

**УТВЕРЖДАЮ**



Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО КГЭУ

Шамсутдинов Э.В.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации

на диссертационную работу Иванина Олега Александровича  
«Оптимизация энергетических комплексов малой распределенной  
энергетики», представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и  
комплексы

### **Актуальность темы диссертации**

Тема диссертации является актуальной, потому что подход к энергоснабжению потребителей, основанный на создании оптимальных энергокомплексов с использованием разнородного оборудования, требует синхронизации режимов работы энергоисточников с текущими нагрузками потребителей, а большое разнообразие вариантов схем и способов, применяемых для автономного производства энергии, усложняет выбор оптимального варианта энергоснабжения.

В создании оптимальных энергокомплексов малой распределенной энергетики в основном заинтересованы коммерческие и некоммерческие структуры, у которых нет технической возможности для подключения к большим энергосистемам, а также государство, которому при таком подходе легче осуществлять надзорные функции.

### **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.

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи, определены научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен литературный обзор по теме исследования, в котором рассмотрены состояние и перспективы развития российской



энергетики и определены пути для дальнейшей работы в выбранном направлении. Дано определение энергокомплекса малой распределенной энергетики, как группы энергоустановок под единым автоматизированным управлением, предназначенных для энергоснабжения одного или компактно расположенной группы потребителей. Выделены особенности состава оборудования энергокомплексов малой энергетики: 1) использование установок на углеводородном топливе в качестве основных; 2) совместная работа установок на углеводородном топливе с установками на возобновляемых источниках энергии; 3) применение аккумуляторов тепловой и электрической энергии для сглаживания пиков и провалов нагрузки. Рассмотрены плюсы и минусы оборудования, включаемого в состав энергокомплексов малой энергетики. Отмечено, что для согласованной работы различных по принципу действия установок необходимо внедрять современные автоматизированные системы контроля и управления производством энергии на основе интеллектуальных сетей (smart grid). Вопрос оптимизации энергокомплексов малой распределенной энергетики представлен как поиск максимально эффективного способа организации энергоснабжения потребителей в заданных условиях. Для достижения поставленной цели предложено поэтапно оптимизировать схему энергокомплекса и режимные карты оборудования методами многопараметрической оптимизации. Также в первой главе выполнен литературный обзор по проблеме поиска оптимальных схем энергокомплексов, на основе которого сформулированы цель и задачи исследования, а также – требования к разрабатываемой методике оптимизации энергокомплексов: 1) используется математическая модель энергокомплекса произвольного состава; 2) поиск оптимального состава оборудования основывается на реализации метода математического программирования; 3) методика включает алгоритм моделирования графиков характерных нагрузок потребителей; 4) практическая реализация осуществляется в виде компьютерной программы.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы математического моделирования и выполнена разработка методики оптимизации энергокомплексов малой распределенной энергетики на основе симплекс-метода с формализацией поставленной задачи и оптимизацией по величине затрат на энергоснабжение. В основу математической модели энергокомплекса произвольного состава положены уравнения энергетического баланса потоков тепловой и электрической энергии. Для определения текущего режима работы оборудования (производительности и расхода топлива в любой момент времени) использован коэффициент загрузки, определяемый относительно номинальной



производительности. В качестве параметров оптимизации выбраны коэффициент загрузки для определения эксплуатационных затрат и номинальная производительность для определения капитальных затрат. В качестве временного интервала исследования принят 1 год с минимальным шагом измерений в 1 час. Задача оптимизации решена с применением симплекс-метода. В качестве целевой функции использован минимум критерия оптимизации в виде минимума затрат, включающий в себя параметры, определяющие режим работы оборудования и параметры, определяющие оптимальную установленную мощность или емкость оборудования. Установки в зависимости от оптимизируемых параметров поделены на три типа: 1) оптимизируемые по режиму работы (газопоршневые и газотурбинные установки, дизель-генераторы); 2) оптимизируемые по режиму работы и номинальной мощности или емкости (электрические и газовые котлы, аккумуляторы); 3) оптимизируемые по номинальной мощности (возобновляемые источники энергии). Характеристики установок с переменным значением коэффициента полезного действия (газопоршневые и газотурбинные установки, дизель-генераторы) для возможности их оптимизации с применением симплекс-метода приводятся к линейному виду (сначала аппроксимируются гиперболической функцией, а затем линейной). Программа, с помощью которой реализуется предлагаемый алгоритм оптимизации, написана в среде программирования Delphi. Согласно алгоритму программы, после ее запуска происходит загрузка данных о потребителе, тарифах и доступном оборудовании (формируются целевая функция, симплекс-таблицы, опорные базисные решения). Затем реализуется итеративный вычислительный цикл с перебором вариантов до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение по конфигурации и режиму работы энергокомплекса. Полученные результаты выводятся в отдельные файлы в виде режимной карты загрузки оборудования энергокомплекса и в текстовой форме. Для тестирования разработанной методики проведен расчет оптимальной конфигурации и оптимального режима работы энергокомплекса системы автономного энергоснабжения жилого здания. Для выбранного здания составлены характерные графики энергопотребления. График отопительной нагрузки построен с учетом климатических условий и строительных характеристик здания. Графики электрической нагрузки и нагрузки горячего водоснабжения построены на основе литературных данных по характерным графикам относительных нагрузок для жилых зданий с учетом количества жильцов. Энергоснабжение здания в тестовом варианте принято автономным без подключения к внешним сетям. В качестве энергоносителя использован природный газ с ценой 5,2 руб./ $\text{м}^3$ . Для оценки возможности использования



