

На правах рукописи

ИВАНИН Олег Александрович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

05.14.01 – энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединённом институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: Д.т.н., в.н.с. лаборатории 2.1.3.1 – распределенной генерации
Директор Леонид Бенцианович
ФГБУН Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, г. Москва

Официальные оппоненты: Д.т.н., доцент, профессор каф. «Электроэнергетика, электроснабжения и силовая электроника»
Соснина Елена Николаевна
ФГБОУ ВО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

К.т.н., доцент, зав. каф. «Промышленных теплоэнергетических систем»
Яворовский Юрий Викторович
ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет МЭИ, г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Защита состоится “10” октября 2018 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте <https://jiht.ru/>

Автореферат разослан “___” _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н.

Л.Б. Директор

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Распределенная генерация играет все более заметную роль в энергетическом балансе многих стран, в том числе России. При этом требования энергоэффективности и энергосбережения, экологические ограничения заставляют использовать все более сложные схемы энергетических комплексов: когенерационные и тригенерационные, с тепловыми и электрическими аккумуляторами, гибридные схемы с установками на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Переменные нагрузки потребителя и многообразие типов современных энергогенерирующих и аккумулирующих установок делают задачу выбора оптимальной конфигурации энергетического комплекса нетривиальной и труднореализуемой без использования эффективных численных методов и адекватных математических моделей.

Предлагаемые в литературе подходы к решению данной задачи, как правило, не отличаются универсальностью и накладывают значительные ограничения на состав оборудования оптимизируемого энергетического комплекса. Отсутствие общих решений выливается в отсутствие нормативной базы, позволяющей подобрать генерирующее оборудование для системы энергоснабжения заданного потребителя с учетом климатических особенностей региона, потенциала возобновляемых источников энергии и уровня местных цен на энергоносители. Разработка методики решения задач оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов с варьируемым составом оборудования будет способствовать снижению затрат на энергоснабжение потребителей, подключенных к автономным источникам тепло- и электроснабжения, а также повышению эффективности энергетических систем распределенной энергетики.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов малой распределенной энергетики, направленных на снижение затрат на производство энергии. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Критический анализ методов оптимизации энергетических комплексов малой распределенной энергетики, имеющих в своем составе как традиционные энергогенерирующие установки, так и установки на возобновляемых источниках энергии, накопители электрической и тепловой энергии.

2. Определение целевых критериев выбора схем и режимов работы комплексов малой энергетики.

3. Разработка обобщенной математической модели энергетических комплексов произвольного состава.

4. Обоснование метода оптимизации и его адаптация для решения задачи оптимизации схем и режимов работы комплексов малой распределенной энергетики.

5. Разработка алгоритма краткосрочного прогнозирования энергетических нагрузок потребителей, находящихся вне зон централизованного энергоснабжения, в условиях ограниченности исходной информации.

6. Проведение экспериментальных исследований стендовой модели энергетического комплекса для верификации разработанных моделей и программ.

Научная новизна

Предложен новый метод оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов малой распределенной энергетики на основе симплексного алгоритма. В отличие от существующих подходов метод позволяет моделировать работу энергетического комплекса с варьируемым набором электро- и теплогенерирующего оборудования и накопителей энергии, а также определять оптимальную конфигурацию комплекса и оптимальные режимные карты работы входящего в него оборудования в соответствии с выбранным критерием оптимизации.

На основе технологии искусственных нейронных сетей разработан алгоритм краткосрочного прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей, позволяющий прогнозировать графики нагрузок в условиях ограниченности исходной информации о потребителе энергии, при которых традиционные методы прогнозирования неприменимы.

Практическое значение

Практическая значимость работы заключается в создании метода оптимизации энергетических комплексов малой распределенной энергетики варьируемого состава и метода краткосрочного прогнозирования энергетических нагрузок при ограниченной информации о потребителе энергии, позволяющих определять оптимальную конфигурацию энергетического комплекса и оптимизировать затраты на энергообеспечение потребителя. Разработанные методы могут быть использованы в предпроектных исследованиях для выбора концепции энергоснабжения

потребителя и при разработке системы интеллектуального управления энергокомплексами.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по соглашению о субсидии № 14.607.21.0157 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60716X0157). Метод оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов был использован в работе ОИВТ РАН по проекту «Разработка и экспериментальная апробация технических решений повышения эффективности газотурбинных установок на основе внутрициклового сжатия топлива» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы».

Положения, выносимые на защиту

Метод оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов малой распределенной энергетики, разработанный на основе симплексного алгоритма. Разработанный метод предназначен для моделирования работы энергетического комплекса с варьируемым набором электро- и теплогенерирующего оборудования и накопителей энергии, а также для определения оптимальной конфигурации комплекса и оптимальных режимных карт работы оборудования в его составе в соответствии с выбранным критерием оптимизации.

Алгоритм краткосрочного прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей, построенный на базе технологии искусственных нейронных сетей, позволяющий прогнозировать графики нагрузок в условиях ограниченности исходной информации о потребителе энергии, при которых традиционные методы прогнозирования неприменимы.

Личный вклад автора

Участие в экспериментальных исследованиях. Участие в разработке обобщенной модели комплекса малой энергетики. Разработка метода оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов и метода моделирования графиков энергетических нагрузок. Реализация разработанных методов в виде компьютерных программ, проведение расчетов. Подготовка статей, докладов и заявок на регистрацию программ для ЭВМ.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. World Sustainable Energy Days 2012. – Linz, Austria, 29 февраля – 2 марта 2012.
2. Молодежная конференция «Вклад молодежи в решение практических задач в области модернизации энергетики и развития энергетической инфраструктуры» в рамках Ярославского энергетического форума 2012, Ярославль, 5–6 декабря 2012.
3. Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых ЭНЕРГИЯ-2013, Иваново, 24 апреля 2013.
4. Молодежная конференция в рамках Ярославского энергетического форума 2015, Ярославль, 2–3 декабря 2015.
5. XXXI International Conference on Equations of State for Matter, Кабардино-Балкария, 1–6 марта 2016.
6. Современные проблемы теплофизики и энергетики, Москва, 9-11 октября 2017.

Публикации

Результаты диссертационной работы опубликованы в семи научных статьях, из которых четыре – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, две – в издании, индексируемом в реферативной базе Web of Science.

Получено 2 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 125 страницах, содержит 41 рисунок, 8 таблиц, 1 приложение и список литературы из 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, кратко описана структура диссертации.

