

На правах рукописи

Буткина Анна Александровна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МИКРОСЕТИ
С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск — 2018

Работа выполнена на кафедре систем автоматизированного проектирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева».

- Научный руководитель – **Белов Владимир Федорович**
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты – **Кувшинов Алексей Алексеевич**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», кафедра «Электроснабжение и электротехника», профессор кафедры
- **Никишин Андрей Юрьевич**
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», кафедра электрооборудования судов и электроэнергетики, доцент кафедры
- Ведущая организация – – ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Защита диссертации состоится «27» июня 2018 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.278.02 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», расположенном по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная р. Свияги, 106, корп. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа <http://www.ulsu.ru>, а также с авторефератом можно ознакомиться на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ – <http://vak.ed.gov.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-
математических наук,
доцент



Волков М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В соответствии с планом мероприятий («дорожной картой») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы, принятым в сентябре 2016г., интеллектуализация энергетики рассматривается как один из основных инструментов реализации Энергетической стратегии РФ.

Приоритетной задачей этой «дорожной карты» является разработка комплексных решений для микросетей, то есть автономных электрических сетей, объединяющих несколько пользователей и источников электрической энергии.

«Дорожная карта» в качестве приоритетных рассматривает методы и технические средства интеллектуального управления конечным электропотреблением по экономическому критерию в режиме реального времени на основе интеграции электрических и информационных сетей, то есть «энергетического Интернета». Таким образом, энергетические и информационные процессы в микросети необходимо рассматривать как взаимосвязанные.

Поэтому в дальнейшем будем определять микросеть как энергоинформационную систему (ЭИС), представляющую собой совокупность информационных технологий и энергетических элементов, которые, взаимодействуя между собой, позволяют управлять режимами работы микросети. Фрагмент микросети, принадлежащий одному пользователю, будем называть ЭИС пользователя микросети. В работе рассматривается микросеть, включающая только одного пользователя, что является частным случаем описанной системы. Она полностью соответствует одному из приоритетных направлений реализации «дорожной карты» «потребительские сервисы», которое рассматривает микроэнергетику на уровне частных домов, включая микрогенерацию и системы накопления энергии, а также управление энергопотреблением на уровне домохозяйства.

При этом диссертационное исследование выполняется в рамках одного из основных технологических трендов «дорожной карты», заключающегося в формировании моделей оптимального управления функционированием энерго-системы.

Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной как с точки зрения рассматриваемой в ней проблемной области, так и с точки зрения применяемых методов и технологий.

В настоящее время не существует каких-либо значимых, находящихся в свободном доступе наработок в данной области, поскольку потребность в постановке и решении рассматриваемой задачи возникла относительно недавно. Однако в зарубежной литературе можно найти примеры реализации микросетей¹ и описание проблем, связанных с продажей энергии в микросети^{2, 3}. В Рос-

¹ Zhao B., Zhang X., Li P., Wang K., Xue M., and Wang C. Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island. *Applied Energy*, 2014, vol. 113, pp. 1656–1666.

² Gregoratti D., Matamoros J. Distributed Energy Trading: The Multiple-Microgrid Case. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no. 4, pp. 2551–2559.

³ Kahrobaee S., Rajabzadeh R. A., Soh L.-K., Asgarpour S. A multiagent modeling and investigation of smart homes with power generation, storage, and trading features. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 659–668.

сии также начинают появляться результаты исследования значимости использования и оптимизации работы микросетей и «умных сетей»^{4, 5, 6}.

Объектом исследования в диссертационной работе являются микросеть с накопителем электрической энергии (НЭЭ).

Предмет исследования – математические модели, алгоритмы и программное обеспечение (ПО), обеспечивающие оптимизацию режимов работы микросети по критерию затрат пользователя микросети на электроэнергию.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование математической модели микросети с НЭЭ и оптимизация режимов ее работы по критерию минимизации затрат пользователя на электрическую энергию.

Эта цель достигается решением следующих задач:

1. Определение базовых режимов работы микросети с НЭЭ.
2. Математическое моделирование микросети с НЭЭ.
3. Оптимизация режимов работы микросети по критерию минимизации затрат пользователя на электрическую энергию с целью определения моментов переключения режимов работы микросети.
4. Экспериментальная оценка математических моделей и алгоритмов оптимизации режимов работы микросети.
5. Разработка и исследование ПО решения поставленных задач.

Методы исследования. В работе применялись численные методы поиска глобального экстремума (метод роя частиц и его модификации), положения общей теории алгоритмов, методология высокопроизводительных вычислений. Построение математических моделей микросети и ее элементов выполнено с помощью узлового метода, уравнений Парка-Горева и теории М-систем. Разработка архитектуры ПО ЭИС осуществлялась в соответствии с методологией UP (Unified Process) и с применением языка UML. Для создания ПО применялись методы объектно-ориентированного программирования на языке C++.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новая математическая модель НЭЭ в стандартной для М-элементной концепции форме, представляющая собой совокупность М-элементов и учитывающая особенности совместной работы аккумуляторной батареи (АБ) и АС/DC преобразователя.
2. Постановка задач оптимизации режимов работы микросети, оптимизации графика потребления энергии нагрузками и оптимизации работы НЭЭ в

⁴ Куприяновский В.П., Фокин Ф.Ю., Буланча С.А., Куприяновская Ю.В., Намиот Д.Е. Микрогриды - энергетика, экономика, экология и ИТС в умных городах. International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т. 4. № 4. С. 10-19.

⁵ Харченко В.В., Адомавичюс В., Гусаров В.А. Микросеть на основе ВИЭ как инструмент концепции распределенной энергетики. Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 2 (119). С. 80-85.

⁶ Жуков В.П., Осипов Д.А., Уланов Д.А., Ледуховский Г.В., Барочкин Е.В. Оптимальное управление структурой и эксплуатационными режимами интегрированных энергетических систем. Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 33-37.

виде задач нелинейного программирования, использующих в качестве критерия оптимальности минимальные затраты пользователя на электроэнергию.

3. Модификация метода роя частиц, позволяющая повысить эффективность решения задачи оптимизации работы НЭЭ в сравнении с классическим вариантом метода.

4. Архитектура ПО ЭИС пользователя микросети, учитывающая разработанную спецификацию требований к микросети с НЭЭ.

5. Исследовательское ПО, позволяющее минимизировать затраты пользователя микросети на электроэнергию путем решения совокупности задач моделирования микросети и оптимизации режимов ее работы.

Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью математической постановки задачи исследования, корректным использованием математического аппарата, вычислительными экспериментами, а также тестированием разработанного ПО на физической модели микросети.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

— разработана математическая модель НЭЭ в стандартной форме, представляющая собой совокупность М-элементов и учитывающая особенности совместной работы АБ и АС/DC преобразователя.

— поставлена задача оптимизации режимов работы микросети с НЭЭ с целью минимизации затрат пользователя микросети на электрической энергии;

— разработан алгоритм решения поставленной задачи, представляющий собой последовательное решение задач оптимизации графика потребления энергии нагрузками и оптимизации работы НЭЭ;

— разработана модификация метода роя частиц для решения отдельных подзадач рассматриваемой задачи, позволяющая повысить эффективность решения в сравнении с классическим вариантом метода.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых математических моделей и алгоритмов оптимизации работы НЭЭ, обеспечивающих минимизацию затрат пользователя микросети на электроэнергию.

Практическая значимость (ценность) работы. Использование разработанного ПО для управления режимами работы микросети с НЭЭ позволит значительно сократить расходы пользователя микросети на электроэнергию, а также закладывает основы успешного внедрения и эффективного использования собственных источников генерации электроэнергии, включая альтернативные источники. Кроме того, оптимизация работы ЭИС каждого пользователя микросети позволит повысить эффективность ее функционирования в целом.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы в ЗАО «Конвертер» при разработке систем бесперебойного питания типа СБП, содержащих в своем составе АС/DC/АС преобразователь с АБ (то есть НЭЭ) и в АУ «Технопарк–Мордовия» для разработки интегрированной системы непрерывного электроснабжения испытательных комплексов на основе промышленных НЭЭ с автоматическим управлением потоками мощности.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на XIV-XX конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов (Саранск,

2010-2017 гг.), на XL-XLVI научных конференциях «Огаревские чтения» (Саранск, 2011-2017 гг.), международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы в науке и практике» (Самара, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК и 1 статья в зарубежном журнале, индексируемом в SCOPUS.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все основные теоретические и практические исследования проведены автором работы самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 93 наименований работ российских и зарубежных авторов и трех приложений. Работа изложена на 153 страницах, содержит 40 рисунков, 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследований, определяется цель проводимых исследований, приведены сведения о научной новизне, практической значимости, основных результатах и положениях, выносимых на защиту, апробации результатов и публикациях.

