

На правах рукописи



БУГАЕВА ТАТЬЯНА МИХАЙЛОВНА

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МЕГАПОЛИСА**

Специальность 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством
(экономика, организация и управление предприятиями,
отраслями, комплексами: промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:	доктор экономических наук, доцент Викторова Наталья Геннадьевна
Официальные оппоненты:	Домников Алексей Юрьевич доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Банковский и инвестиционный менеджмент», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» Чекмарев Сергей Юрьевич кандидат экономических наук, заведующий кафедрой «Экономика и организация управления в энергетике», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Защита состоится «29» декабря 2020 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.056.02 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 3-ий уч. корпус, ауд. 506.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке СПбПУ и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» <http://www.spbstu.ru>, в библиотеке ИТМО и на сайте ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» <http://www.ifmo.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор экономических наук, доцент

 О.В. Калинина

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В России, по данным Федеральной службы государственной статистики, на начало 2020 г. проживает 146,7 млн. чел., 74,7% из них — в городах, причем треть жителей сосредоточена в пятнадцати крупнейших городах с населением более 1 млн. чел. (мегаполисах) в связи с чем, проблемам развития крупных городов уделяется все большее внимание, а органам управления во все большей степени приходится иметь дело с новыми формами и методами работы.

Особую роль в городской инфраструктуре играет система энергоснабжения, именно в жизнедеятельности мегаполисов наиболее полно проявляются проблемы и специфика функционирования и развития этой системы. Так, для современного энергетического комплекса мегаполиса (ЭКМ) характерны постоянные динамичные изменения объемов и структуры потребления электрической и тепловой энергии как по городу в целом, так и в его структурных единицах вследствие:

- роста энергонасыщенности жилищного строительства;
- выноса промышленных предприятий из центральных районов в приграничные районы;
- развития инфраструктуры услуг, мелкого предпринимательства;
- появления новых районов крупномасштабной жилищной застройки, рекреационных зон, в том числе на смежных территориях других субъектов РФ;
- развития объектов транспортной инфраструктуры;
- реализации мероприятий по энергосбережению;
- развития малой энергетики.

Функционирование отдельных субъектов энергетического комплекса в рыночных условиях без скоординированного централизованного управления неизбежно ведет к повышению цен на продукцию и услуги для потребителей на территории мегаполиса. К механизмам управления развитием ЭКМ, реализуемым органами власти мегаполиса, относятся: 1) разработка схем и программ перспективного развития энергетических отраслей; 2) координация и согласование перспективных инвестиционных программ субъектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

На практике существуют серьезные проблемы с реализацией этих механизмов. Разработка отраслевых схем ведется разрозненно с использованием разноуровневой исходной информации о динамике энергопотребления, о реконструкции и развитии объектов электро-, теплогенерации и сетевых объектов. Принципиально не определены критерии и не ставится задача поиска оптимума развития энергетического комплекса в целом в границах мегаполиса.

Интересы участников энергетического комплекса мегаполиса разнонаправлены. Органы власти мегаполиса, как представители интересов городского сообщества, решают задачи обеспечения надежности и ценовой доступности снабжения энергетическими ресурсами всех групп потребителей. В тоже время город, как владелец активов, решает задачи их эффективного использования. Менеджмент организаций энергетического комплекса

заинтересован в увеличении финансовых потоков от операционной и инвестиционной деятельности предприятий. Акционеры ставят задачу увеличения прибыли и роста дивидендов. Потребители активно решают задачу энергосбережения для сокращения собственных расходов.

Разработка документов энергетического планирования, программ и проектов развития энергетического комплекса мегаполиса, обоснование и принятие решений по составу, объему и стоимости мероприятий требуют оценки и учета внутриотраслевых и межотраслевых связей в форме потоков энергетических ресурсов для каждой из составных частей комплекса, а также тенденций социально-экономического развития мегаполиса, особенности его пространственной структуры.

В связи с вышесказанным представляется актуальной разработка методов и моделей планирования развития энергетического комплекса мегаполиса, позволяющих гармонизировать интересы участников комплекса, систематизировать механизмы управления развитием с учетом сложности взаимосвязей всех элементов энергетической системы, а также социально-экономических особенностей мегаполиса.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической и методологической основой исследования послужили труды ученых в области технико-экономического обоснования решений в энергетике. Вопросы определения экономической эффективности в энергетике и методы оптимизации развития энергетических систем тщательно проработаны в трудах ученых: Д.А. Арзамасцева, В.В. Болотова, Н.И. Воропая, И.М. Волькенау, А.И. Кузовкина, А.В. Липеса, Л.А. Мелентьева, А.Л. Мызина, А.С. Некрасова, В.Р. Огорокова, Л.Д. Хабачева, Л.С. Попырина, Б.Г. Санеева, А.Ю. Домникова, В.А. Стенникова, К.В. Суслова и др. Задачи оптимизации систем теплоснабжения рассматривались в трудах Л.Л. Гинтера, Н.М. Якуба, В.В. Дмитриева, Л.С. Хрилева. Моделирование сложных производственных систем исследуется в работах Б.И. Кузина, В.В. Глухова, В.И. Скурихина, В.В. Кобзева, В.М. Макарова, А.С. Соколицына. Вопросам формирования энергетической политики региона посвящены работы О.Э. Кичигина, Д.Г. Родионова, М.А. Любарской, А.В. Бабкина, С.Б. Сулоевой. Проблемам функционирования и развития энергетической системы мегаполиса в современных условиях посвящены работы В.В. Бушуева, П.А. Ливинского, В.К. Аверьянова, С.Ю. Чекмарева, Ю.В. Юферева, В.Л. Василенка, С.С. Белобородова.

Проекция опыта исследования и моделирования энергетических систем на проблему планирования развития энергетического комплекса крупного города (мегаполиса) показала необходимость совершенствования методического, инструментального и информационного обеспечения анализа и принятия решений по выбору варианта развития системы энергоснабжения мегаполиса.

Целью диссертационного исследования является разработка совокупности положений по планированию развития энергетического комплекса мегаполиса, включающих методическое, инструментальное и информационное

обеспечение принятия решений по развитию систем электро- и теплоснабжения мегаполиса в едином комплексе.

Для достижения цели диссертационного исследования были поставлены следующие **задачи**:

1. Дать характеристику сущностных черт ЭКМ; выявить условия и факторы, определяющие развитие ЭКМ в увязке с направлениями технологического развития энергетики, тенденциями развития мегаполиса и функционированием энергетического рынка.

2. Проанализировать и обобщить существующие научные подходы к моделированию городских энергетических систем.

3. Сформулировать принципы и требования к информационно-аналитическому обеспечению обоснования плановых решений по развитию ЭКМ.

4. Предложить методический подход к решению задачи многоцелевой оптимизации развития систем электро- и теплоснабжения в составе ЭКМ.

5. Разработать методику технико-экономического обоснования и поиска оптимального варианта плановых решений по скоординированному развитию ЭКМ.

Объектом исследования выступает энергетический комплекс мегаполиса.

Предмет исследования — экономико-управленческие отношения, возникающие в процессе планирования и координации развития энергетического комплекса мегаполиса.

Теоретической и методологической основой работы являются труды отечественных и зарубежных авторов по обоснованию перспективных решений в энергетике с использованием специальных методов и моделей, государственные программы по вопросам функционирования и развития энергетического комплекса, системный подход к моделированию будущего состояния энергетического комплекса мегаполиса. В работе использованы как общенаучные методы, так и методы экономико-математического моделирования: имитационное моделирование, математическое программирование, информационный анализ.