В первой главе обоснована актуальность задачи оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов малой распределенной энергетики. Рассмотрено текущее состояние отечественной энергетики,

обозначены сложившиеся в последние десятилетия тенденции развития распределенной генерации. Приведено описание объекта исследований – энергетического комплекса малой энергетики. Рассмотрены различные типы генерирующего и аккумулирующего оборудования, которое может входить в состав такого комплекса, обозначена проблема выбора композиции оборудования. Показано, что решение этой проблемы – одно из актуальных направлений развития технологий малой распределенной энергетики.

Приводится обзор публикаций, посвященных оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов. Показано, что предлагаемые в литературе подходы к решению поставленной задачи обладают общими недостатками: поиск оптимального решения, как правило, сводится к выбору лучшего из нескольких экспертно-предлагаемых вариантов; мало внимания уделяется проблеме моделирования графиков энергетических нагрузок, без которых невозможно проведение оптимизационных расчетов. На основании проведенного обзора сформированы требования к разрабатываемой методике оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов:

1) методика должна быть применима для оптимизации энергетических комплексов различного состава, в том числе включающих установки на ВИЭ и аккумуляторы энергии;

2) поиск оптимального решения должен осуществляться путем реализации метода математического программирования;

3) методика должна включать алгоритм моделирования энергетических нагрузок потребителей, характерных для распределенной энергетики;

4) разработанные алгоритмы должны быть реализованы в виде компьютерных программ для практического применения методики.

Вторая глава посвящена описанию обобщенной математической модели энергетического комплекса, обоснованию выбора и адаптации метода оптимизации. Приводится описание программной реализации разработанного алгоритма оптимизации, а также примеры оптимизационных расчетов.

В основе математической модели энергетического комплекса лежат уравнения баланса потребляемой и производимой энергии, как тепловой, так и электрической. Для моделирования работы энергетического комплекса горизонт расчета разбивается на часовые интервалы, в пределах которых нагрузки потребителей и режим работы энергетических установок полагаются постоянными. В качестве параметра, характеризующего режим работы энергетических установок, введен коэффициент загруженности, который вычисляется как отношение текущей мощности установки к ее номинальному значению:

$$x_i^j = \frac{P_i^j}{P_i^{nom}}$$

где x_i^j – коэффициент загрузки i -й установки на j -м временном интервале; P_i^j – мощность i -й установки на j -м временном интервале; P_i^{nom} – номинальное значение мощности i -й установки.

Параметр x_i^j в любой момент времени определяет для отдельно взятой установки ее производительность и связанные с этим топливные затраты. Это регулируемый параметр, а значит – параметр оптимизации. Номинальная мощность энергетических установок также является параметром оптимизации при решении задачи поиска оптимальной конфигурации оборудования. Коэффициент загрузки каждой установки определяется для каждого из временных отрезков, составляющих горизонт расчета. При решении задачи оптимизации энергетических комплексов горизонт расчета должен составлять не менее 1 года, что обусловлено периодичностью нагрузок потребителей и климатических условий. Таким образом, при решении задачи оптимизации энергетического комплекса, включающего всего 4 генерирующие установки, количество оптимизируемых параметров составит не менее чем $4 \cdot 8760 = 35040$. Эффективно решать оптимизационные задачи, характеризующиеся большим числом переменных, позволяют методы линейного программирования, в частности – симплекс-метод. Задача линейного программирования формулируется следующим образом: найти вектор значений переменных, доставляющих экстремум линейной целевой функции при заданных ограничениях в виде линейных равенств или неравенств. С целью упрощения расчетов и реализации метода вводятся следующие допущения:

1) Временные изменения характеристик установок, связанные с запуском, остановкой и переходными режимами, не учитываются, т.к. переходные режимы занимают малую долю от времени работы установок.

2) Малые изменения характеристик установок в результате изменения режима их работы не учитываются, т.к. влияние этих изменений на общую эффективность работы системы полагается незначительным. Например, КПД электродкотлов изменяется в процессе эксплуатации в пределах 5%, а номинальное значение КПД различных типов электродкотлов составляет от 90% до 98%.

3) Аккумуляторы на начало расчетного периода полностью разряжены.

4) Несколько аккумуляторов одного типа энергии заменяются при расчетах одним аккумулятором суммарной емкости.

В качестве целевой функции выбирается величина затрат на энергоснабжение заданного объекта за расчетный период. Любые затраты, связанные с компонентами энергетического комплекса, можно разделить на две группы: зависящие от режима работы установки (затраты топлива) и не зависящие от него (амортизационные затраты, зарплата персонала и т.д.). Это значит, что в общем случае в целевую функцию входят параметры оптимизации, характеризующие режим работы оборудования, и параметры оптимизации, определяющие оптимальную установленную мощность оборудования (для аккумуляторов – оптимальную емкость). К каждому типу параметров относится соответствующая составляющая стоимости энергии: топливная, которая определяется режимом работы энергетического комплекса, и капитальная, определяемая номинальной мощностью энергетических установок. В соответствии с вкладом в целевую функцию можно выделить три типа установок:

1) Установки, для которых может быть оптимизирован режим работы, но не номинальная мощность. К ним относятся все работающие на углеводородном топливе установки с выраженной зависимостью КПД от относительной мощности: газотурбинные, газопоршневые установки, дизель-генераторы. Номинальная мощность таких установок определяется в процессе экспертных оценок на основании графиков нагрузок потребителя, категории надежности электроснабжения и других данных.

2) Установки, для которых можно определить, как оптимальный режим работы, так и оптимальное значение номинальной мощности. К таковым относятся установки, КПД которых слабо зависит от текущей мощности и режима работы, например, газовые водогрейные или электрические котлы, а также аккумуляторы.

3) Установки, для которых могут быть оптимизированы капитальные затраты, но не режим работы. К ним относятся установки на ВИЭ. В рамках рассматриваемой математической модели у них нет управляемых параметров. Это позволяет использовать математические модели любой сложности для ветрогенераторов и фотоэлектрических преобразователей, вычисляя вне оптимизационного расчета удельную мощность таких установок на каждом временном интервале.

Приняв, что первому типу установок в произвольном энергокомплексе, включающем m установок, соответствуют установки с номерами с 1 до l_1 , установкам второго типа – с l_1+1 по l_2 , а установкам третьего типа – с l_2+1 до m , можно записать для такого комплекса целевую функцию в общем виде

$$R = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^{l_2} f_i(P_i^j) \right) + \sum_{i=l_1+1}^m F_i(P_i^{\max}),$$

где R – значение целевой функции; первое слагаемое в правой части – сумма топливных затрат за расчетный период; второе слагаемое – сумма постоянных затрат, связанных с теми установками, для которых они могут быть оптимизированы; P_i^j и P_i^{\max} – значения текущей и максимальной мощности для i -й установки, соответственно.

