

Министерство образования и науки Украины  
Одесский национальный политехнический университет

На правах рукописи

БАБИЧ Сергей Владимирович

УДК 681.5.015.23:658.264

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА  
С ОПТИМИЗАЦИЕЙ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА**

Специальность 05.13.07 – Автоматизация процессов управления

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
Максимов Максим Витальевич,  
доктор технических наук,  
профессор

Одесса–2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных сокращений .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
РАЗДЕЛ 1 Анализ структур теплоснабжения различных групп потребителей .....	12
1.1 Классификация систем теплоснабжения .....	12
1.2 Виды источников производства тепловой энергии .....	13
1.3 Классификация потребителей тепловой энергии .....	28
1.4 Техничко-экономические показатели эффективности систем теплоснабжения .....	29
1.4.1 Показатели эффективности .....	30
1.4.2 Показатели надежности .....	34
1.4.3 Воздушно-тепловой режим .....	37
1.5 Выбор структуры объекта управления .....	40
1.6 Анализ методов управления системами с изменяемой структурой .	42
1.6.1 Анализ метода управления по параметру	42
1.6.2 Анализ методов управления по структуре	46
1.7 Постановка задачи исследования .....	49
Выводы к разделу 1.....	52
РАЗДЕЛ 2 Разработка модели объекта управления .....	54
2.1 Модель тепловых процессов в отдельной квартире .....	56
2.2 Модель тепловых процессов в многоквартирном доме .....	63
2.3 Модели оборудования систем теплоснабжения .....	65
2.3.1 Модель газового оборудования .....	65
2.3.2 Модель теплонасосной установки .....	67
2.4 Модели процессов теплоснабжения от различных источников тепловой энергии .....	68

2.5 Анализ потенциальных возможностей .....	76
Выводы к разделу 2.....	80
<b>РАЗДЕЛ 3 Оптимизация процесса теплоснабжения городских районов</b>	<b>82</b>
3.1 Исходные данные .....	83
3.2 Постановка задачи управления .....	85
3.3 Постановка задачи оптимизации .....	87
3.4 Выбор критериев управления и целевой функции .....	88
3.4.1 Общие теоретические сведения .....	88
3.4.2 Экспериментальное определение КПД процесса теплоснабжения	92
3.4.3 Синтез стоимостной составляющей критерия оптимальности .....	92
3.4.4 Синтез составляющей надежности критерия оптимальности .....	94
3.4.5 Целевая функция локальной задачи оптимизации .....	99
3.5 Постановка глобальной задачи оптимизации .....	99
3.6 Определение решающего правила по изменению структуры цены на энергетические потоки .....	100
3.7 Формализация алгоритмов системы управления .....	102
3.7.1 Алгоритм управления для локальной задачи оптимизации .....	102
3.7.2 Алгоритм управления для глобальной задачи оптимизации .....	103
3.8 Формализация метода управления структурой системы теплоснабжения в условиях ограничений на ресурсы	107
Выводы к разделу 3.....	112
<b>РАЗДЕЛ 4 Результаты имитационного моделирования компьютерно- интегрированной системы управления .....</b>	<b>115</b>
4.1 Исходные данные для моделирования .....	115
4.2 Результаты анализа чувствительности целевой функции .....	118
4.3 Результаты имитационного моделирования .....	120
Выводы к разделу 4.....	147
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>149</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>151</b>

ПРИЛОЖЕНИЕ А Документы о внедрении .....	160
--	-----

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АГВ	– аппарат газовый водогрейный
АСТ	– атомная станция теплоснабжения
АСУ	– автоматизированная система управления
АЭС	– атомная электрическая станция
ВТР	– воздушно-тепловой режим
ГВС	– горячее водоснабжение
ГеоТЭС	– геотермальная электростанция
ИТНУ	– индивидуальная теплонасосная установка
КИСУ	– компьютерно-интегрированная система управления
КК	– крышная котельная на газе
КПУ	– координатно-параметрическое управление
ОВК	– системы отопления, вентиляции и кондиционирования
ОУ	– объект управления
РК	– районная котельная на газе
РК с ТНУ	– районная котельная с теплонасосной установкой
СПС	– системы с переменной структурой
ССС	– системы со случайной структурой
ТС	– теплоснабжение
ТН	– тепловой насос
ТНУ	– теплонасосная установка
ТЭЦ	– теплоэлектроцентраль
ЦТП	– центральный тепловой пункт

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* В современном крупном городе Украины с переходом на рыночные цены на энергоносители растет уровень требований к функциональным характеристикам компьютерно-интегрированных систем управления (КИСУ), которые обеспечивают управление техническими средствами теплоснабжения (ТС).

Современные КИСУ ТС делают возможным подключение технических средств теплоснабжения из тех, которые работают в системе, с минимальными текущими затратами финансовых ресурсов при изменении среды их использования с отсутствием или минимизацией вмешательства оператора в процесс функционирования. Сегодня уровень развития теории адаптивных систем и методов управления, а также теории оптимального управления (ОУ) позволяют решать задачи управления структурой взаимозаменяемого оборудования системы теплоснабжения, которое обеспечит поиск минимальных затрат ресурсов. При этом априори понимается, что каждая единица оборудования, которая управляется по параметрам, работает в оптимальном режиме. Целью автоматизированного управления является поддержание минимальных затрат финансовых ресурсов в системе теплоснабжения при условии существования альтернативных энергетических ресурсов (потоков), которые отличаются разной стоимостью, изменяющейся во времени.

В настоящее время возникло противоречие. С одной стороны, производители тепловой энергии заинтересованы продать ее по максимальной регламентируемой стоимости, а с другой – потребители заинтересованы приобрести тепловую энергию по минимально возможной стоимости.

Необходимость совершенствования КИСУ, которая повысит экономическую эффективность за счет целевого изменения структуры

объекта управления на основе анализа стоимости альтернативных энергетических потоков, и определяет актуальность данной работы.

***Связь работы с научными программами, планами, темами.*** Работа выполнена в соответствии с планами, утвержденными Министерством образования и науки Украины, и является составной частью госбюджетной НИР «698-47» (№ ДР 0115U000411) по теме: «Совершенствование теоретических и экспериментальных методов исследования переходных процессов в энергетических установках за счет структурной оптимизации моделей и технических систем». В этой работе аспирант принимал участие как исполнитель.

***Цель и задачи исследования.*** Целью работы является совершенствование методов и моделей автоматизированного управления системой теплоснабжения города для повышения экономической эффективности за счет целевого изменения структуры объекта управления.

Достижение цели осуществляется решением следующих задач:

- анализ объекта управления, методов и моделей, используемых при управлении процессом теплоснабжения города и городских районов, избрание прототипа системы теплоснабжения;
- разработка имитационных моделей объекта управления, функционирующих в условиях наличия альтернативных энергетических потоков, отличающихся разной стоимостью;
- синтез и обоснование критериев и целевой функции оптимизации процесса теплоснабжения города;
- решение задачи оптимизации процесса теплоснабжения городских районов за счет перехода от структурной оптимизации объекта управления к управлению структурой цены, предложенной потребителю энергетических потоков;
- внедрение и определение эффективности КИСУ для предложенных объектов.

**Объект исследования** – компьютерно-интегрированная система управления теплоснабжением города с множеством взаимодополняющих или альтернативных источников тепловой энергии.

**Предмет исследования** – методы и модели управления системой теплоснабжения города для повышения эффективности за счет оптимизации структуры объекта управления.

**Методы исследования** – методы актуарной математики обеспечили расчет критерия надежности в размерных единицах; имитационное моделирование подтвердило полученные теоретические результаты; методы системного анализа были использованы для декомпозиции объекта управления; моделирование нестационарных процессов тепломассообмена с помощью метода конечных элементов позволило получить модель среднестатистического дома, которая обеспечивает расчет тепловых потерь; теория оптимального управления использовалась для поиска нужной структуры объекта управления.

***Научная новизна полученных результатов:***

– получила дальнейшее развитие математическая модель системы теплоснабжения потребителя тепла при случайных возмущениях, которая определяет структуру объекта управления на базе всего множества технических средств, которые рассматриваются на базе решения нестационарной задачи теплопередачи, что дает возможность формировать текущую модель объекта управления в зависимости от возмущений и различных затрат финансовых ресурсов;

– получила дальнейшее развитие целевая функция оптимизационной задачи для системы теплоснабжения с переменной структурой объекта управления, объединяющая в себе эффективность применяемого оборудования, его надежность и стоимость ресурсов, которая отличается от известных тем, что критерий надежности рассчитывается на базе методов актуарной математики, что позволяет свести задачу к одному аргументу



(расходы) и находить ее значение в реальном времени управления при любых ограничениях и возмущениях;

– получил дальнейшее развитие метод управления структурой большой системы теплоснабжения в условиях ограничений на ресурсы и возмущений, который заключается в том, что решение задачи управления теплоснабжением на каждом шагу моделирования обеспечивается множеством источников тепловой энергии, которые обеспечивают минимальное значение целевой функции;

– впервые предложен метод управления процессом теплоснабжения городских районов в условиях ограничений на ресурсы за счет перехода от структурной оптимизации множества теплогенерирующих источников к управлению структурой цены предложенного потребителю энергетического потока, что позволяет достичь рационального использования энергоресурсов.

***Практическое значение полученных результатов:***

– обеспечение минимальных финансовых затрат для потребителя в течение отопительного периода при наличии альтернативных источников;

– применение разработанных и апробированных подходов к совершенствованию КИСУ, включая ее информационное и математическое обеспечение, для минимизации финансовых затрат при любых ограничениях на ресурсы;

– использование модели большой распределенной системы теплоснабжения городских районов;

– применение методов актуарной математики для оценки критерия надежности отдельного источника тепловой энергии.

Образцы различных вариантов КИСУ прошли испытания в лабораториях кафедры АТП ОНПУ. Внедрения, проведенные на ОАО «Одессаоблэнерго» и КП тепловых сетей «Южтеплокоммунэнерго», подтвердили эффективность разработанных методов управления (см. Приложение). Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов ОНПУ.

**Личный вклад соискателя.** Научные результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Автору принадлежат основные идеи по совершенствованию методов и моделей автоматизированного управления системой теплоснабжения города для повышения экономической эффективности за счет целевого изменения структуры объекта управления. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: в [19; 59] – математическая модель системы теплоснабжения потребителя тепла при случайных возмущениях, которая определяет структуру объекта управления на базе всего множества технических средств; в [46; 52] – целевая функция оптимизационной задачи для системы теплоснабжения с переменной структурой объекта управления, объединяет в себе эффективность применяемого оборудования и его надежность, которая рассчитывается на базе методов актуарной математики, и стоимость ресурсов; в [42; 63] – метод управления структурой большой системы теплоснабжения в условиях ограничений на ресурсы и возмущений; в [77; 68] – метод оптимизации процесса теплоснабжения городских районов в условиях ограничений на ресурсы при переходе от структурной оптимизации множества теплогенерирующих источников к управлению структурой цены; в [56; 78; 79] предложены подходы по совершенствованию КИСУ для минимизации финансовых затрат при любых ограничениях в ресурсах.

**Апробация результатов работы.** Результаты диссертационного исследования докладывались на международных конференциях и семинарах: «Автоматика–2014» (г. Киев), «Международная научно-практическая конференция «Новые технологии автоматизированного управления. Теория и практика» (г. Одесса, 2013), «Современные методы, информационное, программное и техническое обеспечение систем управления организационно-техническими и технологическими комплексами» (г. Киев, 2014), «Информационные технологии и автоматизация» (г. Одесса, 2014), первая

всеукраинская научно-техническая конференция «Автоматизация, контроль и управление» (г. Красноармейск, 2015).

**Публикации.** Результаты научных достижений изложены в 11 печатных работах, из них 6 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных аттестационной комиссией МОН Украины, 5 – докладов и тезисов докладов международных, национальных, региональных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка используемых источников и приложения; изложена на 164 страницах компьютерного текста, содержит 25 рисунков, 25 таблиц, 1 приложение. Список используемых источников содержит 80 наименований.

# РАЗДЕЛ 1

## АНАЛИЗ СТРУКТУР ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Вопросы, связанные с теплоснабжением современных городов и городских районов, последнее десятилетие актуальны во всем мире [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8]. Исследования направлены как на оптимизацию работы существующих систем, так и на внедрение новых технологий получения тепловой энергии. К сожалению, информации об управлении структурой систем теплоснабжения в доступных источниках не найдено. Поэтому первым шагом в данном диссертационном исследовании будет изучение рынка источников и потребителей тепловой энергии, а также методов управления процессом теплоснабжения.

### 1.1 Классификация систем теплоснабжения

Функционально система теплоснабжения состоит из следующих частей:

- источник производства тепловой энергии;
- транспортирующие устройства тепловой энергии к помещениям (тепловые сети);
- теплопотребляющие приборы, которые передают тепловую энергию потребителю (радиаторы отопления, калориферы).

По месту выработки теплоты системы теплоснабжения делятся на такие:

- централизованные (источник производства тепловой энергии работает на теплоснабжение группы зданий и связан транспортными устройствами с приборами потребления тепла);

– местные (потребитель и источник теплоснабжения находятся в одном помещении или в непосредственной близости).

По роду теплоносителя в системе:

– водяные;

– паровые.

По способу подключения системы отопления к системе теплоснабжения:

– зависимые (теплоноситель, нагреваемый в теплогенераторе и транспортируемый по тепловым сетям, поступает непосредственно в теплопотребляющие приборы);

– независимые (теплоноситель, циркулирующий по тепловым сетям, в теплообменнике нагревает теплоноситель, циркулирующий в системе отопления).

По способу присоединения системы горячего водоснабжения к системе теплоснабжения:

– закрытая (вода на горячее водоснабжение забирается из водопровода и нагревается в теплообменнике сетевой водой);

– открытая (вода на горячее водоснабжение забирается непосредственно из тепловой сети).

## **1.2 Виды источников производства тепловой энергии**

Основными источниками централизованного теплоснабжения являются промышленные и коммунальные тепловые станции комбинированного производства тепла и электрической энергии – ТЭЦ, сооружаемые вблизи промышленных центров и городов [9]. Преобладающее число ТЭЦ имеет тепловые сети со средним радиусом действия 10÷15 км. В последние годы наметилась тенденция к увеличению протяженности сетей до 30÷50 км. Строительство ТЭЦ далеко за чертой города объясняется высокими требованиями санитарных норм к чистоте городов и воздушного бассейна, а

также экономическими выгодами приближения тепловых станций к местным топливным базам и водным источникам. Исследования специалистов привели к заключению, что допустимая дальность транспортировки тепла по тепловым сетям для городов с населением более 1 млн человек может быть увеличена до 100 км.

В тех районах, где сооружение ТЭЦ по технико-экономическим показателям нецелесообразно ввиду отсутствия необходимой концентрации тепловой и электрической нагрузок, централизованное теплоснабжение городов и рабочих поселков ведется от районных и промышленных котельных с радиусом действия тепловых сетей 2÷3 км [10]. Теплоснабжение сельских населенных мест отличается небольшой величиной тепловой нагрузки и рассредоточенной теплоплотностью. Ввиду этого централизованное теплоснабжение в сельской местности экономически целесообразно предусматривать от котельных с чугунными котлами при общей тепловой нагрузке на котельную не более 8÷10 МВт. В районных центрах с большими тепловыми нагрузками и имеющими крупные производственные зоны по переработке сельскохозяйственной продукции или выращиванию скота местные котельные оборудуют паровыми котлами. На отдельных предприятиях вместе с промышленными котельными часто используют энергетические установки, утилизирующие тепло вторичных энергоресурсов.

Капитальные вложения на сооружение современных ТЭЦ и крупных районных водогрейных котельных с тепловой мощностью до 220 МВт при полной автоматизации процессов в 2÷3 раза ниже затрат, связанных со строительством эквивалентных мощностей квартальных котельных, в связи с чем строительство квартальных котельных с 1958 г. повсеместно запрещено. Суммарный отпуск тепла с ТЭЦ и от районных котельных в дальнейшем будет непрерывно возрастать за счет преимущественного строительства крупных ТЭЦ [9].

