

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»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ.

Научный руководитель: **Резников Станислав Борисович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Теоретическая электротехника» МАИ.

Официальные оппоненты: **Гречишников Виктор Александрович**,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Электроэнергетика транспорта», первый заместитель
директора – начальник учебного отдела Института
транспортной техники и систем управления ФГБОУ
ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)».

Рогоза Александр Валерьевич,
кандидат технических наук, начальник научно-
производственного комплекса «Космическая и
комплексная силовая электромеханика» АО
«Корпорация «ВНИИЭМ».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ».

Защита диссертации состоится 21 декабря 2017 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, корп. «Г», ауд. 302 (кафедра 310).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), www.mai.ru.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4 на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.125.07; e-mail: stevilen@mail.ru.
Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.125.07



В.С. Степанов

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: Национальный исследовательский университет «МЭИ» (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), 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 дефицита мощности систем электроснабжения является востребованной для КЛА, в автономно-наземной электроэнергетике с использованием

альтернативных источников энергии, а также при создании электроэнергетического комплекса для более (полностью) электрифицированного самолета. В связи с этим данная работа, посвященная совершенствованию систем управления электроэнергетическими комплексами 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 электроэнергетическим комплексом для выбранных периодов прогнозирования.

5. Разработка программного обеспечения и моделирование многоагентного управления электроэнергетическим комплексом 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 и 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), универсальное программное обеспечение (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 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 «Электроэнергетические, 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 страницу, включающих список литературы из 139 наименований, 44 рисунка и 27 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая ценность работы, положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена анализу авиационно-космических и автономно-наземных электроэнергетических комплексов (ЭЭК). Представлены структурные схемы ЭЭК летательных аппаратов и сформулированы требования, предъявляемые к ним.

Для наземных ЭЭК с появлением новых потребителей различного типа отмечается непрерывный рост мощности потребления, что приводит к дефициту электрической энергии. Данную проблему усугубляет неравномерное потребление электрической энергии, имеющее циклический характер с пиками в дневных и провалами в ночных периодах времени, повышенное потребление в зимний период, в праздничные дни и т.п. При этом мгновенное значение мощности потребления может превышать среднегодовое значение более чем в 5-7 раз. В этой связи для локальных систем электроснабжения задача рационального и эффективного управления ими имеет приоритетное значение.

В настоящее время широкое внедрение получают электрогенерирующие установки малой мощности (ЭУММ), к которым относятся энергетические установки на альтернативных источниках энергии и малые тепловые станции, размещающиеся в непосредственной близости с потребителями электрической энергии, что позволяет решить проблему дефицита электрической энергии.

В ЭЭК с большим числом генерирующих установок, накопителей энергии и различных типов потребителей возникает задача по выбору эффективной стратегии группового управления (ГУ). Сравнительный анализ стратегий ГУ выполнен по следующим критериям: точность принятия решения, масштабируемость, сложность формализации управления, надёжность, время выработки решения (ВВР), применительно к системам электроснабжения (таблица 1). Проведенный анализ показал целесообразность использования коллективного ГУ для ЭЭК.

Таблица 1 Сравнительный анализ принятых критериев стратегий группового управления

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

Во второй главе изложена реализация коллективного группового управления на основе разработанной многоагентной системы управления (МСУ) некоторой гипотетической системой электроснабжения с большим числом генерирующих установок, накопителей энергии и различных типов потребителей – автономно-наземным электроэнергетическим комплексом (ЭЭК).

МСУ основан на использовании интеллектуального посредника, так называемого агента, который посредством обработки данных от других агентов самостоятельно решает локальные задачи. При этом каждый агент не имеет общего представления о глобальной цели (информации), а решает только собственную локальную задачу. В такой многоагентной системе весь спектр задач по заданным правилам распределяют между всеми агентами. Каждый агент производит обмен данными с другими агентами, организует сбор собственной информации и осуществляет по индивидуальным алгоритмам решение поставленных задач.

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.

Агентом управления является программно-аппаратный модуль любого объекта ЭЭК, 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 МАС на активные и служебные.

Активные агенты непосредственно участвуют в генерации, накоплении и потреблении электрической энергии. В качестве активных агентов рассматриваются следующие: агент ветроэнергетической установки (АВЭУ); агент солнечной энергетической установки (АСЭУ); агент малых гидроэлектростанций (АМГЭ); агент малых тепловых электростанций (АМТЭ);

агент нагрузки (АН); агент накопителей энергии (АНЭ); агент внешней сети (АВС).

Служебные агенты выполняют роль вспомогательных элементов МСУ, которые снижают информационную и вычислительную нагрузку с активных агентов. К служебным агентам относятся, агент окружающей среды (АОС); агент моделирования (АМ). Вышеизложенный многоагентный подход к управлению ЭЭК является оригинальным решением, и его новизна подтверждается патаном на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016.