При этом не имеет значения, производит установка тепловую или электрическую энергию. Функция $f_i(P_i^j)$ определяет зависимость топливных затрат от текущего значения мощности, а $F_i(P_i^{\max})$ – зависимость постоянных затрат от максимальной мощности для i -й установки. В соответствии с условиями применимости симплекс-метода эти зависимости должны быть линейными. Последнее означает, что при наличии в составе энергетического комплекса хотя бы одной установки с переменным значением КПД целевая функция будет содержать нелинейные члены. К ним относится большинство электрогенерирующих установок: дизель-генераторы, ГПУ, ГТУ. Подобные характеристики могут с достаточно высокой точностью быть аппроксимированы гиперболической функцией. Если зависимость КПД установки от загруженности аппроксимируется гиперболой, то функция

$$f_i(x_i^j) = \frac{x_i^j}{\eta_i^j} C_i, \quad \text{где } C_i \text{ –}$$

константа, характеризующая топливные затраты i -й установки, может быть аппроксимирована линейной функцией (Рис. 1.).

Алгоритм оптимизации был реализован в среде программирования Delphi в виде компьютерной программы Smart Energy complex. Для расчета необходимы следующие исходные данные: графики энергетических нагрузок потребителя, данные о подключении к внешним энергетическим сетям,

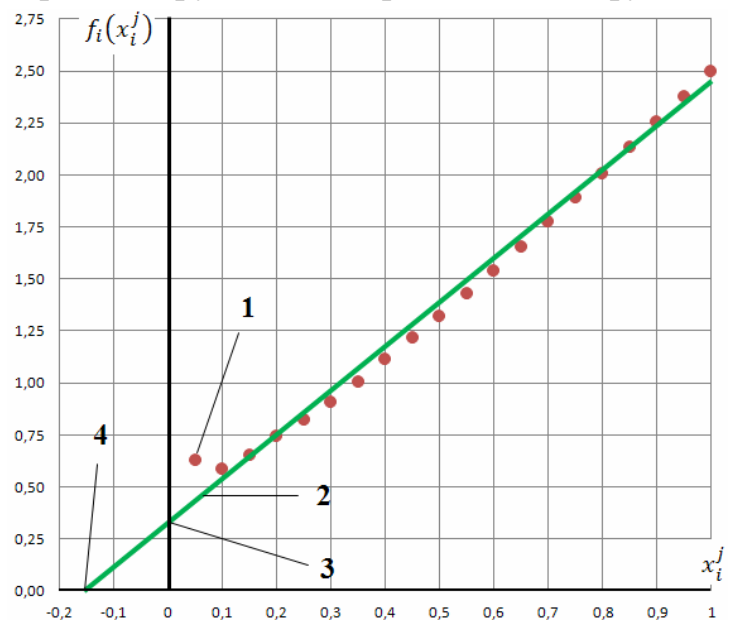


Рис. 1. Линейная аппроксимация функции $f_i(x_i^j)$ для дизельной установки: 1 – график функции $f_i(x_i^j)$; 2 – график линейно-аппроксимированной функции $f_i(x_i^j)$; 3, 4 – точки пересечения графика аппроксимированной функции с осями

тарифы на электроэнергию и тепло, местные цены на энергоносители, почасовые графики интенсивности солнечного излучения и скорости ветра, перечень установок, которые могут входить в состав энергетического комплекса, их стоимость, срок эксплуатации и характеристики.

Разработанный метод был применен для расчета оптимальной конфигурации системы автономного энергоснабжения жилого здания. В качестве потребителя рассматривалось 16-и этажное жилое одноподъездное здание (проект П-68), расположенное в климатической полосе г. Москвы. Графики нагрузок были сгенерированы для рабочих и выходных дней для 4-х характерных по потреблению тепла периодов: лето, зима, осень-весна (отопление включено) и осень-весна (отопление отключено). Отапливаемая площадь здания была принята равной 7000 м^2 , отопительная характеристика $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Графики электрической нагрузки и нагрузки горячего водоснабжения были построены на основании характерных графиков относительных нагрузок для жилых зданий. Число жителей при расчете нагрузок было принято равным 300. Возможными потребителями топлива в расчетах являлись газопоршневая установка и водогрейный котел. Обе установки работают на природном газе, цена газа была принята равной $5,2 \text{ руб.}/\text{нм}^3$. Для учета инсоляции использовались данные, предоставленные Лабораторией возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН, полученные статистической обработкой метеоданных для Московского региона. Перечень допустимых установок в составе энергетического комплекса включал: мини-ТЭЦ на базе газопоршневого двигателя ЯМЗ-240 (КГУ), газовый водогрейный котел (ВК), тепловой (ТА) и электрический (АКБ) аккумуляторы, фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), электродкотел. Оптимальный вариант конфигурации энергетического комплекса сравнивался с базовым вариантом, включавшим газовый водогрейный котел и газопоршневую электростанцию без когенерационной надстройки. Срок эксплуатации оборудования принимался равным 20 годам.

Полученная по результатам расчета оптимальная режимная карта для зимнего дня

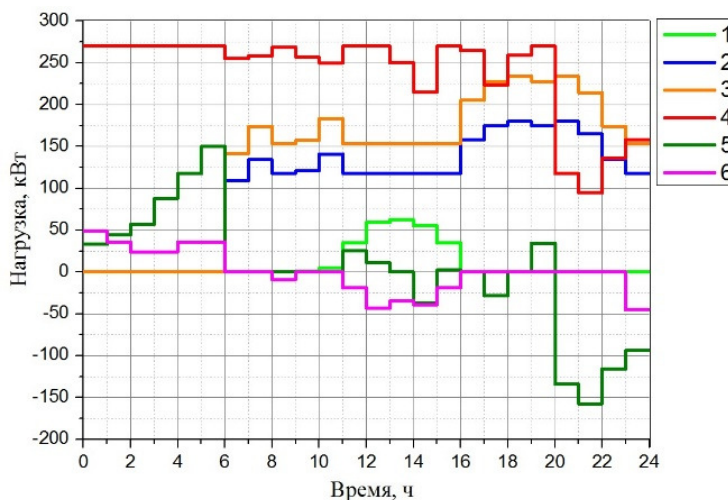


Рис. 2. Характерный график работы оборудования энергокомплекса: 1 – ФЭП; 2 – КГУ (электричество); 3 – КГУ (тепло); 4 – ВК; 5 – ТА; 6 – АКБ

представлена на рис. 2. Из состава энергетического комплекса был исключен электрокотел, площадь ФЭП составила 78 м^2 , емкость АКБ – 208 кВтч, объем теплового аккумулятора – $12,4 \text{ м}^3$, оптимальная мощность газового котла – 270 кВт. Согласно расчету, накопители энергии, несмотря на значительные капитальные затраты, обеспечивают еще более значительный выигрыш в затратах на топливо. По сравнению с базовым вариантом затраты (капитальные и эксплуатационные) на производство энергии снизились на 4,2%, а потребление природного газа – на 16%. Структура энергоснабжения, полученная в результате расчета, приведена на рис. 3.

