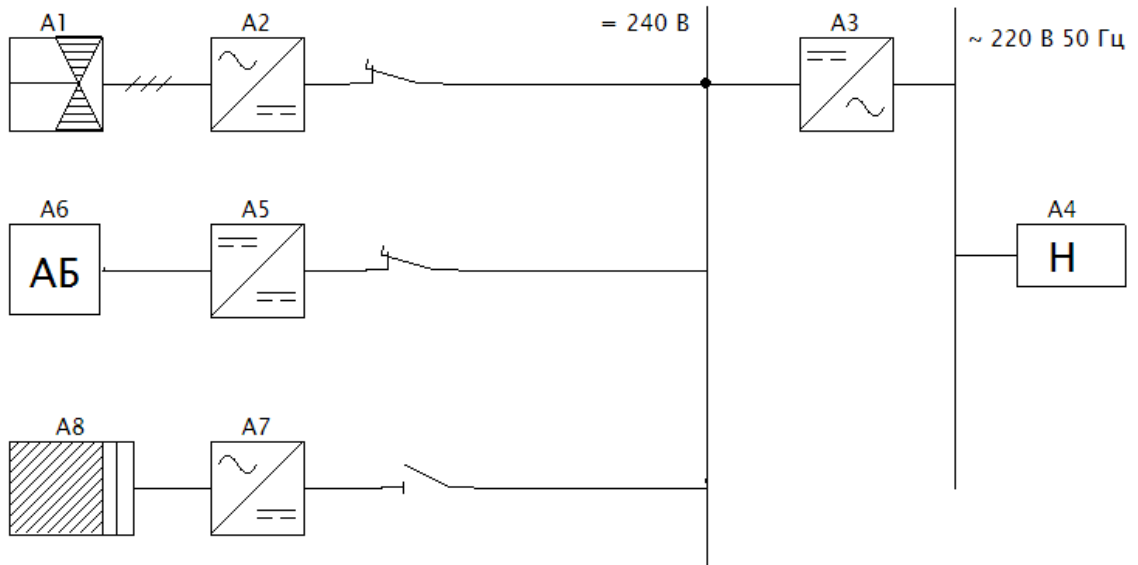


Рисунок 4.1. Функциональная схема МЭЖ

В качестве ВЭУ (А1) выбрана установка с характеристиками, приведенными в таблице 4.1, в составе трехфазного генератора с постоянными магнитами номинальной мощностью 10 кВт и встроенного выпрямителя (А2) на выходе.

Таблица 4.1. Технические характеристики ВЭУ

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальная мощность, кВт	10
2	Минимальная скорость ветра, м/с	2
3	Максимальная скорость ветра, м/с	25
4	Номинальное выходное напряжение, В	240
5	Диапазон изменения выходного напряжения, В	216...264
7	Номинальный ток, А	42
8	Максимальный ток, А	50

Инвертор для подключения потребителей (А3) собран из модулей с параметрами, приведенными в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Технические характеристики одного модуля инвертора

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальная мощность, кВА	4
2	Номинальное входное напряжение, В	220
3	Диапазон изменения входного напряжения, В	176...264
4	Номинальное выходное напряжение, В	220
5	Диапазон изменения выходного напряжения, В	210...230
6	Частота, Гц	50

В качестве нагрузки (А4) для моделирования выбран частный дом с номинальной мощностью потребления электроэнергии – 10 кВт. При расчете

номинальной мощности проведен аудит потребления электроэнергии для оценки возможной работы различных нагрузок в течение дня (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Перечень потребителей электроэнергии

№	Наименование оборудования	Мощность, кВт
1	Лампа светодиодная	0,02
2	Холодильник	0,5
3	Посудомоечная машина	1,5
4	Измельчитель пищевых отходов	0,4
5	Чайник	2,3
6	Кофемашина	2,0
7	СВЧ-печь	1,3
8	Компьютерное место	0,9
9	Кондиционер	1,5
10	Вентиляционная установка	1,1
11	Стиральная машина	1,5

Как правило, реальное потребление электроэнергии составляет 15-20% от номинальной мощности и только в течение короткого периода превышает номинальное значение. Характеристики нагрузки выбранной системы представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Параметры нагрузки

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальное напряжение нагрузки, В	220
2	Диапазон изменения входного напряжения на нагрузке, В	216...242
3	Номинальная мощность, кВт	10
4	Максимальная мощность, кВт	15,3
5	Число фаз	1
6	Частота, Гц	50

Для выравнивания графика потребления электроэнергии между ночным и дневным периодом времени, а также накопление избыточной энергии от ВЭУ при моделировании использовались два вида АБ. В таблице 4.5 и 4.6 представлены технические характеристики кислотных и литий-фосфатных аккумуляторных батарей соответственно.

Таблица 4.5. Технические характеристики кислотной аккумуляторной батареи

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальное напряжение, В	2
2	Номинальная емкость, Ач	420
3	Ток заряда максимальный, А	84
4	Ток разряда максимальный, А	$\leq 5C$
5	Число циклов (при глубине разряда 80%)	1200

Таблица 4.6. Технические характеристики литий-фосфатной аккумуляторной батареи

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальное напряжение, В	2,8
2	Номинальная емкость, Ач	400
3	Ток заряда максимальный, А	$\leq 3C$
4	Ток разряда максимальный, А	$\leq 10C$
5	Ток заряда номинальный, А	0,5C
6	Ток разряда номинальный, А	0,5C
7	Число циклов (при глубине разряда 80%)	5000

В процессе моделирования использовался конвертор (A5) с характеристиками, приведенными в таблице 4.7.

Таблица 4.7. Технические характеристики конвертора (А5)

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальная мощность, кВт	10
2	Номинальное входное напряжение, В	220
3	Диапазон изменения входного напряжения, В	200...250
4	Номинальное выходное напряжение, В	48
5	Диапазон изменения выходного напряжения, В	45...55

Гарантированное электроснабжение потребителей обеспечивает дизельный генератор (А8) с выпрямителем (А7) для подключения к шине постоянного тока. Характеристики дизельного генератора и выпрямителя приведены в таблицах 4.8, 4.9 соответственно.