На этапе массового жилищного и промышленного строительства возрастающая потребность в тепловой энергии должна решаться на базе источников с большой присоединенной тепловой мощностью. Однако ввод таких источников тепла в центральных районах с высокой плотностью населения все более сдерживается из-за опасности загрязнения воздушного бассейна и сокращающихся запасов органического топлива. Значительные трудности возникают и с выбором территорий под большие хранилища топлива, транспортные коммуникации с круглосуточным движением транспорта для доставки топлива на тепловые станции и размещением высоких дымовых труб.

Сооружение атомных станций теплоснабжения (АСТ) дает многие преимущества. Опыт Нововоронежской атомной станции показал широкую возможность повторного использования выгружаемых из водо-водяных реакторов отработавших тепловыделяющих элементов для дожигания ядерного горючего в АСТ. Остаточная концентрация ядерного топлива в выгружаемых на АЭС тепловыделяющих элементах становится недостаточной для выработки пара высоких давлений, но этот остаточный энергетический потенциал вполне пригоден для реализации в АСТ для нагрева сетевой воды.

В районах Кавказа, Сибири и Дальнего Востока успешно используют геотермальные воды для теплоснабжения населенных мест и парникового хозяйства. Эксплуатация, например, только одной скважины, от которой тепло поступает в несколько кварталов г. Тбилиси с населением 5 тыс. человек, позволила сэкономить в год 64,8 млн м<sup>3</sup> природного газа, 9 млн кВтч электроэнергии и 3 млн м<sup>3</sup> питьевой воды. С 1967 г. работает на дешевой энергии подземных источников Камчатки Паужетская геотермальная электростанция. На опытно-промышленных геотермальных электрических станциях (ГеоТЭС) используется вода гейзеров с температурой от 40 до 200 °С и выше. Вода преобразуется в пароводяную смесь или пар с перегревом до 200 °С.

Другим перспективным естественным источником тепла является лучистая энергия Солнца. Потенциальные мировые энергетические ресурсы солнечного излучения вследствие его постоянной возобновляемости безграничны. По оценке специалистов, годовые запасы возобновляемой энергии солнечного излучения составляют около 52 % от всех используемых возобновляемых и невозобновляемых источников энергии. Экспериментальные гелиоустановки на юге Средней Азии и в других районах показали возможность применения лучистой энергии Солнца для теплоснабжения коммунально-бытовых потребителей и промышленных предприятий. Особенно заметны преимущества гелиоустановок в летний период, когда в различных санаториях, домах отдыха, пионерских и спортивных лагерях на горячее водоснабжение расходуется огромное количество топлива, сжигаемого в мелких временных котельных.

Сегодня из-за проблем, связанных со старением и износом тепловых сетей в городской черте, а также в частном секторе, получили широкое распространение бытовые отопительные котлы.

Прямое назначение бытовых котлов – обогрев небольших помещений: индивидуальных домов, дач, коттеджей, а также квартир. В качестве дополнительной услуги – получение горячей воды для хозяйственных нужд.

Все бытовые котлы являются водогрейными, низкотемпературными (температура меньше 100 °С) и относятся к классу котлов малой мощности (теплопроизводительность – от 4 до 65 кВт).

Бытовые котлы используются везде, где нет поблизости сети центрального отопления или подключение к ней слишком дорого. В связи с большим спросом на бытовые отопительные котлы существует и большое предложение. Поэтому производством котлов этого класса занимается значительное число крупных фирм. Отсюда и большое количество марок и модификаций бытовых котлов.



Однако все эти марки и модификации можно разделить по ряду параметров, определяющих эффективность использования котлов в различных обстоятельствах.

Основные параметры, по которым классифицируются бытовые отопительные котлы:

- по типу применяемого топлива;
- по материалу теплообменника;
- по способу установки;
- по возможности получения горячей воды для хозяйственных нужд.

В зависимости от способа подогрева горячей воды в отопительном оборудовании котлы разделяются на одноконтурные и двухконтурные. Как правило, такое деление в первую очередь относится к газовым котлам отопления.

Одноконтурные котлы предназначены только для обогрева помещений и не располагают системой, обеспечивающей горячее водоснабжение дома. Правда, с подключением водяного теплообменника выносного бойлера и они могут выполнять функцию нагрева воды. Такой вид котельного оборудования дешевле двухконтурных аналогов и используется в небольших частных домах. Двухконтурные котлы выполняют две функции: обогрев дома и нагрев воды. Такое название котлы получили потому, что в их конструкции имеется два контура: один отвечает за отопление, второй – за нагрев проточной воды. Наибольшее распространение получили газовые двухконтурные котлы, которые работают на природном или сжиженном газе. Обычно они обладают мощностью от 20 до 30 кВт, при этом обеспечивая дом около 10–14 л воды. Для увеличения количества горячей воды котел можно оборудовать бойлером.

В зависимости от типа применяемого топлива выделяют следующие котлы.

Газовые. Работают на природном газе или при конструктивных возможностях на сжиженном газе. Это наиболее экономичные котлы в

настоящее время. Имеют малый выброс вредных веществ в атмосферу и наиболее полное сгорание топлива.

Газовые котлы – самый распространенный тип котлов во всем мире. Примерно половина всех продаваемых котлов – газовые. И это неслучайно, ведь газ – самое дешевое топливо на сегодняшний день. Поэтому если рядом с домом проходит газовая магистраль, то применение именно газового котла оптимально в подавляющем большинстве случаев.

Газовые котлы, в свою очередь, тоже имеют свою классификацию: атмосферные и вентиляторные.

Атмосферные котлы – наиболее простые газовые котлы. Процесс горения и выброс газов осуществляется за счет естественной тяги дымохода. Атмосферные котлы наиболее предпочтительны при мощности до 100 кВт. Достоинства атмосферных котлов: не требуют электричества для своей работы, обладают наименьшей шумностью, это наиболее дешевый вид газовых котлов. Недостатки: нестабильность работы при низких давлениях магистрального газа.

Вентиляторные (наддувные) котлы. В вентиляторных котлах камера сгорания находится под давлением.

Вентиляторные котлы по принципу своей работы весьма близки к котлам дизельным, поэтому многие типы вентиляторных котлов позволяют устанавливать вместо газовой дизельную горелку, кроме того, существуют универсальные горелки, способные работать как на газе, так и на дизельном топливе. Достоинства вентиляторных котлов: способность работать при пониженном давлении магистрального газа. Недостатки: повышенная шумность, зависимость от электроэнергии, стоимость на 30 % больше, чем у атмосферных котлов.

Дизельные (жидкотопливные) котлы. Работают на дизельном топливе. По сути, это те же газовые котлы, только газовая форсунка в них заменена на форсунку, которая подает жидкое топливо. Поэтому их в основном используют там, где не подведен магистральный газопровод. Дизельные

котлы характеризуются высоким уровнем коэффициента полезного действия, поэтому могут нагреть даже самые большие коттеджи и загородные дома.

Дизельные котлы имеют существенный недостаток: дизельное топливо достаточно более дорогое в сравнении с газовым и сравнимо по цене с электричеством на малых отапливаемых площадях. К тому же котлы на дизельном топливе более подвержены засорению теплообменника сажей, что мешает нормальной работе котла и приводит к снижению эффективности системы отопления в целом. Имеет смысл устанавливать дизельные котлы, когда нет возможности провести газ и площадь отапливаемого помещения выше 100 м<sup>2</sup>. Для отопления небольших домов и дач целесообразнее применять электродкотлы или электроконвекторы (если это позволяют электросети).

Твердотопливные котлы. Работают на твердом топливе различного вида – угле буром либо каменном, дровах, торфяных брикетах и даже опилках. Котлы этого типа просты и неприхотливы, пользуются большой популярностью и сравнительно дешевы, т. к. работают на недорогом твердом топливе.

Твердотопливные котлы получили заслуженное признание из-за доступности и относительной дешевизны используемого топлива. Благодаря тому, что в качестве источника энергии выступают привычные для всех уголь или дрова, котлы на твердом топливе характеризуются как одни из самых простых в эксплуатации видов теплотехники. Котёл на твёрдом топливе может использоваться даже там, куда не подведены ни газопровод, ни линия электропередач – они полностью автономны. Это преимущество твердотопливных отопительных котлов в сочетании с невысокой стоимостью котла, доступностью и дешевизной топлива обуславливает их популярность в России. Однако твердое топливо имеет некоторые специфические недостатки. Самый главный из них – это то, что отопительный твердотопливный котел сильно затрудняет автоматическую подачу твердого топлива в топку котла. В среднем одной закладки котла на твердом топливе,

будь то дрова или уголь, хватает от 6 до 8 часов. Это означает, что после того как вечерняя закладка твердотопливного котла прогорает (примерно в 6 часов утра), система начинает остывать. Кроме этого, существует необходимость регулярной чистки камеры сгорания; низкий (например по сравнению с котлами на жидком топливе) КПД; низкая экологичность (за счет неполного сгорания топлива твердотопливный котел выбрасывает в атмосферу довольно много вредных веществ). Практически любой отопительный твердотопливный двухконтурный котел можно перевести на газовое топливо. Для этих целей большинство заводов, выпускающих твердотопливные котлы, производят или заказывают газовые горелки специально для своих твердотопливных двухконтурных котлов. Несмотря на широкое распространение котлов на газе и электричестве, твердотопливные котлы имеют большую популярность.

Электрические котлы чаще всего используются в частных домах. Это связано с их специфическими преимуществами, прежде всего с их невысокой ценой. Электрический котёл стоит в несколько раз дешевле, чем дизельный, газовый и т. д. Это позволяет приобретать их представителям любого класса населения.

Следующее преимущество – это простой монтаж и отсутствие надобности в использовании услуг профессиональных мастеров по установке отопительного оборудования. За такими котлами уход минимален. Простота в управлении – современные электрические котлы снабжаются большим количеством систем, управление которыми сводится к нажатию одной или двух кнопок, вынесенных на переднюю панель управления. Все основные регулирующие функции на себя берёт «умная электроника», которая работает согласно одной из заданных программ. Электрические отопительные котлы обычно размещаются на стене. Это стало возможным благодаря их небольшим габаритам. При этом не страдает полезная площадь помещения. Особенно это актуально для небольших домов, в которых и принято устанавливать электродкотлы. Кроме того, в отличие от газовых и

твёрдотопливных электрические котлы не нуждаются в подведении дымохода. Электрокотлы являются полностью экологически чистыми приборами, которые не выделяют в окружающую среду вредные вещества. Они максимально безопасны по сравнению с газовыми или твёрдотопливными котлами, у которых имеется открытый доступ к огню. В то же время электрокотлы обладают рядом недостатков. Во-первых, это большие энергозатраты. Электрический котёл расходует порядка 1 кВт на обогрев 10 м<sup>2</sup>. Поэтому их использование в больших домах просто нецелесообразно, т. к. они не смогут обеспечить оптимальную температуру, особенно в зимнее время. Во-вторых, у электрических котлов довольно низкий КПД, что является значительным минусом, т. к. происходит перерасход электроэнергии. В некоторых регионах очень часты перебои с электроэнергией, а в зимний период это недопустимо для котлов такого типа. Стоимость производства электроэнергии довольно высока, поэтому постоянно обогревать даже небольшое помещение – дорогое удовольствие. Поэтому распространение электрических котлов идёт не такими большими темпами, как других систем отопления. Тем не менее, несмотря на это, электрические котлы широко применяются в загородных домах, которые используются не для сезонного проживания.

Рассмотрим классификацию котлов по материалу теплообменника.

Теплообменник – сердце котла, важнейший элемент, в котором происходит нагрев теплоносителя. По материалу теплообменника котлы подразделяются на котлы с чугунным теплообменником и со стальным.

Чугунные котлы. Срок службы чугунных котлов около 25÷35 лет, стальных – примерно 15÷25 лет.

Чугун имеет более высокую коррозионную стойкость, чем сталь. С другой стороны, чугун – материал достаточно хрупкий и боящийся ударов. Это обстоятельство имеет существенное значение при транспортировке, где при погрузках-разгрузках довольно сложно избежать ударов.

Чугун имеет высокую тепловую инерцию, т. е. после нагрева тепло сохраняется в течение длительного времени, обладает повышенной коррозионной стойкостью к химически активным средам, шламу.

Чугун – хрупкий материал, не работает на изгиб и растяжение и крайне капризен по отношению к температурным неравномерностям, в т. ч. к колебаниям температуры стенки. Отсюда возникают жесткие тепловые требования к работе чугунных котлов. Для них, как правило, требуется гарантированное принудительное охлаждение котла (с помощью циркуляционного насоса). Чугунные котлы по сравнению со стальными котлами имеют более высокий вес и большие габариты.

Чугунные котлы боятся разницы температур на входе и выходе (т. е. в чугунные котлы нельзя подавать слишком холодный теплоноситель). Поэтому при использовании чугунных котлов необходим узел подмеса горячей воды к воде на входе. Теплообменник чугунных котлов всегда состоит из отдельных секций. За счет своей массы чугунные котлы обладают высокой тепловой инерцией.

Чугунные котлы чаще всего предназначаются для сжигания угля или дров, однако их несложно перевести и на сжигание жидкого топлива или газа. Для этого меняется передняя плита и устанавливается соответствующая горелка.

Котлы данного класса обычно универсальны, т. е. при установке соответствующей газовой горелки работают на природном газе низкого давления.

Стальной котел. Сталь – пластичный материал, хорошо работает как на сжатие-растяжение, так и на изгиб, поэтому он легко справляется с большими перепадами температур. Стальной котел не столь хрупок, как чугунный, и обладает хорошей стойкостью к ударам, вследствие чего транспортировка его более безопасна. Стальные котлы представляют собой цельносварную конструкцию, обладающую ресурсом 15÷25 лет.

Стальные котлы обладают более эстетичным внешним видом, что немаловажно при отоплении дачи, коттеджа. Что касается стоимости, то, по одним источникам, чугунные котлы дороже стальных, а по другим – наоборот. По-видимому, все зависит от конкретной марки котла.

С недавних пор появились и медные теплообменники. У таких теплообменников распределение температуры по стенкам теплообменника практически равномерное (за счет высокой теплопроводности меди) и нагрев воды происходит без локальных перегревов. Тем самым, образование отложений кальция в теплообменнике минимально.

Медные теплообменники легкие и стойкие к коррозии. В связи с этим и вся конструкция котла становится легче. Котел с теплообменником небольшого объема и веса безопаснее, система отопления с таким котлом быстрее реагирует на команды автоматики. В теплообменниках малой емкости теплоноситель при нагревании продвигается с большей скоростью, это препятствует образованию накипи на стенках теплообменника.

У этих котлов имеется еще один очевидный плюс – очень высокий КПД, невозможность коррозии и пластичность. Но имеется и большой недостаток у таких котлов – стоят они очень дорого.

По способу установки котлы делятся на настенные и напольные.

Настенные котлы идеально подходят для отопления квартиры или жилого дома и приготовления горячей санитарно-технической воды. Они отвечают всем текущим требованиям по минимуму занимаемого места. По сравнению с напольным котлом настенный котел имеет меньшие габариты и не занимает большую площадь, т. к. устанавливается на стену. Он легко устанавливается в кухне, в ванной комнате или на чердаке.

Основной и, пожалуй, единственный недостаток подобных котлов по сравнению с напольными – его малая мощность, которая обычно варьируется от 12 до 45 кВт. Впрочем, это можно назвать не недостатком, а ограничением. Во всем остальном среди большого количества моделей и

выпускающих фирм можно найти подходящее изделие, удовлетворяющее самым изысканным требованиям.

Настенные котлы иногда называют мини-котельными. И действительно, в одном небольшом корпусе компактно размещаются и горелка, и теплообменник, и управляющее устройство. У большинства моделей имеются циркуляционные насосы, один или два, расширительный бак, термометр, манометр, автоматика безопасности настенного котла и еще много других составляющих, которые все вместе и являются современной котельной.