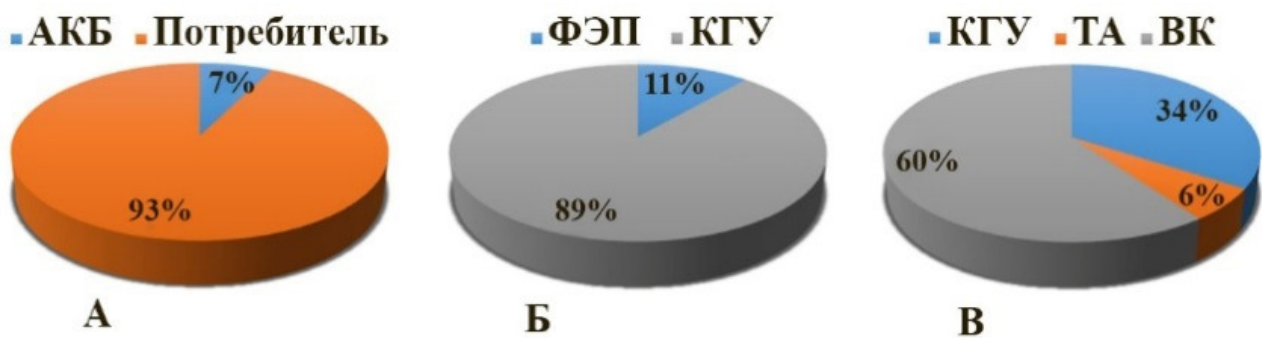


Рис. 3. Структура энергоснабжения: А – структура электроснабжения (КГУ+ФЭП); Б – соотношение электрогенерации КГУ и ФЭП; В – структура теплоснабжения

Метод оптимизации также использовался для моделирования системы энергоснабжения поселка Жиганск Жиганского улуса Якутии. Численность населения составляет 3451 человек, в поселке имеются промышленные предприятия. Графики нагрузок моделировались по 4 характерным дням зимы, весны, лета и осени. В соответствии с техническим заданием энергоснабжение поселка должно осуществляться преимущественно за счет мини-ТЭЦ на базе газотурбинной установки ГТУ-2,5П производства ОДК «Пермские моторы». Номинальная электрическая мощность установки составляет 2,68 МВт, электрический КПД в номинальном режиме – 21,1%, тепловая мощность когенерационной надстройки в номинальном режиме – 5,14 МВт. В состав энергетического комплекса мог входить водогрейный котел. Для оценки эффективности предлагаемой схемы энергоснабжения расчеты были также проведены для схемы без когенерационной надстройки ГТУ. В обоих случаях рассчитывались варианты работы при наличии или отсутствии подключения к внешней электросети. Цена природного газа была принята равной $3,43 \text{ руб./м}^3$. Предполагалось, что электроснабжение от внешней сети осуществляется по двухставочному тарифу: дневной – $2,42 \text{ руб./кВтч}$; ночной – $1,53 \text{ руб./кВтч}$. Результаты расчетов годовых затрат для 4-х схем энергоснабжения

представлены в табл. 1. Минимальные затраты соответствуют схеме с когенерацией и подключением к внешней электрической сети.

Таблица 1

**Результаты расчетов годовых затрат для 4 схем энергоснабжения
пос. Жиганск**

Схема	КГУ+ВК+эл.сеть	КГУ+ВК	ГТУ+ВК+эл.сеть	ГТУ+ВК
Период				
Зима	125500	125500	184279	188122
Весна	74983	74983	112453	122058
Лето	42691	49068	46545	55822
Осень	82442	82442	130084	134848
Сумма	325616	331993	473361	500850

В третьей главе рассмотрена проблема моделирования графиков электрических нагрузок потребителя, а также предложен метод их моделирования на базе искусственных нейронных сетей (ИНС), эффективный в условиях недостаточной информации о потребителе.

Данные об энергетических нагрузках потребителя являются необходимыми для проведения оптимизационного расчета состава оборудования энергетического комплекса. Наиболее достоверным источником таких данных являются полученные путем измерения графики тепловой и электрической нагрузок рассматриваемого потребителя. На практике получить такие графики затруднительно: во-первых, измерения должны производиться, по крайней мере, в течение года, т.к. изменения в характере потребления энергии имеют именно такую периодичность, во-вторых, задача оптимизации энергоснабжения может решаться для потребителя еще на этапе проектирования или строительства. Глава посвящена моделированию электрических нагрузок коммунальных потребителей, поскольку графики нагрузок промышленных потребителей могут быть спрогнозированы на основании производственных планов, а тепловая нагрузка может быть рассчитана при условии, что известны графики температуры наружного воздуха и отопительная характеристика здания.

Анализ публикаций позволяет выделить 4 основных подхода к моделированию графиков нагрузок: построение графика на основании информации о режиме работы потребителя, использование типовых графиков, аппроксимация и применение искусственных нейронных сетей. Первый способ неприменим в случае с коммунальными потребителями, а использование типовых графиков не позволяет учитывать индивидуальные особенности

объектов и может привести к значительной погрешности. Для аппроксимации нагрузок применяются, как правило, периодические функции, например, преобразование Фурье. Для успешного осуществления аппроксимации необходима исходная информация, представляющая собой график нагрузки рассматриваемого потребителя на длительном временном отрезке либо на нескольких характерных интервалах. Такие данные могут быть недоступны, в связи с чем требуется метод прогнозирования нагрузок, применимый в условиях недостаточной исходной информации. Такой метод может быть разработан на основании аппарата искусственных нейронных сетей.

Нейронная сеть – это распределенный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации (нейронов) и связей между ними, так называемых синаптических весов, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки. Группа нейронов, формирующая шаг обработки сигнала, формирует скрытый слой нейронов. Каналы ввода исходных данных для вычислений и вывода результатов расчетов формируют входной и выходной слои, соответственно. Функционирование нейрона может быть описано следующей парой уравнений:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j ,$$

$$y_k = \varphi (u_k + b_k) ,$$

где m – число сигналов на входе в нейрон k ; x_1, x_2, \dots, x_m – входные сигналы нейрона k ; $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ – синаптические веса нейрона k ; u_k – линейная комбинация входных воздействий; b_k – пороговая константа нейрона k ; сумма $u_k + b_k$ представляет собой сигнал, обрабатываемый целевой функцией, и носит название индуцированного локального поля; φ – функция обработки входного сигнала, называемая функцией активации нейрона k ; y_k – выходной сигнал нейрона. Для корректной работы нейронной сети необходим, во-первых, грамотный выбор набора входных параметров, во-вторых, обучающая выборка. Обучающая выборка – это набор типовых задач, для которых решения известны. Нейронная сеть пытается решать задачи сама и сравнивает полученный результат с ответом. Любое отклонение от заданного ответа влечет за собой коррекцию синаптических весов, пропорциональную величине ошибки и сигналу, вызвавшему эту ошибку.