В первой главе рассмотрены основные аспекты развития интеллектуальной энергетики, приведена классификация микросетей, перечислены основные компоненты ЭИС пользователя микросети, выделены основные режимы работы НЭЭ и базовые режимы работы рассматриваемой микросети.

Для эффективного функционирования микросетей необходимо создание автоматических устройств оптимального управления ЭИС пользователя микросети в течение заданного промежутка времени, который далее будем называть **периодом планирования**. Для решения данной задачи необходимо создание программно-аппаратного комплекса, включающего систему управления куплей-продажей и потреблением электрической энергии (далее – СУ) и соответствующие исполнительные устройства. Эта система должна реализовывать единый процесс управления куплей, продажей и потреблением электроэнергии на основе НЭЭ с целью минимизации затрат пользователя на электроэнергию.

Основными компонентами ЭИС пользователя микросети являются:

1. Центральная сеть электроснабжения (ЦСЭ).
2. Накопитель электрической энергии.
3. Локальная сеть электроснабжения.
4. Устройства генерации электрической энергии, принадлежащие пользователю микросети (собственные источники энергии, СИЭ).
5. Электрические нагрузки.
6. Устройство, обеспечивающее возможность переключения между различными источниками электроэнергии и сброса ее излишков в локальную сеть.
7. Сервер системы «Умный дом», включающий СУ.

Схематическое представление функционирования микросети отражено на рисунке 1.

Выделены следующие основные режимы работы НЭЭ:

- режим накопления энергии, в котором накопитель заряжается от выбранного источника энергии;
- режим выдачи энергии, в котором накопитель отдает запасенную энергию в сеть/потребителю;
- дежурный режим, в котором накопитель не потребляет и не отдаёт энергию в сеть (кроме потребления для обеспечения собственных нужд);
- островной режим, в котором накопитель осуществляет питание потребителя без отдачи энергии в сеть.

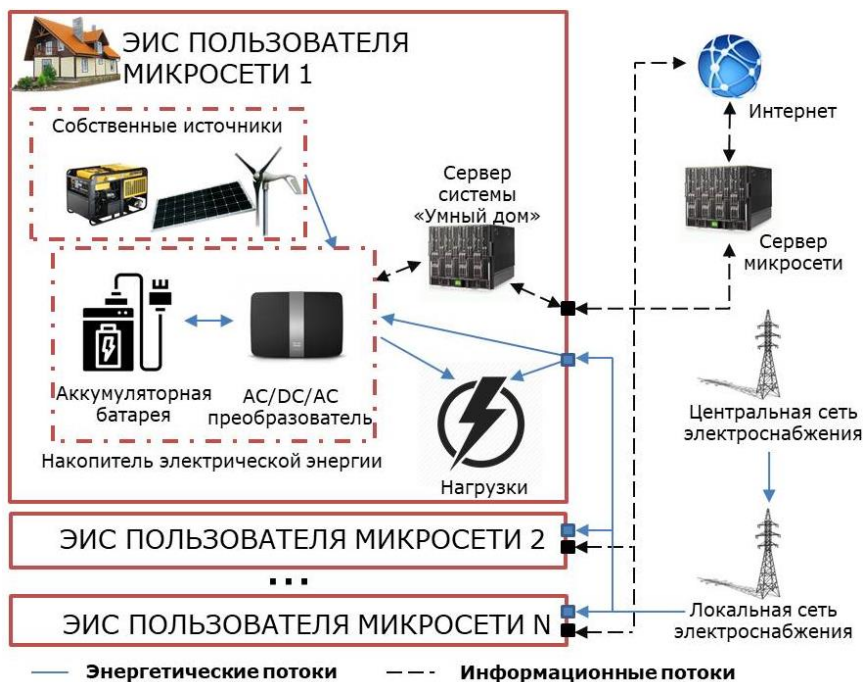


Рис. 1 – Функционирование микросети

Поскольку в рамках данной работы рассматривается микросеть, которая подключена к одному внешнему источнику электрической энергии – ЦСЭ с дифференцированной тарификацией, включает СИЭ и НЭЭ, то количество рассматриваемых режимов работы микросети можно сократить. Также в работе не рассматриваются возможности продажи излишков электрической энергии другим пользователям микросети. В этом случае, можно выделить следующие базовые режимы работы данной микросети:

1. СИЭ питает нагрузки.
2. СИЭ заряжает накопитель.
3. ЦСЭ с дифференцированной тарификацией питает нагрузки.
4. ЦСЭ с дифференцированной тарификацией заряжает накопитель.
5. Накопитель питает нагрузки.

Вторая глава посвящена моделированию микросети, включающей СИЭ, с целью учета снижения качества энергии в микросети при формировании точного прогноза потребления электроэнергии.

Рассмотрим систему, включающую СИЭ, в качестве которого применяется дизель-генератор (бензогенератор). Заметим, что на данный момент это наиболее распространённый способ генерации электроэнергии в микросетях.

Решение задачи оптимального управления ЭИС пользователя микросети с НЭЭ, которая включает помимо ЦСЭ ещё один источник электроснабжения, становится невозможным без математического моделирования системы «синхронный генератор-выпрямитель-накопитель-нагрузка» (рис. 2).

Это связано с необходимостью учёта нелинейных электрических процессов, возникающих в такой системе в случае использования СИЭ, мощность которых соизмерима с суммарной мощностью электрических нагрузок.



Рис. 2 – Моделируемая система

При этом решение задачи минимизации затрат пользователя на электроэнергию существенно усложняется. Это связано с тем, что характерной особенностью подобных систем являются потери электроэнергии, обусловленные более низким ее качеством в сравнении с системами бесконечной мощности. Анализ качества электроэнергии в узле соединения СИЭ с НЭЭ и нагрузками возможно выполнить только на полной математической модели микросети.

Для решения данной задачи в автономных (обособленных) системах электроснабжения, к классу которых относятся микросети, наиболее эффективными являются методы анализа, учитывающие специфику моделирования элементов системы электроснабжения, таких как синхронный генератор (СГ), АС/DC/АС преобразователь с широтно-импульсной модуляцией, управляемые нагрузки. Объединение этих элементов в систему в различных методах анализа выполняется на основе топологических уравнений, отражающих специфику моделируемых систем. Эти особенности в приложении к моделированию микросетей учтены в методе моделирования автономных электроэнергетических систем, основанном на концепции мостового элемента (М-элемента)⁷.

В этом методе для упрощения математических моделей элементов микросети применяется переход от неподвижной системы координат связанной с *тремя* фазами к ортогональной системе координат $dq0$, вращающейся синхронно с ротором питающего трехфазного СГ. При этом периодически изменяющиеся коэффициенты становятся постоянными величинами.

В соответствии с концепцией мостового элемента математические модели элементов микросети должны приводиться к канонической форме

⁷ Белов В.Ф. Автоматизация проектирования электромагнитной совместимости автономных преобразовательных систем. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1993. – 342 с.

$$\frac{d}{dt} I_{dq0} = QU_{dq0} + H, \quad (1)$$

где I_{dq0} – вектор изображения фазных токов элемента; U_{dq0} – вектор изображения фазных напряжений в узле подключения элемента к микросети; Q и H – вектор и матрица параметров трехфазного элемента.

Напряжение в узлах микросети определяется по формуле

$$U = -(K_1 + LK_2Q_\Sigma)^{-1} [LK_2H_\Sigma + (LK'_2 + ZK_2)I_\Sigma] \quad (2)$$

где $L = \text{diag}(L_i)$, $Z = \text{diag}(Z_i)$, $I_\Sigma = \text{colon}(I_{\Sigma i})$, $Q_\Sigma = \text{diag}(Q_{\Sigma i})$, $H_\Sigma = \text{colon}(H_{\Sigma i})$, $i = \overline{1, n}$; $K'_2 = d/dt K_2$; L_i – матрица индуктивностей соединительной линии, подключенной к i -ому узлу; Z_i – матрица, отражающая активные и индуктивные сопротивления i -ой соединительной линии; $I_{\Sigma i}$ – суммарный ток

элементов, подключенных к i -ому узлу; $Q_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^n Q_{ji}$, $H_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^n H_{ji}$, Q_{ji} и H_{ji} –

матрица и вектор параметров j -го элемента, подключенного к i -му узлу микросети, n – общее количество элементов, подключенных к узлу. Матрицы K_1 и K_2 отражают особенности структуры микросети: K_1 , умноженная на столбец узловых напряжений, выражает разности потенциалов между соседними узлами; K_2 осуществляет приведение узловых токов к единой системе координат.