возобновляемых источников энергии взяты метеоданные, предоставленные лабораторией возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН. Определены установки, которые могут быть включены в состав энергетического комплекса: газопоршневая когенерационная установка (КГУ), состоящая из газопоршневой электростанции на базе двигателя ЯМЗ-240 и когенерационной надстройки, газовый водогрейный котел (ВК), электрокотел (ЭК), фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), свинцово-кислотная аккумуляторная батарея (АКБ) и тепловой аккумулятор (ТА). В результате тестовой реализации программы по разработанному алгоритму было определено требуемое количество топлива и денег на энергоснабжение жилого здания в течении года. В результате оптимизационного расчета из рассмотрения был исключен электрокотел и определены: площадь ФЭП, емкости АКБ и ТА, оптимальная номинальная мощность ВК. Построены оптимальные режимные рабочие карты оборудования для характерных суточных графиков потребления. Проведенный анализ результатов позволил определить структуру энергоснабжения, в соответствии с которой возобновляемые источники энергии в виде ФЭП генерируют 11% электроэнергии (в основном расходуется на зарядку АКБ (7%)), а когенерационная установка закрывает оставшуюся часть (89%). По тепловой энергии основную часть генерирует водогрейный котел (60%), а остаток покрывают когенерационная установка (34%) и ТА (6%). Предложенный метод оптимизации схемных решений и режимов работы использован для моделирования энергоснабжения характерного потребителя малой распределенной энергетики при выполнении НИР по соглашению с Минобрнауки №14.607.21.0157 от 03 октября 2016 г. В качестве характерного потребителя выбран поселок Жиганск (3451 жителей с промышленными предприятиями). В качестве расчетного периода – 2013 год. В качестве основного энергогенерирующего оборудования – ГТУ-2,5П и водогрейный котел. В качестве характерных для данной местности выбраны 4 дня со значениями температур, близкими к средним сезонным значениям. С учетом суточных изменений температуры и данных энергопотребления построены характерные суточные графики потребления электроэнергии и теплоты. Для оценки эффективности предлагаемой схемы энергоснабжения проведены расчеты в режиме электростанции (ГТУ) и в режиме мини-ТЭЦ (КГУ). При этом учитывалась возможность работы энергокомплекса совместно с внешней электросетью и без нее. Тариф на газ принят равным 3,43 руб./м<sup>3</sup>, на электроснабжение – 2,42/1,53 руб./кВт·ч (двухставочный тариф день/ночь). Рассматривались следующие варианты: КГУ+ВК+эл.сеть, КГУ+ВК, ГТУ+ВК+эл.сеть, ГТУ+ВК. Годовые затраты для энергоснабжения п. Жиганск согласно расчетам по программе находятся в диапазоне от 325616



руб. до 500850 руб. Наиболее экономичный вариант соответствует варианту: КГУ+ВК+Эл.сеть (комбинированная выработка совместно с внешней электросетью), наименее экономичный – ГТУ+ВК (раздельная выработка). Для характерных суточных графиков составлены режимные карты энергокомплекса п. Жиганск с оптимальным режимом работы установленного оборудования.

Предложены подходы к решению проблемы высокой размерности оптимизационной задачи на основе метода декомпозиции. Рассмотрены три способа декомпозиции (архитектурный, алгоритмический и модельный) и определены границы их применимости для разнородного оборудования энергокомплексов малой распределенной энергетики.