Таблица 4.8. Технические характеристики дизельного генератора

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальная мощность, кВА / кВт	18,75 / 15
2	Напряжение, В	230 / 400
3	Частота / скорость вращения, Гц / об/мин	50 / 1500
4	Число фаз	3
5	Удельный расход топлива, г/кВт·ч	258
6	КПД, %	93
7	Регулируемый диапазон напряжения, %	+/- 5

Таблица 4.9. Технические характеристики выпрямителя

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальное напряжение, В	198...242
2	Частота, Гц	50
3	Выходное напряжение, В	0...460
4	Номинальный ток нагрузки, А	80
5	Питание системы управления, В / Гц	220 / 50

Разработанная многоагентная система управления электроснабжением (рисунок 4.2) включает элементы МЭЭК и дополнительные агенты управления: агент ветроэнергетической установки (АВЭУ), агент нагрузки (АН), агент накопителей энергии (АНЭ), агент малых тепловых электростанций (АМТЭ), агент окружающей среды (АОС), агент моделирования (АМ). Состав МСУ с использованием элементов МЭЭК приведен в таблице 4.10, что является развитием технического решения, предложенного в патенте на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016 в рамках настоящей диссертационной работы [85].

Таблица 4.10. Состав многоагентной системы

№	Элементы МСУ	Элементы МЭЭК
1	АВЭУ	ВЭУ (А1), выпрямитель (А2)
2	АН	Инвертор (А3), нагрузка (А4)
3	АНЭ	Конвертор (А5), АБ (А6)
4	АМТЭ	Выпрямитель (А7), дизельный генератор (А8)
5	АОС	–
6	АМ	–

Осуществлено моделирование и исследование следующие временные диаграммы:

- модель графика потребления электроэнергии, генерируемой ВЭУ;
- модель процесса заряда/разряда АБ.

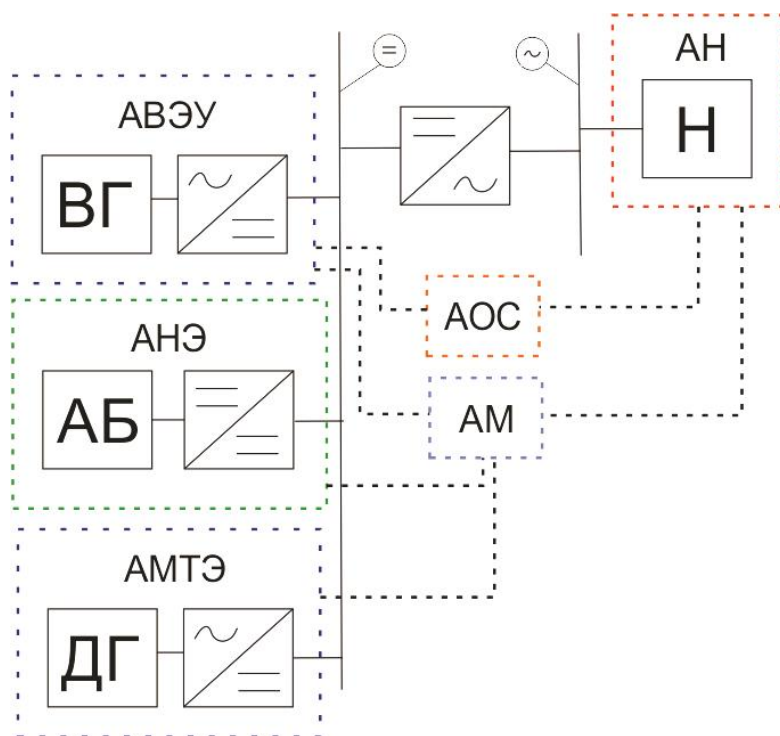


Рисунок 4.2. Многоагентная система управления электроснабжением
МЭЭК с общей шиной постоянного напряжения

На рисунке 4.3 представлен график потребления электроэнергии в течение суток (кривая 2). С целью подтверждения целесообразности использования метода дерева решения в МСУ построены прогнозируемые графики потребления электроэнергии на основе аналитических зависимостей (кривая 1) и метода дерева решений (кривая 3).

Для оценки точности прогнозирования применяется среднеквадратическое отклонение, вычисляемое по формуле:

$$MAEP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f_i - y_i|}{y_i} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

где f_i – прогнозируемая мощность потребления электроэнергии, y_i – мощность потребления электроэнергии.

Рассчитанное по формуле (4.6) среднеквадратическое отклонение графика потребления (кривая 2) от прогнозируемого графика потребления, построенного с помощью аналитических зависимостей (кривая 1), составляет 14,79%, в то время как прогнозируемый график потребления по методу дерева (кривая 3) решений имеет отклонение 7,56%.

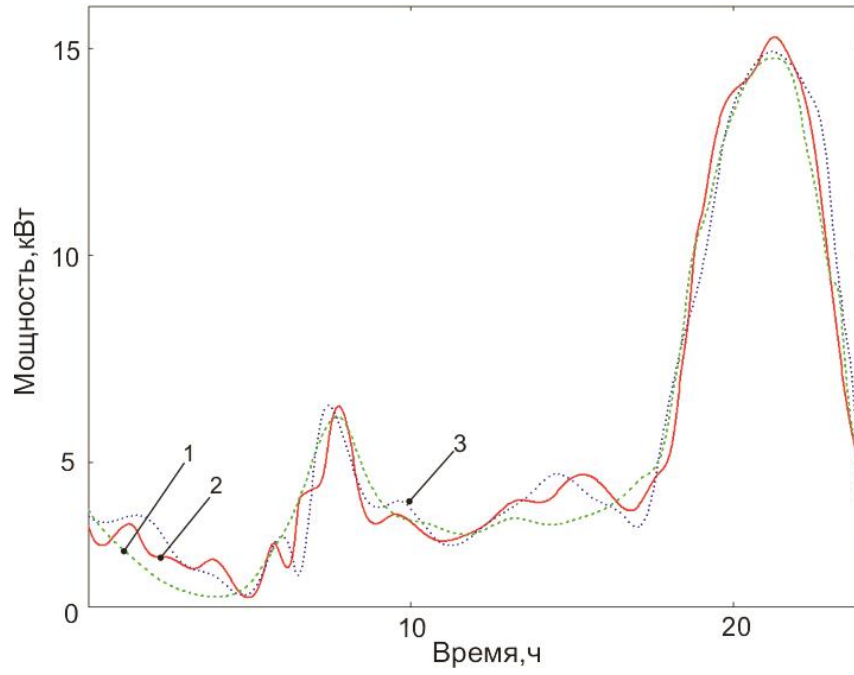


Рисунок 4.3. График потребления электроэнергии в течение суток

Сопоставление графиков, полученных при использовании аналитических зависимостей и метода дерева решений, по среднеквадратическому отклонению показало целесообразность использования метода дерева решений для прогнозирования процессов в выбранном МЭЭК.