Настенные газовые котлы управляются автоматически. Вы можете задать любой температурный режим в разное время суток. Настенные газовые отопительные котлы самостоятельно отключаются при прекращении подачи газа и включаются при ее возобновлении. Таким образом, управлять работой настенного котла легко и комфортно. Имеется и другое преимущество настенных котлов перед остальными – простота их монтажа. Монтаж всей системы обходится гораздо дешевле, чем установка традиционного напольного теплооборудования.

Напольные котлы обычно используются в больших помещениях производственного типа, офисах или в частных жилищах, где есть достаточно места для установки такого котла.

Основным преимуществом напольных котлов перед настенными является более широкая линейка мощностей (до 100 кВт и более). Некоторые из наиболее мощных котлов этого типа уже могут выполнять роль небольших промышленных котлов. В связи с этим напольные котлы имеют довольно большой вес – 100 кг и более.

Как отмечалось выше, в районах с дорогим привозным топливом, где сооружение котельных нецелесообразно, допускается электрическое теплоснабжение зданий. Электрическое отопление и горячее водоснабжение отвечает основным тенденциям современного технического прогресса, т. к. позволяет осуществить идею единого энергетического ввода в здание, при



котором с наибольшей точностью может быть достигнуто автоматическое регулирование заданных режимов потребления энергии. Однако повсеместное применение электрического обогрева помещений неэкономично ввиду перерасхода топлива на выработку электроэнергии. В этой ситуации необходимо решать важнейшую задачу по экономии и рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Кроме альтернативных и возобновляемых источников, эффективным энергосберегающим мероприятием является разработка и внедрение теплонасосных и комбинированных установок в системах теплоснабжения и теплохладоснабжения объектов промышленного и гражданского строительства.

Основное назначение тепловых насосов (ТН) – это отопление и горячее водоснабжение с использованием природных низкопотенциальных источников тепла и «сбросного» тепла промышленности и коммунально-бытового сектора.

К достоинствам ТН относится повышенная надежность теплоснабжения по сравнению с централизованными системами теплоснабжения.

Строительство протяженных теплотрасс к удаленным объектам, а также к объектам в районах с малой плотностью застройки сопряжено со значительными капитальными вложениями и большими тепловыми потерями на трассе. Их дальнейшая эксплуатация также требует больших затрат. Серьезные проблемы возникают и при реконструкции существующих объектов и строительстве новых в обжитых городских районах с плотной застройкой. В этих случаях увеличение тепловых нагрузок создает для застройщика часто непреодолимые трудности, в т. ч. финансовые, при получении и реализации технических условий на подключение к районной тепловой сети.

Действующие в настоящее время тарифы на тепловую энергию в сочетании с затратами на подключение к городским тепловым сетям

заставляют все чаще задумываться над альтернативными способами теплоснабжения [11], а также над повышением эффективности использования имеющихся ресурсов [12].

Ключевым вопросом, от которого в значительной степени зависит эффективность применения тепловых насосов, является вопрос об источнике низкопотенциального тепла. Таким источником мог бы быть атмосферный воздух. Однако в зимнее время, когда тепловая нагрузка возрастает, его температура природно-климатических условиях становится слишком низкой, чтобы обеспечить эффективную работу теплового насоса. Идеальный вариант для тепловых насосов – наличие вблизи от потребителя источника «сбросного» тепла промышленного или коммунального предприятия. В условиях хозяйствования такие случаи нередки. Тем не менее эти случаи следует рассматривать как частные.

В качестве довольно универсального источника низкопотенциального тепла можно использовать теплоту грунта [13; 14; 15]. Известно, что на глубине 4–5 м и более температура грунта в течение года практически постоянна и соответствует среднегодовой температуре атмосферного воздуха. В климатических условиях Украины эта температура составляет  $+10\div 15$  °С, что весьма неплохо для использования в тепловых насосах. Большой опыт практического применения тепловых насосов с грунтовыми теплообменниками накоплен в США и Канаде [11].

Хотя за последние несколько десятков лет во всем мире резко возросло производство тепловых насосов, но в нашей стране ТНУ до настоящего времени не нашли широкого применения.

Причин здесь несколько:

- традиционная ориентация на централизованное теплоснабжение;
- неблагоприятное соотношение между стоимостью электроэнергии и топлива;

– изготовление ТН осуществляется, как правило, на базе наиболее близких по параметрам холодильных машин, что не всегда приводит к оптимальным характеристикам ТН.

Проектирование серийных ТН под конкретные характеристики, принятые за рубежом, существенно повышает как их эксплуатационные, так и энергетические характеристики.

Рост производства теплонасосного оборудования в США, Японии, ФРГ, Франции, Англии и других странах базируется на производственных мощностях холодильного машиностроения. Выпускаемые в этих странах ТН применяются, в основном, для теплоснабжения и горячего водоснабжения жилищного, торгового и промышленного секторов.

Теплоснабжение школ, торговых центров, бассейнов осуществляется ТН теплопроизводительностью до 40 кВт, выполненными на базе поршневых и винтовых компрессоров. Только в США, например, эксплуатируется свыше 4 млн ед. ТН небольшой, до 20 кВт производительности тепла на базе поршневых или ротационных компрессоров. Для теплоснабжения районов, городов требуются крупные ТН на базе центробежных компрессоров с  $Q_v$  свыше 400 кВт. В Швеции из 130 тыс. работающих ТН более 100 шт. имеют теплопроизводительность 10 МВт и более. В Стокгольме теплоснабжение на 50 % производится от ТН.

В промышленности ТН утилизируют низкопотенциальное тепло промышленных процессов.

Анализ возможности применения ТН в промышленности, проведенный на предприятиях 100 шведских компаний, показал, что наиболее подходящей сферой для применения ТН являются предприятия химической, пищевой и текстильной промышленности.

На многих предприятиях химической промышленности при охлаждении высокотемпературных аппаратов основных технологических производств (реакторов, печей и т. д.) образуется большое количество воды с температурой  $t = 30\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$ .

Вода с такой температурой практически полезно не используется, а, охлаждаясь в градирнях, приводит к большим потерям тепла, которые при увеличении его температурного потенциала могут быть использованы в качестве вторичных энергоресурсов на этих предприятиях.

### **1.3 Классификация потребителей тепловой энергии**

По режиму потребления тепла в течение года различают две группы потребителей [14; 15; 16]:

1) сезонные потребители, нуждающиеся в тепле только в холодный период года, с зависимостью расхода тепла в основном от температуры наружного воздуха;

2) круглогодичные потребители, нуждающиеся в тепле весь год, со слабовыраженной в большинстве случаев зависимостью расхода тепла от температуры наружного воздуха.

К первой группе относятся системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, ко второй – системы горячего водоснабжения и технологические установки. Если для систем кондиционирования воздуха искусственный холод в теплый период года вырабатывается на основе использования тепловой энергии абсорбционным или эжекторным методами, то такие системы входят во вторую группу.

Потребителей, получающих тепло от централизованной системы теплоснабжения, называют абонентами этой системы, а расходуемое абонентами тепло – тепловой нагрузкой источника тепла.

В зависимости от соотношения и режимов отдельных видов теплоснабжения различают 3 характерные группы потребителей:

– жилые здания (характерны сезонные расходы тепла на отопление, вентиляцию и круглогодичный – на горячее водоснабжение);

– общественные здания (сезонные расходы тепла на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха);

– промышленные здания и сооружения, в т. ч. сельскохозяйственные комплексы (все виды теплопотребления, количественное отношение между которыми определяется видом производства).

Для жилых зданий характерны сезонные расходы тепла на отопление и вентиляцию и круглогодичный расход тепла на горячее водоснабжение. В жилых зданиях не устраивают специальную приточную вентиляцию – свежий воздух поступает в помещения через форточки окон и неплотность в наружных ограждениях. Подогрев вентиляционного воздуха в этом случае возлагается на систему отопления. Для большинства общественных зданий основное значение имеют сезонные расходы тепла на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха. У промышленных абонентов, в т. ч. и сельскохозяйственной направленности, обычно имеются все виды теплопотребления, количественное соотношение между которыми определяется видом основного производства. Некоторые общественно-коммунальные предприятия, такие как бани, прачечные и т. п., по характеру теплопотребления следует рассматривать как производственные объекты.

Потребность абонентов в тепле не остается постоянной [16]. Расходы тепла на отопление и вентиляцию изменяются в зависимости от температуры наружного воздуха, на горячее водоснабжение – в зависимости от режима потребления горячей воды населением (при отсутствии у абонентов аккумуляторов горячей воды), в технологических установках – в зависимости от режима работы теплоиспользующего оборудования.

#### **1.4 Техничко-экономические показатели эффективности систем теплоснабжения**

Актуальность расчетов систем теплоснабжения определяется, прежде всего, необходимостью создания схем теплоснабжения поселений. Задача подробного технико-экономического анализа систем теплоснабжения возникает, с одной стороны, в связи со сложным устройством самих

исследуемых систем, а с другой – со стремлением как можно точнее оценить финансово-экономические и технические показатели их работы для создания систем, обеспечивающих наиболее экономичное бесперебойное теплоснабжение [17].

#### 1.4.1 Показатели эффективности

Все тепловая энергия, получаемая в теплогенерирующей установке, при сжигании топлива распределяется на полезно используемую (т. е. ту часть энергии, которая идет непосредственно на нагрев помещения) и тепловые потери в окружающую среду. Чтобы тепло стало полезным, его необходимо передать теплоносителю и распределить по системе отопления [18].

На каждой из стадий производства, регулирования и распределения тепла неизбежны его потери. Поэтому справедливо будет записать следующее равенство:

$$\eta_g = \eta_p \eta_d \eta_e \eta_c, \quad (1.1)$$

где  $\eta_g$  – общий коэффициент эффективности системы отопления;

$\eta_p$  – коэффициент эффективности теплогенерирующей установки;

$\eta_d$  – коэффициент эффективности распределения теплоты;

$\eta_e$  – коэффициент эффективности отопительных приборов;

$\eta_c$  – коэффициент эффективности регулятора системы.

Согласно европейским нормам, принято считать, что общий коэффициент эффективности системы отопления ( $\eta_g$ ) не должен быть ниже определенного значения, которое вычисляется по формуле

$$\eta_g = 65 + 3 \lg(N_{nom}), \quad (1.2)$$

где  $\lg(N_{nom})$  – десятичный логарифм от номинальной мощности котла.

Мощность котла выражается в киловаттах. Для примера минимально допустимый общий коэффициент эффективности для системы отопления, оборудованной котлом мощностью 23 кВт, составляет

$$\eta_g = 65 + 3\log(23) = 69,1.$$

Иными словами, минимально допустимый общий коэффициент эффективности большинства систем отопления, оборудованных навесными котлами, должен превышать 69,1 %.

Из равенства (1.1) очевидно, что снижение любого из коэффициентов эффективности приводит к снижению общего коэффициента эффективности системы отопления.

Наглядно это иллюстрирует график (рис. 1.1), из которого видно, насколько общий коэффициент эффективности системы отопления зависит от каждого из множителей уравнения.

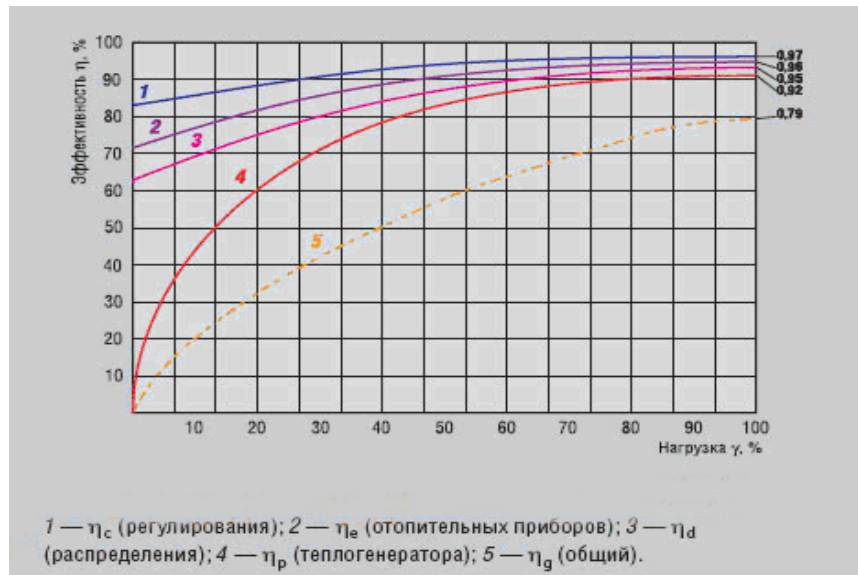


Рисунок 1.1 – Зависимость эффективности системы отопления от нагрузки

Для примера рассмотрим показатели современной системы отопления, спроектированной и собранной согласно всем нормам и правилам. В ней используются такие показатели:

– коэффициент эффективности теплогенерирующей установки  $\eta_p = 0,89$ ;

– коэффициент эффективности распределения теплоты  $\eta_d = 0,95$ ;

– коэффициент эффективности отопительных приборов  $\eta_e = 0,96$ ;

– коэффициент эффективности регулятора системы  $\eta_c = 0,97$ .

Общий коэффициент эффективности системы

$$\eta_g = \eta_p \eta_d \eta_e \eta_c = 0,89 \times 0,95 \times 0,96 \times 0,97 = 0,79.$$

Как видно из рис. 1.1, наибольший коэффициент эффективности получается при 100-процентной нагрузке системы отопления, т. е. при максимальной мощности теплогенерирующей установки, которая закладывается из расчета на минимальную температуру наружного воздуха в самый холодный период.

Поскольку средняя температура наружного воздуха за отопительный период значительно выше минимальной, то, соответственно, снижается и тепловая нагрузка отопительной системы, а следовательно, и общий коэффициент эффективности системы. В среднем за отопительный период общая эффективность системы отопления может составлять порядка 40÷50 % от ее максимального значения. Для упрощения принято считать, что среднее значение общего коэффициента за отопительный период составляет 50 % от ее значения при максимальной нагрузке.

Рассмотрим, как изменяются составляющие общего коэффициента эффективности системы отопления при разных условиях.

Эффективность регулирования:

$\eta_c = 0,98$  – эффективное терморегулирование;



$\eta_c = 0,93$  – частичное терморегулирование;

$\eta_c = 0,85$  – без терморегулирования.

Эффективность отопительных приборов:

$\eta_e = 0,98$  – конвекторы с принудительной циркуляцией воздуха;

$\eta_e = 0,97$  – хорошо отрегулированные панели лучистого обогрева (напольное отопление);

$\eta_e = 0,96$  – хорошо отрегулированные радиаторы.

Эффективность распределения:

$\eta_d = 0,95 \div 0,96$  – хорошо утепленные трубопроводы;

$\eta_d = 0,80 \div 0,95$  – плохо утепленные трубопроводы;

$\eta_d = 0,70 \div 0,80$  – неутепленные трубопроводы.

Эффективность теплогенерирующей установки:

$\eta_p = 0,70 \div 0,90$  – в зависимости от типа котла, качества его настройки, размеров, мощности и т. д.

Следует уделить внимание первому множителю: за последние несколько десятилетий наметился значительный прогресс в регулировании систем отопления. Этому способствовало развитие схем управления системами отопления, а также совершенствование материальной базы, что позволило значительно повысить эффективность процесса регулирования.

Сегодня основным фактором, влияющим на снижение эффективности централизованных систем отопления, является износ трубопроводов.

На практике при отсутствии мероприятий по ремонту и обслуживанию согласно нормативным требованиям тепловые потери трубопроводов существенно зависят от качества и состояния тепловой изоляции [19]. В [20] проведен сравнительный анализ тепловых потерь, который показывает, что полное намочение изоляции на основе минеральной ваты приводит к увеличению тепловых потерь в 11 раз. Многочисленные проверки состояния тепловых сетей в различных городах Украины и стран СНГ свидетельствуют

о том, что фактические тепловые потери в десятки и сотни раз превышают нормативные.