**В третьей главе** выполнено моделирование графиков электрических нагрузок коммунальных потребителей на основе метода искусственных нейронных сетей (ИНС). В работе использована ИНС прямого распространения с одним скрытым слоем и нейронами с линейными функциями активации, что позволило упростить организацию нейронной сети и процесс ее обучения.

Рассмотрены четыре основных подхода к моделированию графиков нагрузок и границы их применимости: 1) построение графика на основании информации о режиме работы потребителя; 2) использование типового графика; 3) аппроксимация и 4) применение искусственной нейронной сети. Сделан вывод о том, что ИНС в условиях недостаточности исходной информации позволяет более точно смоделировать графики нагрузок, так как позволяет учесть любые параметры, влияющие на режим электропотребления. В ИНС каждый нейрон скрытого слоя является вычислительным блоком, а выбор входных параметров и набор типовых задач с правильными решениями определяет результат.

Определены этапы краткосрочного прогнозирования электрических нагрузок с использованием ИНС: 1) выявление параметров, влияющих на электрическую нагрузку; 2) выбор архитектуры ИНС; 3) формирование обучающей и контрольной выборки для ИНС на базе реальных графиков нагрузок; 4) обучение ИНС; 5) моделирование графика электрических нагрузок по входным данным контрольной выборки; 6) сравнение результатов моделирования с выходными данными контрольной выборки и оценка точности метода. Для тестирования метода с ИНС обработано значительное количество данных, полученных путем прямого замера на реальных объектах по двум группам коммунальных потребителей: 1) отдельные жилые дома и 2) малые населенные пункты. При выборе входных сигналов для ИНС учитывалась доступность исходной информации. Для малых населенных пунктов выбраны следующие входные сигналы: 1)



численность населения; 2) температура наружного воздуха; 3) наличие промышленных предприятий; 4) характерный период суток; 5) уровень естественного освещения. Для отдельных жилых домов: 1) тип дня; 2) сезон; 3) тип здания; 4) характерный период суток; 5) наличие электроплит. Графики нагрузок для обучающей и контрольной выборок были взяты из литературных источников по сезонам (зима, лето, осень-весна). Для малых населенных пунктов обучающая выборка сформирована на основании данных предоставленных лабораторией возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН (26 суточных графиков электрических нагрузок использовались для обучения и четыре графика в качестве контрольной выборки). Начальный синаптический вес до начала обучения выбран из условия соответствия относительной нагрузки населенного пункта с населением в 1000 человек и одним промышленным предприятием 50% при нахождении солнца в зените. Для прогнозирования электропотребления жилых зданий было отобрано 16 суточных графиков для обучения и 2 графика в качестве контрольной выборки. Начальный синоптический вес до начала обучения соответствовал 50% относительной нагрузки для жилого многоквартирного дома с электроплитами в осенний период в утренние часы. Метод с ИНС использовался для построения графиков относительной электрической нагрузки. Для обучения использовался алгоритм обратного распространения ошибки. Ограниченность обучающей выборки компенсирована повтором цикла обучения до достижения заданного уровня среднеквадратичного изменения весов нейронов за цикл (ниже 3% за 12 циклов). Метод прогнозирования электрических нагрузок с ИНС был реализован в виде программы в среде программирования Delphi. По исходным данным контрольной выборки для малых населенных пунктов было смоделировано 4 графика нагрузок. По исходным данным контрольной выборки для отдельных жилых домов – 2 графика. Наибольшее среднеквадратичное отклонение среди малых населенных пунктов наблюдается у поселка Угоян в зимний период ( $0,354=35,4\%$ ), среди отдельных жилых домов – у частного дома в зимний период ( $0,135=13,5\%$ ). Смоделированные графики относительных электрических нагрузок рассмотренных потребителей удовлетворительно коррелируются с контрольной выборкой за исключением смоделированного графика нагрузок для поселка Угоян в зимний период, график контрольной выборки для которого характеризуется значительной неравномерностью потребления электроэнергии в течении суток (не характерный случай). Параметр в исходных данных, учитывающий типовые графики загрузки промышленных предприятий, вероятно, мог бы решить эту проблему, но автор отмечает, что чем больше параметров, тем сложнее сформировать обучающую выборку. Для отдельных жилых зданий таких



отклонений не наблюдается. Для определения границ, в рамках которых может быть использован метод с ИНС, автор предлагает учитывать зависимость случайной величины электрической нагрузки от количества жителей в населенном пункте, что позволит получить более достоверный результат. Адекватность синаптических весов нейронных связей зависит от качественных и количественных характеристик обучающей выборки. Автор считает, что примененный им метод прогнозирования нагрузок с использованием ИНС подходит для подготовки данных при решении задач по оптимизации энергокомплексов малой распределенной энергетики. В дальнейшем точность прогнозирования при использовании метода с ИНС может быть повышена: расширением обучающей выборки, оптимизацией количества входных сигналов, изменением структуры нейронной сети.