При этом математическую модель микросети определяют выражения (1,2).

Построение модели НЭЭ осуществлялось с использованием концепции М-элемента, в которой общий вид математической модели М-элемента задается системой уравнений:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_L \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{NL} & C_P^{-1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} U_{dq} + \begin{pmatrix} Z_L & L_{ML} \\ C_{CL} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_L \\ U_C \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Выбор данной концепции обусловлен тем, что она позволяет эффективно моделировать микросеть кампусного типа с большим количеством АС/DC преобразователей, ключи которых работают асинхронно.

Эффективность моделей, полученных с помощью данной концепции, обусловлена следующими ее особенностями: 1) уравнения математической модели преобразовательных устройств и СГ приводятся к единой стандартной форме (1); 2) для моделирования полупроводниковых приборов используется модель идеального ключа, которая, с одной стороны, позволяет ускорить процесс расчета в связи с уменьшением размерности задачи, а с другой стороны позволяет представить математическую модель преобразовательного устройства в виде СОДУ с непрерывной правой частью на каждом временном интервале, в течение которого структура системы постоянна; 3) алгоритм управления состоянием этих идеальных ключей вынесен за рамки СОДУ, описывающих модели М-элементов, что позволяет эффективно реализовывать систему управления преобразовательными устройствами.

Однако недостатком данной концепции является то, что она не учитывает особенности совместной работы АБ и АС/DC преобразователя, и для применения данной концепции, необходимо решить указанную проблему.

Для устранения выявленного недостатка автором было сформулировано следующее условие корректности моделирования: выделение отдельных М-элементов следует производить так, чтобы хордовая группа каждого из них включала только одно проводящее ребро, и это ребро не содержало источников напряжения [7]. Проверка выполнения этого условия осуществлялась на примере моделирования АС/DC преобразователя с АБ (то есть НЭЭ) [1], эквивалентная схема которого представлена на рисунке 3.

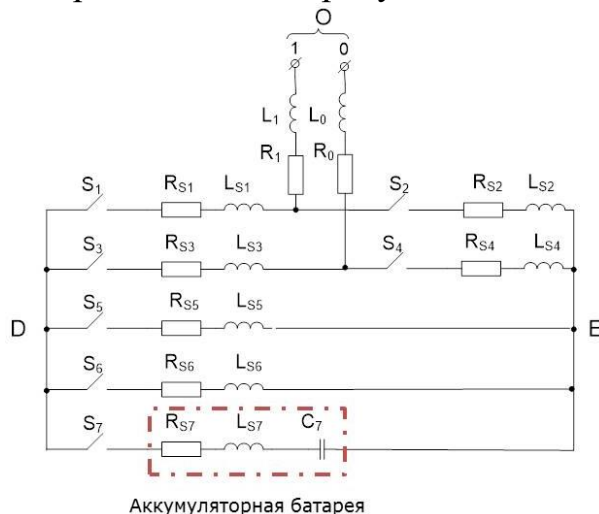


Рис. 3 — Эквивалентная схема АС/DC преобразователя

Согласно оригинальной М-элементной концепции данной эквивалентной схеме соответствует граф, включающий один М-элемент (рисунок 4, а). Для выполнения условия корректности моделирования должен быть выполнен ряд последовательных преобразований данного графа, в результате которых он будет представлять собой эквивалентную комбинацию из двух М-элементов — М₁ и М₂ (рисунок 4, б).

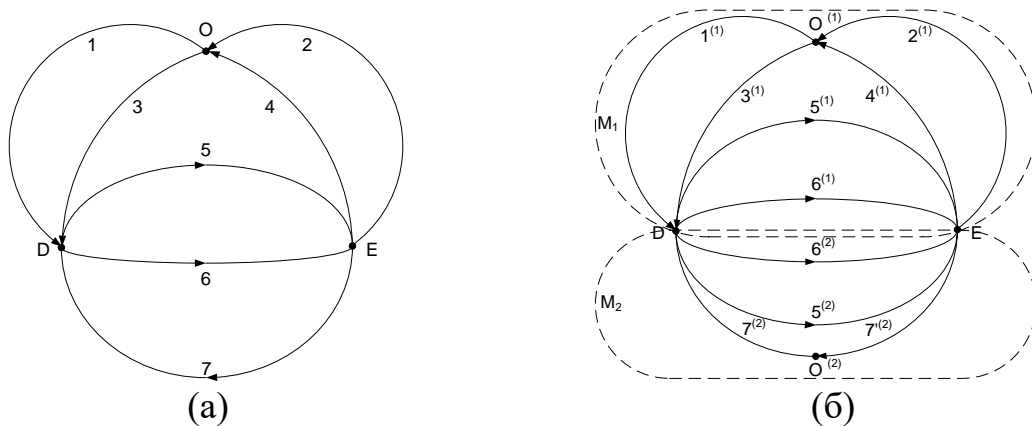


Рис. 4 — Граф АС/DC преобразователя: (а) исходный; (б) после преобразования

При этом в результате применения разработанного автором алгоритма формирования математической модели накопителя с учетом трансформации графа его исходной эквивалентной схемы, математическая модель, представленная выражением (3), для двух М-элементов примет вид (4)-(6):

$$\frac{d}{dt} I_{L1} = L_{LL1}^{-1} (E_{12} + R_{L1} I_{L1} + N_1 U_1), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} I_{L2} = L_{LL2}^{-1} (E_{21} + R_{L2} I_{L2} + N_2 U_{C2}), \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} U_{L2} = S_{C2} I_{L2}. \quad (6)$$

где $E_{12} = L_{L12} \frac{d}{dt} I_{L2} + R_{L12} I_{L2}$, $E_{21} = L_{L21} \frac{d}{dt} I_{L1} + R_{L21} I_{L1}$, $L_{LL1}^{-1} = -(C_{L1} L_1 C_{L1}^T)^{-1} C_{L1}$,
 $L_{LL2}^{-1} = -(C_{L2} L_2 C_{L2}^T)^{-1} C_{L2}$, $R_{L1} = R_1 C_{L1}^T$, $R_{L2} = R_2 C_{L2}^T$, $R_{L12} = R_{12} C_{L2}^T$,
 $L_{L12} = L_{12} C_{L2}^T$, $R_{L21} = R_{21} C_{L1}^T$, $L_{L21} = L_{21} C_{L1}^T$, $L_{L1} = L_1 C_{L1}^T$, $L_{L2} = L_2 C_{L2}^T$;
 $U_{O1} = -C_{O1} (L_{L1} \frac{d}{dt} I_{L1} + E_{12} + R_{L1} I_{L1} + N_1 U_1)$, $U_{O2} = -C_{O2} (L_{L2} \frac{d}{dt} I_{L2} + E_{21} + R_{L2} I_{L2} + N_2 U_2)$,
 $U_{O1} = C_{O1} U_{S1}$ и $U_{O2} = C_{O2} U_{S2}$ – векторы напряжений на разомкнутых ключах;
 $S_{C2} = C^{-1} M_2^T C_{L2}^T$.

Корректность результатов моделирования микросети на основе уточнённой М-элементной концепции была подтверждена путем сравнения результатов физических и вычислительных экспериментов, посвященных исследованию работы накопителя. Результаты физического эксперимента были получены и опубликованы ранее Беловым В.Ф.⁸ Экспериментальная установка представляла собой систему, состоящую из дизель-генератора и накопителя. Вычислительные эксперименты проводились с использованием программы, в которой для моделирования накопителя применялся разработанный автором алгоритм.

В тексте диссертационной работы приведены значения характеристик сравнения для напряжения и тока фазы А, а также рисунки, демонстрирующие результаты сравнения измерений и вычислений для всех фаз.

Проведенный в работе анализ показывает, что различия между величинами, полученными в результате выполнения физического и вычислительного экспериментов, находятся в допустимых на практике пределах. Таким образом, разработанная математическая модель накопителя, представляющая собой совокупность двух М-элементов и учитывающая особенности работы АС/DC преобразователя с АБ в качестве нагрузки, может применяться при моделировании микросети с накопителем для оценки качества электроэнергии в ней.