Другой вид потерь тепловой энергии связан с утечками теплоносителя. Согласно [21], нормированное значение потерь теплоносителя не должно превышать 0,0025 кг/(ч\*м). Фактическое состояние трубопровода таково, что данные потери существенно выше и по практическим данным могут достигать значения 0,01 кг/(ч\*м).

В [22] приводятся результаты обследований различных тепловых сетей. По результатам этих обследований делается вывод, что до 50 % тепла может просто не доходить до конечного потребителя из-за повреждения либо отсутствия изоляции и из-за утечек теплоносителя.

#### 1.4.2 Показатели надежности

Надежность является важным показателем, определяющим потребительские свойства систем теплоснабжения [23; 24; 25; 26; 27]. Под надежностью (безотказностью работы) системы отопления понимается ее способность обеспечивать и поддерживать в обслуживаемом помещении требуемые значения параметров микроклимата в заданный период времени, а под отказом – состояние, когда значения этих показателей вышли за заданные пределы.

Надежность является вероятностной характеристикой работы систем теплоснабжения и зависит, в основном, от выбранной производительности систем и надежности работы оборудования

$$P_{ст} = P_{пр} P_{об}, \quad (1.3)$$

где  $P_{ст}$  – надежность системы теплоснабжения;

$P_{пр}$  – надежность выбора производительности системы;

$P_{об}$  – надежность работы оборудования.

При определении надежности работы систем теплоснабжения следует учитывать, что практически любая система обладает временной избыточностью, т. е. создаваемый ею эффект не исчезает мгновенно при прекращении работы системы [28]. Величина временной избыточности зависит от теплоинерционных качеств помещения, его объема, диапазона и интенсивности изменения нагрузок на систему. Сегодня практически ни один нормативно-методический документ не касается этого вопроса, хотя необходимые исследования для практических расчетов имеются. Вместе с тем на практике временная избыточность часто используется при регулировании работы систем, например при регулировании систем отопления «пропусками», использовании режима натопа, включения в работу систем вентиляции после достижения в помещении концентрации вредных веществ, равной ПДК, и т. п.

При выборе производительности систем основными факторами при известных объемно-планировочных и конструктивных решениях здания являются температура наружного воздуха, интенсивность солнечной радиации и величина технологических нагрузок, как правило, внутренних тепло- и газовыделений. Необоснованный количественный выбор этих факторов может привести к отказу в работе систем теплоснабжения или неоправданному «запасу» мощности систем. Например, принимая в качестве расчетной для систем отопления температуру наружного воздуха с обеспеченностью 0,92, в практике проектирования, как правило, не проверяется, какая температура воздуха будет в конкретном помещении в период резкого похолодания, когда температура наружного воздуха будет ниже расчетной. Расчет отопительной нагрузки в жилых домах сегодня в соответствии со СНИП 2.04.05-91 проводится с учетом внутренних тепловыделений, величину которых предписывается принимать не менее 10 Вт на 1 м<sup>2</sup> пола жилых помещений и кухонь. Оценка вероятного значения температуры внутреннего воздуха в квартирах жилых домов постройки после 1998 г. показывает, что для зданий, выше 6 этажей, в диапазоне значений

расчетной температуры наружного воздуха  $-25\dots-30$  °С температура внутреннего воздуха (при отсутствии тепловыделений и являющейся массовой сегодня нерегулируемой системе вентиляции) снизится до 12–13 °С, что вряд ли можно считать приемлемым.

Надежность работы оборудования систем отопления определяется его качеством, основным показателем которой может являться наработка на отказ. Учет временной избыточности систем при выборе оборудования и схемного решения позволяет установить вероятность возможных отказов в работе оборудования, установить регламенты его обслуживания и ремонта, предусмотреть на основе объективных расчетов необходимость резервирования или дублирования систем и их элементов. СНИП 2.04.05-91 содержит ряд указаний о необходимости резервирования систем, но, как правило, они не имеют объективного обоснования.

В современных условиях конкурентного рынка инвестору при выборе расчетных условий, схем и оборудования систем следует требовать от подрядчика обоснование предлагаемых решений с точки зрения эксплуатационной эффективности в сочетании с ценой.

Показатели надежности некоторых систем представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. – Показатели надежности систем отопления и вентиляции

№ п/п	Наименование системы	Показатель надежности, $P(\tau)$ *
1	Система воздушного отопления с нагруженным резервным отопительным агрегатом	$P(4776) = 0,91$
2	То же с ненагруженным резервным отопительным агрегатом	$P(4776) = 0,95$
3	То же с ненагруженным резервным вентилятором	$P(4776) = 0,52$
4	Система вытяжной механической вентиляции	$P(8760) = 0,51$
5	То же с резервным вентилятором	$P(8760) = 0,85$

\* время работы системы в течение года, ч

Временная избыточность системы отопления, т. е. время, за которое должна быть восстановлена ее работоспособность, составляет  $4\div 8$  ч. За этот период времени температура внутреннего воздуха не снизится ниже допустимых значений.

В последнее время энергосбережение (рациональное использование энергетических ресурсов) стало одной из ключевых проблем отрасли, и было бы неверным не согласиться с такой постановкой вопроса [29]. Сегодня ее решения, как правило, направлены на повышение теплозащиты ограждающих конструкций и эффективность теплоснабжения. Эти вопросы действительно актуальны, должны обеспечить устранение неоправданных потерь энергии, вызванных, как правило, изношенностью основных фондов и бесхозяйственностью. Здесь необъятное поле проблем – организационных, административно-правовых, финансовых; меньше инженерных.

Вместе с тем, по-видимому, ключевыми вопросами в деле эффективного использования энергии являются проблемы потребляющих систем – отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Здесь имеются широкие возможности для разработки рациональных схем и технических решений систем, обеспечивающих устранение или минимизацию зон, участков, помещений и зданий в целом с избыточным во времени и пространстве нагревом, охлаждением и вентилированием. Ряд исследователей считает, что именно это направление наиболее перспективно [23].

#### 1.4.3 Воздушно-тепловой режим

Минимально необходимый расход энергии на отопление и вентиляцию помещений будет иметь место в том случае, когда в любой момент времени в заданной точке или зоне помещения подача тепла и свежего воздуха соответствует минимально необходимым значениям, обеспечивающим с

заданной надежностью потребительские свойства систем, т. е. требуемые параметры микроклимата и чистоту воздуха.

Проектирование и строительство энергоэффективных систем отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) позволяют сократить эксплуатационные энергозатраты от 30 до 75 % без снижения уровня их комфортности и функциональности.

Обеспечение потребительских свойств и энергоэффективности систем ОВК связано с анализом процессов формирования, поддержания и управления воздушно-тепловым режимом (ВТР) помещений и здания в целом при изменяющихся в течение периода эксплуатации условиях [30].

ВТР является одной из основных характеристик помещений и зданий как среды обитания человека и условий нормального функционирования технологического процесса.

Под ВТР подразумевается совокупность полей параметров, характеризующих воздушно-тепловой микроклимат помещений: температуру воздуха и окружающих поверхностей, концентрацию содержащихся в воздухе примесей, включая пыль и влагу, скорость движения воздуха, ионный состав и т. п.

Теория ВТР в ее сегодняшнем виде была создана трудами отечественных ученых и инженеров В.Н. Богословского, О.Е. Власова, В.В. Константиновой, В.Д. Мачинского, С.И. Муромова, М.Я. Поза, Н.А. Селиверстова, Г.А. Селиверстова, Л.А. Семенова, Ю.А. Табунщикова, В.П. Титова, К.Ф. Фокина, А.М. Шкловера и мн. др.

Проектирование ВТР, способов его стабилизации, управления и оптимизации является основным инструментом для разработки технических решений систем ОВК.

«Идеальный» ВТР соответствует положению, когда в каждый момент времени в каждой точке помещения баланс тепла (холода) и воздуха (примесей) обеспечивает соответствие требуемым параметрам воздушно-теплого микроклимата.

«Оптимальному» ВТР будут соответствовать технические решения, при которых при обязательном соблюдении требуемых параметров воздушно-теплого микроклимата в обслуживаемой (рабочей) зоне ВТР помещения будет минимально отличаться от «идеального». Степень приближения «оптимального» ВТР к «идеальному» определяется не только знаниями и искусством проектировщика, но и экономическими факторами.

Условно можно разделить ВТР на естественный (пассивный) и искусственный (активный). Пассивный ВТР формируется как результат взаимодействия здания (формы, ограждающих конструкций) с наружным климатом; активный ВТР формируется как результат взаимодействия пассивного ВТР и систем обеспечения внутреннего воздушно-теплого микроклимата – систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Существенную, а часто определяющую в промышленных зданиях роль в формировании ВТР играет технологический процесс, который должен рассматриваться как фактор пассивного ВТР, если отсутствует возможность влияния на его характеристики, или активного ВТР, если такая возможность предусмотрена.

Знание закономерностей формирования и управления ВТР зданий позволяет решить ряд задач, в т. ч. социальных, в части формирования здоровой среды обитания; технологических, в части формирования необходимых условий функционирования технологического процесса; экономических, в части рационального расходования ресурсов, прежде всего, энергетических.

## 1.5 Выбор структуры объекта управления

Анализ тепловых сетей различных городов позволил выбрать структуру прототипа исследуемой системы теплоснабжения.

В качестве объекта управления был выбран городской район, состоящий из 200 жилых девятиэтажных домов на 72 квартиры. Тепловые потери одного дома составляют 204 кВт. Для обеспечения горячего водоснабжения в пике требуется 450 кВт.

Была синтезирована обобщенная структура сети. Ее фрагмент представлен на рис. 1.2.

Источником тепловой энергии для централизованного теплоснабжения является районная котельная мощностью 40 МВт. Из котельной в различных направлениях выходят 8 веток. Каждая ветка состоит из двух магистральных трубопроводов диаметром 300 мм для прямой и обратной воды. В каждой ветке на удалении 300 м друг от друга расположены 5 центральных тепловых пунктов (ЦТП). От каждого ЦТП отходит 3 трубопровода диаметром 100 мм. Они предназначены для прямой и обратной воды в системе отопления. К трубопроводу ЦТП на расстоянии 100 м друг от друга подключены 5 домов. При такой схеме максимальная протяженность трубопровода от котельной до конкретного дома составляет 2÷3 км.

Наряду с централизованной системой теплоснабжения было принято, что каждый дом снабжен крышной котельной. Дополнительно было принято, что в каждой квартире расположены газовый котел и теплонасосная установка.

Таким образом, объект управления представляет собой систему теплоснабжения с изменяемой структурой.



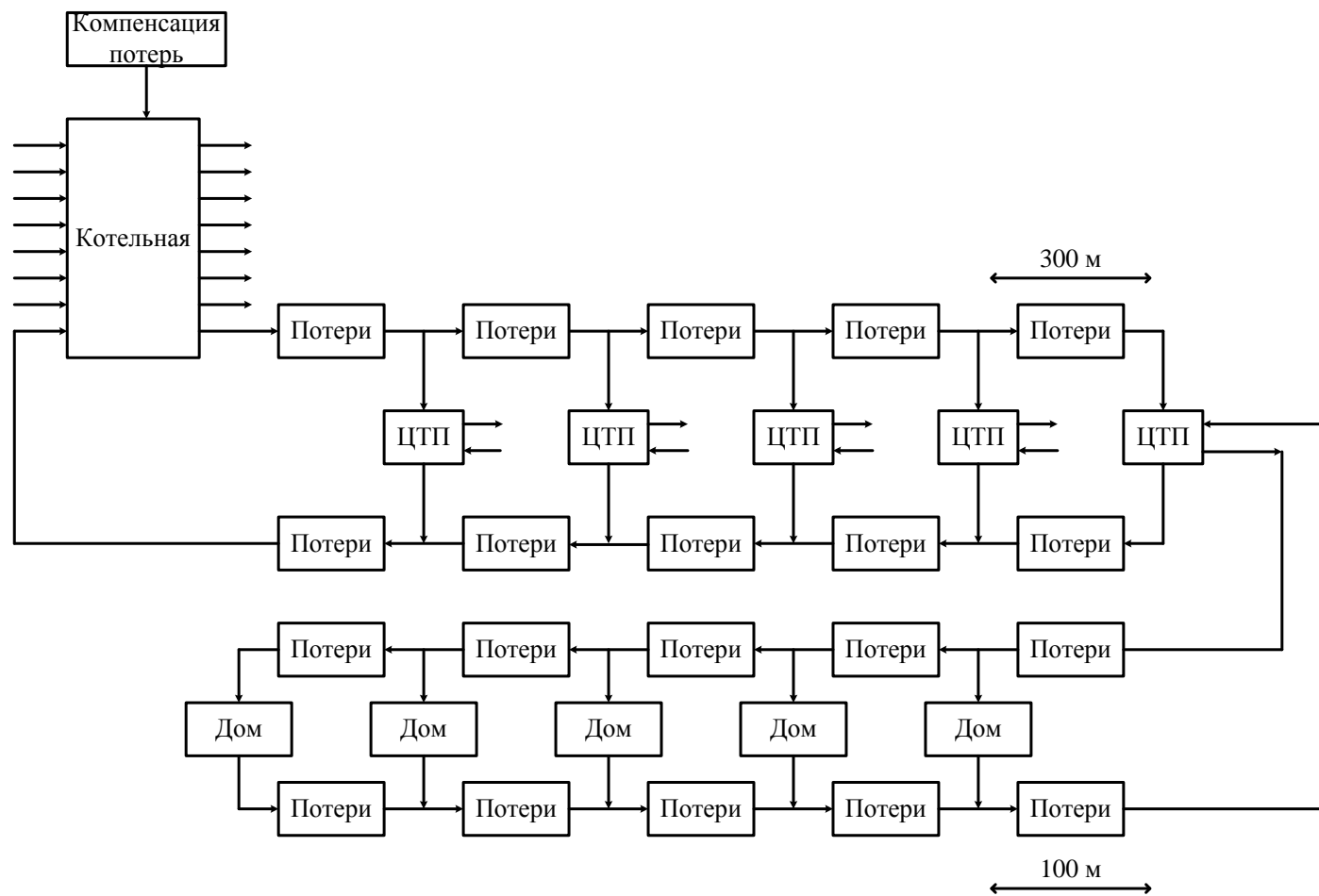


Рисунок 1.2 – Фрагмент структуры тепловой сети

## 1.6 Анализ методов управления системами с изменяемой структурой

### 1.6.1 Анализ метода управления по параметру

Замкнутая система управления состоит из объекта и автоматического устройства (рис. 1.3), которые соединены между собой прямой *ПС* и обратной *ОС* связями. По прямой связи к объекту подводится входное воздействие  $x$ , по обратной — выходная величина воздействует на автоматическое устройство [31].

Система такого вида работает по отклонению фактической величины  $y$  от заданного значения  $y_3$ .

Если назначение системы — поддерживать величину  $y$  около заданного значения при изменении внешнего воздействия  $f_{вн}$ , то такую систему называют системой автоматического регулирования (САР), а автоматическое устройство — автоматическим регулятором (АР).

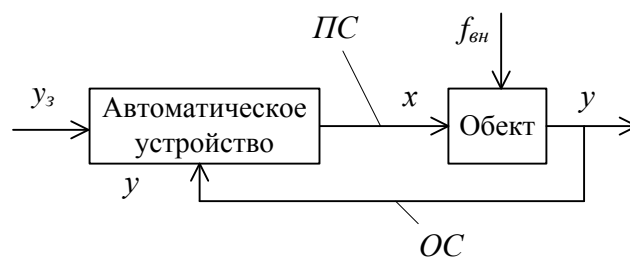


Рисунок 1.3 – Увеличенная схема замкнутой системы автоматизации

На рис. 1.4 представлена функциональная схема системы САР. В цепь прямой связи входят усилитель, исполнительный механизм и регулирующий орган. В цепь обратной связи включен чувствительный элемент. С помощью чувствительного элемента автоматический регулятор воспринимает регулируемую величину  $y$  и преобразует ее в величину  $y_n$  удобную для дальнейшей передачи. На один из входов элемента сравнения подается преобразованная величина  $y_n$ , а на другой его вход — сигнал  $y_3$  от

задатчика. Этот сигнал в преобразованном виде представляет собой Задание  $Z$  регулятору. В элементе сравнения осуществляется вычитание, в результате которого получается величина отклонения (рассогласования)  $\delta$ .