Информационную базу исследования составили нормативно-правовые акты г. Санкт-Петербурга и РФ в области функционирования и развития энергетики; статистические данные Федеральной службы государственной статистики; публикации в российских и зарубежных периодических изданиях по перспективам развития энергетики мегаполиса; данные Комитета по энергетике и инженерному обеспечению г. Санкт-Петербурга; обзорная научно-техническая информация в части использования традиционных и нетрадиционных энергетических технологий.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в совершенствовании методов планирования и обоснования развития энергетического комплекса мегаполиса на основе разработанных экономико-математических моделей, учитывающих системный характер проблемы,

специфику объекта исследования и современные тенденции развития энергетики.

Наиболее существенные результаты исследования, обладающие научной новизной и полученные лично соискателем:

1. Дана характеристика сущностных черт ЭКМ; уточнено понятие «энергетический комплекс мегаполиса»; выявлены и обоснованы условия и факторы, определяющие развитие ЭКМ в увязке с тенденциями технологического развития энергетики, особенностями формирования территории мегаполиса и функционированием энергетического рынка.

2. Предложена классификация существующих научных подходов к моделированию городских энергетических систем, выделены их основные характеристики; показаны ограничения известных моделей и программных комплексов, используемых для планирования развития ЭКМ, определены направления их совершенствования.

3. Сформулированы принципы и требования к информационно-аналитическому обеспечению обоснования плановых решений по развитию ЭКМ, которые заключаются в комплексном рассмотрении ресурсов, технологий и потребностей, определении решений на основе компромисса общесистемных показателей эффективности, учете особенностей функционирования и связи систем электро- и теплоснабжения в составе ЭКМ во взаимодействии с федеральным оптовым рынком электроэнергии и мощности, а также региональным рынком тепла, учете объективных тенденций технологического развития.

4. На основе определения структуры, свойств, взаимосвязей подсистем и элементов, критериев оптимальности развития ЭКМ предложен методический подход к решению задачи многоцелевой оптимизации развития систем энергоснабжения мегаполиса, который заключается в декомпозиции исходной проблемы на взаимосвязанные нелинейную мастер-задачу и линейную подзадачу. При этом для решения мастер-задачи используется генетический алгоритм, для решения подзадачи – смешанно-целочисленное линейное программирование. Сформированы концептуальная и математическая постановка задачи на двух уровнях, выполнена апробация алгоритмов на конкретных примерах ЭКМ, доказывающая осуществимость предложенного авторского подхода.

5. Разработана методика технико-экономического обоснования плановых решений по скоординированному развитию систем энергоснабжения мегаполиса, позволяющая проводить структурирование исходных данных, оценку перспективных объемов и пространственного распределения электрической и тепловой нагрузки, поиск оптимальной структуры генерирующих мощностей и схемы электрической и тепловой сети, а также оптимизацию совместных режимов работы ТЭЦ и котельных на территории мегаполиса с учетом многоцелевого характера поставленной задачи, экономических, технических и экологических ограничений, современных условий функционирования и развития энергетических рынков. Универсальная

постановка задачи, использование оптимизационных и имитационных моделей позволяет проводить исследования для городских энергетических систем в конкретных условиях с учетом разнонаправленных интересов участников ЭКМ.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке оригинального подхода к планированию развития ЭКМ мегаполиса, базирующегося на методах эвристики и на имитационном моделировании и позволяющего наиболее точно учесть внутренние взаимосвязи, закономерности и условия функционирования ЭКМ в социально-экономическом пространстве крупнейшего города.

Практическая значимость исследования состоит в разработке конкретных рекомендаций по повышению эффективности работы энергетического комплекса мегаполиса в целях устойчивого развития такой технико-экономической системы. Разработанные методики и модели могут быть использованы при формировании документов стратегического планирования энергетического комплекса мегаполиса, а также иных городов, не подпадающих под статус мегаполиса. Проведена апробация предложенной методики.

Материалы диссертационного исследования используются в рамках курса «Технико-экономическое планирование развития энергосистем» для подготовки студентов-бакалавров по профилю «Экономика энергетики» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Область исследования. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с паспортом специальности 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами: промышленность), в части пунктов:

1.1.1. Разработка новых и адаптация существующих методов, механизмов и инструментов функционирования экономики, организации и управления хозяйственными образованиями в промышленности.

1.1.19. Методологические и методические подходы к решению проблем в области экономики, организации управления отраслями и предприятиями топливно-энергетического комплекса.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и обоснованность научных результатов обусловлены использованием общенаучных и специальных методов исследования, положительной оценкой на научно – практических конференциях.

Основные результаты диссертации были представлены на международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях: Эффективная энергетика – 2014, Эффективная энергетика – 2015, Reliability, infocom technologies and optimization (trends and future directions) – 2017, Экономика энергетики и энергосбережение – 2018, Digital transformation on manufacturing, infrastructure and service (DTMIS – 2018), Неделя науки СПбПУ – 2019, Современные технологии и экономика в энергетике (МТЭЕ – 2019), Современные технологии и экономика в энергетике (МТЭЕ – 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ общим объемом 13,6 п.л. (в т.ч. лично автором – 7,7 п.л.), из них 3 публикации в

издании, индексируемом международной базой Scopus, 5 публикаций в изданиях, утвержденных перечнем ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование изложено как научно-исследовательская работа, направленная на развитие современных теоретических взглядов и разработку прикладных инструментов планирования развития ЭКМ. Структура и логика диссертационной работы построена исходя из предмета, цели и задач исследования. Данное диссертационное исследование состоит из трех глав, введения, заключения и библиографического списка, включающего 249 источников, содержит 20 таблиц, 21 рисунок и 3 приложения. Работа изложена на 188 страницах машинописного текста.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Дана характеристика сущностных черт ЭКМ; уточнено понятие энергетического комплекса мегаполиса; выявлены и обоснованы условия и факторы, определяющие развитие ЭКМ в увязке с тенденциями технологического развития энергетики, особенностями формирования территории мегаполиса и функционированием энергетического рынка.

Система энергообеспечения мегаполиса включает системы электроснабжения и теплоснабжения и тесно связана со многими другими городскими системами, например, системой газоснабжения, водоснабжения, строительства, землепользования, транспорта, связи. Энергетические системы, входящие в структуру системы энергообеспечения города представляет собой энергетический комплекс. В условиях функционирования крупного города такой комплекс имеет специфические сущностные черты.

Система энергоснабжения мегаполиса отличается сложностью структуры и взаимосвязей, обусловленных: большим количеством разноплановых потребителей; повышенными требованиями к надежности, безопасности, экономической доступности и энергоэффективности вследствие высокой социальной значимости услуг; развитием тенденций децентрализации энергоснабжения по мере разрастания территории мегаполиса, связанных с изменением концентрации и плотности нагрузок энергопотребления; высоким уровнем изношенности основных фондов во всех сферах энергетического комплекса – объекты генерации электрической и тепловой энергии, объекты транспортной инфраструктуры в электроэнергетике, теплоснабжении, газоснабжении; жесткими ограничениями на размещение и возможность выделения и использования площадок и трасс для новых объектов энергетического комплекса, прежде всего магистральных транспортных сетей; необходимостью согласования интересов различных хозяйствующих субъектов, федеральных и региональных органов власти при разработке стратегии развития энергетического комплекса мегаполиса в силу сложности взаимосвязей в социально-экономической системе крупного города. Важным фактором, определяющим вектор развития ЭКМ, является забота о снижении негативного

влияния отрасли на окружающую среду и здоровье жителей. В последнее десятилетие экологические задачи стали явно доминировать над остальными во многих странах. Перечисленные свойства и особенности позволяют выделить ЭКМ в качестве самостоятельного объекта оптимизации и уточнить его понятие.

Энергетический комплекс мегаполиса представляет собой совокупность взаимосвязанных энергетических процессов и установок производства, доставки и использования энергетической продукции (электрической и тепловой энергии) для удовлетворения спроса в ней на данной городской территории (рис. 1).