Одним из основных последствий ухудшения качества электроэнергии в микросетях, обусловленных протекающими в них нелинейными процессами, является уменьшение доли активной мощности (Р) в полной мощности системы (S) за счет появления различных неактивных мощностей, к которым относятся:

- мощность сдвига Qс, возникающая в результате сдвига основной гармоники тока относительно основной гармоники напряжения;
- мощность искажения Qi, возникающая в результате преобразования энергии основной частоты в энергию высших гармонических составляющих;
- мощность несимметрии Н, обусловленная несимметрией нагрузки фаз;
- мощность модуляции или мощность неравномерности F, возникающая в результате неравномерного потребления тока нагрузкой.

⁸ Белов В.Ф. Тестирование математических моделей активных электрических фильтров автономных электроэнергетических систем / В.Ф. Белов, Н.Н. Пальдяев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета – 2008. – Вып. 2 – С. 65-71.

В классическом виде система критериев качества электроэнергии содержит коэффициент сдвига K_c , коэффициент искажения K_i , коэффициент несимметрии $K_{нс}$ и коэффициентом неравномерности $K_{нр}$, мультипликативно объединенных в коэффициент мощности K_m :

$$K_m = K_c K_u K_{нс} K_{нр} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_c^2}} \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q_c^2}}{\sqrt{P^2 + Q_c^2 + Q_u^2}} \times \frac{\sqrt{P^2 + Q_c^2 + Q_u^2}}{\sqrt{P^2 + Q_c^2 + Q_u^2 + H^2}} \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q_c^2 + Q_u^2 + H^2}}{\sqrt{P^2 + Q_c^2 + Q_u^2 + H^2 + F^2}} \quad (7)$$

Таким образом, обобщенной численной характеристикой качества электрической энергии в микросети, является коэффициент мощности (7), который показывает долю полной мощности расходуемой на совершение работы. Данный коэффициент следует учитывать при постановке задачи оптимизации режимов работы микросети с накопителем.

В **третьей главе** рассматриваются постановка задачи оптимизации режимов работы микросети, постановка и решение задач оптимизации графика потребления электрической энергии нагрузками и оптимизации работы НЭЭ, а также их экспериментальное исследование.

Решение общей проблемы оптимизации режимов работы микросети с НЭЭ по критерию затрат пользователя микросети на электроэнергию является сложной оптимизационной задачей и требует поэтапного решения. На данном этапе в диссертационной работе рассматривается упрощенный вид задачи. Предполагается, что микросеть состоит из электрических нагрузок, НЭЭ, СИЭ (в качестве которого выступает дизель-генератор или бензогенератор) и подключена к одному внешнему источнику электроэнергии – ЦСЭ с дифференцированной тарификацией.

Для минимизации затрат пользователя микросети на электрическую энергию необходимо решить следующую задачу нелинейного программирования:

$$F(x) = \sum_{i=0}^n ((1 - y_i)c_i + y_i g_i p_i)(cons_i + x_i) \rightarrow \min, \quad i = \overline{0, n} \quad (8)$$

$$\begin{cases} s_0(b_{in}) - x_0 \geq 0 \\ x_0 - d_0(b_{in}) \geq 0 \\ \left. \begin{aligned} x_i - d_i(x_0, \dots, x_{i-1}) \geq 0 \\ s_i(x_0, \dots, x_{i-1}) - x_i \geq 0 \end{aligned} \right| i = \overline{1, n} \end{cases} \quad (9)$$

где c_i – величина тарифа на электроэнергию в течение i -го периода планирования, д.е.;

$$g_i = \frac{C_f \cdot \sum_{i=0}^n (cons_i \cdot G_{ii})}{\sum_{i=0}^n (cons_i \cdot T_i)} = \frac{C_f \cdot \sum_{i=0}^n (cons_i \cdot g_{ei} \cdot T_i)}{\sum_{i=0}^n (cons_i \cdot T_i)} - \text{стоимость электроэнергии, вырабатываемой дизель-генератором (бензогенератором) за период фиксированной величины тарифа (топливная составляющая), д.е./кВт·ч; } cons(cons_0, \dots, cons_n) - \text{график почасового электропотребления в течение периода планирования, кВт; } C_f - \text{цена топлива для дизель-генератора (бензогенератора), д.е./г; } g_{ei} - \text{удельный}$$

удельный расход топлива дизель-генератором (бензогенератором), г/кВт·ч; G_{ii} – удельный расход топлива дизель-генератором (бензогенератором), г/кВт·ч; T_i – продолжительность периода планирования, ч; s_i – количество электроэнергии, поступающей в микросеть из внешнего источника, кВт·ч; d_i – количество электроэнергии, потребляемой микросетью из внешнего источника, кВт·ч.

расход топлива для i -й нагрузки в течение периода планирования, г/кВт·ч; T_i – время работы i -й нагрузки в течение периода планирования, ч;
 $p(p_0, \dots, p_n) = 1/K_{mi}$ – корректирующий коэффициент; K_{mi} – коэффициент мощности, рассчитываемый по формуле (7) для i -го периода планирования;

$$s_i = \begin{cases} b_{ph}, & b_{max} - b_i \geq b_{ph} \\ b_{max} - b_i, & b_{max} - b_i < b_{ph}, \quad i = \overline{0, n} \\ 0, & b_{max} - b_i = 0 \end{cases}$$

максимальное количество энергии, которое может запасти АБ в составе накопителя (далее — батарея) за i -й час; b_{ph} – максимальное количество электроэнергии, которое может быть накоплено батареей за период фиксированной величины тарифа (за час), кВт·ч; b_{max} –

максимальная емкость батареи, кВт·ч; $b_i = \begin{cases} b_{in}, & i = 0 \\ b_{in} + a_i + \sum_{j=0}^{i-1} x_j, & i = \overline{1, n} \end{cases}$ – количество энергии, запасенной в батарее на начало i -го часа; b_{in} – начальный заряд батареи, кВт·ч; a_i – количество энергии, вырабатываемое альтернативными источниками за i -ый час;

$d_i = \begin{cases} -b_i, & b_i < cons_i \\ -cons_i, & b_i \geq cons_i \end{cases}, \quad i = \overline{0, n}$ – максимальное количество энергии (в пределах необходимого), которое может обеспечить батарея в течении i -го часа.

Решением задачи (8), (9) являются векторы $x(x_0, \dots, x_n)$ и $y(y_0, \dots, y_n)$, отражающие оптимальный график работы батареи и источников электрической энергии соответственно, причем для всех $i = \overline{0, n}$. При этом являются справедливыми следующие утверждения:

- если $x_i < 0 \Rightarrow$ батарея разряжается на x_i единиц энергии;
- если $x_i = 0 \Rightarrow$ батарея не используется;
- если $x_i > 0 \Rightarrow$ батарея заряжается на x_i единиц энергии;
- если $y_i = 1 \Rightarrow$ питание осуществляется от дизель-генератора;
- если $y_i = 0 \Rightarrow$ питание осуществляется от центральной сети.

Теперь рассмотрим постановку задачи оптимизации графика потребления электрической энергии нагрузками [2]. Данная задача также является задачей нелинейного программирования и записывается в следующем виде:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{m_i} U_i^j \cdot c(h_i + j - 1) \right] \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$\begin{cases} a_i < h_i < z_i, 0 \leq a_i \leq 23, 0 \leq z_i \leq 23, i = \overline{1, n}, \\ \sum_{i=1}^n U_i^j \leq U, j = \overline{0, 23} \end{cases}, \quad (11)$$

n – количество электрических нагрузок, m_i – время работы i -ой нагрузки (количество часов); U_i^j – количество энергии, потребляемой i -ой нагрузкой за j -й час работы, т. е. каждой электрической нагрузке соответствует вектор $U_i^j(U_i^1, U_i^2, \dots, U_i^{m_i})$; h_i – время (час) начала работы i -ой нагрузки, причем $0 \leq h_i \leq 23, i = \overline{1, n}$; $c(t)$ – тариф на электрическую энергию, $0 \leq t \leq 23$ (в нашем случае $t = h_i + j - 1$ соответствует j -му часу работы электрической нагрузки при условии, что данная нагрузка начала работать в момент времени h_i); $a_i < h_i < z_i, i = \overline{1, n}$, где $0 \leq a_i \leq 23$ и $0 \leq z_i \leq 23$ – определяются потребителем, исходя из его предпочтений (например, можно задать ограничение та-

ким образом, чтобы какая-либо электрическая нагрузка работала только в ночные часы); U – пиковое значение допустимой мощности потребления.