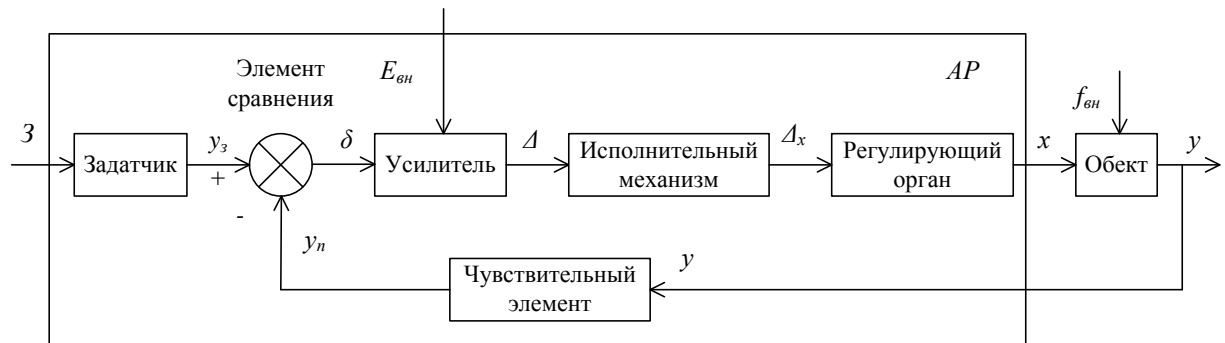


Рисунок 1.4 – Функциональная схема системы САР

Сигнал  $\delta$  является побуждающим для работы остальных элементов регулятора. В усилителе его мощность усиливается за счет подвода внешней энергии  $E_{вн}$  и в виде сигнала  $\Delta$  воздействует на исполнительный механизм, который преобразует усиленный сигнал отклонения в удобный для использования в виде энергии  $\Delta_x$  (чаще всего механический) и переставляет регулирующий орган. В результате изменяется подводимый к объекту поток энергии или вещества, что соответствует изменению регулирующего воздействия  $x$  [31].

Рассмотрим теперь вопросы управления котлами и тепловыми насосами. Данный процесс управления представляет собой классический пример управления по параметру. На рис. 1.5 представлены примеры схем типовых систем автоматического регулирования для водогрейных котлов.

Совместная работа всех локальных систем регулирования позволяет котлу реализовывать свое функциональное назначение, адаптируясь к изменениям внешней среды, и поддерживать оптимальный режим работы. На рис. 1.6 представлен пример многомерной АСР для барабанного котла, в которой управление также осуществляется по параметрам.

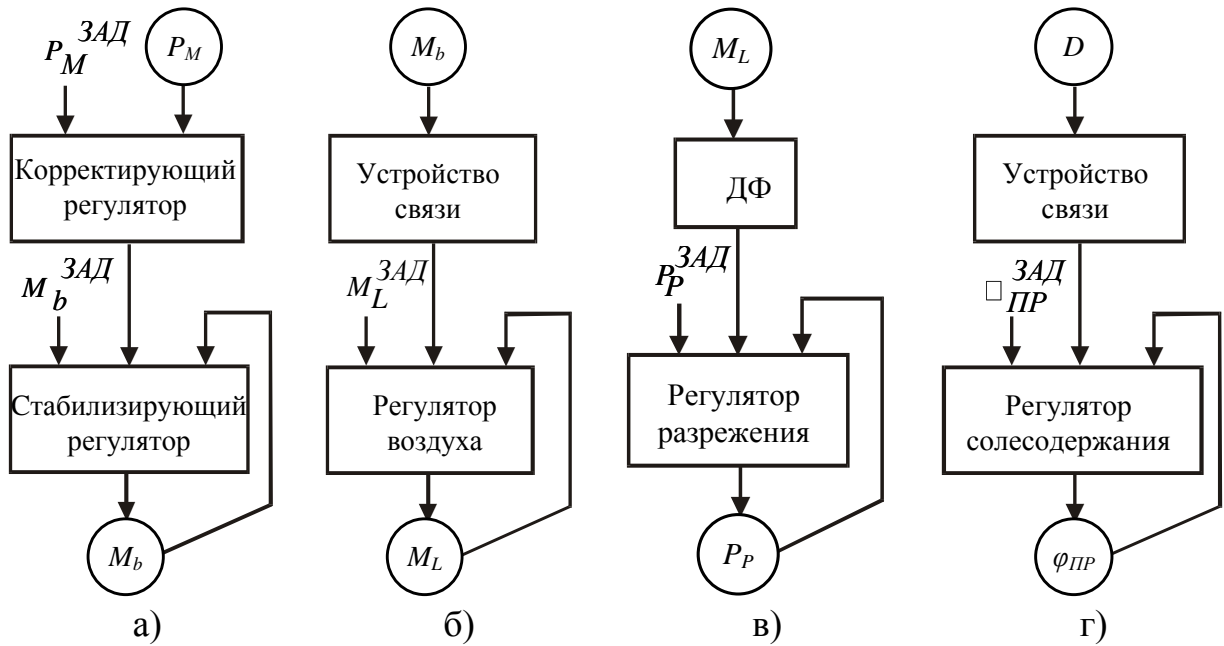


Рис. 1.5 – Типовые схемы локальных АСР барабанного котла: а) – АСР тепловой нагрузки; б) – АСР общего воздуха; в) – АСР разрежения; г) – АСР соленосодержания

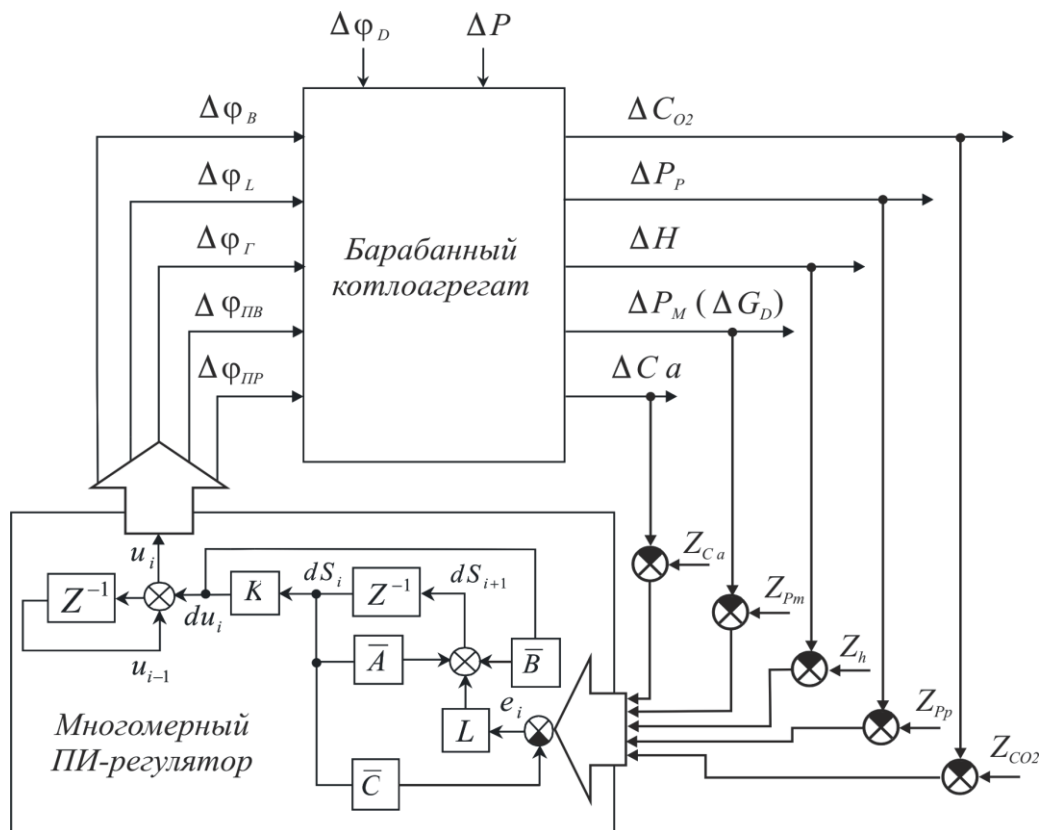


Рис. 1.6 – Многомерная АСР управления барабанным котлом

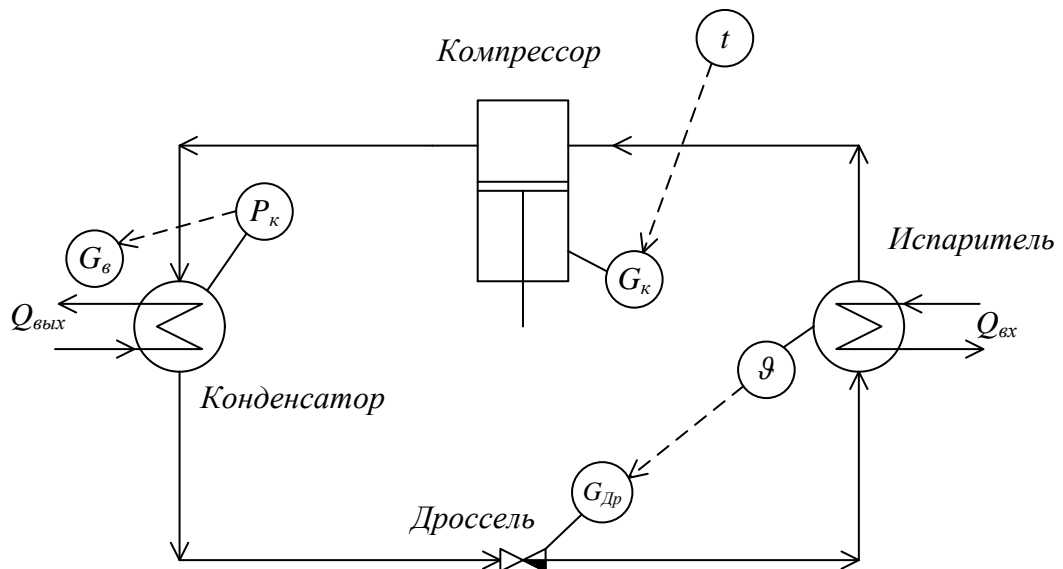


Рисунок 1.7 – Схема управления одноконтурной одноступенчатой компрессионной холодильной машиной

В тепловых насосах, или, что тоже самое, в холодильных машинах, регулирование также осуществляется по параметрам. На рис. 1.7 представлена схема управления одноконтурной одноступенчатой холодильной машиной. Основной регулируемой величиной является температура объекта  $t$ . В зависимости от ее отклонения изменяется производительность компрессора  $G_k$ . Степень заполнения испарителя холодильным агентом контролируется по перегреву  $g$  отходящего пара и изменяется перестановкой дросселя, регулирующего расход холодильного агента  $G_{др}$ .

В ряде случаев, в холодильных машинах поддерживают не температуру объекта, а температуру (давление) кипения холодильного агента в испарителе. В некоторых холодильных машинах для стабилизации режима работы, в частности, дросселирующего органа поддерживают давление конденсации  $P_k$  путем изменения расхода охлаждающей среды  $G_в$ .

При переходе от рассмотрения отдельных единиц теплогенерирующего оборудования к рассмотрению работы множества таких источников схемы управления принципиально не меняются. Появляются дополнительные САР позволяющие синхронизировать одновременную работу источников,

обеспечить равномерный износ и пр. Но в основе это остается тем же управлением по параметрам, и весь комплекс локальных САР будет выводить каждый источник в индивидуальный оптимальный режим работы. Помимо этого, на практике, каждая САР имеет ограниченный рабочий диапазон изменения параметров. Если оборудование спроектировано для работы в определенных условиях особых проблем с его управлением нет. Но как только возникает задача проектирования универсального оборудования рассчитанного на любые погодные условия, работу в течение всего года и т.п. традиционные САР уже не всегда справляются со своей задачей. Необходимо кардинальным образом изменять свойства объекта управления.

Понимание того, что локальные оптимальные решения не гарантируют достижение глобального оптимума, а также необходимость в ряде случаев кардинальным образом изменять свойства объекта управления привели к тому, что в данной диссертационной работе для достижения глобального оптимума системы теплоснабжения города рассматривается оптимизация структуры объекта управления. Именно структурная оптимизация позволяет кардинальным образом изменять свойства объекта управления в зависимости от внешних воздействующих факторов.

### 1.6.2 Анализ методов управления по структуре

Несмотря на свою актуальность, задача управления структурой объекта остается открытой и малоизученной. Отсутствуют конкретные методики по синтезу и анализу подобных систем управления. В литературе данная тематика почти не освещается, хотя впервые идея систем с переменной структурой (СПС) была предложена более 50 лет назад.

На рубеже 50–60-х гг. прошлого века С.В. Емельянов разработал теорию СПС, успешно применяемую для решения обширного круга задач на основе управления структурой регулятора [32; 33].

В 60–70-х гг. И.В. Казаков и В.М. Артемьев развили теорию систем со случайной структурой (ССС) [34]. Но, как и в теории СПС, задача управления структурой объекта не рассматривалась.

Первоначально и СПС, и другие классы систем интенсивно развивались исходя преимущественно из актуальных задач управления самолетами и космическими аппаратами [35], в дальнейшем их сферы применения несколько разошлись. Это объяснялось тем, что летательные аппараты изначально являются объектами, работающими при наличии большого количества неконтролируемых возмущений и недостатке информации о параметрах самого объекта, т. е. в условиях сильной неопределенности, когда синтез классической СПС представляет собой определенные трудности.

Классическое адаптивное управление, работающее в системах с существенно нелинейными и нестационарными звеньями и целенаправленно изменяющее динамические характеристики одних звеньев с целью компенсации нежелательного изменения параметров других звеньев, в случае с летательными аппаратами тоже не всегда оказывается пригодным. «Например, при существенном изменении динамических характеристик летательного аппарата может возникнуть ситуация, когда никакое изменение коэффициентов и структуры регулятора не способно компенсировать изменения характеристик объекта» [36].

В этом случае более эффективной оказалась теория координатно-параметрического управления, активно развиваемая доктором технических наук С.Д. Земляковым, доктором технических наук В.Ю. Рутковским (Институт проблем управления РАН, г. Москва) и их коллегами [37]. Основная идея этой теории заключается в том, что иногда «приходится в процессе функционирования целенаправленно изменять конструктивные параметры самого летательного аппарата, т. е., с точки зрения теории управления, вмешиваться в математическую модель объекта и целенаправленно ее «подправлять». При этом возникают два типа

управления: традиционное – с помощью изменения координат рулевых органов и дополнительное – с помощью изменения параметров математической модели объекта. В результате приходим к координатно-параметрическому управлению (КПУ) объектом» [36].

В 70-х гг. XX в. появился еще один метод управления, называемый ситуационным управлением [38]. Сегодня метод применяется как для управления техническими системами [39], так и организационными [40].

В последние десятилетия активно развиваются системы с целенаправленно изменяемой структурой в области промышленности и теплоэнергетики [41; 42; 43; 44; 45; 46; 47]. Следует отметить ряд работ по управлению структурой объекта. В [35] предлагается комплекс методов для управления объектами с целенаправленно изменяемой структурой на примере горно-обогатительной фабрики. В работе [48] предлагаются модели и методы комплексного управления технологическими процессами поточных производств на примере нефтеперерабатывающего завода.