**В четвертой главе** выполнены экспериментальные исследования на стендовой модели энергетического комплекса. При проведении оптимизации состава оборудования и режимов работы энергокомплексов малой распределенной энергетики необходимо предварительно составить математические описания оборудования. Математические описания составляют на основе данных предоставляемых заводами-изготовителями и результатов экспериментов (испытаний) в случае использования нетипового оборудования. Эксперименты (испытания) на реальном объекте позволяют проверить степень соответствия математических описаний и оценить погрешность моделирования. Эксперименты (испытания) проведены на стендовой модели автономного энергетического комплекса (АЭК ОИВТ РАН). Испытательный стенд АЭК ОИВТ РАН, оборудованный системами измерений, диагностики, управления и синхронизации, состоит из газопоршневой когенерационной установки АГ-200 (мини-ТЭЦ на базе двигателя ЯМЗ-240), газопоршневой когенерационной установки АГ-315 (мини-ТЭЦ на базе двигателя АД-315), бака-аккумулятора тепла (CAS, V=1000 л,  $\Delta t=20$  °C,  $\Delta Q=0,02$  Гкал), имитаторов электрической (электрокалориферы СФО-99, 9×33кВт) и тепловой (калорифер SKG 0963, 438 кВт) нагрузки и имеет подключение к внешней электросети. В качестве первого объекта исследования рассмотрена мини-ТЭЦ на базе ЯМЗ-240, для которой проведены балансовые испытания в диапазоне изменения электрической мощности от 36,6 до 168,5 кВт, тепловой – от 123 до 274,9 кВт и построены энергетические характеристики эффективности мини-ТЭЦ в зависимости от расхода газа. В качестве второго объекта исследования рассмотрен вертикальный жидкостный тепловой аккумулятор. Проверена пригодность разработанной одномерной зонной модели для определения характеристик вертикального осесимметричного бака-аккумулятора теплоты с обязательным уточнением количества зон разбиения для зарядки и



разрядки при помощи двумерной динамической модели д.ф.-м.н. Майкова И.Л. При проведении экспериментов бак-аккумулятор теплоты сначала заряжался при работающей ГПУ, а затем разряжался, но уже при остановленной ГПУ. Полученные экспериментальные результаты показали хорошую согласованность с результатами моделирования по двумерной динамической модели. Сравнение результатов расчетов по двумерной динамической и одномерной зонной моделям выявили необходимость предварительного уточняющего расчета динамических температурных кривых по двумерной динамической модели и определения количества зон разбиения бака-аккумулятора теплоты в режимах заряда/разряда для использования в одномерной зонной модели.

Заключительная проверка разработанных моделей и программ, предназначенных для оптимизации состава оборудования и режимов работы энергетических комплексов выполнена на испытательном стенде АЭК ОИВТ РАН. Получены результаты моделирования энергоснабжения по тарифам 2012 года в рамках двух экспериментов, продолжительностью 6 и 4 ч с временным масштабированием для приведения к суткам и использованием оптимизированных для промышленных и коммунальных потребителей режимных карт. Все расходы отнесены к электрической энергии и определены, как совокупность топливных затрат и затрат, не зависящих от режима работы оборудования (амортизационных и условно постоянных эксплуатационных). В результате расчетов была определена себестоимость электроэнергии, равная 1,76 руб./кВт·ч (на топливо – 1,41 руб./кВт·ч, остальные затраты -0,35 руб./кВт·ч). При сравнении полученных результатов с централизованным теплоснабжением суточные затраты на автономное теплоснабжение на базе энергетического комплекса АЭК оказались ниже (почти в два раза). При сравнении оптимальных затрат, полученных путем расчетного моделирования и по результатам эксперимента, расхождение составило менее 4%, что указывает на адекватность реализованной в программе математической модели.

### **3. Степень новизны результатов**

Новыми являются: метод, алгоритм и программа оптимизации схем и режимов работы энергокомплексов малой распределенной энергетики на основе симплекс метода; алгоритм и программа краткосрочного прогнозирования графиков электрических нагрузок малых населенных пунктов и отдельных жилых зданий на основе нейронных сетей в условиях дефицита исходной информации; алгоритм построения рабочих характеристик бака-аккумулятора с использованием одномерной зонной модели; результаты проверки адекватности разработанных моделей и программ на экспериментальном стенде.