На рисунке 4.4 представлены графики генерируемой ВЭУ электроэнергии в течение суток, где кривая 1 – прогнозируемый с помощью метода дерева решений график, кривая 2 – фактический график генерируемой ВЭУ электроэнергии.

Кроме того, как отмечалось ранее и следует из графика, представленного на рисунке 4.3, существует неравномерность потребления электроэнергии между дневным и ночным временем суток. Указанный дисбаланс в потреблении электроэнергии нивелируется путем применения накопителей энергии – аккумуляторных батарей, которые накапливают электроэнергию, генерируемую ВЭУ в течение дня, и передают ее потребителю в часы пик.

На рисунке 4.5 представлен график заряда/разряда АБ в течение суток, полученный с использованием графиков потребления (рисунок 4.3) и генерации ВЭУ (рисунок 4.4) электроэнергии. В рассматриваемом случае дизельный генератор выступает в качестве резервного источника энергии.

При использовании АБ нескольких типов возникает задача по выбору рационального и эффективного процесса заряда/разряда для каждого из типов АБ, решение которой представлено во второй главе. На рисунке 4.6 представлен график заряда/разряда кислотных (кривая 1) и литий-железо-фосфатных (кривая 2) АБ с использованием подхода, предложенного в параграфе 2.2.6. Моделирование показало, что стоимость одного цикла работы АБ уменьшилось на 14,7 %.