Главное достоинство упомянутых работ в том, что в них разработаны методы и модели, которые позволяют путем изменения структуры объекта управления обеспечить непрерывность технологического процесса и, как следствие, поддержать технологические параметры процесса на заданном уровне.

В работе [49] рассмотрено управление процессом теплоснабжения отдельного коттеджа с использованием альтернативных источников тепловой энергии.

В работе [50] приведено решение задачи оптимизации процесса теплоснабжения отдельного коттеджа. Обоснована необходимость комплексного оценивания состояния системы теплоснабжения по четырем критериям: качество обеспечения заданной температуры, стоимость затрачиваемых ресурсов, эффективность и надежность используемого оборудования. Для решения задачи были использованы методы целевого программирования и генетические алгоритмы.



Основная сложность при управлении структурой объекта управления заключается в том, что внешние воздействующие факторы, как правило, носят вероятностный характер. Как показали исследования в [40], можно попытаться смоделировать вероятностную природу искомым параметров системы и спланировать работу оборудования. К сожалению, методы решения задач прогнозирования достаточно сложны, с вычислительной точки зрения. Эта сложность возрастает с увеличением интервала прогнозирования и количества единиц используемого оборудования.

Для решения простых задач прогнозирования широко используется метод динамического программирования. Когда количество альтернатив измеряется единицами или десятками, данный метод позволяет найти требуемое решение, но с увеличением количества альтернатив вычислительная сложность алгоритма растет экспоненциально и для поиска решения требуется все больше времени.

Генетические алгоритмы в отличие от динамического программирования позволяют найти за приемлемое время решение не идеальное, но достаточно близкое к нему. К сожалению, такие решения не всегда реализуемы на практике [50].

Альтернативой решениям, основанным на прогнозировании, можно считать поиск решений в данный момент времени. Очевидно, что множество локальных оптимальных решений не дает оптимальное решение в глобальном смысле, но, несмотря на это, данная альтернатива все же позволяет улучшить, а в ряде случаев и в принципе реализовать решения по управлению структурой объекта управления.

### **1.7 Постановка задачи исследования**

Проведенный анализ показывает, что решение задачи теплоснабжения потребителей в современном городе осуществляется множеством централизованных и индивидуальных систем теплоснабжения. В условиях

систематических перебоев с поставкой тепловой энергии от основной системы потребители, как правило, дополнительно устанавливают резервные источники как для отопления, так и для горячего водоснабжения (ГВС). Вследствие этого у каждого потребителя появляется возможность альтернативного выбора источника, который в данный момент будет решать задачу теплоснабжения. Структура такой организации процесса теплоснабжения представлена на рис. 1.8.

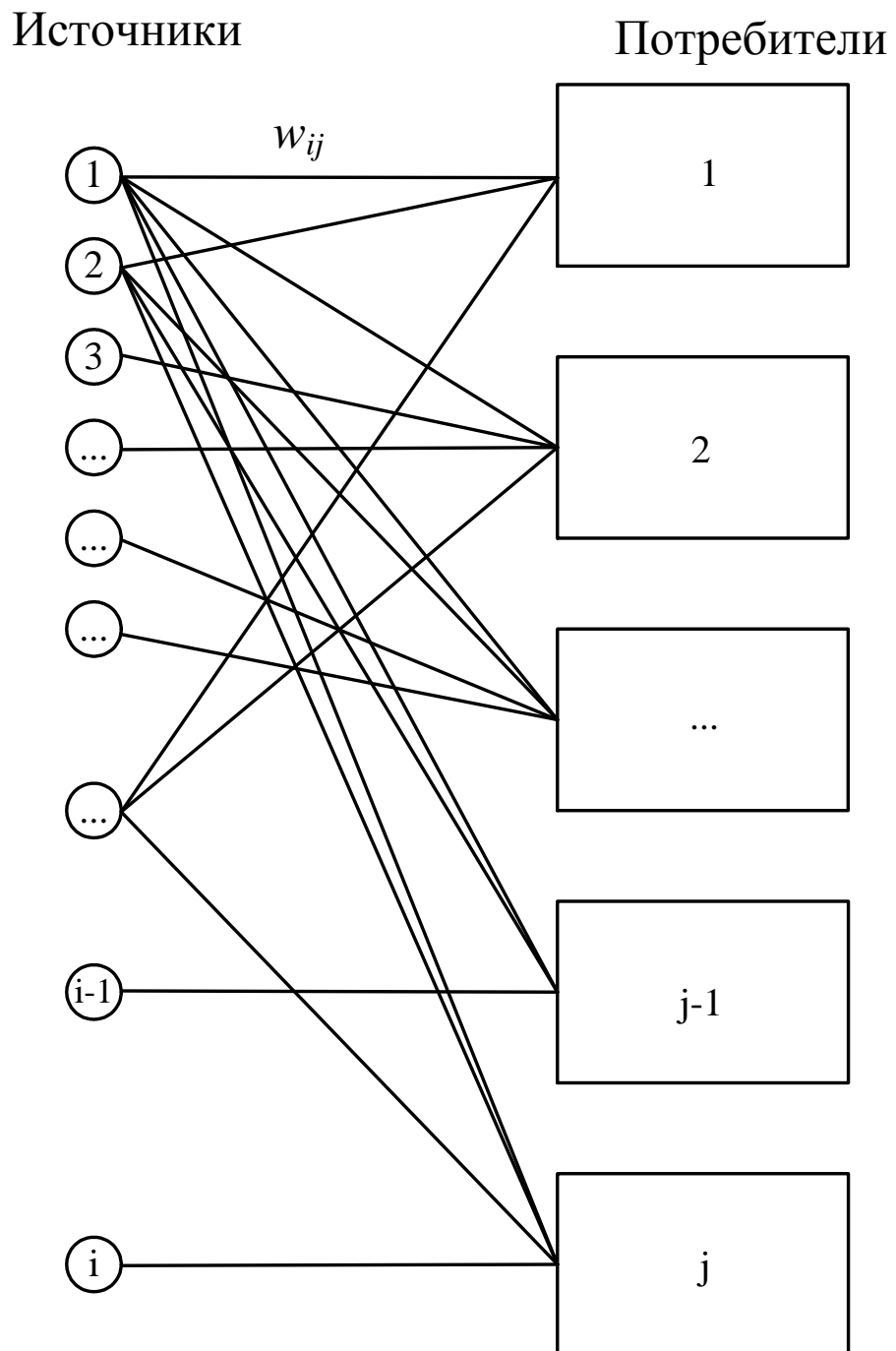


Рисунок 1.8 – Структура организации процесса теплоснабжения

Множество источников тепловой энергии  $i$  неким образом связано с множеством потребителей  $j$ . Каждая связь  $w_{ij}$  в общем случае представляет участок тепловой сети, ответственный за транспортировку теплоносителя от конкретного источника конкретному потребителю. В каждый момент времени связь может быть активна или неактивна.

Каждый источник тепловой энергии обладает некой эффективностью и надежностью. С течением времени оборудование изнашивается и надежность падает. При этом растет риск аварии и, следовательно, возникновения необходимости ликвидации ее последствий.

Для централизованных систем теплоснабжения основным фактором, определяющим их эффективность, является эффективность тепловой сети. В свою очередь, эффективность тепловой сети определяется ее протяженностью и уровнем тепловых и физических потерь теплоносителя.

В рамках рассматриваемой системы источники потребляют такие ресурсы, как холодная вода, газ, электроэнергия. Стоимость каждого ресурса изменяется в зависимости от уже потребленного количества. Стоимость электроэнергии также зависит от времени суток.

Таким образом, себестоимость тепловой энергии, генерируемой от того или иного источника, подключенного к конкретному потребителю, может существенно изменяться даже на протяжении суток. Это открывает потенциальную возможность оптимизации процесса теплоснабжения.

Целью данного диссертационного исследования является автоматизация системы теплоснабжения городского района за счет ее структурной оптимизации. В результате оптимизации в каждый момент времени должна выбираться та структура системы теплоснабжения, которая обеспечит минимальные затраты на решение задачи теплоснабжения. Затраты должны отражать весь комплекс капитальных и эксплуатационных затрат, а также косвенно учитывать надежность оборудования.

Помимо структурной оптимизации множества теплогенерирующих технических средств, необходимо рассмотреть возможность управления

структурой цены на энергетические потоки с целью оптимизации процесса теплоснабжения в условиях ограничения первичных ресурсов.

Для достижения цели диссертационного исследования – совершенствования методов и моделей автоматизированного управления системой теплоснабжения города для повышения экономической эффективности за счет целевого изменения структуры объекта управления – необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать имитационные модели объекта управления, функционирующие в условиях наличия альтернативных энергетических потоков, отличающихся разной стоимостью.

2. Синтезировать и обосновать критерии и целевую функцию оптимизации процесса теплоснабжения города.

3. Решить задачу оптимизации процесса теплоснабжения городских районов за счет перехода от структурной оптимизации объекта управления к управлению структурой цены, предложенной потребителю энергетических потоков.

### **Выводы к разделу 1**

1. Анализ показал, что стоимость генерируемой энергии для каждого источника своя, а с учетом действующей сетки тарифов, зависящих от количества потребленного ресурса, а также возможности использования многозонных тарифов на электроэнергию возникает существенное колебание стоимости тепловой энергии даже на протяжении суток. Поэтому при обеспечении потребителя тепловой энергией для получения минимальных текущих затрат автоматизированная система управления должна иметь возможность конфигурировать технические средства.

2. Для дальнейшего изучения была принята структура объекта управления, представляющая собой перспективную систему теплоснабжения г. Южный. В качестве теплогенерирующих систем рассматривались

центральная теплонасосная установка и районная котельная. В ряде случаев жилые здания снабжены крышными газовыми котельными, а отдельные квартиры снабжены индивидуальными газовыми котлами и тепловыми насосами. Результаты анализа показали, что наличие различных источников тепла, которые могут подключаться независимо друг от друга, существующая сетка тарифов на электрическую энергию (ночная, дневная, пиковая) и природный газ обуславливают конечное множество возможных структур системы теплоснабжения.

3. В разделе представлены результаты возможной классификации систем теплоснабжения и обобщенная структурная схема организации процесса теплоснабжения теплового потребителя. Сделан вывод, что это сложная техническая система, у которой есть возможность изменения своей структуры за счет множества источников, потребителей и связей.

4. Была определена эффективность автоматизированной системы управления теплоснабжением, под которой понимается ее способность к генерации множества структур объекта управления и выбора оптимальной среди них, а именно – той, которая обеспечит в текущий момент времени минимальные финансовые затраты. При этом априори понимается, что каждая единица оборудования системы, которая управляется по параметру, работает в оптимальном режиме.

5. Было установлено, что теория систем с переменной структурой регуляторов на текущий момент хорошо разработана, а задачи автоматизированного управления системами с изменяемой структурой объекта управления в области теплоснабжения остаются нерешенными.

6. Анализ объекта управления показал, что автоматизированное управление системой теплоснабжения города за счет целевого изменения структуры объекта управления невозможно без решения задачи оптимизации структуры, а это, в свою очередь, требует разработки модели объекта управления, которая учитывала бы все изменения и возмущения во времени.

## РАЗДЕЛ 2

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Для проведения дальнейших исследований в данной диссертационной работе необходимо разработать комплекс моделей, имитирующих поведение объекта исследования. В нашем случае это модель среднестатистического бытового потребителя тепловой энергии и модели различных систем теплоснабжения.

Основное требование к разрабатываемым моделям – простота вычислений. Как показали исследования других авторов [50], попытки точного моделирования температурных полей или использование таких алгоритмов решения задач, как динамическое программирование или генетические алгоритмы, приводят к существенному возрастанию вычислительной сложности решаемых задач. Как следствие, решения находятся либо на малых интервалах времени, либо обладают большой погрешностью.

Если принять, что интервал моделирования  $\Delta\tau$  и в нашей модели он просчитывается за время  $\Delta\tau_m$ , то в идеальном случае

$$\Delta\tau_m \ll \Delta\tau.$$

С ростом вычислительной сложности модели величина  $\Delta\tau_m$  становится сравнимой с  $\Delta\tau$  и мы уже не можем исследовать модель на больших временных промежутках. Поэтому в ходе разработки моделей объекта управления необходимо, в первую очередь, стремиться к максимально допустимому упрощению этих моделей.

Следует также отметить, что нет смысла предъявлять жесткие требования к точности и адекватности моделируемых параметров к

разрабатываемому комплексу моделей. Как и в большом классе подобных задач, с точки зрения исследования, важна реакция системы на изменение того или иного параметра, а не его абсолютное значение.

В разрабатываемом комплексе моделей были выделены следующие элементы: квартира, дом, источник тепловой энергии, система теплоснабжения.

В рамках квартиры необходимо смоделировать процессы:

- передачи к воздуху тепла от отопительных радиаторов, людей и бытовых приборов;
- потребления людьми горячей воды с учетом рабочих и выходных дней недели;
- вентиляции;
- передачи тепла ограждающим конструкциям;
- изменения параметров теплоносителя после утилизации тепла;
- учета потребленного количества всех видов используемых ресурсов;
- управления температурой воздуха.

Модель дома должна учитывать процессы теплообмена между отдельными квартирами и всего дома с окружающей средой, а также моделировать изменение параметров теплоносителя, поступающего в дом извне от различного вида котельных.

Задача моделей источников тепловой энергии – имитация процесса нагрева теплоносителя с учетом возможных физических и тепловых потерь, а также управление процессом поддержания заданной температуры теплоносителя с учетом температурного графика.

Модель системы отопления приобретает особую важность при рассмотрении распределенных систем, таких как, например, районные котельные. В этом случае становятся существенными затраты на транспортировку теплоносителя, а также тепловые и физические потери теплоносителя в магистральных трубопроводах.

## 2.1 Модель тепловых процессов в отдельной квартире

На рис. 2.1 представлена упрощенная структурная схема модели отдельной квартиры.