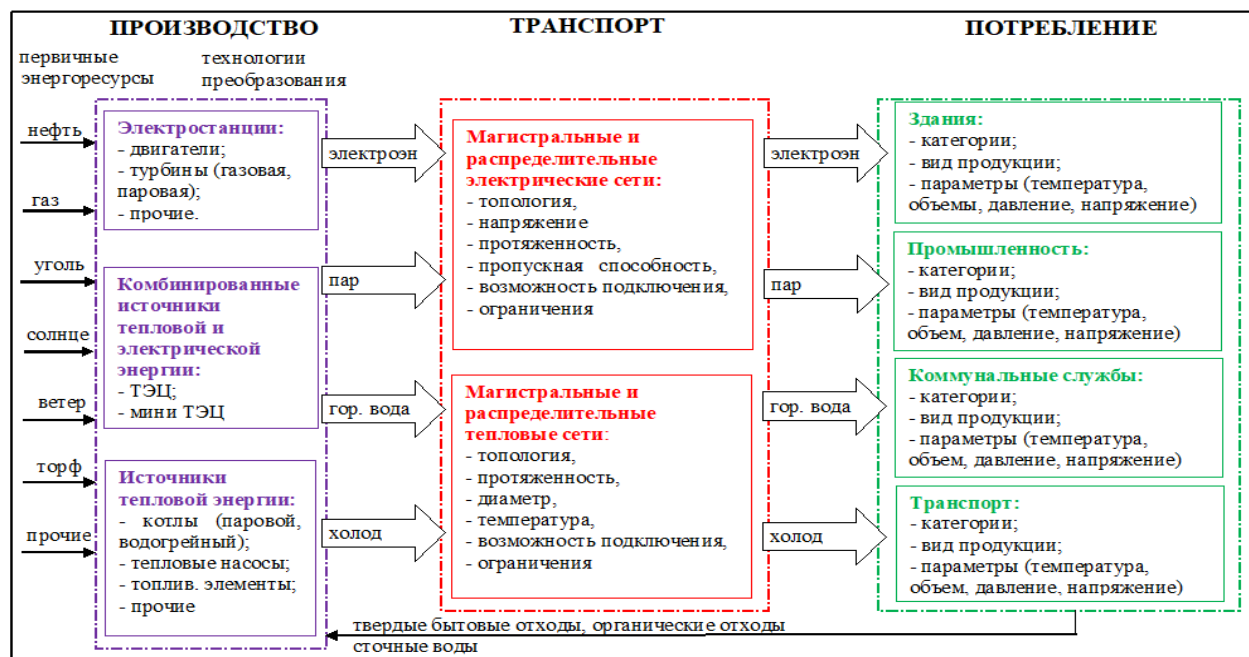


Рисунок 1 – Энергетический комплекс мегаполиса (разработано автором)

Сложность исследования и оптимизации систем энергоснабжения мегаполисов заключается в том, что они с одной стороны являются составной частью электроэнергетических систем (ЭЭС), а с другой стороны – частью теплоснабжающей системы (ТСС) города. Выбор оптимальных вариантов развития ЭКМ является составной частью работ по планированию развития ЭЭС и систем теплоснабжения городов. Однако не все условия комплексного развития и функционирования ЭКМ достаточно учитываются в составе указанных работ. Причины недостаточной проработанности программ заключаются в фрагментарности деятельности по планированию и программированию развития, в отсутствии информационного и аналитического задела – предпроектных оптимизационных исследований и обоснований на уровне мегаполиса, в результате которых должны разрабатываться комплексные схемы развития энергетической инфраструктуры во взаимосвязи подсистем электро- и теплоснабжения.

Важной задачей является устранение не последствий, а причин возникновения проблем в ЭКМ, а также разработка механизмов и инструментов, способных обеспечить развитие комплекса на качественно новом уровне с использованием возможностей цифровизации и инновационных подходов.

2. Предложена классификация существующих научных подходов к моделированию городских энергетических систем, выделены их основные характеристики; показаны ограничения известных моделей и программных комплексов, используемых для планирования развития ЭКМ, определены направления их совершенствования.

Моделированию энергетических систем городов посвящено большое количество исследований. Однако столь широкая тематика неизбежно приводит к ряду альтернативных интерпретаций проблемной области и используемых при ее изучении инструментов моделирования. На основе анализа публикаций были выделены классификационные группы методов и моделей, ориентированных на: применение отдельных технологий, проектирование зданий, оценку воздействия на экологию/климат городов, планирование развития энергосистем, оценку стратегий развития энергосистем.

Из обзора основных подходов следует, что нынешняя практика моделирования лишь частично учитывает ключевые особенности ЭКМ, определенные выше. Во-первых, было показано, что исследования часто сосредоточены на отдельных процессах и элементах энергетической системы, и только модели планирования развития энергосистем наиболее полно охватывают совокупность процессов производства и использования энергетической продукции, зачастую не учитывая транспортную составляющую ЭКМ. Во-вторых, исследования часто опираются на экзогенные входные данные, например, о спросе на электрическую и тепловую энергию в моделях планирования развития энергосистем. Только небольшое число моделей по оценке стратегий развития энергосистем рассматривали как спрос, так и предложение эндогенно. Наконец, в большинстве моделей действительно наблюдается хорошая оценка особенностей конкретных городов, но не выделены их общие черты.

Проведенный анализ программных комплексов позволил выявить направления совершенствования инструментов моделирования городских энергетических систем:

- переход от узкоспециального к междисциплинарному подходу, который наиболее полно отразит теоретическую сложность городских энергетических систем;
- внедрение инструментов анализа чувствительности и многокритериального анализа;
- наличие открытого кода, что даст возможность настройки модели пользователем;
- возможность решения задачи в динамической многоцелевой постановке;
- уменьшение временного шага моделирования, что позволит учесть волатильность возобновляемых источников энергии и точнее учесть особенности распределенной генерации.

В современных условиях, когда экономические и экологические критерии развития должны быть согласованы, необходима новая методология

комплексного обоснования структуры генерирующих источников энергии, режимов их работы в увязке с проектированием схемы сети.

3. Сформулированы принципы и требования к информационно-аналитическому обеспечению обоснования плановых решений по развитию ЭКМ, которые заключаются в комплексном рассмотрении ресурсов, технологий и потребностей, определении решений на основе компромисса общесистемных показателей эффективности, учете особенностей функционирования и связи систем электро- и теплоснабжения в составе ЭКМ во взаимодействии с федеральным оптовым рынком электроэнергии и мощности, а также региональным рынком тепла, учете объективных тенденций технологического развития.

Базовым методическим принципом обоснования плановых решений по развитию ЭКМ должен стать поиск концепции согласованного развития систем электро- и теплоснабжения, что выражается в необходимости использования единого методического и модельного инструментария на основе достаточного информационного обеспечения. Плановые решения должны строиться исходя из результатов комплексных многовариантных оптимизационных исследований с учетом циклов межуровневых итерационных согласований по прямым и обратным связям в рассматриваемой системе. Это, в свою очередь, требует выстраивания последовательной процедуры действий, управления и организации работ из специализированного центра ответственности.

С учетом разной направленности интересов участников ЭКМ условием принятия и реализации мероприятий по развитию систем электро- и теплоснабжения, программ и проектов становится наличие убедительных и прозрачных результатов технико-экономических обоснований, определяющих условия достижения целей при обеспечении баланса интересов всех участников.

При решении задачи планирования развития ЭКМ необходимо учитывать:

- совместное функционирование энергетических объектов (источников генерации, электрических и тепловых сетей) в составе системы энергоснабжения мегаполиса в различных временных разрезах;
- особенности пространственной структуры города и тенденции ее развития, технологические и экономические связи системы энергоснабжения мегаполиса с другими территориальными производственными системами;
- сложность количественного описания используемых в модели финансовых и ресурсных ограничений;
- неопределенность, связанную с исходными данными (затраты, профиль нагрузки и др.), которая может повлиять на достоверность результатов оптимизации, особенно в случае предварительного проектирования и долгосрочных инвестиций;
- многокритериальность и динамический характер поставленной задачи.