На рисунке 1 представлена схема взаимодействия агентов МСУ в электроэнергетическом комплексе, содержащей набор различных ЭУММ, НЭ и групп нагрузок (H_1-H_5).

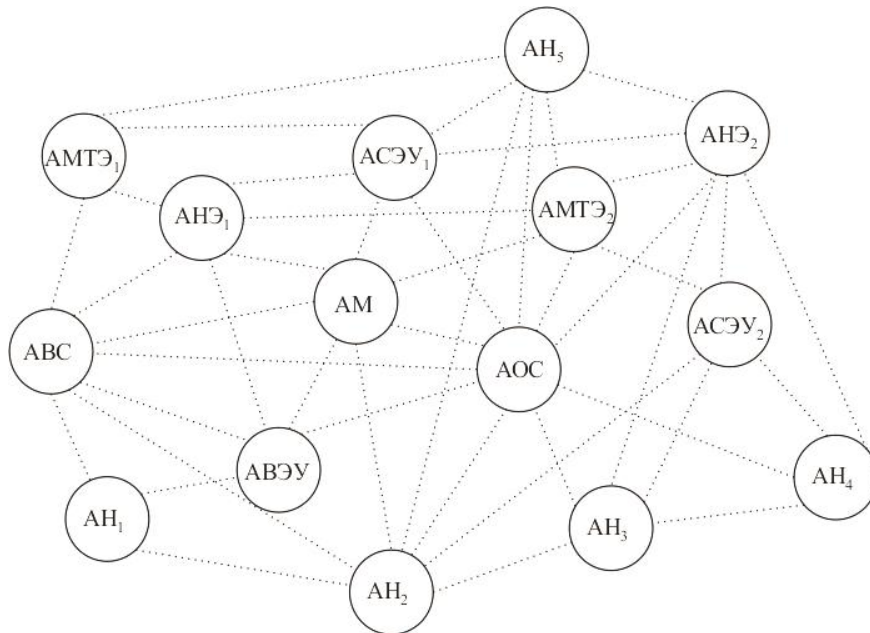


Рисунок 1. Взаимодействие агентов МСУ электроэнергетического комплекса

Кроме того, во второй главе рассмотрено функционирование активных агентов, в том числе агента ветроэнергетической установки (АВЭУ). 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 от погодных условий сбалансировать необходимый уровень электроэнергии для потребителя за счёт других силовых установок и накопителей энергии.

Зависимость генерируемой мощности ВЭУ с учетом коэффициентов полезного действия механической передачи (η_m) и генератора (η_g) имеет следующий вид:

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

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), η_m , η_g – коэффициенты полезного действия механической передачи и генератора соответственно.

В процессе адаптации агента целесообразно использовать аналитическую зависимость (1) выходной мощности ВЭУ от параметров установки и окружающей среды. В дальнейшем, в процессе работы эффективно применять накопленные агентом данные для прогнозирования работы ВЭУ. Для этого разработана программа, графический интерфейс которой представлен на рисунке 2. 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) следует, что при повышении номинальной мощности, система ограничивает отбор энергии от ветроколеса для предотвращения механического повреждения конструкции установки.