Структура исходных данных определяется перечнем параметров, влияющих на режим электропотребления, и значениями, которые они могут принимать. Из множества параметров, определяющих электрическую нагрузку, выбираются те, которые могут быть внесены в обучающую выборку, то есть

доступные в открытых источниках или вычисляемые на основании открытой информации. Например, для коммунальных потребителей характерно заметное различие между графиками нагрузок в рабочие и выходные дни. Однако, если в описании графиков, использованных при обучении нейронной сети, не указан день, для которого этот график был построен, невозможно сформировать выборку, которая позволила бы учитывать этот фактор при моделировании.

Для прогнозирования нагрузок населенных пунктов была спроектирована однослойная нейронная сеть, перечень входных сигналов которой включал 5 параметров: численность населения, температуру наружного воздуха, наличие промышленных предприятий, характерный период суток (ночь, утренний пик, день, вечерний пик), уровень естественного освещения. Наличие промышленных предприятий, а также характерный период суток являются качественными характеристиками, а не количественными. Такие параметры на входе в нейронную сеть можно моделировать в виде n входных сигналов, где n – количество значений, которое может принимать эта характеристика. Каждый из n сигналов отвечает за свое значение и равен 1, если его значение соответствует текущему значению характеристики, и 0, если не соответствует. Таким образом, наличие предприятий будет задано единицей, а характерный период суток – четырьмя сигналами входного слоя. Структура разработанной нейронной сети представлена на рис. 4.

Для обучения нейронной сети были использованы 30 графиков нагрузок населенных пунктов Камчатского края, Якутии, Бурятии и Иркутской области, из которых 26 сформировали обучающую выборку, а 4 – контрольную. В качестве графиков контрольной выборки выбраны суточные графики нагрузок для летнего и зимнего дней двух населенных пунктов: поселка Оссора (Камчатский край, население – около 2000 человек) и поселка Угоян (Якутия, население – около 400 человек). Метод прогнозирования нагрузок обособленных потребителей был реализован в компьютерной программе Load Forecast в среде Delphi. По исходным данным контрольной выборки было смоделировано 4 графика нагрузок (рис. 5).

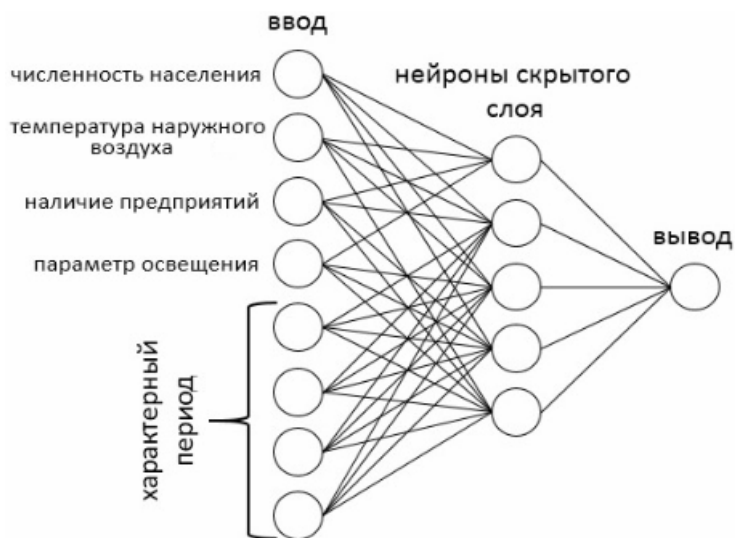


Рис. 4. Структура нейронной сети для прогнозирования нагрузок населенных пунктов

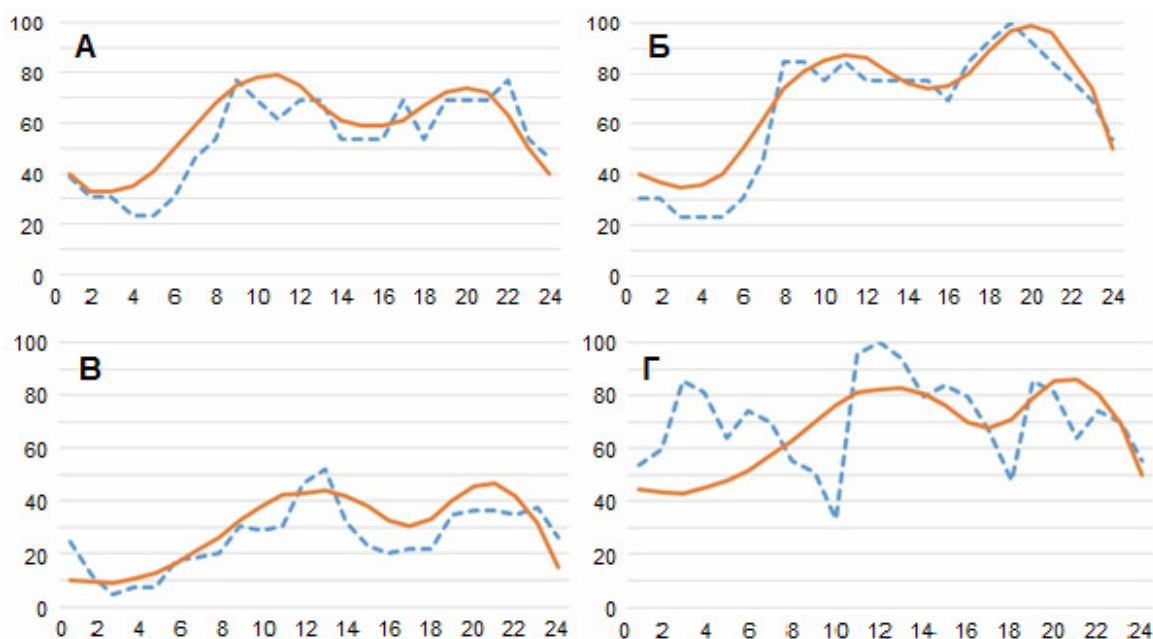


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования графиков нагрузок с контрольной выборкой: а – п. Оссора, лето; б – п. Оссора, зима; в – п. Угоян, лето; г – п. Угоян, зима; сплошные линии – результаты моделирования, пунктир – графики из контрольной выборки

Оценка результатов прогнозирования показала, что применение искусственных нейронных сетей, несмотря на значительную погрешность в отдельных точках, позволяет получить достоверную качественную картину энергопотребления. Слабое совпадение расчетного и контрольного графиков для зимнего дня поселка Угоян (рис. 5-г) объясняется тем, что структура реального график принципиально отличается от заложенной в нейронной сети в процессе обучения: невозможно выделить 4 характерных участка. Метод может быть усовершенствован путем расширения обучающей выборки и увеличения количества исходных параметров.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментальных исследований динамических характеристик бака-аккумулятора тепла и режимов работы модели энергетического комплекса на стенде ОИВТ РАН с целью проверки адекватности используемых при расчетах математических моделей энергетического оборудования и допущений, принятых при разработке методики оптимизации.