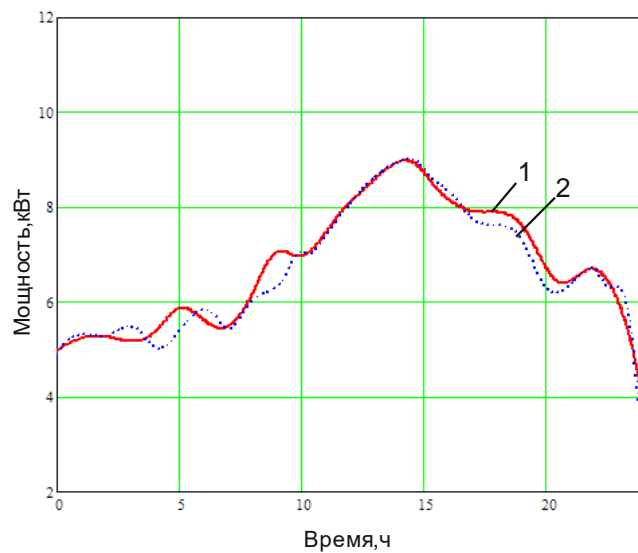


Рисунок 4.4. Графики вырабатываемой ВЭУ электроэнергии в течение суток

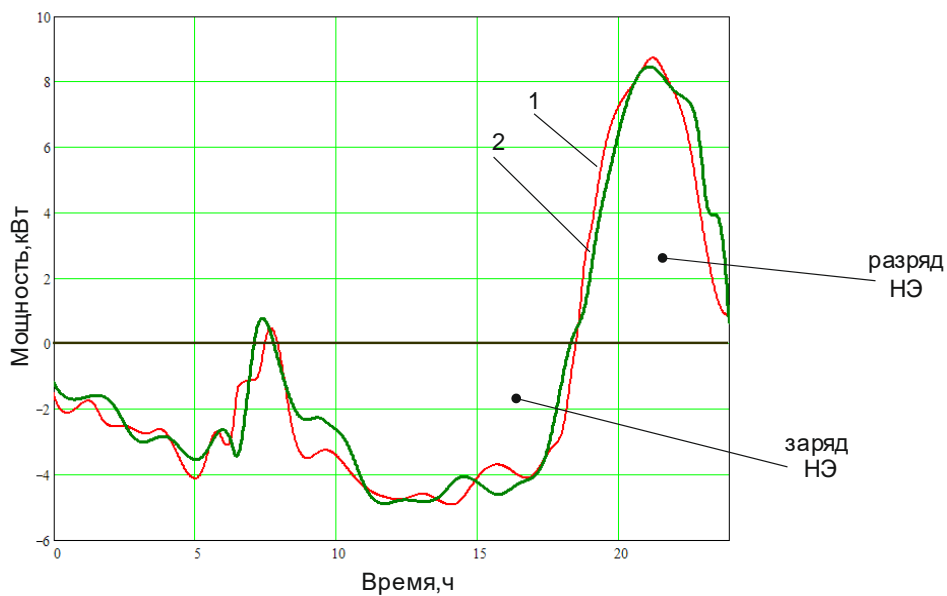


Рисунок 4.5. Графики заряда/разряда АБ

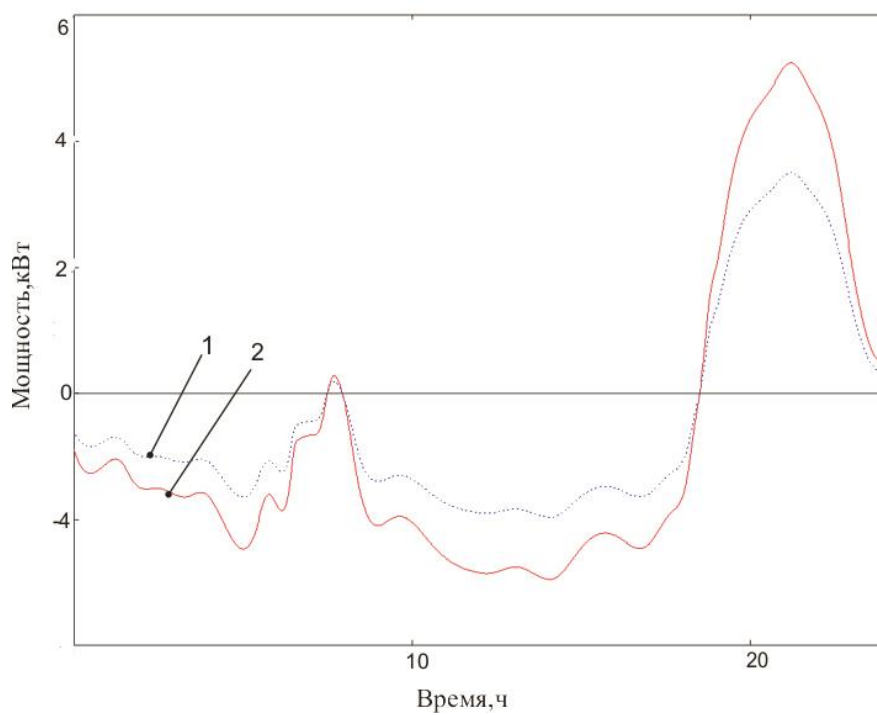


Рисунок 4.6. Графики заряда/разряда кислотной (кривая 1) и литий-железо-фосфатной (кривая 2) АБ

Таким образом, в ходе компьютерного моделирования подтверждена работоспособность разработанной многоагентной системы управления электроэнергетическим комплексом. Кроме того, подтверждена целесообразность использования метода дерева решений для прогнозирования процессов в системе при среднеквадратичном отклонении от фактических показателей не более 7,56%, что позволяет эффективно функционировать системе, а также предложенного во второй главе диссертации подхода по определению рационального режима заряда/разряда различных типов АБ, который позволяет снизить стоимость одного цикла на 14,7 %.

Выводы по четвертой главе

1. Проведенное моделирование выбранного электроэнергетического комплекса, подтвердило работоспособность разработанного многоагентного подхода с использованием метода дерева решений для прогнозирования генерации, накопления и потребления электроэнергии и показало, что среднеквадратическое отклонение прогнозируемого графика от фактического не превышает 7-8%.

2. Моделирование работы аккумуляторных батарей различных типов с использованием разработанного подхода в определении их рациональных режимов работы показало снижение стоимости заряда/разряда аккумуляторных батарей на 13-15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ и сформулированы основные требования к системам управления авиационно-космическими и автономно-наземными электроэнергетическими комплексами и с преобразовательно-накопительными батареями с большим количеством потребителей.

2. Предложен многоагентный подход к управлению электроэнергетическим комплексом с альтернативными источниками энергии и большим количеством потребителей, который позволяет осуществлять рациональное перераспределение электроэнергии в комплексе, а также в кратчайшие сроки адаптироваться к изменению количества источников электроэнергии и потребителей за счет использования прогнозирования. Оригинальность структуры многоагентного управления электроэнергетическим комплексом подтверждена патентом РФ на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016.

3. Предложено и обосновано применение метода дерева решений в многоагентной системе управления для прогнозирования генерации, накопления и потребления электроэнергии при среднеквадратическом отклонении прогнозируемого графика от фактического не более чем на 7-8%.

4. Предложен подход заряда/разряда аккумуляторных батарей различного типа, который позволяет снизить стоимость одного цикла в автономно-наземном электроэнергетическом комплексе на 13-15%.

5. Разработана компьютерная программа, которая реализует предложенную многоагентную систему управления электроснабжением потребителей. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016617807 от 14.07.2016 (приложение А).

6. Создано программное обеспечение для переносных мобильных устройств, позволяющее отслеживать и анализировать в режиме реального времени протекающие процессы в электроэнергетическом комплексе.

7. Подтверждена работоспособность предложенного многоагентного подхода с использованием метода дерева решений для прогнозирования и подхода по определению рационального режима заряда/разряда аккумуляторных батарей различного типа при помощи созданной компьютерной модели.

Таким образом, в диссертационной работе решена научно-техническая задача по совершенствованию управления электроэнергетическим комплексом путем использования многоагентного подхода, что позволяет осуществлять прогнозирование уровня генерации различными электроэнергетическими установками, потребления и перераспределения электроэнергии в комплексе с целью обеспечения гарантированного электроснабжения различных групп потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токарев А.Б. Сравнительный анализ структурных схем СЭП повышенного напряжения для КА / А.Б. Токарев, С.П. Шпаков // Системы и устройства электрооборудования летательных аппаратов. Сб. научн. тр. – М.: МЭИ, 1988. – №179. – С. 5-13.
2. Перспективные межпланетные полеты с использованием электроракетных двигателей и ядерных энергетических установок // Итоговый отчет объединенной исследовательской группы. – 1994.
3. Резников С. Авиабортной электроэнергетический комплекс с магнитоэлектрическими стартер-генераторами для полностью электрифицированных самолетов / С. Резников [и др.] // Силовая электроника – 2016. – №6(63). – С. 50-55.
4. Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А. Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения и вторичных источников питания полностью электрифицированных самолетов / С.Б. Резников С.Б., В.В. Бочаров В.В., И.А. Харченко – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 160 с.
5. Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л. Электропривод компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрифицированного самолета // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – С. 44-49.
6. Волокитина Е.В., ОАО «Электропривод». исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – №4. – С. 29-33.
7. Машинский В.В. Резервная система генерирования электрической энергии для летательных аппаратов. дис. кан. тех. наук: 05.09.03/ Машинский Вадим Викторович, Новосибирск, 2014. – 129 с.