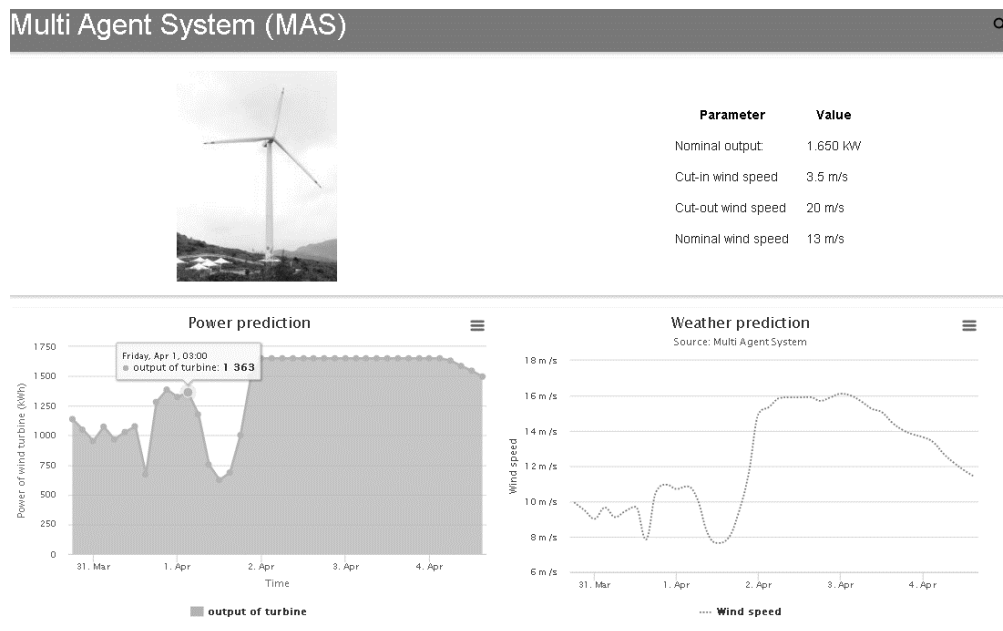


Рисунок 2. Пример работы агента ВЭУ

Принимая во внимание зависимость работы энергетических установок на альтернативных источниках энергии от погодных условий, в электроэнергетических системах необходимо использование накопителей энергии (НЭ). НЭ позволяют сбалансировать необходимый уровень электроэнергии для потребителя. Главной задачей агента накопителей энергии (АНЭ) является управление процессами заряда и разряда НЭ. 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, в частности – аккумуляторной батареи (АБ). Существует большое число разных типов АБ, характеристики которых необходимо учитывать в процессе эксплуатации.

Во второй главе представлен подход к определению рациональных параметров заряда/разряда аккумуляторных батарей различного типа, который используется в многоагентной системе управления. В качестве целевой функции (F) выбрана зависимость стоимости НЭ от числа циклов.

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

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

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

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

где $C_{нэ}$ – стоимость НЭ, I – ток разряда НЭ, α – коэффициент НЭ, отражающий нелинейную зависимость тока разряда от емкости, Q_n – номинальная емкость НЭ, t – время разряда НЭ.

На рисунке 3 представлена целевая функция для двух АБ (АБ1, АБ2), зависящая от тока разряда, где по осям X Y – глубина разряда АБ1, АБ2 соответственно, по оси Z – значение целевой функции (стоимость одного цикла работы АБ).

При использовании предложенного подхода в системе с различными НЭ (литий-железо-фосфатные и свинцово-кислотные АБ) стоимость одного цикла снижается на 14%.

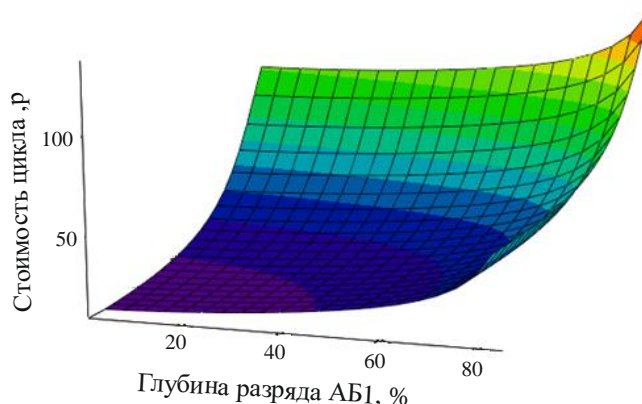


Рисунок 3. Целевая функция для двух АБ, зависящая от тока разряда

В третьей главе рассмотрено функционирование служебных агентов и подходы к обработке накопленных данных в многоагентной системе управления электроснабжением.

Одним из ключевых звеньев в структуре многоагентного управления электроэнергетическими комплексами является агент окружающей среды (АОС). Данный агент предназначен для сбора в режиме реального времени информации об окружающей среде (скорость ветра, температура, облачность, давление и т.п.) на краткосрочный и долгосрочный периоды времени. АОС обменивается с другими активными агентами для прогнозирования их работы.

Агент окружающей среды с заданной периодичностью или по запросу других агентов запрашивает данные о погоде от внешних серверов метеорологических служб (веб-сервисы) таких, как *Gismeteo*, *OpenWeatherMap*, *WeatherBug*, *Weather Underground*, *World Weather Online* и др.

Разработанный в данной работе программный продукт предусматривает функцию отображения в графическом виде информации об окружающей среде, передаваемой активным агентам. Кроме того, разработанный программный продукт предоставляет возможность использования мобильных переносных устройств, поддерживающие браузеры *Internet Explorer*, *Chrome*, *Firefox*, для получения основной информации о протекающих процессах в системе (рисунок 4), что является несомненным преимуществом.