Решением задачи является оптимальный график потребления энергии нагрузками, представленный вектором $h(h_1, h_2, \dots, h_n)$.

Поскольку для решения указанной задачи требуется найти глобальный экстремум функции нескольких переменных, для ее решения был выбран так называемый метод «Роя частиц» («Particle Swarm Optimization», или PSO), который гарантирует его нахождение. В этом методе под частицами понимаются абстрактные объекты, обладающие двумя свойствами: позицией и скоростью. При этом позиция частицы представляет собой возможное решение задачи оптимизации, а скорость частицы отражает величину и направление ее перемещения к новому, предположительно лучшему, решению. Канонический вариант этого метода описывает движение частиц следующим образом⁹:

$$v_{i,k}^{t+1} = \omega \cdot v_{i,k}^t + c_1 \cdot r_1(t) \cdot (p_{Gb,i}^t - p_{i,k}^t) + c_2 \cdot r_2(t) \cdot (p_{Pb,i}^t - p_{i,k}^t), \quad (12)$$

$$p_{i,k}^{t+1} = p_{i,k}^t + v_{i,k}^{t+1}, \quad (13)$$

где $P(p_{1,k}, \dots, p_{n,k})$ и $V(v_{1,k}, \dots, v_{n,k})$ – позиция и скорость k -й частицы; коэффициенты ω , c_1 , c_2 – весовая доля инерции, когнитивная и глобальная весовые доли соответственно; $r_1(t)$, $r_2(t)$ – случайные числа, лежащие в диапазоне $[0, 1]$, $p_{Gb,i}^t$ – лучшая известная позиция, найденная на данный момент среди всех частиц в рое (Global best); $p_{Pb,i}^t$ – лучшая позиция i -й частицы, найденная ею на данный момент (Particle best).

Результаты решения задачи нелинейного программирования (12)-(13) данным методом позволяют сделать вывод о том, что он может эффективно применяться для формирования оптимального графика потребления энергии нагрузками, используемого при решении задачи оптимизации режимов работы микросети.

При решении задачи оптимизации режимов работы микросети будем рассматривать микросеть, работающую только в базовых режимах 3,4,5 и их комбинациях. При этом СИЭ не используется и энергетическая часть микросети примет вид, представленный на слайде.

Выбор данных режимов основан на анализе статистических данных, отражающих стоимость электрической энергии, полученной из различных типов источников, который показывает, что наиболее высокую стоимость имеет электроэнергия, получаемая на основе сжигаемого жидкого топлива. Поэтому при наличии возможности получения энергии из ЦСЭ использование СИЭ типа дизель-генератор для питания нагрузок и заряда НЭЭ является экономически целесообразным.

С учетом изложенного, очевидно, что задача оптимизации режимов работы микросети (8)-(9), может быть существенно упрощена. Так как СИЭ не используется, все компоненты вектора u будут равны 0, и целевая функция (8), отражающая затраты пользователя микросети, примет вид:

⁹ Kennedy J., Eberhart R., Particle swarm optimization // Proceedings of the IEEE International Conference, Neural Networks – vol 4 – 1995

$$F(x) = \sum_{i=0}^n c_i(\text{cons}_i + x_i) \rightarrow \min, \quad i = \overline{0, n} \quad (14)$$

При этом ограничения, накладываемые на значения параметров целевой функции, имеют прежний вид (9). Таким образом, получаем задачу нелинейного программирования (14), (9). Ее решением является вектор $x(x_0, \dots, x_n)$, отражающий оптимальный график работы батареи.

Так как возможность минимизации затрат пользователя в рассматриваемых режимах работы микросети обеспечивается за счет создания запасов энергии в накопителе и их использования в момент, когда цены на электроэнергию достигают пиковых значений, то очевидно, что накопитель играет ключевую роль в оптимизации режимов работы микросети. Поэтому в дальнейшем будем называть эту задачу **задачей оптимизации работы накопителя**.

Заметим, что не все функции ограничений (9) имеют непрерывные частные производные, что делает затруднительным применение стандартных методов решения задач нелинейного программирования. Рассмотрим решение данной задачи методом роя частиц. В данном случае помимо ограничений в форме (9) на элементы вектора x дополнительно накладывались ограничения вида:

$$-b_{max} \leq x_i \leq b_{ph}, \quad i = \overline{0, n}. \quad (15)$$

Учет ограничений выполнялся следующим образом: если значение вектора x не удовлетворяло указанным ограничениям, то целевая функция (14) принимала заведомо большое значение и данное решение отбраковывалось. Таким образом, удалось избежать явного описания пространства возможных решений,

Тестирование выбранного метода выполнялось путем решения задачи оптимизации работы накопителя, для которой на основе аналитических рассуждений было получено оптимальное решение.

Результаты серии вычислительных экспериментов продемонстрировали эффективность разработанной модели и алгоритма оптимизации работы накопителя по критерию минимизации затрат пользователя микросети. Однако, решения, близкие к оптимальным, были достигнуты только в 80% случаев, и их получение требовало существенных затрат машинного времени. Для устранения этих недостатков было сделано следующее [9]:

1) с целью сокращения времени расчетов была использована технология организации параллельных вычислений OpenMP;

2) с целью повышения точности решения была проведена модификация канонического варианта метода, в результате которой формула для определения скорости частицы приобрела вид:

$$v_{i,k}^{t+1} = \omega \cdot v_{i,k}^t + c_1 \cdot r_1(t) \cdot (p_{Gb,i}^t - p_{i,k}^t) + c_2 \cdot r_2(t) \cdot (p_{Pb,i}^t - p_{i,k}^t) + c_3 \cdot r_3(t) \cdot (p_{Nb,i}^t - p_{i,k}^t), \quad (16)$$

где c_3 – весовая доля зависимости от соседних частиц; $r_3(t)$ – случайное число, лежащее в диапазоне $[0, 1]$, $p_{Nb,i}^t$ – лучшая известная позиция, найденная на данный момент среди соседних частиц.

Сравнение результатов, полученных с использованием канонического и модифицированного вариантов метода, демонстрирует существенное преимущество последнего при решении поставленной задачи. Так, по сравнению с предыдущими результатами для рассматриваемого примера:

- среднее количество итерации уменьшилось на 339,7;
- среднее время выполнения программы уменьшилось на 369,8282 секунд;
- средняя экономия увеличилась на 4,0975% и составила 36,3455%.

Экономия рассчитывалась путем вычитания оптимального значения целевой функции, полученного с помощью одного из вариантов метода, из затрат пользователя микросети, работающей только в базовом режиме 3, когда питание нагрузок производится от центральной сети.

В четвертой главе представлена экспериментальная оценка модели оптимизации работы НЭЭ на физическом макете базовой микросети.

Для определения границ функциональных возможностей предложенной модели интеллектуального управления режимами работы микросети в реальных условиях эксплуатации было проведено ее экспериментальное исследование на физическом макете. Энергетическая часть макета состояла из нагрузок, блока управления их питанием и накопителя, подключенных к сети электроснабжения с дифференцированной тарификацией энергии.

Заметим, что в качестве сети электроснабжения может использоваться как ЦСЭ с дифференцированной тарификацией энергии, так и СИЭ типа дизель-генератор, стоимость энергии которого также является дифференцированной по времени величиной. В данном случае в качестве источника электроэнергии использовалась ЦСЭ, график тарификации энергии которой задавался на сервере микросети.

Информационная часть макета состояла из сервера микросети и сервера системы «Умный дом», контролирующего состояние энергетической части системы. Схема взаимодействия элементов макета представлена на рисунке 5.