8. Space power-propulsion plant on MHD generator and MHD accelerator that use an effect of T-layer / S.V. Slavin [et al.]// Proceedings of SEAM (Mississippi State University), 1997.
9. Кудрин Б.И. Системы электроснабжения / Б.И. Кудрин. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 352 с.
10. Основы энергосбережения / Б.И. Врублевский [и др.] – Гомель: ЧУП ЦНТУ «Развитие», 2002. – 190 с.
11. Идельчик В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
12. Блок В.М. Электрические сети и системы / В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1986. – 430 с.
13. Головкин П.И. Энергосистема и потребители электрической энергии / П.И. Головкин. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 359 с.
14. Шведов Г.В. Электроснабжение городов. Электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети / Г.В. Шведов. – М.: МЭИ, 2012. – 128 с.
15. Кудрин Б.И. Стратегия электроэнергетики и стратегия электрики России до конца 21 века / Б.И. Кудрин // Вести в электроэнергетике. – 2012. – №3. – С. 18-29.
16. Исследование устойчивости электротехнических комплексов с ветродизельными электростанциями / Е.Н. Соснина [и др.] // Электротехника и электроэнергетика. – 2015. – С. 203-208.
17. Филиппов С.П. Перспективы применения электрогенерирующих установок малой мощности / С.П. Филиппов // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111. – №5. – С. 255-261.
18. Электроэнергетика России 2030: целевое видение / Под общ. ред. Б. Ф. Вайнзихера. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 360 с.
19. Концепция и основные параметры целевого видения развития электроэнергетики России на период до 2030 г. – М.: ИНЭИ, 2006. – 19 с.

20. Семенов В.Г. Особенности российского энергодефицита / В.Г. Семенов // Новости теплоснабжения. – 2007. – №3 (79). – С. 40-45.
21. Лыкин А.В. Электрические системы и сети / А.В. Лыкин. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 254 с.
22. Лукьяненко М.В. Энерговооруженность космических аппаратов и бортовые источники электроэнергии / М.В. Лукьяненко, В.С. Кудряшов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2008. – №1. – С. 141-145.
23. Алфёров Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – №8. – Т. 38. – С. 937-948.
24. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения / Ю.А. Шиняков // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – №. 8. – С. 152-155.
25. Данилов А.Д. Исследование энергосберегающих систем электроснабжения космических аппаратов / А.Д. Данилов, А.О. Тищенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – №. 5. – С. 1-3.
26. Чернявский Г.М. Космическая деятельность в России: проблемы и перспективы / Г.М. Чернявский Г. М. // Вестник российской академии наук. 2013. – №9. – Т. 83. – С. 799-806.
27. Чернышев В.В. Космические орбитальные станции / В.В. Чернышев. – М.: Машиностроение, 1976. – 160 с.
28. Проектирование системы энергоснабжения научно-энергетического модуля для российского сегмента международной космической станции / Бидеев А. Г. [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2015. – №2(9). – С. 64-74.
29. Легостаев В.П. Целевое использование российского сегмента МКС: значимые научные результаты и перспективы / В.П. Легостаев, А.В. Марков, И.В. Сорокин // Космическая техника и технологии. – 2013 – №2. – С. 3-18.

30. Фортескью П. Разработка систем космических аппаратов / П. Фортескью. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 765 с.
31. Mukund R. Spacecraft power systems / R. Mukund. – CRC PRESS, 2005. – 692 p.
32. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов / Ю.А. Шиняков // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – №.8. – С. 152-155.
33. Ковалевский В.В. Энергоустановки космических летательных аппаратов: учебное пособие Харьков / В.В. Ковалевский. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – 242 с.
34. Акимов В.Н. Ядерная космическая энергетика: вчера, сегодня, завтра / В.Н. Акимов, А.С. Коротеев. – М.: ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». – 2011. – №2. – С. 77-85.
35. Проблемы создания в космосе крупногабаритных конструкций / В.М. Мельников [и др.]. – М.: Труды МАИ. – 2014. – №78. – С. 1-21.
36. Чеботарев В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / В.Е. Чеботарев, В.Е. Косенко. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. – 488 с.
37. Легостаев В.П. Перспективы и эффективность применения космических ядерно-энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок / В.П. Легостаев, В.А. Лопота, В.В. Синявский // Космическая техничка и технология. – 2013. – №4. – С. 4-15.
38. Лантратов К. Солнечные «крылья» для МКС / К. Лантратов // Новости космонавтики. – 2001. – №2. – С. 2-5.
39. Косенко А.Б. Влияние ресурса ядерно-энергетической установки многоразового межорбитального электроракетного буксира на удельную стоимость транспортировки единицы массы полезного груза / А.Б. Косенко, В.В. Синявский // Космическая техника и технология. – 2014. – №4 (7). – С. 89-95.

40. Косенко А.Б. Оптимизация параметров многоразового межорбитального буксира с ядерной электроракетной двигательной установкой / А.Б. Косенко, В.В. Синявский // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – №3. – С. 140-152.

41. Грибков А.С. Оптимизация электрической мощности термоэмиссионной ЯЭУ в составе межорбитального буксира для различных средств выведения и допустимого времени транспортировки / А.С. Грибков, Р.А. Евдокимов, А.Б. Косенко // Сб. Ракетно-космическая техника. Труды. Сер. XII. Королев: РКК «Энергия». – 2007. – Вып. 1-2. – С. 113-119.

42. Синявский В.В. Научно-технический задел по ядерному электроракетному межорбитальному буксиру «Геркулес» / В.В. Синявский // Космическая техника и технологии. – 2013. – №3. – С. 25-46.

43. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. Образования / Е.А. Конюхова. – М.: «Мастерство», 2002. – 320 с.

44. Гасникова А.А. Роль традиционной и альтернативной энергетики / А.А. Гасникова // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2013. – №5. – С. 77-88.

45. Тупаева А.С. Традиционная энергетика и проблемы развития в современных условиях / А.С. Тупаева // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №6. – С. 269-271.

46. Вертешев А.С. Развитие распределенных энергетических систем в регионе / А.С. Вертешев, З.П. Зиборов // Электротехника. – 2011. – С. 300-304.

47. Ильин А.А. Роль малой энергетики в обеспечении энергетической безопасности России / А.А. Ильин // Малая энергетика. – 2004. – №1. – С. 11-15.