#### **4. Практическая значимость результатов**

Разработанные алгоритмы и программы использованы и могут использоваться: для оптимизации состава оборудования энергокомплексов малой распределенной энергетики; составлении краткосрочных прогнозов электропотребления малых населенных пунктов и отдельных жилых зданий; составления характеристик работы баков-аккумуляторов теплоты; при выполнении научно-исследовательских работ по созданию энергокомплексов, в процессе подготовки студентов и аспирантов технических вузов.

#### **5. Достоверность и обоснованность результатов**

Подтверждаются применением современных методов исследования, оборудования и средств измерения, положительными результатами практической апробации и реализации разработанных алгоритмов и программ, актом о внедрении результатов диссертации, верификацией путем сопоставления результатов моделирования с данными эксперимента.

#### **6. Соответствие полученных результатов паспорту специальности**

Результаты соответствуют паспорту специальности по части формулы: разработаны новые методы исследования и оценки качества энергетических систем и комплексов с целью повышения их экономичности.

Результаты соответствуют паспорту специальности по части области исследований: п.2. Исследование и разработка нетрадиционных источников энергии и новых технологий преобразования энергии в энергетических системах и комплексах; п.3. Использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов, и происходящих в системах энергетических процессов; п.6. Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.

#### **7. Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты могут быть использованы для подбора оптимального состава разнородного оборудования при проектировании и эксплуатации энергокомплексов малой распределенной энергетики, в научно-исследовательских работах по созданию энергокомплексов малой распределенной энергетики, в обучении бакалавров и магистров по направлениям «Теплоэнергетика» и «Электроэнергетика». Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в ОИВТ РАН, в ООО «ЭНЕРГО-ЮГ» «Ростовтеплоэлектропроект» и других проектных



организациях, в ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет МЭИ.

## **8. Основные замечания**

1. В каждой главе диссертации решаются частные задачи с разными исходными данными и составом оборудования, реализующие единую поставленную задачу, но не связанные между собой общей моделью, что затрудняет восприятие материала.

2. В тексте диссертации не полностью раскрыта информация об алгоритме, использующем симплекс-метод. В частности, не приведены примеры заполнения таблиц с исходными данными и пошаговый алгоритм работы вычислительного блока применительно к решаемой задаче.

3. Использование искусственных нейронных сетей с ограниченным по составу набором входных данных для построения относительных графиков электрических нагрузок сужает область применения разработанной программы до прогнозирования поведения потребителей с характерными графиками нагрузок.

4. В приближенной методике расчета технико-экономических показателей, приведенной в диссертации, расход топлива определяется расходом природного газа, что не позволяет выполнить анализ энергокомплексов с мини-ТЭЦ на базе дизельных двигателей.

5. Недостаточно раскрыта связь испытаний бака-аккумулятора тепла с основной тематикой диссертационной работы.

## **9. Заключение**

Указанные замечания не снижают практической и теоретической значимости диссертации. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для вновь создаваемых энергетических комплексов малой распределенной энергетики, и изложены новые научно обоснованные решения и разработки, имеющие существенное значение для их развития в масштабах страны. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Диссертация содержит новые научные результаты и положения, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных научных результатов и рекомендации по использованию сделанных научных выводов. Основные научные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Диссертация удовлетворяет требованиям п.п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской



Федерации от 24.09.2013 года, № 842 в редакции от 28.08.2017), а ее автор Иванин Олег Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы».

Отзыв составлен доцентом кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» кандидатом технических наук Валиевым Радиком Нурттиновичем и заведующим кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» доктором технических наук профессором Ваньковым Юрием Витальевичем.

Диссертация, автореферат и отзыв ведущей организации рассмотрены и обсуждены на совместном заседании кафедр «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», «Тепловые электрические станции» и «Экономика и организация производства». Протокол №1 от 31.08.2018.

Доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

кандидат технических наук  
Валиев Радик Нурттинович

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

доктор технических наук, профессор  
Ваньков Юрий Витальевич

Ученый секретарь КГЭУ

д.т.н.  
420066 г. Казань ул. Красносельская, 51  
+7 (843) 519-42-17, belvira6@list.ru

Зверева Э.Р.

Адрес ведущей организации: 420066 г. Казань ул. Красносельская, 51  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Тел.: (843) 519-42-02

E-mail: kgeu@kgeu.ru



*Валиев Р.Н.; Ваньков Ю.В.; Зверевой Э.Р.  
Ступаев А.А.*