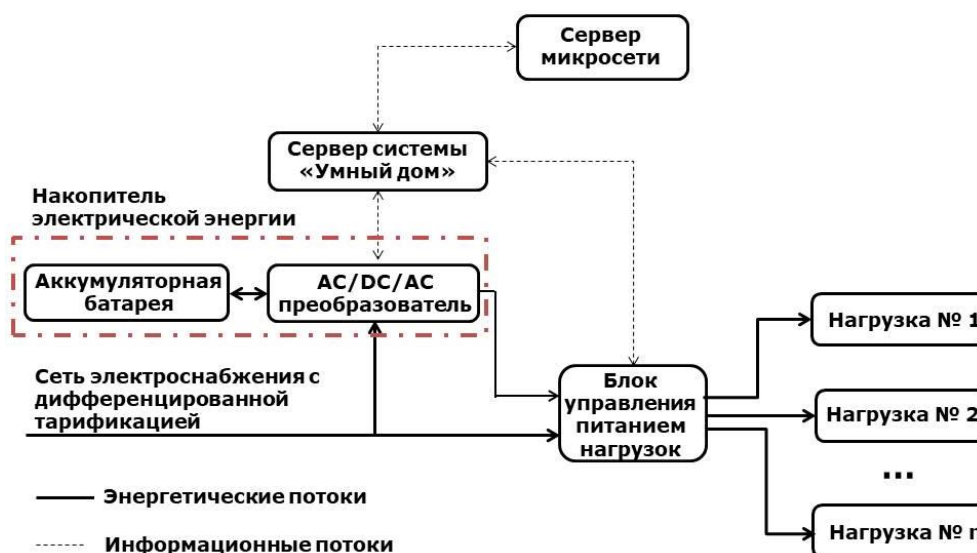


Рисунок 5 – Взаимодействие компонентов макета

В качестве AC/DC/AC преобразователя электрической энергии применена система бесперебойного питания СБП-5-230-50-1/1-МО-УХЛ4 с комплектом АГМ аккумуляторных батарей ёмкостью 65 А/час. Основными требованиями, предъявляемыми при выборе преобразователя были: наличие интерфейса управления RS485 или RS232, функции контроля количества энергии в накопителе, мгновенное переключение между двумя источниками питания нагрузок

(накопителем и сетью электроснабжения). Контроллер системы «Умный дом» представлен программируемым логическим контроллером ПЛК100 производства компании «Овен». Блок управления питанием нагрузок представляет собой набор управляемых реле с интерфейсом связи RS485. Сервер микросети представляет собой портативный компьютер, вычислительные способности которого ограничены 4 вычислительными процессорами и 1 ГБ оперативной памяти.

Экспериментальное исследование включало два этапа. На первом этапе выполнялся анализ функциональных возможностей модели по обеспечению экономии затрат пользователя для двух структур микросети. В первой структуре в качестве источников электрической энергии использовались ЦСЭ и НЭЭ. Вторая структура отличалась от первой наличием возможности покупки энергии у других пользователей микросети. Была проведена серия экспериментов, в каждом из которых были выполнены следующие шаги:

1. Автоматизированный расчет оптимального графика работы накопителя на предстоящий период планирования.

2. Проверка соответствия количества реально потребленной энергии заданному графику её потребления и корректировка графика работы накопителя на предстоящий период в случае необходимости.

На первом этапе была проведена серия экспериментов с периодом планирования, равным 24 часам, по результатам которых была рассчитана экономия денежных средств, приведенная в таблице 1. Средние значения экономии для каждой структуры отражены в последнем столбце.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности предложенной модели интеллектуального управления режимами работы микросети с заданной структурой.

Таблица 1 – Результаты первого этапа экспериментального исследования

№ эксп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
экономия, % (структура 1)	19,2	18,9	22,3	20,4	19,5	23,6	19,7	22,3	20	18,4	20,43
экономия, % (структура 2)	22,1	28,2	30,5	35,8	21,5	25	29,3	30,1	24,8	22,2	26,95

Второй этап экспериментального исследования посвящен изучению быстродействия модели интеллектуального управления режимами работы микросети и измерению требуемых объемов оперативной памяти.

Опытным путем было установлено, что при увеличении количества частиц в рое точность решения задачи возрастает. Для достижения результата, близкого к оптимальному, в рое должно быть не менее 20 частиц. При количестве частиц более 100 существенного повышения точности результатов зафиксировано не было. Поэтому была проведена серия из 9-ти экспериментов с количеством частиц равным 20, 50 и 100 при различных размерностях задачи (8, 12 и 24).

Эти эксперименты выявили следующее ограничение на использование метода роя частиц для решения поставленной задачи: при размерности задачи более 8 время выполнения расчетов может превысить один час. Это ограничение делает невозможным выполнение своевременных расчетов с целью коррекции

графика работы накопителя в случаях, когда значения реального и заданного потребления энергии нагрузками не совпадают, что приводит к снижению эффективности предложенной модели. С целью устранения влияния данного ограничения на скорость расчетов были проведены эксперименты, в которых размерность задачи была уменьшена до 8. Таким образом, каждый эксперимент представлял собой троекратное повторение эксперимента первого этапа с уменьшенным до 8 часов периодом планирования. Результаты обработки этих экспериментов отражены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты второго этапа экспериментального исследования

№ эксп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
экономия, % (структура 1)	22,2	28,9	22,3	25,4	23,5	27,6	29,7	30,3	28	29,7	26,76
экономия, % (структура 2)	31,5	31,2	33,5	32,8	35,5	34	29,8	28,7	33,9	32,4	32,33

Увеличение экономии, полученное на данном этапе, связано с тем, что при отклонении реального потребления от запланированного, производился своевременный перерасчет графика работы накопителя, так как быстродействие модели значительно увеличилось. Таким образом, для обеспечения максимальной эффективности предложенной модели, необходимо осуществлять расчет оптимального графика работы накопителя со следующими параметрами: количество частиц в рое — 100, размерность задачи — 8.

Пятая глава посвящена выявлению базовых требований реализуемости микросетей с НЭЭ и рассмотрению этих требований в двух аспектах: наличие методологии построения и реализации сетевой архитектуры и наличие экономических условий реализации ЭИС.

В общем случае пользователь имеет четыре способа получения необходимого количества электрической энергии для обеспечения своих нужд [4]:

1. Питание от ЦСЭ;
2. Покупка необходимого количества электроэнергии у других пользователей микросети;
3. Использование электроэнергии, запасенной в собственном накопителе;
4. Использование электроэнергии, генерируемой СИЭ.

С целью минимизации затрат пользователя на электроэнергию необходимо осуществить оптимальное комбинирование указанных способов в течение заданного периода планирования T , состоящего из n временных интервалов t_i , $i = \overline{1, n}$, каждый из которых равен периоду фиксированной величины тарифа τ , т.е. необходимо для каждого t_i сформировать так называемый **энергетический пакет** (или энергопакет), который может быть представлен вектором

$$\bar{e}_i = (e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, e_{i4}), \quad (17)$$

где e_{i1} – количество электроэнергии, полученное из ЦСЭ с дифференцируемой тарификации; e_{i2} – количество электроэнергии, полученное от других пользователей микросети: $e_{i2} = \sum_{k=1}^m e_{i2k}$, где e_{i2k} – количество электроэнергии, купленное у k -го пользователя, $k = \overline{1, m}$, m – количество пользователей; e_{i3} – коли-

чество электроэнергии, взятой из собственного НЭЭ; e_{i4} – количество электроэнергии, полученной от СИЭ.

Таким образом, Система должна также решать задачу формирования оптимального энергетического пакета. В процессе выявления требований были сформулированы функциональные и нефункциональные требования. Было идентифицировано 17 нефункциональных требований, атрибуты которых приведены в тексте диссертации, а среди функциональных требований были выделены следующие:

— Система должна разграничивать права пользователей для доступа к различным функциям системы;

— Система должна предоставить пользователю веб-интерфейс для использования функций Системы;

— Система должна предоставить пользователю набор средств для формирования запросов на предоставление энергопакетов по дифференцированным тарифам;

— Система должна предоставить пользователю набор средств для управления работой НЭЭ и подключенных к нему потребителей;

— Система должна проводить оценку запросов на предоставление энергии и адаптацию предложений к ним;

— Система должна предоставлять пользователю информацию о состоянии НЭЭ и СИЭ;

— Система должна предоставлять пользователю набор отчетов о работе Системы;

— Система должна предоставлять пользователю информацию о состоянии системы;

— Система должна иметь базу данных для хранения информации.

Удобным средством представления функциональных требований являются пользовательские сценарии (use cases), которые описывают все варианты взаимодействия пользователей с Системой. Данные варианты были разработаны в рамках построения концептуальной модели Системы.

Разработка архитектуры Системы осуществлялась в соответствии с методологией UP и с применением языка UML. Спецификация Системы состоит из следующих основных частей:

1. **Концептуальная модель** описывает участников системы (актеры) и основные сценарии и варианты работы системы (прецеденты). Взаимоотношения актеров и прецедентов (варианты взаимодействия пользователей с Системой) представлены на диаграмме вариантов использования (рис. 6).