48. Харитонов В.П. Основы ветроэнергетики / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 340 с.

49. Концепция использования ветровой энергии в России. / Под редакцией д.т.н. Безрукиз П.П. – М.: Книга-Пента, 2005. – 128 с.

50. Кашкаров А. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции / А. Кашкаров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 214 с.
51. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / Г. Дерюгина [и др.]. – М.: МЭИ, 2009. – 144 с.
52. Де Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы / А. Де Роза. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. – 704 с.
53. Возобновляемая энергия // Ежеквартальный информационный бюллетень. Тема номера: малая гидроэнергетика. – 2005, май. – 24 с.
54. Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике / Б.А. Алексеев. – М.: ОАО холдинговая компания "ЭЛЕКТРОЗАВОД". – 2005. – №1. – С. 42–46.
55. Дякин Н.В. Корректор пиковой мощности / Н.В. Дякин, С.В. Дякин, С.И. Вольский. – М.: издательский дом МЭИ. Сб. тезисов докладов: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Восемнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – 2012. – Т. 4. – С. 361-362.
56. Бушуев В.В. Энергоэффективность и экономика России в рамках Энергетической стратегии / В.В. Бушуев. – М.: ЭКО. – 2005. – №11. – С. 52-66.
57. Накопители энергии / Д.А. Бут [и др.]. Под ред. Д. А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
58. Dyakin N. The peak power corrector for the apartment buildings / N. Dyakin, S. Dyakin, S. Volskiy // PCIM Europe Conference Proceedings. Nuremberg. – 2012. – P.1501-1508.
59. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Л.К. Ковалев [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 395 с.
60. Дежин Д.С. Перспективы использования сверхпроводниковых технологий в электромеханических преобразователях энергии / Д.С. Дежин, К.Л.

Ковалев, Л.К. Ковалев // «Инновационные технологии в энергетике». – М.: Наука, 2010. – С. 42-73.

61. Смоленцев Н. И. Накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для нетрадиционной энергетики / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова // Электрика. – 2011. – №5. – С. 38-41.

62. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р Гайдук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.

63. Каляев И.А. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели / И.А. Каляев, С.Г. Капустян // Сб. трудов Управление большими системами. – 2010. – №30. – С. 605-639.

64. Копин А.М. Формализация задачи минимизации энергетических потерь с применением эвристического анализа / А.М. Копин, И.О.Проталинский, Н.А. Медников // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2015. – №1. – С. 15-21.

65. Лазарева Т.Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 с.

66. Мелентьев В.А. О топологической масштабируемости вычислительных систем / В.А. Мелентьев // Сб. трудов Управление большими системами. – 2015. – №58 – С. 115-143.

67. Основы алгоритмизации в информационных системах: учебное пособие / М.П. Белов. – Учеб.пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 85 с.

68. Ермаков А.А. Основы надежности информационных систем / А.А. Ермаков. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 151 с.

69. Попович А.Ю. Проблема синтеза иерархических структур управления / А.Ю. Попович, В.Н. Цыгичко // Труды ИСА РАН. – 2008. – Т. 41. – С. 233-246.

70. Теличенко Д.А. Современные подходы при реализации АСУ ТП для объектов теплоэнергетики / Д.А. Теличенко, А.А. Милосердова // Вестник Амурского государственного университета. – 2012. – №59. – С. 89-99.

71. Стюарт С. Искусственный интеллект. Современный подход / С. Стюарт, П. Норвиг. – М.: Вильямс, 2007. – 1408 с.
72. Поспелов Д.А. Многоагентные системы – настоящее и будущее / Д.А. Поспелов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 1998. – №1. – С. 14-21.
73. Евгеньев Г.Б. Мультиагентные системы компьютерной инженерной деятельности / Г.Б. Евгеньев // Информационные технологии. – 2000. – №4. – С. 2-7.
74. Чекинов Г.П. Применение технологии многоагентных систем для интеллектуальной поддержки принятия решения (ИППР) / Г.П. Чекинов, С.Г. Чекинов // Системотехника. – 2003. – №1. – С. 1-7.
75. Лисьев Г. Технологии поддержки принятия решений / Г. Лисьев, И. Попова. – М.: Флинт, 2011. – 133 с.
76. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации / В.И. Городецкий // Известия РАН «Теория и системы управления». – 2012. – №2. – С. 92-120.
77. Доверительная модель информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем с децентрализованным управлением / И.А. Зикратов [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – №2. – С. 47-52.
78. Чекинов С.Г. Интеллектуальные программные исполнительные устройства (агенты) в системах связи / С.Г. Чекинов // Информационные технологии. – 2001. – №4. – С.6-11.
79. Рыгалов А.Ю. Применение мультиагентных систем в электроэнергетике / А.Ю. Рыгалов, Ю.П. Кубарьков // Труды Кольского научного центра РАН. – 2012. – №1. – Т. 4. – С. 102-105.
80. Массель Л. Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев / Л. Массель, В.

Гальперов // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – №5. – С. 45-53.

81. Rahman M. S., A multi-agent approach for enhancing transient stability of smart grids / M.S. Rahman, M.A. Mahmud, H.R. Pota // Electrical Power and Energy Systems. – 2014. – P. 487-500.

82. Проценко П.П. Автоматизированные системы управления на электрических станциях / П.П. Проценко. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 106 с.

83. Дякин Н.В. Преобразователь энергии в многоагентной системе электроснабжения космического летательного аппарата / Н.В. Дякин, С.В. Дякин, С.И. Вольский // Вестник Московского авиационного института. – М.: Московский авиационный институт. – 2016. – №1. – Т. 23. – С. 210-217.

84. Массель Л.В. Разработка многоагентной системы оценивания состояний электроэнергетических систем с использованием событийных моделей / Л.В. Массель, В.И. Гальперов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – №9. – С. 200-214.

85. Устройство для электропитания / Н.В. Дякин, С.И. Вольский, Ю.Ю. Скороход, Н.С. Вольский. Патент на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016.