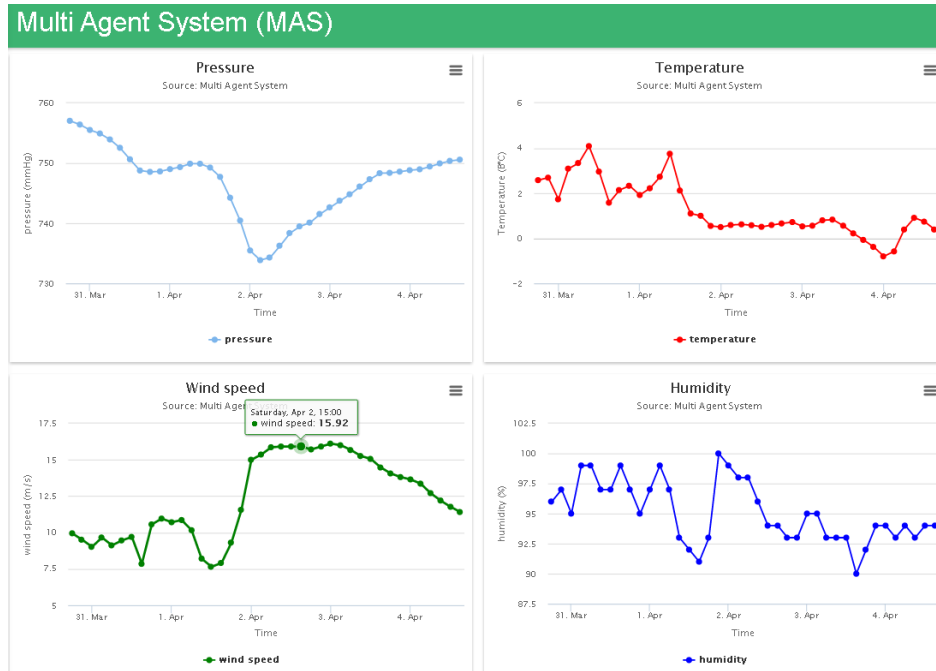


Рисунок 4. Графическое представление информации о погоде с использованием разработанного программного продукта

Агент моделирования (АМ) обеспечивает процесс прогнозирования уровня генерирования и накопления электрической энергии для обеспечения работы энергетических установок в режиме близкому к номинальному, а также гарантированного электроснабжения потребителей. В рассматриваемой многоагентной системе управления рассматриваются электроэнергетические установки на альтернативных источниках энергии. Процесс работы АМ, состоящий из шести этапов, представлен на рисунке 5.

На первом этапе АМ запрашивает у реестра энергетических установок («Реестр ЭУ») перечень функционирующих в рассматриваемый период времени энергетических установок. В случае выхода из строя активного агента (например, для выполнения регламентных работ на ветрогенераторе) данный агент исключается из реестра. Использование реестров позволяет 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.