Необходима методическая платформа, которая позволит получать объективные количественные оценки последствий разрабатываемых решений и станет инструментом обоснования инвестиционных программ предприятий

комплекса. Эффективным инструментом проведения исследований ЭКМ является использование методов оптимизации и имитационного моделирования (рис. 2):

- для моделирования перспективных сценариев потребления энергии необходима разработка системно-динамической модели энергетического комплекса мегаполиса, которая даст возможность оценить не только темпы роста потребления и факторы, непосредственно влияющие на них, но и обратные связи, вызванные ростом эффективности потребления.

- принятие решения по согласованному развитию систем электро- и теплоснабжения с учетом влияния как экономических, так и неэкономических внешних факторов, требует сочетания оптимизационного подхода и экспертно-ориентированной системы имитации.

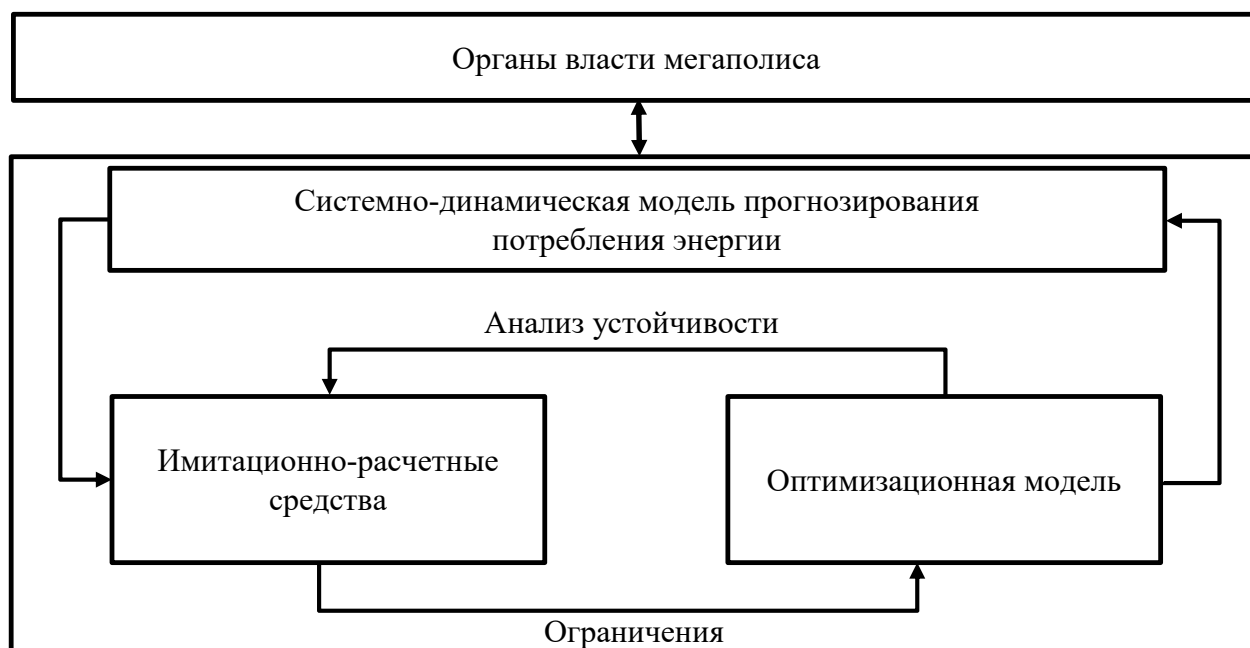


Рисунок 2 – Модельный комплекс для планирования развития ЭКМ
(разработано автором)

Создаваемый инструмент позволит органам власти анализировать то, как различные целевые установки и ограничения влияют на структуру и размещение объектов энергетики и как та или иная структура влияет на жизнедеятельность мегаполиса.

4. На основе определения структуры, свойств, взаимосвязей подсистем и элементов, критериев оптимальности развития ЭКМ предложен методический подход к решению задачи многоцелевой оптимизации развития систем энергоснабжения мегаполиса, который заключается в декомпозиции исходной проблемы на взаимосвязанные нелинейную мастер-задачу и линейную подзадачу. Для решения мастер-задачи используется генетический алгоритм, для решения подзадачи – смешанно-целочисленное линейное программирование. Сформированы концептуальная и математическая постановка задачи.

Концепция комплексной оптимизации ЭКМ состоит в следующем. Задано: годовые потребности в электрической и тепловой энергии потребителей по этапам расчетного периода; электрические (в различных режимах) и часовые тепловые нагрузки потребителей (по зонам графика теплопотребления) для каждого расчетного периода; существующие источники генерации и их технико-экономические характеристики; новые объекты генерации и возможные места их размещения, их технико-экономические показатели, предельные производительности; возможные направления трасс линий электропередач различных напряжений, транзитных и магистральных тепловых трасс, состав их основного оборудования, ресурсы топлива, их качественные характеристики. Требуется определить: места размещения и типы новых объектов генерации, состав их оборудования, мощности электрических и тепловых нагрузок в различных режимах; годовой отпуск от них электроэнергии и тепла; конфигурацию электрических сетей, напряжения и пропускные способности линий электропередач (ЛЭП); направления трасс тепловых сетей; капитальные вложения на реконструкцию существующих и сооружение новых энергетических объектов, и расходы на их эксплуатацию.

В качестве целевых критериев оптимизации выбираются наиболее значимые показатели экономической и экологической эффективности. Также необходимо выполнить ограничения на развитие и функционирование объектов: балансовые, режимные, топливные, технологические, экологические, а также условия надежности энергоснабжения потребителей. При оптимизации необходимо учесть дискретность параметров энергетических объектов, динамику развития мегаполиса, многорежимность, требования надежности энергоснабжения и неоднозначность исходной информации о будущих условиях развития.

В реальных задачах капитальные вложения, расход и стоимость используемых ресурсов и рабочей силы нелинейно зависят от мощности, конструктивных и других параметров объектов оптимизации. Нелинейными могут быть и ограничения, определяющие область допустимых значений. Определенная сложность решения рассматриваемой задачи обусловлена большой пространственной распределенностью систем, структурной неоднородностью, рассредоточенностью источников генерации и потребителей, непрерывным развитием системы энергоснабжения во времени.

Поставленная задача является иерархической, в ней можно выделить два уровня – уровень проектирования энергосистемы и уровень оптимизации режимов. Постановка задачи поиска оптимального решения сразу по нескольким критериям указывает на многоцелевой характер оптимизации.

В основе подхода, предложенного автором, лежит декомпозиция задачи многоцелевой оптимизации ЭКМ на мастер-задачу оптимизации структуры и конфигурации сети, решаемую с помощью генетического алгоритма и подзадачу оптимизации совместных режимов работы генерирующих источников, для решения которой используется смешанно-целочисленное линейное программирование (рис. 3).



Рисунок 3 – Методический подход к решению задачи оптимизации ЭКМ
(разработано автором)

Целевыми функциями мастер-задачи оптимизации структуры генерирующих источников и конфигурации сети являются минимум суммарных затрат (инвестиционных и эксплуатационных) на развитие генерирующих источников и сетей (TAC) и минимум выбросов вредных веществ (M_{CO_2}). Оптимизируемыми переменными на этом этапе являются: Y_s – переменная выбора: расположение или отсутствие энергетической установки s в зоне g , соединение/отсутствие соединения двух зон; U_s – установленная мощность энергетических установок, кВт; Bf – расход топлива, тонн.