В результате моделирования выявлены следующие актеры:

– *пользователь* – владелец сервера системы «Умный дом», осуществляющий работу с Системой с его помощью;

– *администратор сети* – сотрудник, ответственный за работу интеллектуальной сети, осуществляющий работу с Системой с использованием сервера микросети.

Соответствие вариантов использования и функциональных требований представлено в реестре вариантов использования.

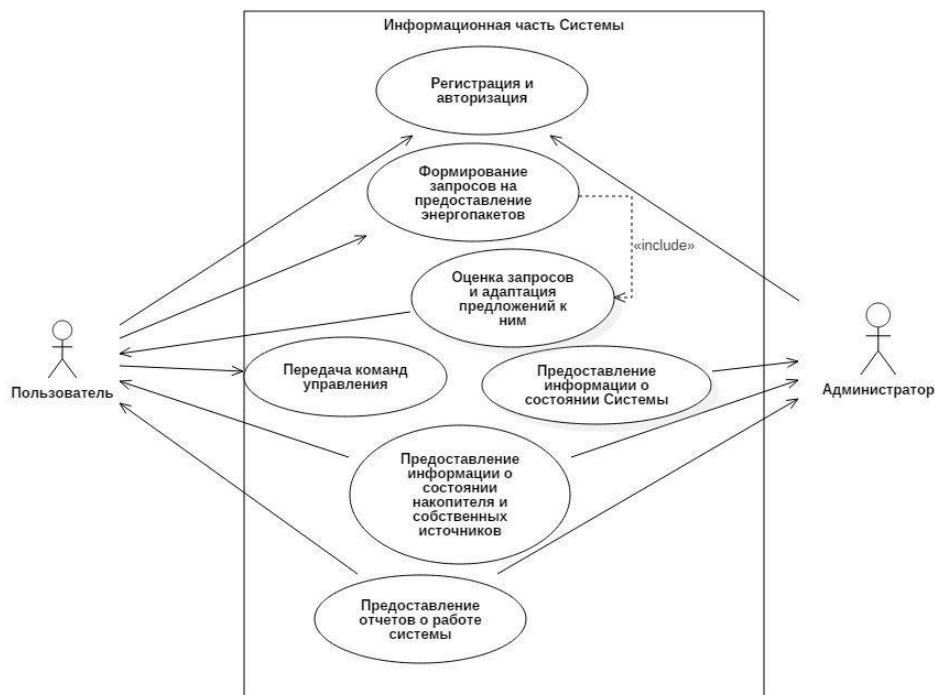


Рисунок 6 – Диаграмма вариантов использования

2. **Логическая модель** включает описание и диаграммы наиболее важных модулей системы, описания значимых классов.

Диаграмма классов Системы представлена на рисунке 7, описание основных классов приведено в тексте диссертации.

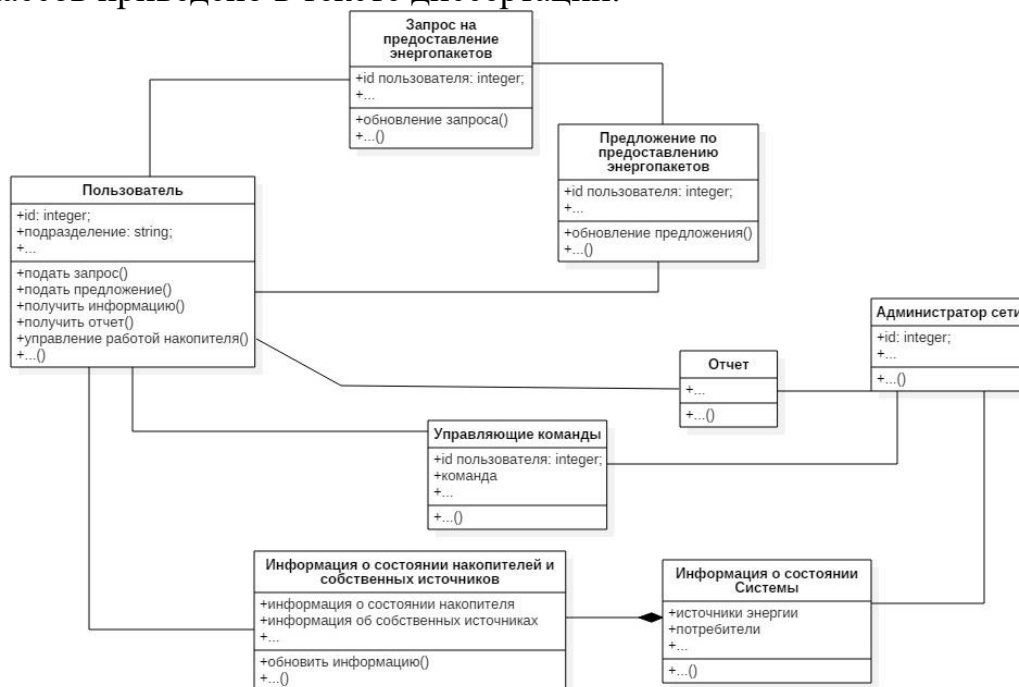


Рисунок 7 – Диаграмма классов

3. **Модель размещения** описывает варианты физического размещения элементов системы.

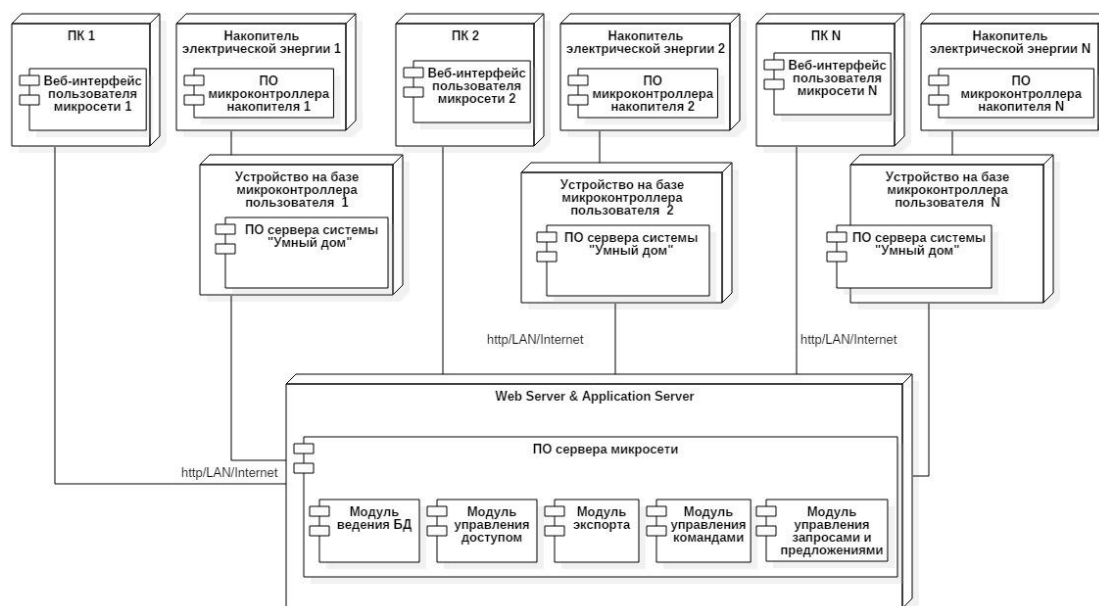


Рисунок 8 – Диаграмма развертывания Системы

4. **Модель реализации** описывает разделение Системы на отдельные компоненты, независимые задачи, подпрограммы, информационные и управляющие потоки и связи между элементами системы.

Для представления модели реализации используется диаграмма компонентов, представленная на рисунке 9.