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

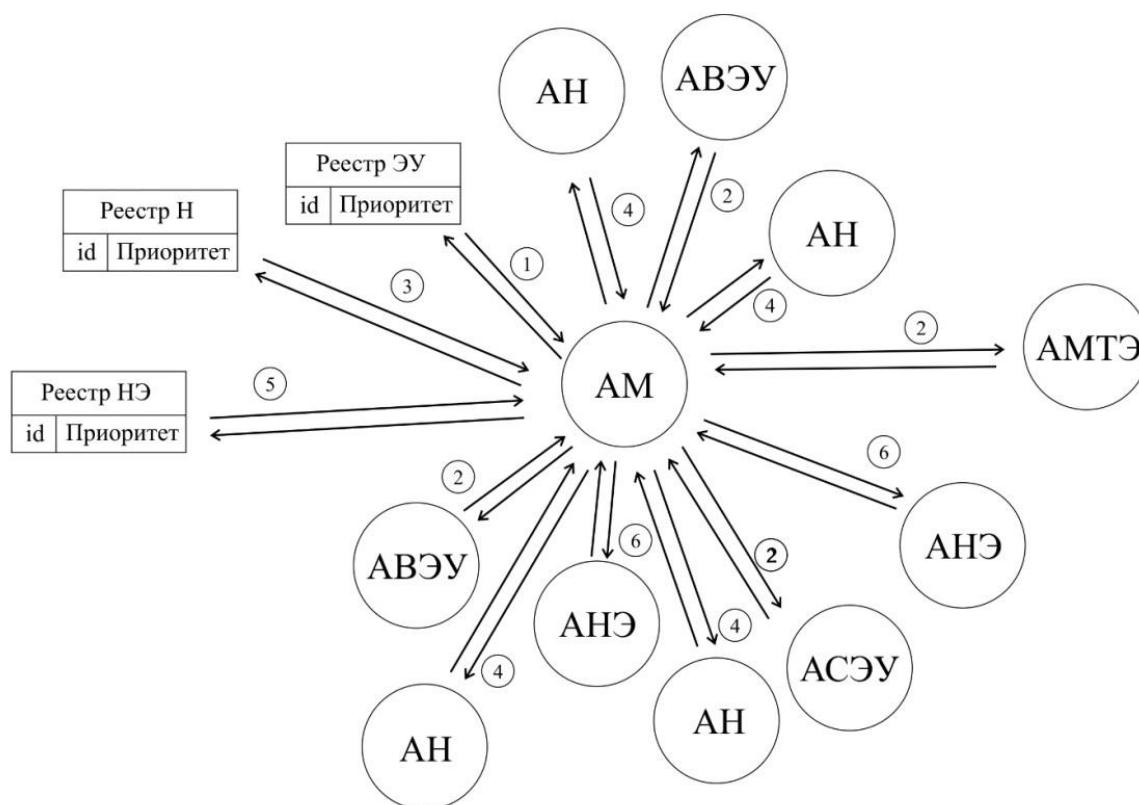


Рисунок 5. Взаимодействие активных агентов в режиме прогнозирования

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

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 систему. 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 подхода в определении параметров заряда/разряда аккумуляторных батарей, описанного во второй главе.

Накопленную в МСУ информацию для выявления зависимостей между данными предлагается обрабатывать, используя методы «машинного обучения». В качестве инструмента для обработки данных использовалось программное обеспечение *Weka*. На рисунке 6 представлено распределение данных для ВЭУ: скорость ветра, давление, температура, выходная мощность.

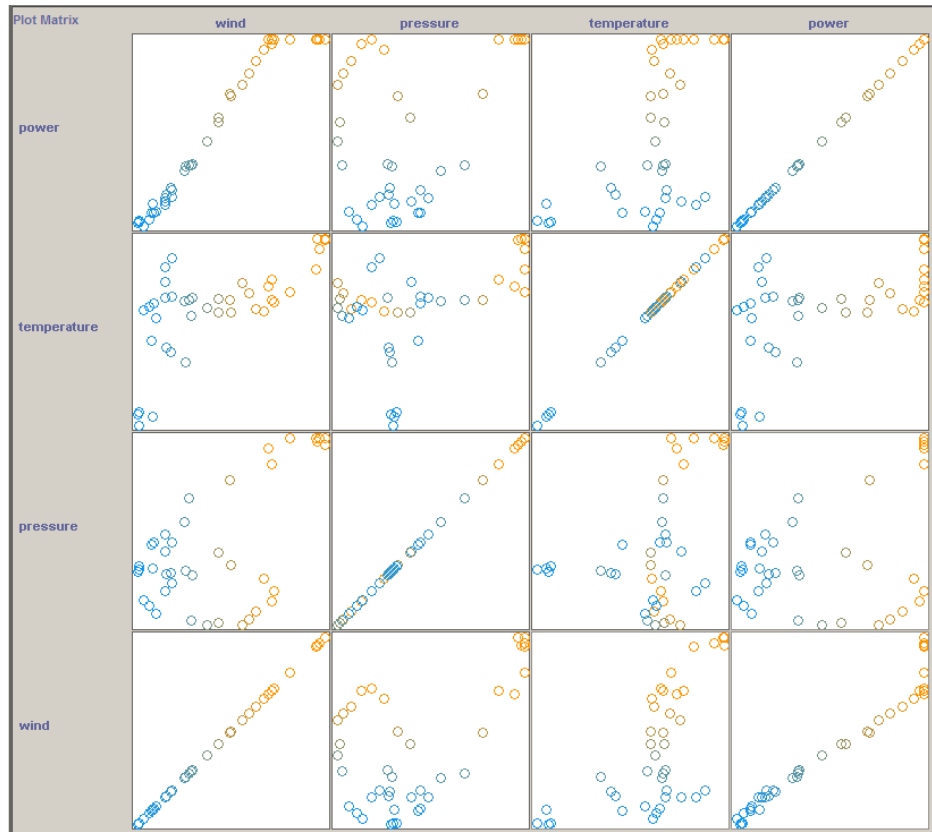


Рисунок 6. Распределение данных для ВЭУ

Кроме того, в третьей главе проведен сравнительный анализ различных методов обработки данных, накопленных с помощью агентов. В качестве рационального метода обработки данных выбран метод дерева решений, который позволяет с высокой точностью и легкой интерпретируемостью построенной модели прогнозировать работу актива агентов. На рисунке 7 представлен пример созданного дерева решений для прогнозирования генерации электроэнергии ВЭУ на основе накопленной информации за время функционирования системы. В качестве тестовых данных используется выборка, которая содержит данные о скорости ветра, давлении, температуре и энергии, выработанной ВЭУ.

В качестве примера на рисунке 8 изображена диаграмма работы МСУ для ВЭУ. На первом этапе, ввиду отсутствия накопленной информации о работе системы, для прогнозирования генерации, потребления и накопления электрической энергии МСУ использует аналитические зависимости функционирования активных агентов, указанные во второй главе диссертации.