Математическая формулировка задачи (ур.1–7) имеет вид:

$$\min_{Y_s, U_s}(TAC, M_{CO_2}), \quad (1)$$

$$U_s^{min} \leq U_s \leq U_s^{max} \quad \forall s \in S, \quad (2)$$

$$Bf \leq b_f^{max} \quad \forall f \in F, \quad (3)$$

$$Y_s \in \{0; 1\} \quad \forall s \in S, \quad (4)$$

$$(I_{s,p}, Q_{s,p}, P_{s,p}, M_{s,p}, C_s, U_{s,p}^{max/min}) = \text{ТЭП}(U_s, Y_s) \quad \forall s \in S, \quad (5)$$

$$(u_s, u_{s,p}, y_{s,p}) = \text{ОСР}(B_f, I_{s,p}, Y_s, U_s^{max/min}, C_s, Q_{s,p}, P_{s,p}, M_{s,p}), \quad (6)$$

$$TAC, M_{CO_2} = \text{ЦФ}(u_s, u_{s,p}, y_{s,p}), \quad (7)$$

где U_s^{min}, U_s^{max} – минимальная и максимально возможная установленная мощность, кВт; $I_{s,p}, Q_{s,p}, P_{s,p}, M_{s,p}$ – объем эмиссии (т), тепловая и электрическая нагрузка (МВт), объем используемых ресурсов (т) подсистемы s в режиме p ; C_s – эксплуатационные затраты в подсистеме s (тыс.руб.); $y_{s,p}$ – двоичные переменные, использование/не использование подсистемы s в режиме p ; u_s – максимальная производительность подсистемы s ; $u_{s,p}$ – использование подсистемы s в режиме p .

Ограничениями мастер-задачи являются:

– Результаты второго этапа (5) – технико-экономические показатели (эксплуатационные затраты, объемы выбросов, потоки ресурсов, диапазон изменения производительности установок и др.), рассчитанные с помощью имитационных моделей используемых энергетических установок и элементов сети. Цель этапа подготовить данные для решения подзадачи оптимизации совместных режимов работы генерирующих источников.

– Результаты третьего этапа – оптимизации совместных режимов работы генерирующих источников (6). Цель данного этапа – решить задачу оптимального (по критерию минимума затрат) распределения графиков нагрузки. Целевая функция оптимизации совместных режимов – минимум эксплуатационных затрат и платежей за загрязнение окружающей среды, при условии соблюдения балансовых и режимных ограничений. Значение целевой функции будет зависеть от уровня их использования при распределении графиков нагрузки:

$$\min_{u_s, y_s, u_{s,p}, y_{s,p}} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} (COV_{s,p} \cdot y_{s,p} \cdot u_{s,p}) \cdot \Delta p + \sum_{s=1}^{N_s} COF_{s,p} \cdot u_s + \sum_{p=1}^{N_p} (I_p \cdot t_{CO_2} \cdot \Delta p), \quad (8)$$

где $COV_{s,p}$, COF_s – условно-переменные (руб./кВтч) и условно-постоянные (тыс.руб./МВт) годовые расходы подсистемы s ; I_p – выбросы загрязняющих веществ в режиме p , т; Δp – длительность режима (с); t_{CO_2} – плата за выбросы загрязняющих веществ, руб/ т.

– Результаты четвертого этапа – расчет значений целевых функций. Выбранная конфигурация энергетической системы и результаты оптимизации совместных режимов работы генерирующих источников используются для расчета значений целевой функции. Экономическим критерием оптимизации является минимум полных годовых затрат на функционирование и развитие ЭКМ. Полные затраты включают эксплуатационные затраты и затраты, связанные с возмещением инвестиций:

$$TAC = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} (COV_{s,p} \cdot y_{s,p} \cdot u_{s,p}) \cdot \Delta p + \sum_{s=1}^{N_s} COF_{s,p} \cdot u_s + \sum_s^{N_s} CI_s \cdot \frac{r \cdot (1+r)^{T_s}}{(1+r)^{T_s} - 1}, \quad (9)$$

где CI_s – инвестиционные затраты в подсистему s года t , r – процентная ставка, T_s – срок службы подсистемы s .

Воздействие ЭКМ на окружающую среду оценивается по объему выбросов парниковых газов:

$$M_{CO_2} = \sum_{p=1}^{N_p} \left[\sum_{s=1}^{N_s} (u_{s,p,t} \cdot I_{s,p,t}) + \sum_{f=1}^{N_f} (I_{f,p} + I_{grid,p}) \right] \cdot \Delta p, \quad (10)$$

где $I_{s,p}$ – полный объем эмиссии парниковых газов подсистемы s в режиме p , т; $I_{f,p}$ – полный объем эмиссии парниковых газов, связанный с движением теплоносителя и топлива, т; $I_{grid,p}$ – полный объем эмиссии

парниковых газов, связанный с импортом электроэнергии (произведенной вне энергосистемы рассматриваемого города), т.

Предложенный в работе методический подход апробирован на примере строящегося района мегаполиса, характеризующегося следующими данными: площадью – 240 км², численностью населения – 450 тыс. чел. Предусмотрено наличие мусоросжигательного завода (МСЗ) на территории района. Годовой объем твердых бытовых отходов принят равным 620 тыс. тонн. Для уменьшения размерности задачи на территории района выделяется 12 зон энергопотребления, для каждой из которых рассчитываются перспективные объемы потребления электрической и тепловой энергии. Рассматривались следующие сценарии оптимизации ЭКМ:

Сценарий 1. Строительство индивидуальных газовых котельных непосредственно рядом с каждым зданием. Сценарий не требует строительства распределительных трубопроводов, электроэнергия в этом случае импортируется из основной сети.

Сценарий 2. Строительство централизованного источника энергоснабжения в каждой зоне энергопотребления, что подразумевает строительство районной распределительной тепловой сети, связь между зонами энергопотребления не предусмотрена.

Сценарий 3. Обеспечение потребностей в энергетической продукции крупными источниками, расположенными на пяти возможных площадках, при этом транспорт теплоты осуществляется через магистральные высокотемпературные трубопроводы между электростанциями и центрами зон энергопотребления. Альтернативными вариантами в этом сценарии являются крупные котельные для производства горячей воды и пара, ТЭЦ, тепловые насосы.

Сценарий 4. Комбинация сценариев 1, 2 и 3. Также предполагается, что на МСЗ в общей сложности сжигается 620 тыс. тонн/год ТБО, даже если остаточное тепло не отводится через распределительные тепловые сети.

Результаты расчетов (рис. 4) показали значимость экологического критерия при формировании оптимального варианта развития ЭКМ. Причем важно отметить, что вклад в общие объемы выбросов парниковых газов оказывают не только объемы сжигаемого на котельных и электростанциях топлива, но и объемы импортируемой электроэнергии, и потоки ресурсов (теплоносителя и топлива).

Оптимальным оказался вариант, соответствующий четвертому сценарию, сочетающий как децентрализованные источники тепловой энергии, рассчитанные на потребность локальных зон энергоснабжения, находящихся на границе рассматриваемого района, так и строительство центральной электростанции, предусматривающее прокладку магистрального трубопровода между центральными зонами энергопотребления. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода.