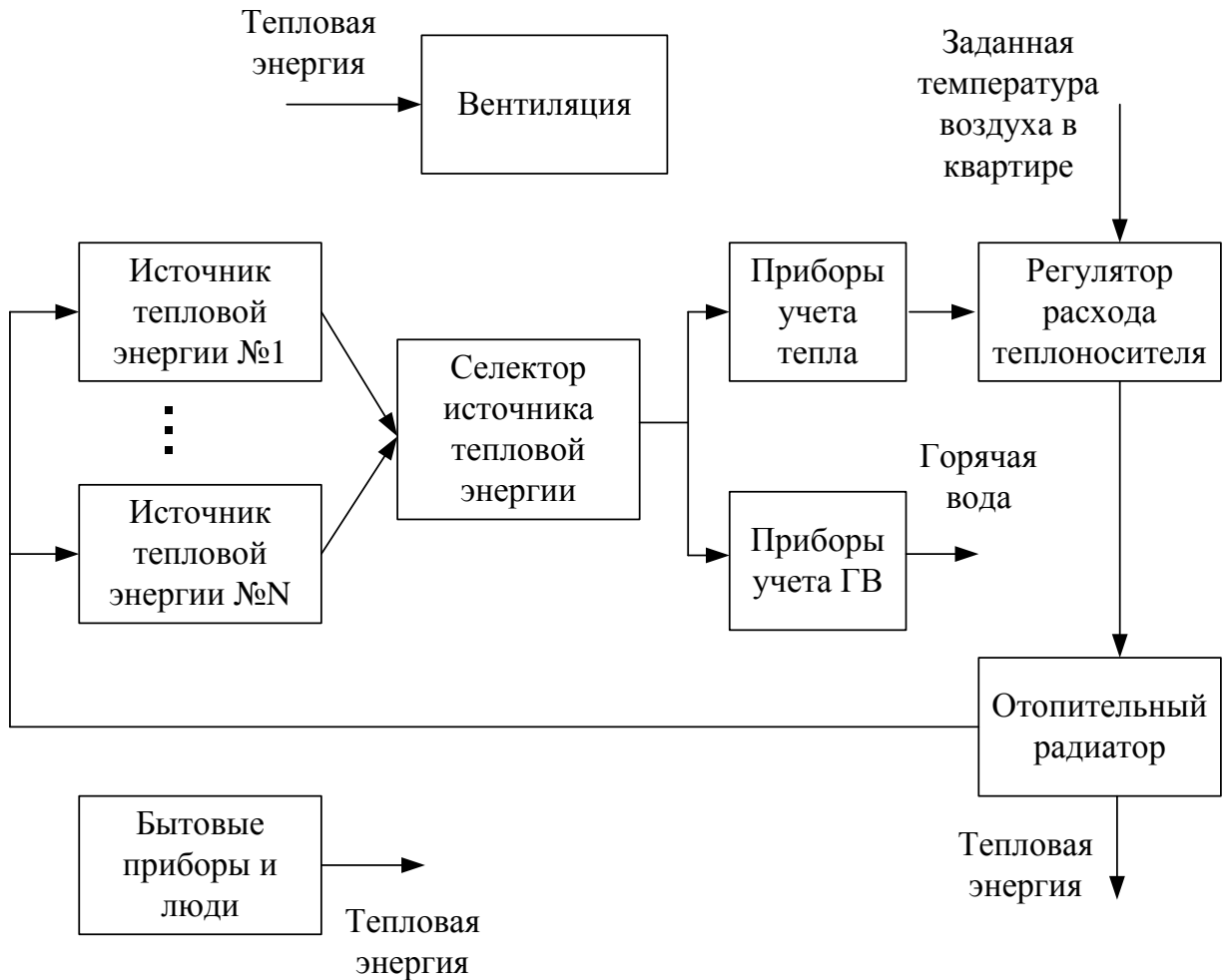


Рисунок 2.1 – Упрощенная структурная схема модели отдельной квартиры

Для моделирования процесса отопления каждая квартира была снабжена неким универсальным отопительным радиатором, который можно подключить к любому источнику тепловой энергии. Зная коэффициент теплоотдачи радиатора  $\alpha_p$ , его площадь  $S_p$ , температуру теплоносителя  $t_p^{\text{ex}}$  на входе в радиатор, расход теплоносителя  $G_p$  через данный радиатор и



температуру воздуха  $t_k$  в квартире, количество теплоты, поступившей в квартиру, определялось как

$$Q_p = \alpha_p S_p (t_p^{6x} - t_k) \Delta \tau. \quad (2.1)$$

Соответственно температура  $t_p^{6x}$  на выходе из радиатора определялась как

$$t_p^{6x} = t_p^{6x} - \frac{Q_p}{G_p C_p \Delta \tau}, \quad (2.2)$$

где  $C_p$  – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг.

Величина  $Q_p$  определяла, насколько изменится температура воздуха в квартире.

Следует отметить, что величина  $t_p^{6x}$  является входным параметром модели квартиры и определяется используемой системой теплоснабжения. В случае индивидуального теплоснабжения это температура на выходе котла, бойлера и т. д. Для централизованных систем теплоснабжения это температура теплоносителя, приходящего от соответствующего теплового пункта.

Результаты предварительного моделирования показали, что для реализации возможности управления количеством отдаваемой радиаторами теплоты необходимо найти зависимость этого количества от текущего расхода теплоносителя.

На рис. 2.2 представлены типовые данные по реальной зависимости тепловой мощности радиатора от расхода теплоносителя [51].

В рамках данного исследования абсолютные значения тепловой мощности радиаторов не имеют значения, а важно только изменение этой мощности в зависимости от текущего значения расхода теплоносителя,

поэтому для упрощения было принято, что данная зависимость носит линейный характер. Математическая модель радиатора была дополнена путем введения коэффициента  $\xi$ , имитирующего работу управляющего вентиля на входном патрубке радиатора. Величина  $\xi$  принимает значения от 0, что соответствует закрытой задвижке и отсутствию расхода теплоносителя в радиаторе, до 1, что соответствует полностью открытой задвижке и номинальному расходу теплоносителя. С учетом коэффициента  $\xi$  выражение (2.1) принимает вид

$$Q_p = \xi \alpha_p S_p (t_p^{ex} - t_k) \Delta \tau. \quad (2.3)$$

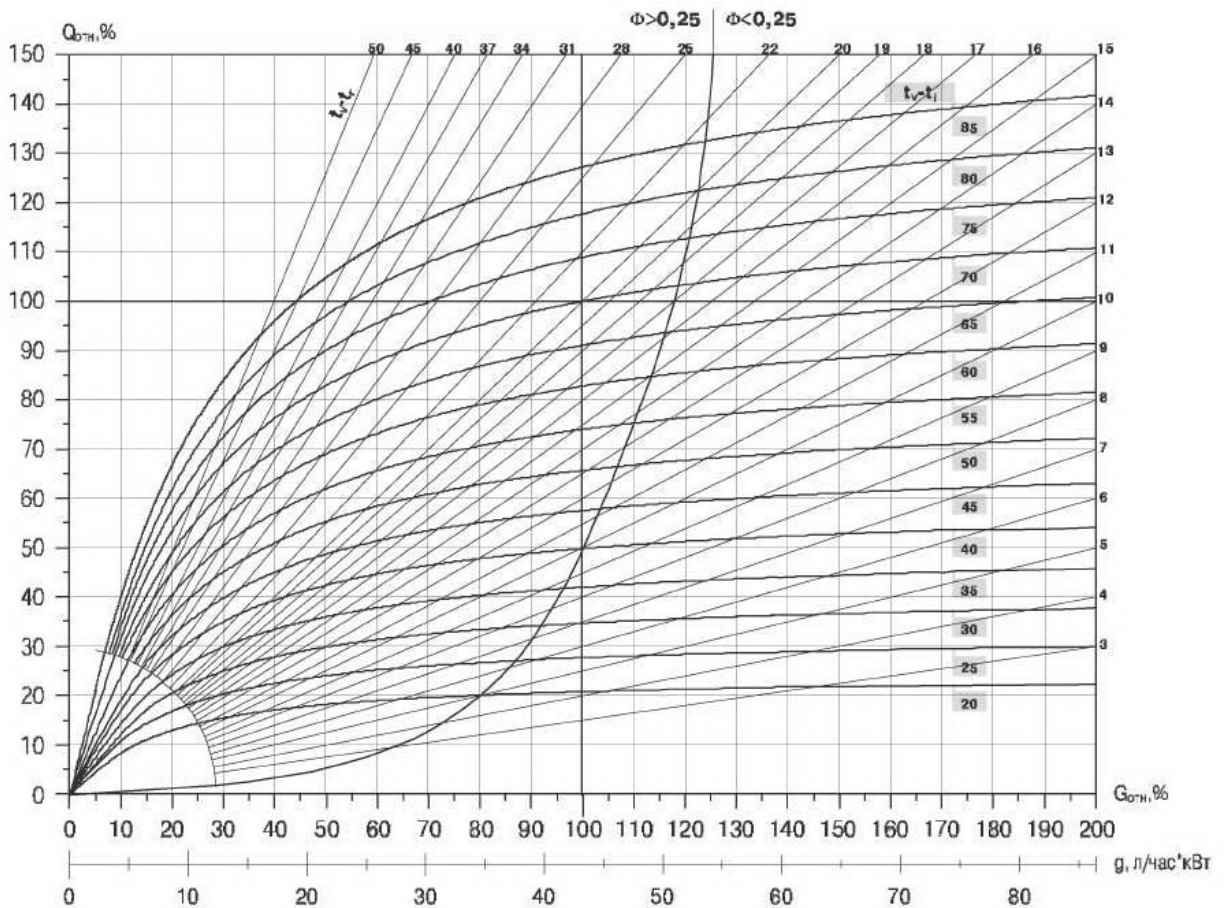


Рисунок 2.2 – Пример зависимости тепловой мощности радиатора от расхода теплоносителя

При этом расход теплоносителя через радиатор определяется как

$$G_p = \xi G_p^{ном}, \quad (2.4)$$

где  $G_p^{ном}$  – номинальный расход теплоносителя в радиаторе.

Управление температурой воздуха в квартире сводится к управлению значением коэффициента  $\xi$ , что в реальности соответствует изменению положения вентиля на входном патрубке радиатора отопления. С этой целью в модель был введен П-регулятор, задачей которого было поддержание в квартире заданной температуры путем управления расходом теплоносителя через радиатор отопления.

Помимо тепловой энергии  $Q_p$ , поступающей в квартиры от радиаторов, в модели было также учтено тепло, поступающее от людей,  $Q_{л}$ . Было принято, что в среднем в каждой квартире проживает 3 человека. Исходя из действующих норм водопотребления, была разработана модель цикла нахождения людей в квартирах в будние и воскресные дни, а также количество потребляемой ими воды. Также было учтено количество дополнительной теплоты, поступающей в квартиры от бытовых приборов,  $Q_n$ .

В соответствии с действующими нормами на вентиляцию было определено изменение температуры в квартире, обусловленное притоком внешнего воздуха. При этом была использована модель изменения температуры окружающей среды, взятая из [50].

Основными расчетными формулами в описываемых моделях были следующие известные выражения:

– изменение температуры  $t$  тела массой  $m$  при подводе/отводе некоторого количества теплоты  $Q$

$$t = t + \frac{Q}{mC_p}; \quad (2.5)$$

– температура смеси двух сред с массами  $m_1$ ,  $m_2$  и начальными температурами  $t_1$ ,  $t_2$

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}. \quad (2.6)$$

Предварительный анализ показал, что в моделировании точной планировки реальных домов нет необходимости, поэтому для моделирования процесса передачи тепла ограждающим конструкциям было принято, что каждая квартира представляет собой параллелепипед, размером  $6 \times 6 \times 2,5$  м. 4 стены, пол и потолок каждой квартиры характеризуются своими толщиной  $d_{cm}$ , коэффициентами теплоотдачи с внешней и внутренней сторон  $\alpha_{внеш}$ ,  $\alpha_{внут}$  и коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{cm}$ . В каждой квартире есть одно окно.

Также было принято, что процесс передачи тепла от отопительных приборов воздуху в квартире происходит мгновенно и равномерно, и поэтому температура воздуха в каждой точке квартиры одинакова.

Учитывая опыт предыдущих исследований с использованием моделирования температурного поля зданий [50; 52], в данной работе было решено максимально упростить вычислительную задачу и рассматривать моделирование процесса теплопередачи через стены, пол и потолок каждой квартиры как нестационарную одномерную задачу теплопередачи через плоскую стенку. Соответственно трехмерное температурное поле всего дома было заменено отдельными одномерными полями ограждающих конструкций.

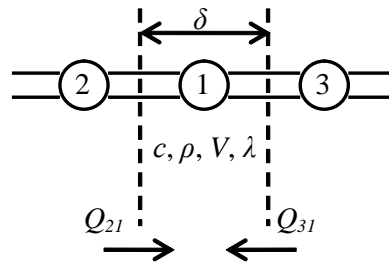


Рисунок 2.3 – Разбиение и числовая сетка для нестационарной одномерной задачи

Напомним суть метода расчета температурного поля методом тепловых балансов [53; 54]. Объект разбивается на элементарные объемы  $V = \delta \times \delta \times 1 = \delta^2$  (рис. 2.3). Полагаем, что удельная теплоемкость  $c$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$  в пределах элементарного участка постоянны. Для каждого элемента составляется уравнение теплового баланса и определяется новое значение температуры через конечное приращение времени  $\Delta\tau$ . В случае одномерной нестационарной задачи (рис. 2.3) уравнение теплового баланса примет вид

$$Q_{21} + Q_{31} = \frac{cpV}{\Delta\tau} (t'_1 - t_1),$$

или

$$\frac{\lambda}{\delta} (t_2 - t_1) \delta \cdot 1 + \frac{\lambda}{\delta} (t_3 - t_1) \delta \cdot 1 = \frac{cpV}{\Delta\tau} (t'_1 - t_1).$$

Решая последнее уравнение относительно неизвестной температуры  $t'_1$ , получаем

$$t'_1 = \frac{\lambda \Delta \tau}{c \rho V} \left( t_2 + t_3 + \frac{t_1}{\frac{\lambda \Delta \tau}{c \rho V}} - 2t_1 \right). \quad (2.7)$$

Если учесть, что  $\frac{\lambda}{c \rho} = a$  – коэффициент температуропроводности вещества,  $V = \delta^2$  и  $\frac{\Delta \tau a}{\delta^2} = Fo$  – число Фурье, то выражение (2.7) принимает вид

$$t'_1 = Fo \left[ t_2 + t_3 + t_1 \left( \frac{1}{Fo} - 2 \right) \right]. \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) является основой численного метода расчета нестационарной теплопроводности [54]. При этом важно помнить, что выбор  $Fo$  ограничен условием

$$Fo \leq \frac{1}{2}. \quad (2.9)$$

Отметим, что данный подход применим и для решения задачи теплопередачи. Предположим, что между элементами 2 и 1 (рис. 2.3) осуществляется теплопередача с коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ , а через элементы 3 и 1 – теплопроводность, тогда температура  $t'_1$  будет определяться по выражению

$$t'_1 = t_1 + \frac{\alpha \Delta \tau}{c \rho \delta} (t_2 - t_1) + \frac{\lambda \Delta \tau}{c \rho \delta^2} (t_3 - t_1). \quad (2.10)$$

Температурные поля всех стен, полов и потолков определялись для десяти точек.

С целью моделирования приборов учета потребленных ресурсов на основании действующей тарифной сетки на энергоресурсы с учетом уже потребленного количества ресурса и времени суток был разработан комплекс моделей, имитирующих работу счетчиков газа, воды и электроэнергии.

При решении задачи поддержания в квартирах заданной температуры следовало учесть тот факт, что температура теплоносителя  $t_{mn}$  в системе отопления зависит от температуры окружающей среды  $t_{oc}$  и температурного графика. В дальнейшем эта зависимость была аппроксимирована выражением

$$t_{mn} = (-0,0228t_{mn}^{НОМ} + 0,509)t_{oc} + 0,5914t_{mn}^{НОМ} + 9,12, \quad (2.11)$$

где  $t_{mn}^{НОМ}$  – максимальная температура теплоносителя в подающем трубопроводе.

Данное выражение также позволяет получить требуемое значение температуры теплоносителя в узловых точках произвольной системы отопления (на входе/выходе котлов, тепловых пунктов и т. п.) в зависимости от используемого температурного графика и температуры окружающей среды.

## 2.2 Модель тепловых процессов в многоквартирном доме

Разработанная выше модель квартиры является элементарной ячейкой, из которых формируется произвольное здание. В качестве среднестатистического был выбран многоквартирный 9-этажный жилой дом на 72 квартиры. Планировка дома представлена на рис. 2.4.

Тепловые процессы, происходящие в отдельной квартире, оказывают влияние на температурные поля всех стен пола и потолка и, как следствие, оказывают влияние на температуру воздуха в соседних квартирах, а также определяют величину потерь тепла в окружающую среду. Разработанная

модель позволяет задавать теплофизические параметры каждой стены в отдельности и таким образом имитировать различные материалы и конструкции стен.

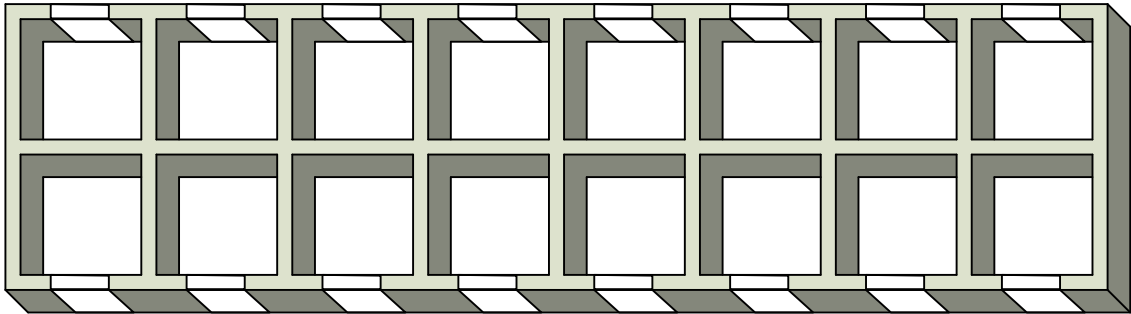


Рисунок 2.4 – Планировка дома

Возможность индивидуального изменения расходов теплоносителя в каждой квартире определила необходимость моделирования гидравлической системы дома. Упрощенная схема гидравлической системы показана на рис. 2.5.