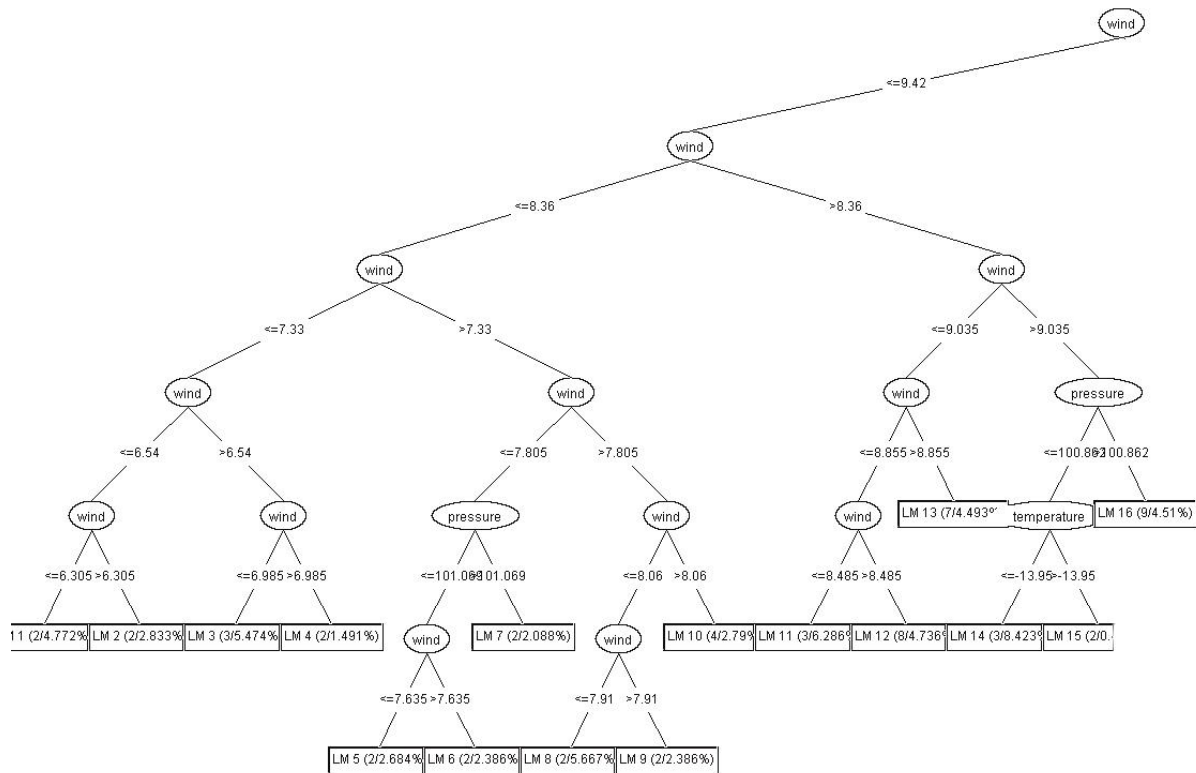


Рисунок 7. Дерево решений для прогнозирования выходной мощности ВЭУ

В последующем, после накопления достаточной информации, МСУ переходит на работу с использованием метода дерева решений.

В рассматриваемом примере принимают участие три агента: АМ, АВЭУ и 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-сервисов метеорологических служб. После получения информации о погоде АОС формирует ответ АВЭУ с погодными данными, замыкая первый информационный поток.

Второй поток 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. В случае, если модель не была найдена, то 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 и обработка данных является ресурсоемким процессом и требует достаточно много времени, поэтому АВЭУ при получении отрицательного ответа о существовании модели параллельно АМ инициализирует процесс поиска модели на основе аналитических функций, описанных во второй главе.

Если модель была найдена АМ, то АВЭУ оценивает ее точность и, в случае выполнения требований по точности, расчет выходной мощности осуществляется 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 условиям, полученным от АОС.

Предложенный алгоритм позволяет в автоматическом режиме переключаться между различными методами прогнозирования, основываясь на накопленных в процессе работы системы данных, с целью обеспечения заданной точности.



Рисунок 8. Диаграмма деятельности МСУ на примере АВЭУ

В четвертой главе представлены результаты моделирования МСУ, подтверждающие ее работоспособность. На рисунке 9 представлена структурная схема моделируемой системы, состоящая из активных (АВЭУ, АНЭ, АМТЭ, АН) и служебных агентов (АОС, АМ), что является развитием технического решения, предложенного в патенте на полезную модель № RU 168811 U1 от 15.07.2016 в рамках настоящей диссертационной работы.