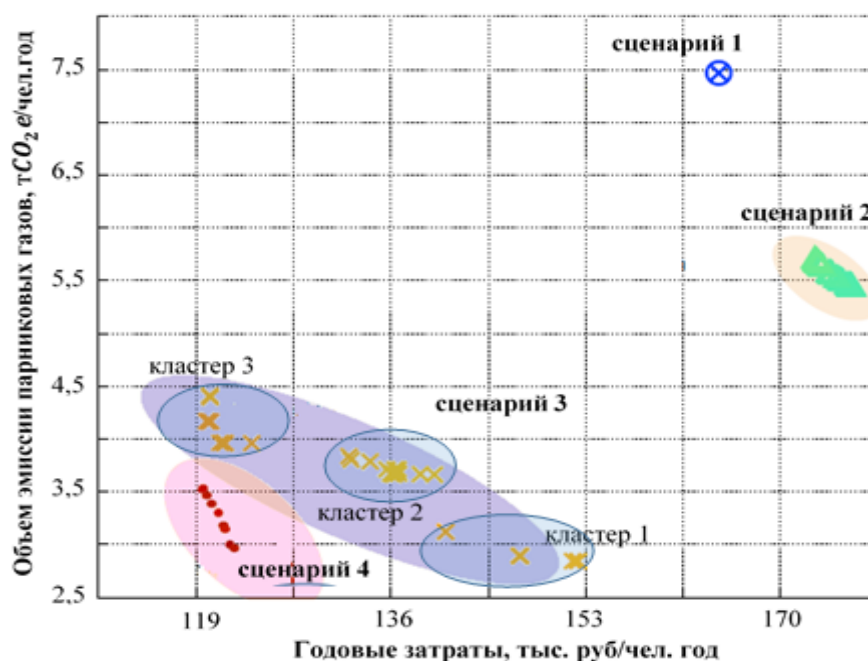


Рисунок 4 – Результаты многоцелевой оптимизации района мегаполиса (получены автором)

5. Разработана методика технико-экономического обоснования плановых решений по скоординированному развитию систем энергоснабжения мегаполиса, позволяющая проводить структурирование исходных данных, оценку перспективных объемов и пространственного распределения электрической и тепловой нагрузки, поиск оптимальной структуры генерирующих мощностей и схемы электрической и тепловой сети, а также оптимизацию совместных режимов работы ТЭЦ и котельных с учетом многоцелевого характера поставленной задачи, экономических, технических и экологических ограничений, современных условий функционирования и развития энергетических рынков. Универсальная постановка задачи, использование оптимизационных и имитационных моделей позволяет проводить исследования для городских энергетических систем в конкретных условиях с учетом разнонаправленных интересов участников ЭКМ.

Алгоритм выбора оптимального варианта развития систем электро- и теплоснабжения в составе ЭКМ, состоит из трех этапов: подготовки данных, оптимизации и анализа решений (рис. 5).

1. Этап подготовки данных. Решению оптимизационной задачи предшествует подготовка исходной информации, которая включает формирование баз данных, прогнозирование пространственно-временного профиля потребления электрической и тепловой энергии, анализ существующего и перспективного баланса энергосистемы.

1.1. База данных по доступным энергетическим ресурсам содержит информацию об энергетических ресурсах, которые могут быть использованы для преобразования в полезные виды энергии на территории мегаполиса.

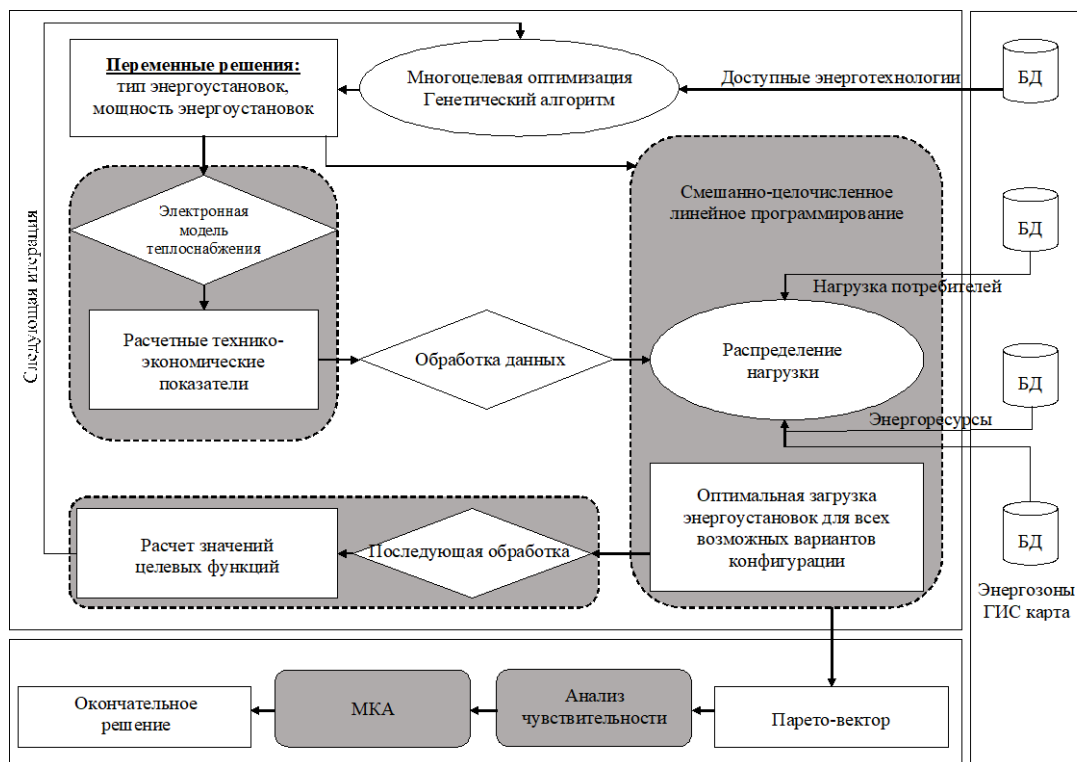


Рисунок 5 – Алгоритм выбора варианта развития систем электро- и теплоснабжения в составе ЭКМ (разработано автором)

1.2. База данных графиков нагрузки и перспективных объемов потребления электрической и тепловой энергии содержит типовые суточные, месячные и годовые графики нагрузки различных групп потребителей по видам энергетической продукции (электроэнергия, тепловая энергия на отопление, горячее водоснабжение и вентиляцию).

С целью долгосрочного прогнозирования потребления энергии сектором зданий предложена системно-динамическая модель, ключевой особенностью которой является оценка влияния динамики развития жилого и нежилого фонда на объемы потребления энергетических ресурсов.

Основными способами повышения энергоэффективности сектора являются: проведение капитальных ремонтов (реновации) старых зданий и строительство новых, рассчитанных на современные стандарты и нормы энергопотребления зданий. На прогнозные оценки потребления энергии зданиями города существенное влияние оказывают существующий объем жилого и нежилого фонда, его структура по возрасту, износу, этажности, материалам стен, функциональному назначению и т. п.; планы по строительству, реконструкции и сносу зданий; реализация мероприятий по повышению энергоэффективности; метеофакторы; уровень жизни населения. Реализация модели выполнена в среде «AnyLogic» (рис. 6).

Прогнозирование с помощью такой модели целесообразно проводить в разрезе групп, однородных по характеристикам зданий, которые определяют потребление ими энергии (по функциональному назначению, конструктивным особенностям и т.п.).