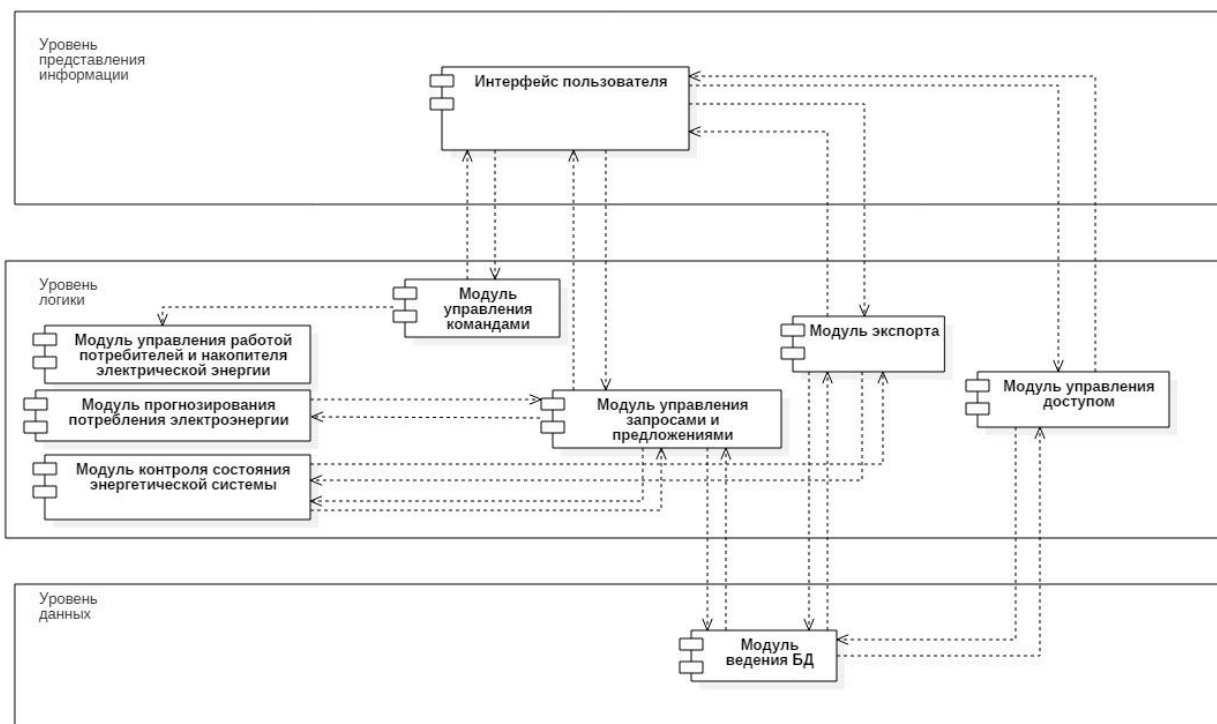


Рисунок 9 – Диаграмма компонентов

Анализ требований с точки зрения экономической реализуемости ЭИС совершенно необходим при её развёртывании в сетях общего и промышленного назначения. Рассмотрим условия реализуемости экономических требований при внедрении ЭИС. В целом, несмотря на то, что альтернативные источники в

России становятся все более популярными, их применение в частном секторе сдерживается отсутствием нормативной и технической базы для их подключения к ЦСЭ. На данный момент договор присоединения к электрическим сетям не предусматривает для частного лица возможности генерации электроэнергии в сеть, а лишь разрешает ее потребление.

Эта ситуация может значительно улучшиться, благодаря совершенствованию нормативной правовой базы РФ в целях устранения барьеров для использования передовых технологических решений и созданию системы стимулов для их внедрения, которые запланировано завершить в соответствии с дорожной картой «Энерджинет» к 2020 году. Рассмотрим механизмы, стимулирующие использование альтернативных источников электрической энергии, в странах, где наблюдается развитие альтернативной энергетики. К числу основных таких мер и механизмов можно отнести:

- обязательное подключение солнечных и ветровых электростанций к сетям (т.е. сети обязаны принимать от таких электростанций энергию);
- компенсация стоимости технологического подсоединения — сети или подключают бесплатно, или стоимость этого подключения компенсируется из специальных фондов поддержки;
- специальные повышенные закупочные тарифы на электрическую энергию от солнечных панелей и ветровых генераторов. Особенную популярность данный механизм приобрел в Европе, так как показал наибольшую эффективность по привлечению населения к использованию энергии от альтернативных источников.

На основе проведенного в работе анализа на примере внедрения ЭИС в Германии, можно сделать о том, что средний срок окупаемости затрат на ее реализацию составляет около 4 лет. При этом условием реализуемости систем электроснабжения с НЭЭ являются компенсация стоимости технологического подсоединения и специальные повышенные закупочные тарифы на электроэнергию от солнечных панелей и ветровых генераторов.

В заключении сформулированы результаты, полученные в диссертации:

1. На основе анализа микросетей, включающих НЭЭ и СИЭ, теоретически обоснован выбор М-элементной концепции моделирования автономных систем электроснабжения для вычисления коэффициента мощности в узле подключения накопителя.
2. Разработана математическая модель НЭЭ в стандартной форме, представляющая собой совокупность М-элементов и учитывающая особенности совместной работы АБ и АС/DC преобразователя.
3. На основе физического эксперимента подтверждена достоверность результатов, получаемых с помощью разработанной модели накопителя электрической энергии.
4. Теоретически обоснована необходимость представления задачи оптимизации режимов работы микросети с НЭЭ по критерию затрат пользователя микросети на электрическую энергию в виде совокупности задач оптимизации графика потребления электрической энергии нагрузками и оптимизации работы НЭЭ.

5. Поставлена и решена задача оптимизации графика потребления электрической энергии нагрузками по критерию затрат пользователя микросети на электрическую энергию.

6. С помощью вычислительного эксперимента подтверждена эффективность разработанного алгоритма формирования оптимального графика потребления электрической энергии.

7. Поставлена и решена задача оптимизации работы НЭЭ.

8. С помощью вычислительного и физического экспериментов подтверждена эффективность разработанного алгоритма оптимизации работы НЭЭ.

9. Разработана спецификация требований к микросети с НЭЭ, в которой были выявлены и проанализированы функциональные и нефункциональные требования к ней;

10. Разработана архитектура ПО ЭИС пользователя микросети;

11. Разработано исследовательское ПО для решения задач моделирования микросети и оптимизации ее режимов работы, а также модуль для формирования предложения по предоставлению энергетических пакетов.

Публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. В.Ф. Белов, А.А. Буткина, А.В. Шамаев, Математическое моделирование систем преобразования электрической энергии для микросетей // Автоматизация процессов управления. Ульяновск: Издательство: Научно-производственное объединение Марс. ISSN: 1991-2927. - 2014. - №2 (36). - С. 43-51.

2. Рожкова С.А., Белов В.Ф., Буткина А.А. Построение оптимального графика потребления электрической энергии в микросетях. Журнал "Фундаментальные исследования", №9 (часть 11), 2014 г., С. 2416-2420.

3. Белов В.Ф., Буткина А.А., Занкин А.И. Исследование условий реализуемости системы электроснабжения с накопителями электрической энергии // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9-1. – С. 19-24.

В журналах, входящих в базы данных Web of Science и SCOPUS:

4. Vladimir Belov, Anna Butkina, Feodor Bolschikov, Peter Leisner, Pja Belov. Power quality and EMC solutions in micro grids with energy-trading capability. Proc. of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014), Gothenburg, Sweden, September 1-4, 2014. IEEE Catalog Number CFP1406F-USB, ISBN 978-1-4799-3225-2. pp. 1203-1208.

В других изданиях:

5. Буткина А.А., Шамаев А.В. Исследование математического обеспечения численного интегрирования дифференциальных уравнений в комплексе программ EMC-CAD. Материалы XIV научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Мордовского государственного университета имени Н.П.Огарева: в 2 ч. Ч.1: технические и естественные науки / сост. О.И. Скотников, О.В. Бояркина; отв. за вып. В.Д. Черкасов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – С. 121-125.

6. Буткина А.А., Сравнение точности и быстродействия численных методов решения дифференциальных уравнений при моделирования линейного однофазного источника питания. XL Огаревские чтения: материалы научн. конф.: в 4 ч. Ч.2: Естественные науки/ сост. Т.И. Теплухова; отв. за вып. П.В. Сенин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. С. 135-137.

7. Белов В.Ф., Буткина А.А., Шамаев А.В. Метод покрытия графа эквивалентной схемы преобразовательной системы совокупностью М-элементов. XLI Огаревские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч 2: Естественные науки. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 237-243.

8. Буткина А.А., Шамаев А.В. Моделирование линейного источника питания устройства энергетической электроники аналитическим способом. XLI Огаревские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч 2: Естественные науки. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. - С. 146-149.

9. Белов В.Ф., Буткина А.А., Шамаев А.В. Модификация метода роя частиц для решения задачи оптимального управления накопителем электрической энергии в микросети. XLV Огаревские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч 2: Естественные науки. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. - С. 103-109.