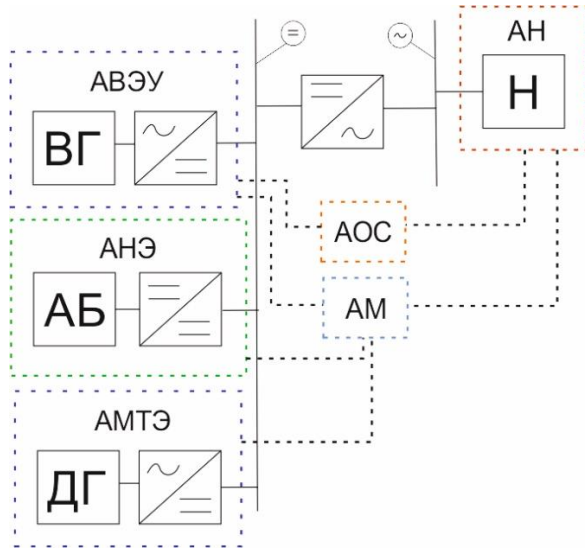


Рисунок 9. Многоагентная система электроснабжения с общей шиной постоянного напряжения

На рисунке 10 представлен график потребления электроэнергии в течение суток, где кривая 1 – график потребления электроэнергии, построенный с использованием аналитических зависимостей; кривая 2 – график потребления электроэнергии; 3 – график потребления электроэнергии, построенный с использованием дерева решений.

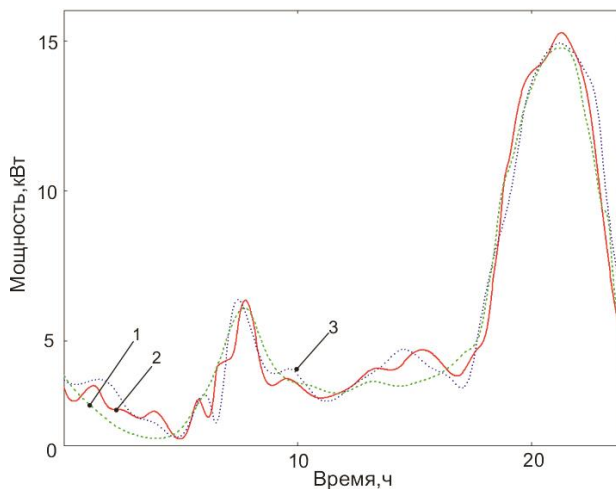


Рисунок 10. График потребления электроэнергии в течение суток

По результатам сравнительной оценки среднеквадратичное отклонение графиков потребления электроэнергии, построенных с использованием аналитических зависимостей (кривая 1) и метода дерева решения (кривая 3), от графика потребления электроэнергии (кривая 2) составляет 14,79% и 7,56% соответственно, что подтверждает целесообразность использования метода дерева решений.

Аналогичным образом проведено моделирование работы МСУ при прогнозировании с помощью метода дерева решений генерации электроэнергии ВЭУ и работы АБ, результаты которого представлены на рисунках 11 и 12.

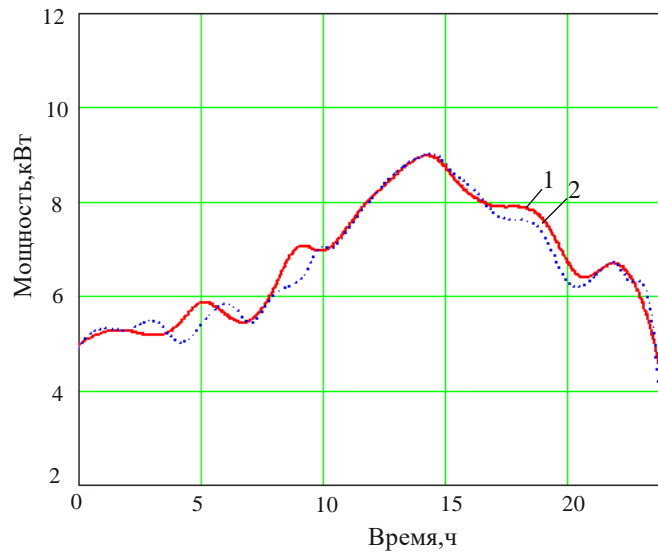


Рисунок 11. Графики вырабатываемой ВЭУ электроэнергии в течение суток, где кривая 1 – прогнозируемый график генерации, построенный с помощью метода дерева решений, кривая 2 – фактический график генерации ВЭУ электроэнергии