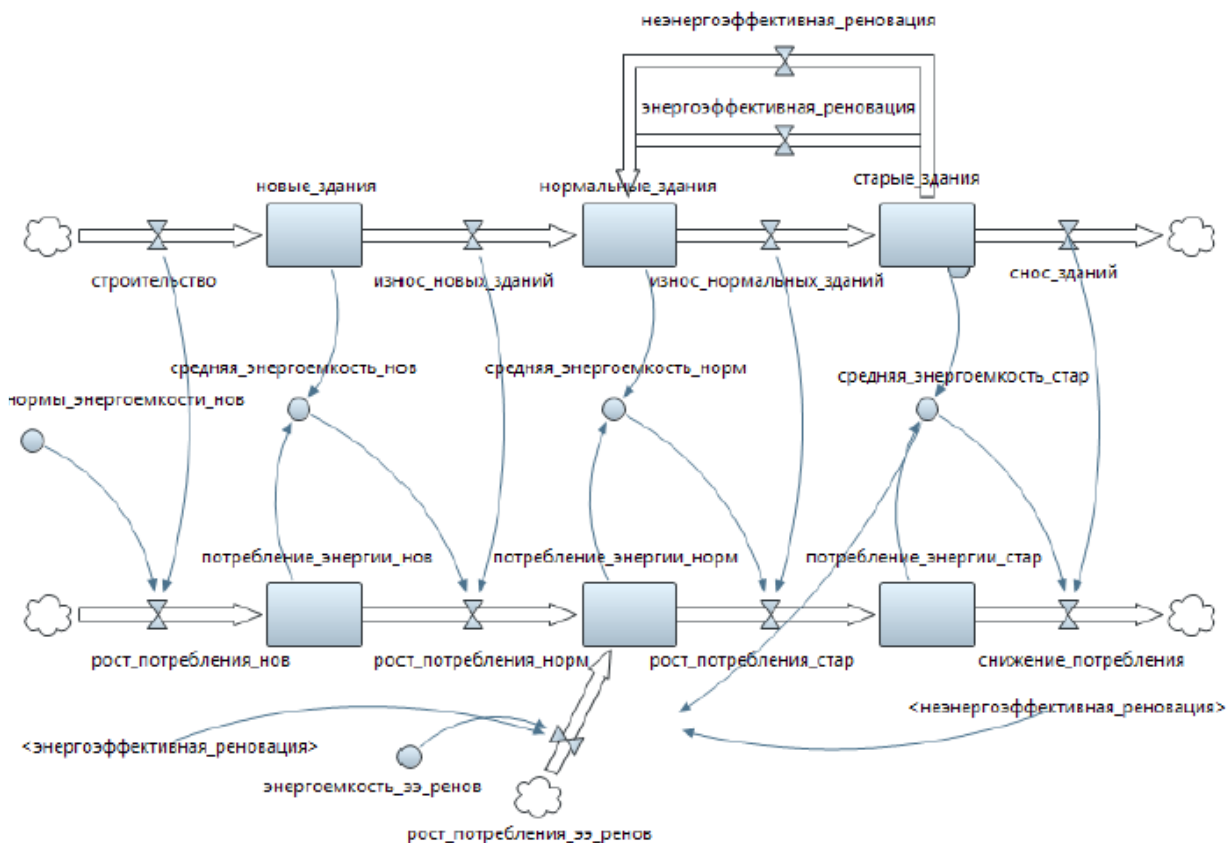


Рисунок 6 – Имитационная модель потребления энергетических ресурсов зданиями (разработано автором)

Прогнозирование с помощью такой модели целесообразно проводить в разрезе групп, однородных по характеристикам зданий, которые определяют потребление ими энергии (по функциональному назначению, конструктивным особенностям и т. п.).

1.3. База данных доступных технологий производства (преобразования) энергии содержит имитационные модели доступных энергетических установок и систем, с помощью которых возможно оценить технико-экономические показатели работы оборудования в разных режимах эксплуатации.

1.4. База данных по пространственным и географическим ограничениям заключается в создании геоинформационной системы ЭКМ с внесением данных о существующих энергетических объектах, топологии магистральных и распределительных сетей, а также координат зданий, промышленных объектов, автомагистралей, рек, озер, планировки дорог.

1.5. Перечень зон энергопотребления: для уменьшения длительности расчетов систему энергоснабжения следует разделить на ограниченное число элементов — «зон энергопотребления». Под «зоной энергопотребления» понимается часть территории, в границах которой нагрузка потребителей агрегируется. При наличии существующей инфраструктуры в качестве зон энергопотребления целесообразно принять зоны теплоснабжения источников, информация о которых приводится в схемах теплоснабжения города.

Для оценки потребления электрической энергии не только во временном, но и в пространственном разрезе предложен алгоритм оценки пространственно-

временного профиля потребления электрической и тепловой энергии. Изменяя масштаб зонирования (район, муниципальный округ, квартал) и временной интервал (год, неделя, сутки, час), можно адаптировать модель согласно конкретным задачам и условиям.

1.6. Анализ существующего и перспективного баланса. По всем зонам энергопотребления и в целом по мегаполису анализируется баланс электрической и тепловой мощности, определяются источники покрытия дефицитов. Дефицит тепловой мощности может покрываться за счет строительства новых источников тепловой энергии, развития магистральных и распределительных тепловых сетей или строительства децентрализованных источников с соответствующими затратами. В качестве источников покрытия дефицитов электрической мощности могут выступать либо существующие или строящиеся мощности ТЭЦ, либо передача от ближайших высоковольтных подстанций.

2. Этап оптимизации. На этапе оптимизации используется предложенный методический подход, который заключается в сочетании детерминированного и стохастического метода многоцелевой оптимизации путем декомпозиции исходной задачи на нелинейную мастер-задачу и линейную подзадачу. Для решения мастер-задачи используется генетический алгоритм, для решения подзадачи – смешанно-целочисленное линейное программирование. Этап оптимизации включает:

2.1. Формирование начальной популяции. На основе данных о доступных технологиях генерации электрической и тепловой энергии, с учетом географических и пространственных ограничений, целей развития ЭКМ случайным образом формируется некоторое количество (*начальная популяция*) вариантов технологических решений (*хромосом*). Варианты включают набор двоичных и непрерывных переменных, определяющих наличие и установленную мощность энергетических установок, мощность и энергию, покупаемую со стороны, отпуск энергии внешним потребителям, наличие или отсутствие связи между зонами энергопотребления.

Состав и количество переменных, формирующих технологические решения, определяются в каждом конкретном случае в зависимости от содержания и размерности задачи.

2.2. Расчет технико-экономических показателей работы энергетических установок и систем. Для этого используются имитационные модели, содержащиеся в разработанной базе данных энергетических технологий. Для расчета режимов функционирования и компьютерной имитации поведения тепловой сети возможно использование расчетно-аналитической («электронной») модели системы теплоснабжения, разрабатываемой в составе схемы теплоснабжения города.

2.3. Распределение графиков электрической и тепловой нагрузки между генерирующими источниками с учетом сетевых связей. Для каждого из зафиксированных в пп.2.1 вариантов, с учетом показателей, рассчитанных с помощью электронной модели теплоснабжения, находится оптимальное

распределение графика электрической и тепловой нагрузки. Основная цель этого шага состоит в том, чтобы для каждого варианта структуры ЭКМ найти оптимальные с точки зрения выбранного критерия объемы производства электрической и тепловой энергии, оценить эксплуатационные затраты энергетической системы.

2.4. *Определение значений выбранных целевых функций (фитнес-функций) мастер-задачи* (ур. 9,10).

Подпункты 2.4 - 2.8 реализуются с помощью генетического алгоритма.

2.5. *Сортировка генетического материала, направленная на отбор решений, характеризующихся наилучшими значениями целевых функций.*

2.6. *Реализация операции скрещивания* информационных цепочек генетического материала всех родительских пар и формирование дочерних решений, наследующих характеристики обоих «родителей».

2.7. *Реализация операции мутации*, которая заключается в случайном изменении генотипа дочерних элементов, определённых на предыдущем этапе выполнения алгоритма; формирования нового поколения возможных решений.

Далее управление передают процедуре 2.2 для выполнения очередного шага генетического алгоритма. Результатом выполнения алгоритма становится формирование множества *эффективных по Парето решений*.

3. *Этап анализа решений*. Решения, оптимальные по Парето, исследуются для выбора наилучшего из них.

Выбор конкретной альтернативы в качестве конечного решения предоставляется лицу, принимающему решение, на полученном множестве Парето и происходит на этапе «анализа решений». Каждое решение из полученного множества эффективно с точки зрения выбранных целей. Поэтому для выбора конкретного решения проводится их анализ. Поскольку лицо, принимающее решение, заранее знает, какие из критериев его интересуют больше, то на полученном множестве Парето рассматриваются отдельные решения, оптимальные по наиболее значимым критериям. Это позволяет значительно сократить и упростить решение задачи многокритериального отбора. Обоснованное принятие решений требует анализа конкретных условий, местных требований и приоритетов, возможностей регулирования и согласования интересов.

III. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ)

Результаты и выводы, полученные в ходе исследования, соответствуют поставленной цели и задачам.

1. Определены сущностные характеристики ЭКМ, включающие в себя: сложность его функционирования; многочисленность потребителей; требования доступности, надежности, безопасности, энергоэффективности к работе комплекса; тенденции децентрализации энергоснабжения; повышенную изношенность основных производственных фондов; ограниченные возможности на размещение новых энергетических объектов; дифференциацию интересов

разных лиц в планировании развития энергетической системы. Все это привело к необходимости уточнения определения энергетического комплекса мегаполиса.