86. Farid A. A Multi-Agent System Coordination Approach for Resilient Self-Healing Operation of Multiple Microgrids / A. Farid, K. Youcef-Toumi, S. Rivalal // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2014. – P. 1-7.

87. Gomez-Sanz J. Reviewing Microgrids from a Multi-Agent Systems Perspective/ J. Gomez-Sanz, S. Garcia-Rodriguez // Energies. – 2014. – P. 3356-3382.

88. Программа для прогнозирования выработки электроэнергии ветростанцией на краткосрочный и долгосрочный период времени / Н.В. Дякин. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016617807 от 14.07.2016.

89. Петриченко Г.С. Выбор метода прогнозирования сложных систем АСУ в зависимости от модели / Г.С. Петриченко, Л.М. Крицкая, Н.Ю. Нарыжная // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2005. – №14. – С. 1-5.

90. Дякин Н.В. Модели прогнозирования требуемой выходной мощности генерации путем перераспределения информационных потоков в многоагентной системе / Н.В. Дякин // Новое в российской энергетике. – 2016. – №5. – С. 36-43.

91. Mets K. Distributed multi-agent algorithm for residential energy management in smart grids / K. Mets, M. Strobbe // Network Operations and Management Symposium (NOMS). – 2012. – P. 435-443.

92. Дякин Н.В. Многоагентная система управления распределенной генерацией энергии/ Н.В. Дякин, А.В. Борисевич, С.И. Вольский // Практическая силовая электроника. – 2015. – №60. – С. 38-42.

93. Харитонов В.П. Автономные ветроэнергетические установки. / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭЧХ, 2006. – 280 с.

94. Singh M. Simulation for Wind Turbine Generators – With FAST and MATLAB-Simulink Modules / M. Singh, E. Muljadi, J. Jonkman, V. Gevorgian // NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, 2014. – 137 p.

95. Ulas Eminoglu. Modeling and Design Optimization of Variable-Speed Wind / Ulas Eminoglu, Saffet Ayasun // Energies. – 2014. – P. 402-419.

96. Pucci M. Neural MPPT control of wind generators with induction machines without speed sensors / M. Pucci, M. Cirrincione // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – P. 37-47.

97. Зубова Н.В. Повышение режимной управляемости ветроэнергетических установок с изменяемой геометрией лопастей регуляторами на нечетной логике. – Новосибирск: дис. ... канд. техн. наук, 2014. – 190 с.

98. Зализняк В.Е. Основы научных вычислений, введение в числовые методы для физики./ В.Е. Зализняк. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 296 с.

99. Jeong J. Predicting the long-term behavior of a micro-solar power system / J. Jeong, D. Culler // ACM Transactions on Embedded Computing Systems. – 2012. – №2. – P. 1-41.

100. Walker G. Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model / G. Walker // Journal of Electrical & Electronics Engineering. – 2001. – No. 1. – P. 49-56.

101. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика: Учеб. пособие для вузов / В.И. Виссарионов [и др.]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – С. 198 – 204.

102. Саврасов Ф.И. Исследование эффективности работы солнечной батареи в полевых условиях / Ф.И. Саврасов, И.К. Ковалев // Энергетика. – 2012. – Т. 321, – №4. – С. 165-168.

103. Анушенко С.Ю. Перспективы использования автономных систем электроснабжения в кемеровской области / С.Ю. Анушенко, И.Ю. Семькина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №4. – С. 87-93.

104. Хузмиев И.К. Малая гидроэнергетика для энергоснабжения отдаленных территорий на примере горных районов Республики Северная Осетия-Алания / И.К. Хузмиев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2010. – №1. – С. 17-19.

105. Федорчук Ю.М. Мини гидроэлектростанция / Ю.М. Федорчук // Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность: Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск. – 2011. – Т. 2. – С. 322-324.

106. Февралев А.В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках: учебное пособие / А.В. Февралев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2014. – 181 с.

107. Диеров Р.Х. Построение системы автоматического регулирования активной мощности гидроагрегата мини-гэс на основемашины двойного питания: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Диеров

Рустам Хакималиевич; ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет». – Новосибирск, 2014. – 153 с.

108. Внутригодное распределение стока равнинных рек европейской территории России и его изменение / Н.Л. Фролова [и др.] // Водное хозяйство России. – 2015. – №4. – С. 4-20.

109. Ястребов А.А. Региональная динамика пресных подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа / А.А. Ястребов, Ю.К. Иванов // ЛИТОСФЕРА. – 2008. – №5. – С. 99-112.

110. Бешенцев В.А. Ресурсы подземных вод ямало-ненецкого нефтегазодобывающего региона и проблемы их использования / В.А. Бешенцев // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – №2. – С. 15-20.

111. Михайлов А. Малая энергетика России классификация, задачи, применение / А. Михайлов, А. Агафонов, В. Сайданов // Новости Электротехники. – 2005. – №5. – С. 26-27.

112. Затопляев Б.С., Редько И.Я. Место малой энергетики в энергетическом балансе России / Б.С. Затопляев, И.Я. Редько // Малая энергетика. – 2004. – №1. – С. 4-11.

113. Обухов С.Г. Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения / С.Г. Обухов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, №6. – С. 95-102.

114. Лукутин Б.В. Современные проблемы науки и образования / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. – Электронный научный журнал. – 2013. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8615> (дата обращения: 28.01.2017).

115. Дякин С.В. Повышение эффективности статического преобразователя в электроэнергетических системах с солнечными фотоэлектрическими установками: автореф. канд. тех. наук., МАИ (НИУ), Москва, 2016. – 24 с.