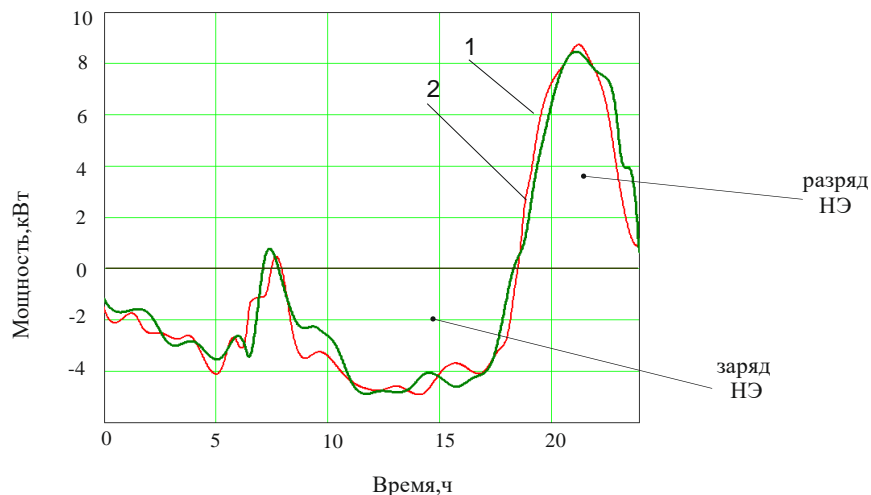


Рисунок 12. Графики заряда/разряда АБ, где кривая 1 – фактический график; кривая 2 – прогнозируемый с помощью дерева решений график

Моделирование выбранной ЭЭК подтвердило работоспособность разработанного многоагентного подхода с использованием метода дерева решений для прогнозирования генерации, накопления и потребления электроэнергии. При этом, среднеквадратическое отклонение прогнозируемого графика от фактического не превышает 7,56%.

Кроме того, в процессе моделирования подтверждена целесообразность использования метод выбора рациональных параметров работы АБ различных типов, описанный во второй главе, и снижение стоимости одного цикла заряд/разряд на 14,7%.

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 авиационно-космическими и автономно-наземными электроэнергетическими комплексами путем использования многоагентного подхода, что позволяет осуществлять прогнозирование уровня генерации различными электроэнергетическими установками, потребления и перераспределения электроэнергии с целью обеспечения гарантированного электроснабжения различных групп потребителей.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:
Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. 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.
2. Дякин Н.В. Прогнозирование выработки и потребления электроэнергии в многоагентной системе / Дякин Н.В // Практическая силовая электроника. – 2016. – №62. – С. 53-56.
3. Дякин Н.В. Модели прогнозирования требуемой выходной мощности генерации путем перераспределения информационных потоков в многоагентной системе / Н.В. Дякин // Новое в российской электроэнергетике. – 2016. – №5. – С. 36-43.
4. 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. – Т. 23, №1. – С. 210-217.
5. 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 [в печати].

Другие печатные издания:

6. Dyakin N. The peak power corrector for the apartment buildings / N. Dyakin, S. Dyakin, S. Volskiy // PCIM Europe Conference Proceedings, Nuremberg, Germany, 2012. – P. 1501-1508.
7. Дякин Н.В. Корректор пиковой мощности / Н.В. Дякин, С.В. Дякин, С.И. Вольский // Сборник тезисов докладов: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Восемнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – Т.4. – С. 361-362.
8. Dyakin N. Application of multi-converter in the peak power corrector / N. Dyakin, S. Dyakin, S. Volskiy // PCIM Europe Conference Proceedings, Nuremberg, Germany, 2013. – P. 1643-1650.
9. 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.
10. Дякин Н.В., Борисевич А.В. Полумарковская модель для оценки показателей надежности источника бесперебойного питания дата-центра // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 8 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/08/57039> (дата обращения: 20.11.2016).
11. Дякин Н.В. Комбинирование различных типов химических накопителей для системы электроснабжения летательных аппаратов / Н.В. Дякин // Сборник тезисов докладов: Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». – М.: ООО «Принт-салон», 22-24 апреля 2014. – С. 106-107.
12. Дякин Н.В. Применение накопителей энергии в перспективной многоагентной системе на летательных аппаратах / Н.В. Дякин, С.И. Вольский // Сборник тезисов докладов: Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015». – М.: ООО «Принт-салон», 21-23 апреля 2015. – С. 77-78.
13. Дякин Н.В. Модели прогнозирования многоагентной системы при распределенной генерации электроэнергии / Н.В. Дякин // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. – Т. 1. – С. 678-679.

Патенты и свидетельства:

14. 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.
15. 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.

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертации опубликованы в работах [2, 3, 5, 11, 13, 15], написанных лично автором. В работах [1, 4, 12] автором проведен анализ технической литературы и разработана структурная схема многоагентной системы управления, в работе [14] автором разработаны технические решения поставленной задачи по управления (прогнозированию) системой электроснабжения, в работах [9, 10] автором предложено использование различных типов накопителей энергии, а в работах [6, 7, 8] – функциональные схемы электроснабжения.