2. Предложена классификация существующих научных подходов к моделированию городских энергетических систем, выделены их основные характеристики; показаны ограничения известных моделей и программных комплексов, используемых для планирования развития ЭКМ, определены направления их совершенствования.

3. Сформулированы принципы и требования к информационно-аналитическому обеспечению обоснования плановых решений по развитию ЭКМ. Базовым принципом планирования развития ЭКМ является комплексный подход, который заключается в одновременном рассмотрении ресурсов, технологий и потребностей, определении решений на основе компромисса общесистемных показателей эффективности, учете особенностей функционирования и связи систем электро- и теплоснабжения в составе ЭКМ во взаимодействии с федеральным оптовым рынком электроэнергии и мощности, а также региональным рынком тепла, учете объективных тенденций технологического развития. В основе информационно-аналитического обеспечения должен находиться комплекс экономико-математических моделей, который позволит получать объективные количественные оценки последствий принимаемых решений.

4. Предложен методический подход к решению задачи многоцелевой оптимизации развития систем энергоснабжения мегаполиса. Сформулированы концептуальная и математическая постановка задачи. Особенностью подхода является декомпозиция исходной проблемы на взаимосвязанные нелинейную мастер-задачу и линейную подзадачу, что позволяет сократить размерность задачи оптимизации. Для решения мастер-задачи использован генетический алгоритм, для решения подзадачи – смешанно-целочисленное линейное программирование.

5. Разработана методика технико-экономического обоснования плановых решений по скоординированному развитию систем энергоснабжения мегаполиса включающая структурирование исходных данных, оценку перспективных объемов и пространственного распределения электрической и тепловой нагрузки, поиск оптимальной структуры генерирующих мощностей и схемы электрической и тепловой сети, а также оптимизацию совместных режимов работы ТЭЦ и котельных. Новизна предлагаемой методики заключается в выборе оптимального варианта ресурсов и технологий для обеспечения энергетических потребностей мегаполиса на основе анализа эффективности комплексного электро- и теплоснабжения с учетом многоцелевого характера поставленной задачи, а также взаимосвязей функциональных элементов ЭКМ, возможностей взаимозаменяемости и комбинирования энергоресурсов, источников централизованного и децентрализованного энергоснабжения.

Представленные результаты исследования формируют необходимую методическую основу для технико-экономического обоснования плановых

решений развития ЭКМ, учитывая эксплуатационные и проектные ограничения реальных систем, реализуя возможность поиска решения при нескольких целях, интеграцию с существующей электронной моделью системы теплоснабжения, выбор статической или динамической постановки задачи. Добиться приемлемого времени решения задачи удалось с помощью ее декомпозиции на нелинейную и линейную части.

Разработанные в ходе исследования методы и модели могут использоваться в процессе планирования при согласовании проектных решений на уровне мегаполиса и формировании текущих и перспективных инвестиционных программ предприятий энергетической отрасли.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science:

1. Бугаева Т.М. Современные методы планирования энергосистемы города / Т.М. Бугаева, О.В. Новикова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 4. С. 377-387. (0,7 п.л. / 0,6 п.л.)
2. Bugaeva T. Development and testing of the genetic algorithm to select a scenario of distributed generation power supply system / T. Bugaeva, A. Khabarov, O. Novikova, U. Plotkina // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. С. 012056.13 (0,6 п.л. / 0,3 п.л.)
3. Bugaeva T. Assessment of systemic effects from integration of distributed generation facilities into regional energy systems / L.D. Khabachev, U.I. Plotkina, T.M. Bugaeva, A.B. Yurkova, //2017 6th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO). – IEEE, 2017. – С. 188-193. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК:

4. Бугаева Т.М. Методика поиска скоординированного варианта развития систем энергоснабжения мегаполиса / Т.М. Бугаева // Инновации и инвестиции. – 2020 – №9. – С. 22–32. (0,7 п.л.)
5. Бугаева Т.М. Особенности управления развитием энергетического комплекса мегаполиса / Т.М. Бугаева, Н.Г. Викторова // Экономические науки. – 2020 – №190 – С. 96-105. (1 п.л. / 0,7 п.л.)
6. Бугаева Т.М. Методические положения обоснования решений по развитию энергетического комплекса мегаполиса / Т.М. Бугаева, Н.Г. Викторова // Экономические науки. – 2020 – №191 – С. 40-48. (1 п.л. / 0,7 п.л.)
7. Бугаева Т.М. Комплексный подход к планированию развития энергетического комплекса мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга) / Т.М. Бугаева, Л.Д. Хабачев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2013. – № 2 (168). – С. 37-42. (0,9 п.л. / 0,6 п.л.)
8. Бугаева Т.М. Принципы построения имитационно-динамической модели прогнозирования потребления электроэнергии / Т.М. Бугаева, Л.Д. Хабачев //

Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2008. – № 2 (54). – С. 126-131. (0,8 п.л. / 0,6 п.л.)

Публикации в других изданиях:

9. Бугаева Т.М. Формирование баланса электрической энергии на трансформаторных подстанциях как фактор повышения экономичности транзита / А.С. Резниченко, Т.М. Бугаева // В сборнике: Современные технологии и экономика энергетики. Материалы Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 53-56. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

10. Бугаева Т.М. Экономическое обоснование введения платы за резерв электросетевой мощности / Е.Ю. Румянцева, Т.М. Бугаева // Современные технологии и экономика энергетики. – 2019. – С. 59-62. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.)

11. Бугаева Т.М. Анализ проблем тарифного регулирования в сфере теплоснабжения / А.Р. Муртазаева, А.М. Кузнеченко, Т.М. Бугаева // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли. В 3-х частях. – 2019. – С. 611-613. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

12. Бугаева Т.М. Информационное обеспечение работ по планированию и прогнозированию развития систем энергоснабжения мегаполиса / Ю.В. Лисичкина, Т.М. Бугаева // Неделя науки СПбПУ. – 2017. – С. 193-195. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

13. Бугаева Т.М. Оценка влияния динамики развития жилого и нежилого фонда зданий на потребление энергии / В.К. Кооп, Т.М. Бугаева // Неделя науки СПбПУ. – 2016. – С. 270-272. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

14. Бугаева Т.М. Оценка перспектив развития возобновляемой энергетики в республике Крым / А.Б. Юркова, Т.М. Бугаева // Неделя науки СПбПУ. – 2016. – С. 356-359. (0,4 / 0,2 п.л.)

15. Бугаева Т.М. Перспективы развития системы теплоснабжения Приморского района г. Санкт-Петербурга / Т.М. Бугаева, М.В. Спицкая // Эффективная энергетика–2014. – 2015. – С. 316-328. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.)

16. Бугаева Т.М. Совершенствование методики прогнозирования потребления энергии в крупном городе / М. О. Ганюшина, Т. М. Бугаева // Неделя науки СПбПУ. – 2015. – С. 7-10. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

17. Бугаева Т.М. Построение модели совместной оптимизации источников электрической и тепловой энергии / Т.М. Бугаева, М. В. Спицкая // Неделя науки СПбПУ. – 2014. – С. 114-117. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

18. Хабачев Л.Д., Бугаева Т.М. Планирование перспективного развития энергосистем. Прогноз балансов мощности и режимов работы электростанций / // Учебное пособие – Изд-во Политехнического университета – 2010. – 42с. (3 п.л. / 0,8 п.л.)

19. Бугаева Т.М. Влияние новой системы тарифов на инвестиции в развитие генерирующих мощностей / Т.М. Бугаева, Ю.А. Воропаева // XXXI Неделя науки СПбПУ. Материалы межвузовской научной конференции 25-30 ноября 2002 года. – 2003. – С. 105-108. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)