116. Дякин Н.В. Повышение эффективности применения аккумуляторных батарей на летательных аппаратах / Н.В. Дякин, С.В. Дякин, С.И. Вольский // XI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского: Сборник докладов XI Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 17–18 апреля 2014). – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, апрель 2014. – С. 229-233.
117. Krieger E. A comparison of lead-acid and lithium-based battery behavior / E. Krieger, J. Cannarella, C. Arnold // Energy. – 2013. – №60. – P. 492-500.
118. Mahmoud H.T. A combined Li-ion & lead-acid battery / H.T. Mahmoud, L. Xu. Department of Applied Physics Chalmers University of Technology, Göteborg, 2011.
119. Albright G. A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications / G. Albright, J. Edie, S. Al-Hallaj. – Chicago (USA): AllCell Technologies LLC, 2012. – 14 p.
120. Гуревич В.И. Свинцово-кислотные аккумуляторы: устройство, принцип действия / В.И. Гуревич // Силовая электроника. – 2012. – №5. – С. 38-44.
121. Дякин Н.В. Выбор рационального типа накопителя энергии в многоагентной системе управления электроснабжением с использованием методов нелинейного программирования / Н.В. Дякин // Практическая силовая электроника. – 2017. – № 3 (67). – С. 38-42
122. Промышленные аккумуляторные батареи DELTA // DELTA: [Сайт]. 2017. URL: <http://www.delta-batt.com/upload/iblock/dd6/OPzV%203000.pdf> (дата обращения: 15.01.2017).
123. Каменев Ю.Б. Современные химические источники тока. Гальванические элементы, аккумуляторы, конденсаторы / Ю.Б. Каменев, И.Г. Чезлов. – СПб.: СПбГУКиТ, 2009. – 90 с.
124. Галушкин Д.Н. Расчет емкости, отдаваемой герметичными никель-кадмиевыми аккумуляторами при различных токах разряда / Д.Н. Галушкин, И.А. Галушкина // Электрохимическая энергетика. – 2007. – Т. 7, №4. – С. 216-218.

125. Наказненко М.Н. Математическое моделирование электрохимических накопителей в составе систем гарантированного энергоснабжения / М.Н. Наказненко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – №9. – С. 182-186.
126. Дякин Н.В. Прогнозирование выработки и потребления электроэнергии в многоагентной системе / Дякин Н.В // *Практическая силовая электроника*. – 2016. – №62. – С. 53-56.
127. Расчеты установившихся режимов ЭЭС с использованием нейронных сетей М.В.Хохлов (ИСЭиЭПС Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар). В книге: *Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами* / Н.А. Манов, Ю.Я. Чукреев, М.И.Успенский и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – С. 102-126.
128. Халидов Э.Д. О результатах применения искусственной нейронной сети для расчетов установившихся режимов электрических сетей / Э.Д. Халидов // *Проблемы энергетики*. – 2008. – №2. – С. 1-8.
129. Машинное обучение [Электронный ресурс] // *Машинное обучение: [Сайт]*. [2015]. URL: <http://www.machinelearning.ru> (дата обращения: 16.12.2015).
130. Барсегян А.А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А.А. Куприянов, М.С. Куприянов, И.И. Холод. 3-е изд. СПб: БХВ-Петербург, 2009. – С. 103-131.
131. Weka 3: Data Mining Software in Java [Электронный ресурс] // *Weka: [сайт]*. [2015]. URL: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> (дата обращения: 21.12.2015).
132. Лафоре Р. Структуры данных и алгоритмы в Java / Р. Лафоре. 2-е изд. – СПб: Питер, 2013. – С. 346-354.
133. Quinlan J.R. Learning With Continuous Classes / J.R. Quinlan // *World Scientific*. – 1992. – P. 343-348.

134. Шевелев О.Г. Классификация текстов с помощью деревьев решений и нейронных сетей прямого распространения / О.Г. Шевелев, А.В. Петраков // Вестник Том. гос. ун-та. – 2006. – №290. – С. 300-307.
135. Будзко И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: КОЛОС, 2000. – 536 с.
136. Методические указания проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок: РД 52.04.275-89. – Издание официальное. – М.: Госкомгидромет СССР, 1990.
137. Андреев Р.В. Ветроэнергетическая установка для автономного электротехнического комплекса малой мощности / Р.В. Андреев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – №4 (207). – С. 49-60.
138. Обухов С.Г. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности / С.Г. Обухов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011. – №2, 2011. – С. 25-30.
139. Лукутин Б.В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. – Томск: Томский политехнический университет, 2015. – 128 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016617807

Программа для прогнозирования выработки
электроэнергии ветростанцией на краткосрочный и
долгосрочный период времени

Правообладатель: *Дякин Николай Валерьевич (RU)*

Автор: *Дякин Николай Валерьевич (RU)*



Заявка № 2016615127

Дата поступления 19 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 14 июля 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)»,
кандидат технических наук, доцент

Козорез Д.А.

«18» августа 2017 г.



**о внедрении результатов диссертационной работы Дякина Н.В. на тему
«Исследование и разработка многоагентных систем управления
авиационно-космическими и автономно-наземными
электроэнергетическими комплексами с преобразовательно-
накопительными батареями» в учебный процесс института**

Научно-техническая комиссия в составе:

1. Следкова Ю.Г., председателя комиссии, к.т.н., декана факультета №3;
2. Ковалева К.Л., д.т.н., заведующего кафедрой 310;
3. Зечихина Б.С., д.т.н., профессора кафедры 310;
4. Сухова Д.В., ст. преподавателя кафедры 310

свидетельствует о внедрении материалов диссертационной работы Дякина Н.В. в учебный процесс кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» при чтении лекций по курсам: «Преобразовательные устройства электроэнергетических комплексов» и «Силовая электроника», в которых излагаются:

- 1) анализ принципов построения авиационно-космических и автономно-наземных электроэнергетических комплексов (ЭЭК);
- 2) применение многоагентной системы управления авиационно-космическими и автономно-наземными ЭЭК;
- 3) алгоритм прогнозирования работы ЭЭК на выбранный промежуток времени с целью повышения его эффективности;
- 4) подход к выбору рациональных параметров процесса заряда/разряда различных типов аккумуляторных батарей, учитывающий их особенности и технические характеристики, в ЭЭК с многоагентной системой управления.


Внедрение проведено согласно с учебно-методическими планами кафедры. Эффективность внедрения заключается в повышении качества учебного процесса по перспективному направлению науки и техники в области систем электроснабжения.

Председатель комиссии



Следков Ю.Г.

Члены комиссии



Ковалев К.Л.



Зечихин Б.С.



Сухов Д.В.