Испытательный стенд ОИВТ РАН представляет собой модель автономного энергетического комплекса (АЭК) и включает следующие установки: газопоршневую когенерационную установку АГ-200, газопоршневую когенерационную установку АГ-315, бак-аккумулятор тепла, имитаторы электрической и тепловой нагрузки потребителя, кроме того, модель АЭК подключена к внешней электросети. Стенд оснащен системами

измерений, диагностики, управления, а также системой синхронизации электрических параметров генератора ГПУ и внешней электрической сети. Технологическая схема стандовой модели АЭК представлена на рис. 6

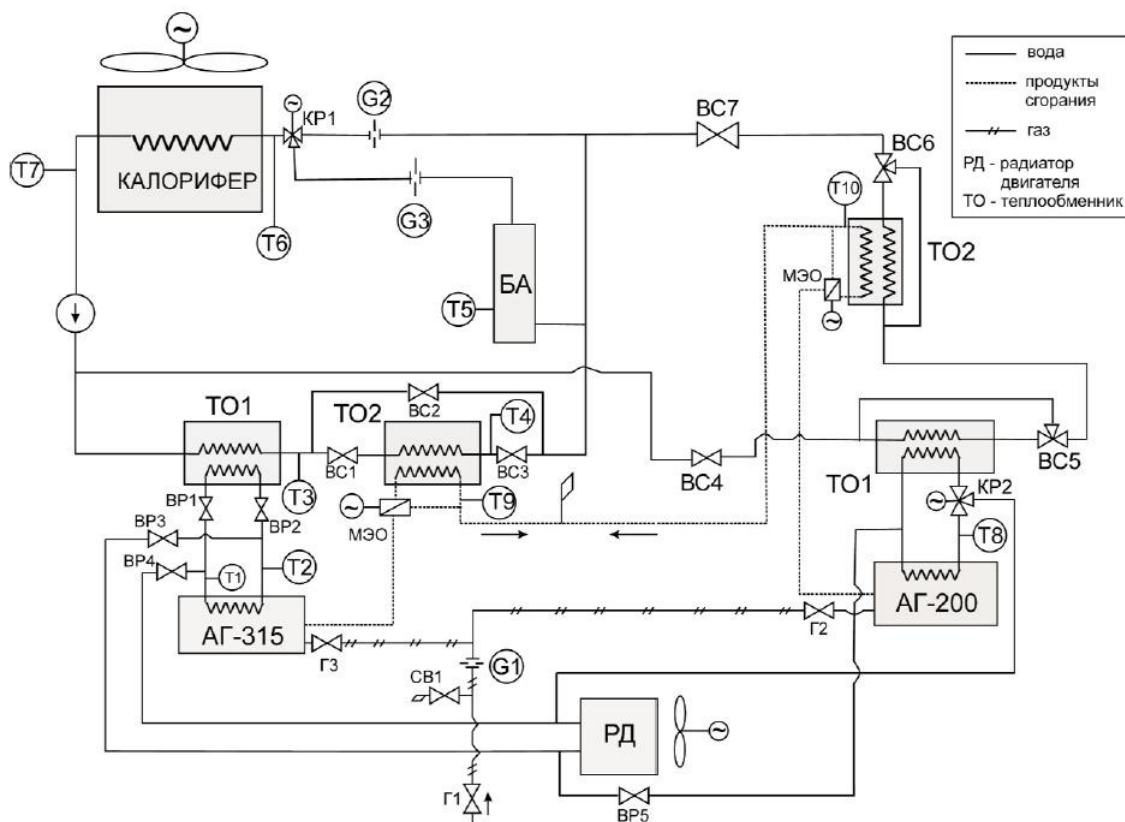


Рис. 6. Технологическая схема стандовой модели АЭК

Специально разработанный программный комплекс обеспечивает визуализацию режимов работы теплоутилизационного блока и архивирование данных измерений. Разработанная программа представляет собой удобный интерфейс для наблюдения за параметрами стандовой модели энергетического комплекса в режиме реального времени, а также архивации параметров в файл с заданной частотой.

В состав испытательного стенда входит бак-аккумулятор тепловой энергии. Для оценки динамики зарядки/разрядки аккумулятора и моделирования работы оборудования стенда в комплексе, необходимо было разработать математическую модель бака, позволяющую с достаточной точностью моделировать его работу в различных режимах и нетребовательную в отношении вычислительных ресурсов.

Разработана одномерная зонная модель вертикального осесимметричного бака-аккумулятора тепла, отвечающая требованиям простоты программной реализации и скорости счета, предъявляемым системами автоматизированного управления. В рамках зонной модели объем бака разбивается по высоте на n

зон, в каждой из которых перемешивание жидкости считается мгновенным. Каждая зона характеризуется средней температурой T_i , где i – порядковый номер зоны. Число зон отражает интенсивность перемешивания жидкости в объеме бака (чем больше n , тем меньше интенсивность перемешивания). Теплоемкость жидкости принимается постоянной, теплоаккумулирующая способность конструкционных материалов не учитывается в расчетах. Выбор числа зон позволяет описать качественное поведение процессов зарядки и разрядки бака. При $n = 1$ (1 зона) перемешивание воды в баке происходит мгновенно по всему объему. С увеличением числа зон разбиения интенсивность перемешивания снижается, и при $n \rightarrow \infty$ перемешивание отсутствует.

Проблема зонной модели состоит в невозможности установления аналитической зависимости между параметрами бака и количеством зон разбиения, что затрудняет экспериментальную верификацию. Для преодоления этого ограничения использовалась двумерная динамическая модель бака-аккумулятора на базе модели турбулентного течения несжимаемой вязкой жидкости с постоянными свойствами в поле силы тяжести, описываемая уравнениями Навье-Стокса в цилиндрической системе координат. Данная модель верифицировалась экспериментально, а уже с ее помощью определялось количество зон разбиения, наиболее подходящее под различные режимы работы аккумулятора. Эксперимент проводился для разрядки и зарядки аккумулятора при расходах воды 10, 7 и 4 т/ч. Во всех случаях двумерная модель показала хорошую согласованность с экспериментом. Сравнение результатов эксперимента и моделирования работы бака при расходе воды 7 т/ч представлено на рис. 7.

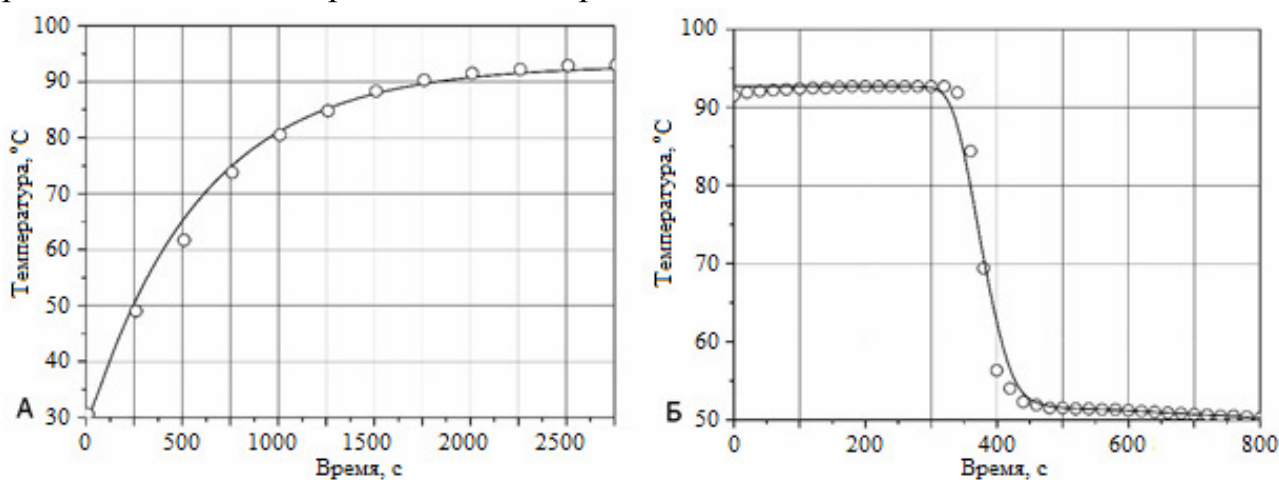


Рис. 7. Зависимость температуры воды на выходе из бака-аккумулятора от времени: кривые – расчет по двумерной модели; точки – эксперимент. А – режим зарядки; Б – режим разрядки

Сравнение результатов расчетов температуры воды на выходе из бака в процессах зарядки и разрядки по зонной и двумерной модели представлено на рис. 8.

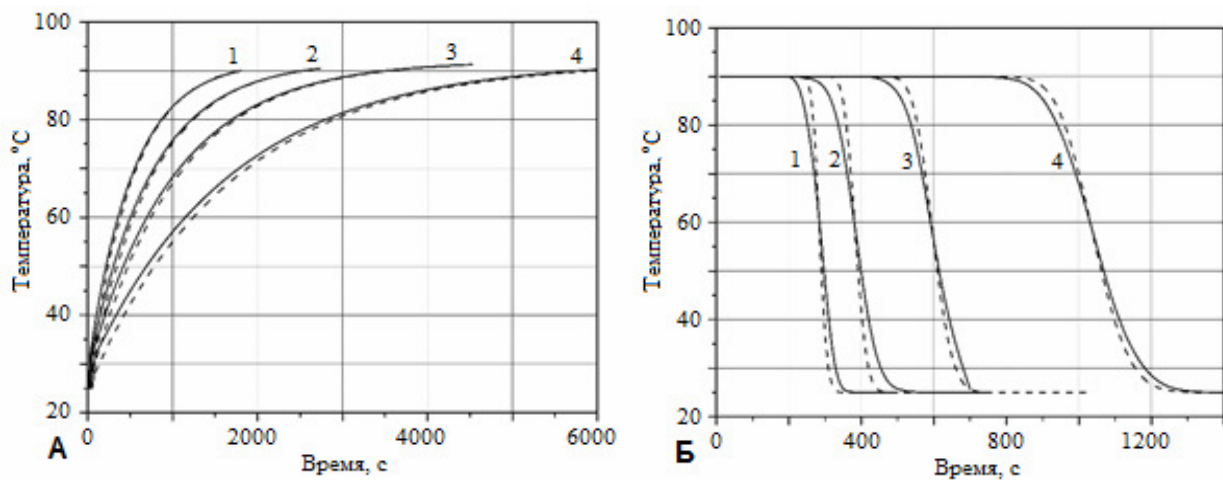


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов по двумерной (сплошные кривые) и зонной (пунктирные кривые) моделям: А – зарядка ($n=1$), Б – разрядка ($n=150$). Расход сетевой воды: 1 – 10 т/ч; 2 – 7 т/ч; 3 – 5 т/ч; 4 – 3 т/ч

Расчеты показали, что зонная модель вполне удовлетворительно описывает процесс зарядки при $n=1$. Разница температур воды на входе в бак и начальной температуры воды в баке не оказывает существенного влияния на результаты расчетов. Для расчета баков-аккумуляторов, для которых не выполняются условия геометрического подобия или используется другой теплоноситель, можно предложить следующий алгоритм расчета. Вначале по двумерной модели рассчитываются динамические температурные кривые при заданной геометрии бака, свойствах рабочей жидкости во всем диапазоне предполагаемого изменения расхода рабочей жидкости. На следующем шаге расчетным путем подбирается число зон, при котором температурные кривые соответствуют рассчитанным по двумерной модели с приемлемой точностью.

Основная цель экспериментальных исследований в рамках настоящей работы – верификация метода оптимизации состава оборудования и режимов работы АЭЖ. Критерием точности метода является отклонение затрат на производство электроэнергии, вычисленных с помощью представленного в главе 2 метода, от величины эксплуатационных затрат, полученной в результате стендовых испытаний при условии, что в процессе испытаний энергетическое оборудование будет эксплуатироваться в соответствии с рассчитанной в процессе оптимизационного расчета режимной картой. Кроме того, величины тепловой и электрической нагрузок должны меняться в процессе эксперимента подобно графикам нагрузок реальных потребителей, а само время эксперимента

должно быть достаточно длительным, чтобы влияние переходных режимов на затраты топлива в эксперименте было минимизировано.

Все расходы на энергоснабжение были отнесены к электрической энергии. Себестоимость электроэнергии, производимой энергетическим комплексом, вычислялась как совокупность топливных затрат, а также затрат, не зависящих от режима эксплуатации оборудования: эксплуатационных и амортизационных. В результате расчетов себестоимости электроэнергии при условии работы мини-ТЭЦ на номинальной мощности были получены следующие значения: топливная составляющая – 1,41 руб./кВтч; амортизационная и эксплуатационная составляющие – 0,35 руб./кВтч; общая себестоимость электроэнергии – 1,76 руб./кВтч.

Для определения стоимости энергии, импортированной из сетей централизованного энергоснабжения, применялись действующие в Москве в 2012 г. тарифы на электроэнергию и тепло.

Моделирование энергоснабжения осуществлялось в двух экспериментах продолжительностью 6 и 4 часа, при этом моделировались суточные графики нагрузки коммунального и промышленного потребителей в масштабах времени 1:4 и 1:6, соответственно. Полученные в результате эксперимента интегральные значения электрической и тепловой энергии, отданной потребителю, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Интегральные значения электрической и тепловой энергии, отданной потребителю

Потребитель	Интервал времени, ч	Электроэнергия, кВтч			Тепло, кВтч	Газ, нм ³
		ГПУ	Сеть	Сумма		
Коммунальный	6	283,75	43,3	327,05	726,8	127,3
	24 (сутки)	1135	173,2	1308,2	2907,2	509,2
Промышленный	4	221	65,9	286,9	300,9	106,2
	24 (сутки)	1330	395	1725	1805,4	637,2

Экспериментально полученные и расчетные суточные затраты на энергоснабжение потребителей для автономной схемы представлены в табл. 3. Также в таблице приведены затраты, рассчитанные при централизованном энергоснабжении, в качестве базового варианта для сравнения.

Сравнение суточных затрат на энергоснабжение, руб.

Потребитель	Централизованное энергоснабжение			АЭК оптимальный режим	
	Электроэнергия	Тепло	Сумма	Эксперимент	Расчет
Коммунальный	4095,6	3314,2	7409,8	3290,2	2955,0
Промышленный	5643	2058,2	7701,2	3521,5	3120,1

Согласно полученным результатам, автономное энергоснабжение экономически эффективнее централизованного более чем в два раза. Расхождения в значениях критерия оптимизации, полученных расчетным путем и по результатам эксперимента, не превышают 4 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

Выводы

1. Выполнен анализ роли распределенной генерации в структуре российской энергетики и тенденций развития распределенной энергетики. Обоснована необходимость разработки современных методов моделирования и оптимизации энергетических комплексов для решения задачи минимизации затрат на энергоснабжение потребителя энергии.

2. Проведен анализ методов оптимизации энергетических комплексов малой распределенной энергетики, имеющих в своем составе как традиционные энергогенерирующие установки, так и установки на возобновляемых источниках энергии, накопители электрической и тепловой энергии, и определены целевые критерии выбора схем и режимов работы комплексов.

3. Разработаны обобщенная математическая модель и метод оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов малой распределенной энергетики на основе симплексного алгоритма. Метод позволяет моделировать работу энергетического комплекса с произвольным составом генерирующего и аккумулирующего оборудования и определять оптимальную конфигурацию комплекса и оптимальные режимные карты работы входящего в него оборудования.

4. На основе технологии искусственных нейронных сетей разработан алгоритм краткосрочного прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей, позволяющий прогнозировать графики нагрузок в условиях ограниченности исходной информации о потребителе энергии, при которых традиционные методы прогнозирования неприменимы.

5. Разработана зонная модель вертикального бака-аккумулятора тепловой энергии. Методика расчета на основе простой зонной модели позволяет вполне адекватно описать динамику процессов зарядки/разрядки бака-аккумулятора и может быть использована для инженерных расчетов и при разработке моделей и алгоритмов оптимизации энергетических комплексов малой энергетики и интеллектуальных систем управления подобными комплексами.

6. Для верификации разработанных моделей и программ проведены экспериментальные исследования стендовой модели энергетического комплекса с возможностью импорта электроэнергии из сети в составе газопоршневой мини-ТЭЦ мощностью 180 кВт и аккумулятора тепловой энергии. Результаты расчетов показали удовлетворительное согласие с результатами испытаний.

7. Предлагаемая методика может быть в дальнейшем усовершенствована путем увеличения количества типов установок, которые могут быть включены в состав энергетического комплекса. Посредством введения дополнительных ограничений в систему уравнений, описывающих работу энергетического комплекса, может быть учтено производство энергетическим комплексом других видов продукции помимо тепловой и электрической энергии. Это позволит проводить оптимизационные расчеты для тригенерационных систем и энерготехнологических комплексов.

Список публикаций по теме диссертации

1. Директор Л.Б., Майков И.Л., Иванин О.А. Задача оптимизации автономных энергетических комплексов в составе локальных распределительных сетей // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. №4. С. 33-41. ISSN 0235-3482.

2. Директор Л.Б., Иванин О.А., Майков И.Л. Динамическая модель накопителя тепловой энергии // Тепловые процессы в технике. 2013. №3. С. 113-118. ISSN 2074-2649.

3. Директор Л.Б., Зайченко В.М., Майков И.Л., Иванин О.А. Анализ схем энергетических комплексов малой распределенной энергетики // Промышленная энергетика. 2014. №2. С. 41-46.

4. Директор Л.Б., Иванин О.А. Об использовании электродвигателей в энергетических комплексах малой энергетики // Промышленная энергетика. 2014. №12. С. 23-27.

5. Ivanin O.A., Director L.B. The solution of the optimization problem of small energy complexes using linear programming methods // Journal of Physics: Conference Series, volume 774, 2016. Doi: 10.1088/1742-6596/774/1/012046.

6. Ivanin O.A. Simulation of short-term electric load using an artificial neural network J. Phys.: Conf. Ser. 946 012038, 2018. Doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012038.

7. O.A. Ivanin, L.B. Director. The Use of Artificial Neural Networks for Forecasting the Electric Demand of Stand-Alone Consumers. Thermal Engineering. 2018, Vol. 65, No. 5, pp. 258–265. Doi: 10.1134/S004060151805004X.

8. Директор Л.Б., Иванин О.А., Майков И.Л. «Программа преобразования, обработки и визуализации режимных параметров автономных энергетических комплексов в режиме реального времени». Свидетельства о государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации №2012616045 от 2 июля 2012 г.

9. Иванин О.А. «Программа моделирования графиков электрических нагрузок обособленных потребителей». Свидетельство о государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации №2018611313 от 1 февраля 2018 г.

Иванин Олег Александрович

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2