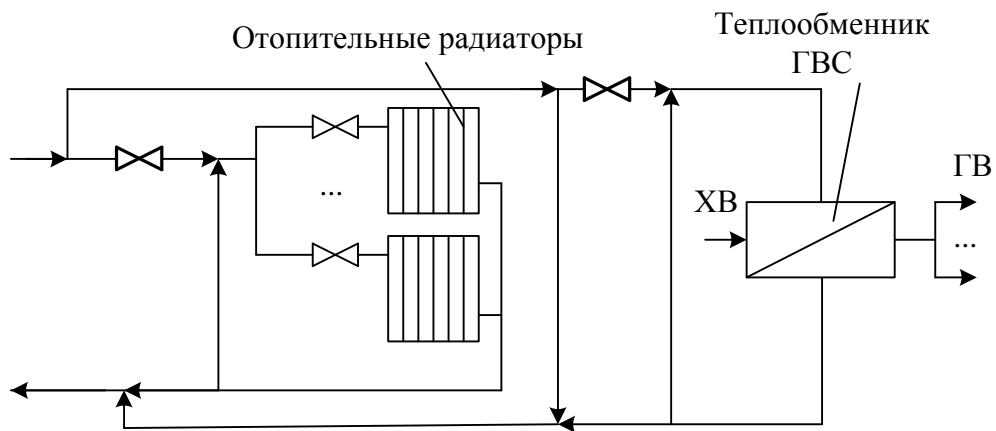


Рисунок 2.5 – Упрощенная схема гидравлической системы дома

Расчет расходов теплоносителя в различных ветвях гидравлической сети выполнялся при условии соблюдения закона Кирхгофа [55]

$$\sum_i G_i = const, \quad (2.12)$$

где  $G_i$  – расходы теплоносителя в одном узле гидравлической сети.



При смешивании нескольких потоков теплоносителя с разными температурами температура смеси определялась как

$$t_{см} = \frac{\sum_i t_i G_i \Delta \tau}{\sum_i G_i \Delta \tau}. \quad (2.13)$$

Задача теплового пункта (ТП) – обеспечить в системе отопления дома температуру теплоносителя в соответствии с температурным графиком. Для этого на ТП установлен соответствующий регулятор, а заданное значение температуры определяется по выражению (2.9).

Таким образом, модель дома позволяет:

- смоделировать процессы теплообмена между отдельными квартирами;
- определить величину тепловых потерь в окружающую среду;
- определить расходы и температуры теплоносителя в любой точке отопительной системы.

## 2.3 Модели оборудования систем теплоснабжения

В рамках данного исследования были рассмотрены такие источники тепловой энергии, как газовый котел, АГВ и теплонасосная установка.

### 2.3.1 Модель газового оборудования

Параметры котла:

- мощность максимальная;
- мощность текущая;
- температура теплоносителя на входе;
- температура теплоносителя на выходе;
- расход теплоносителя;

- КПД;
- количество потребленного газа.

Первоначально в рамках данной работы было предложено достаточно точно моделировать процесс сжигания топлива [56; 57], но в дальнейшем исследования показали, что, с точки зрения управления системой теплоснабжения, достаточно моделировать количество генерируемой тепловой энергии как функции КПД котла

$$Q = G_2 R \tau, \quad (2.14)$$

где  $G_2$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;

$R$  – удельное тепло сгорания, Дж/м<sup>3</sup>.

Для решения задачи отопления на основании температурного графика определялось требуемое значение температуры теплоносителя на выходе котла. Для поддержания данной температуры использовался П-регулятор, который управлял расходом газа. Количество потребляемого газа учитывалось при помощи соответствующего счетчика. Теплотворная способность газа и КПД котла определяли количество полезной теплоты, идущей на нагрев теплоносителя. Далее по известным зависимостям определялось изменение температуры теплоносителя при прохождении через котел. Параметры теплоносителя на входе в котел одновременно являются выходными параметрами гидравлической системы объекта, подключенного к источнику. Это могут быть квартира, дом или тепловой пункт.

Отличие модели АГВ от котлов заключалось в том, что в АГВ содержится существенное количество воды, которое аккумулирует тепло. В этом случае температура смеси прямой и обратной воды в АГВ сначала находилась по выражению (2.6), а далее определялось, на сколько температура изменится с подведением теплоты от сгоревшего газа, по выражению (2.5).

### 2.3.2 Модель теплонасосной установки

В основу модели теплонасосной установки (ТНУ) была положена зависимость коэффициента трансформации энергии для идеального цикла Карно [15]

$$K_{mp} = \frac{T_o}{T_o - T_{oc}}, \quad (2.15)$$

где  $T_o$  – температурный потенциал тепла, отводимого в систему отопления,  $K$ ;

$T_{oc}$  – температура окружающей среды,  $K$ .

Реальный коэффициент трансформации меньше идеального и определяется степенью термодинамического совершенства компрессора  $h$  и необратимыми потерями процесса

$$K'_{mp} = \frac{T_o}{T_o - T_{oc}} h. \quad (2.16)$$

В табл. 2.1 приведена эффективность некоторых компрессоров, используемых в ТНУ [14].

Таблица 2.1. – Эффективность некоторых типов компрессоров, используемых в современных теплонасосных системах теплоснабжения

Мощность, кВт	Тип компрессора	Эффективность $h$
300–3000	Открытый центробежный	0,55–0,75
50–500	Открытый поршневой	0,50–0,65
20–50	Полугерметичный	0,45–0,55
2–25	Герметичный, с R-22	0,35–0,50
0,5–3	Герметичный, с R-12	0,20–0,35
< 0,5	Герметичный	< 0,25

Для решения задачи охлаждения реальный коэффициент трансформации определяется как

$$K'_{mp} = \frac{T_{oc}}{T_{oc} - T_o} h. \quad (2.17)$$

Данный коэффициент определяет, сколько тепла выделится либо утилизируется на единицу затрачиваемой электрической мощности.

Дальнейший расчет аналогичен расчету, выполняемому для котлов. Получаемое/утилизируемое тепло в ТНУ идет на изменение температуры обратной воды в случае отопления либо холодной сетевой воды в случае ГВС.

#### **2.4 Модели процессов теплоснабжения от различных источников тепловой энергии**

Если в случае с индивидуальными потерями источника тепловой энергии на транспортировку теплоносителя можно пренебречь, то для распределенных систем отопления это неприемлемо.

Чем более распределена система, тем больше протяженность магистральных трубопроводов, больше количество тепловых пунктов и различной арматуры. Все это приводит к тому, что в ходе эксплуатации происходят постоянные утечки теплоносителя, связанные не только с технологическими нуждами, но и по причине старения оборудования. Также большая протяженность трубопроводов приводит к большему уровню тепловых потерь. Все эти физические и тепловые потери определяют стоимость тепловой энергии для конечного потребителя.

Поэтому для систем отопления, основанных на использовании различного вида котельных, необходимо было дополнительно разработать модели систем транспортировки теплоносителя.

Наибольшей сложностью обладает модель систем отопления, использующая районные котельные.

В рамках данного исследования была рассмотрена система теплоснабжения городского района, состоящего из 200 домов. Усредненная схема транспортной системы теплоносителя рассматриваемого района была приведена в разд. 1 на рис. 1.2. Напомним основные моменты.

Из котельной выходит 8 веток магистральных трубопроводов, которые распределяют теплоноситель по различным направлениям. Диаметр труб составляет 300 мм. В каждой ветке на удалении 300 м друг от друга расположены 5 центральных тепловых пунктов. От каждого ЦТП идет одна ветка магистрального трубопровода диаметром 100 мм. К этой ветке подключены 5 домов на удалении 100 м друг от друга.

Каждый участок магистрального трубопровода характеризуется физическими и тепловыми потерями теплоносителя. На рис. 1.2 они обозначены блоками «Потери».

Предельно допустимое значение тепловых потерь в магистральных трубопроводах в зависимости от способов их прокладки, размеров труб и параметров теплоносителя нормируется в СНиП 2.04.14-88. Аппроксимация табличных данных позволила вывести следующее выражение для коэффициента линейных потерь:

$$\alpha_{\text{лин}} = \beta \frac{(0,0012D + 0,1841)T + 0,0394D - 0,7873}{168}, \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad (2.18)$$

где  $D$  – диаметр трубопровода, мм;

$T$  – температурный напор между теплоносителем и окружающей средой, К;

$\beta$  – дополнительный множитель.

С ухудшением изоляции уровень тепловых потерь в трубопроводах увеличивается. Величина  $\beta$  в выражении (2.18) предназначена для имитации

этого изменения состояния изоляции. Значение  $\beta = 1$  соответствует нормированному уровню потерь.

Нормированное значение физических потерь теплоносителя составляет 5 % от массы воды, находящейся в гидравлической системе. Для рассматриваемой тепловой сети линейный коэффициент физических потерь  $\varphi = \beta 0,00008$  кг/м. Как и в случае с тепловыми потерями, дополнительный коэффициент  $\beta$  позволяет имитировать изменение физических потерь, связанных с ухудшением состояния трубопровода.  $\beta = 1$  соответствует идеальному состоянию трубопровода.

Для компенсации физических потерь в «обратке» котельной предусмотрено добавление в систему холодной сетевой воды.

Для решения задачи управления в каждом центральном тепловом пункте (ЦТП) предусмотрен регулятор, поддерживающий на выходе температуру ЦТП в соответствии с температурным графиком. Управление осуществляется путем подмеса в «обратку» горячего теплоносителя.

В общем случае в каждом ЦТП происходит смешение двух потоков теплоносителя: прямой горячий поток от котельной и обратный поток от потребителя.

На рис. 2.6 представлена гидравлическая схема участка тепловой сети. Цифрами обозначены точки, в которых производится расчет расходов и температур теплоносителя. Сам расчет состоит из двух частей: в первой определяются расходы теплоносителя, во второй – температуры.

В точках 5, 13, 22 и 27 расположены регуляторы расхода. Для простоты расчетов было принято, что они регулируют степень открытия  $\psi$  соответствующих задвижек. 0 соответствует полностью закрытой задвижке, а 1 – полностью открытой. Текущий расход определяется как произведение максимального расхода на степень открытия.

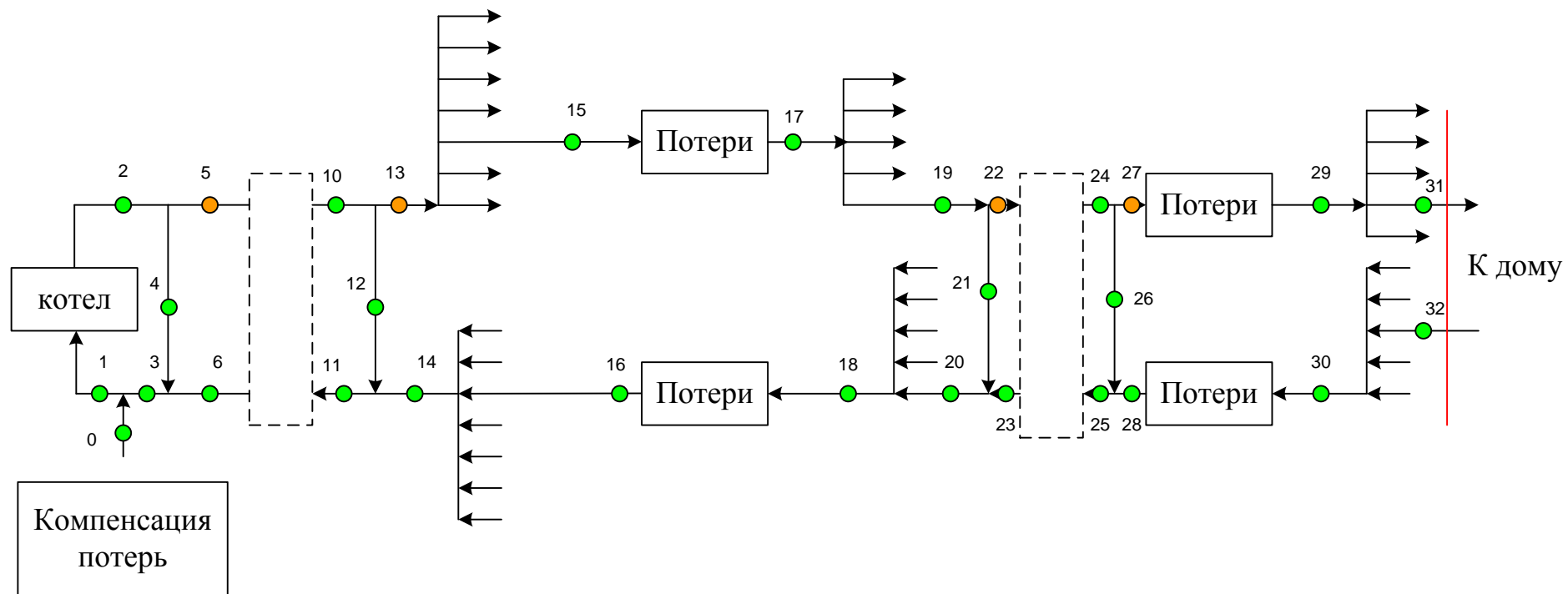


Рисунок 2.6 – Гидравлическая схема участка тепловой сети

Расходы теплоносителя в точках 2, 10, 24 являются номинальными значениями и рассчитываются заранее.

Последовательность расчета следующая.

$$\begin{aligned}G_5 &= G_2 \psi_5; \\G_4 &= G_2 - G_5; \\G_{13} &= G_{10} \psi_{10}; \\G_{12} &= G_{10} - G_{13}; \\G_{15} &= G_{13} / 8; \\G_{17} &= G_{15} - 0.00008L,\end{aligned}$$

где  $L$  – длина участка трубопровода между точками 15–17.

$$\begin{aligned}G_{19} &= G_{17} / 5; \\G_{22} &= G_{19} \psi_{19}; \\G_{21} &= G_{19} - G_{22}; \\G_{27} &= G_{24} \psi_{27}; \\G_{26} &= G_{24} - G_{27}; \\G_{29} &= G_{27} - 0.00008L,\end{aligned}$$

где  $L$  – длина участка трубопровода между точками 27–29.

$$\begin{aligned}G_{31} &= G_{29} / 5; \\G_{30} &= 5G_{31}; \\G_{28} &= G_{30} - 0.00008L,\end{aligned}$$

где  $L$  – длина участка трубопровода между точками 28–30

$$\begin{aligned}G_{25} &= G_{26} + G_{28}; \\G_{23} &= G_{22} - G_{27} + G_{28}; \\G_{20} &= G_{23} + G_{21};\end{aligned}$$



$$G_{18} = 5G_{20};$$

$$G_{16} = G_{18} - 0.00008L,$$

где  $L$  – длина участка трубопровода между точками 16–18.

$$G_{14} = 8G_{16};$$

$$G_{11} = G_{12} + G_{14};$$

$$G_6 = G_5 - G_{13} + G_{14};$$

$$G_3 = G_6 + G_4;$$

$$G_0 = G_2 - G_3.$$

Далее следует расчет температур.

$$T_2 = T_1 + \frac{N\eta}{G_2 C_p},$$

где  $N$  – мощность котла;

$\eta$  – КПД котла;

$C_p$  – теплоемкость теплоносителя.

$$T_{10} = \frac{G_5 T_2 + 200 T_{10} + G_{11} T_{11}}{G_5 + 200 + G_{11}};$$

$$T_{17} = T_{10} - \frac{\alpha_{лин} (T_{10} - T_{oc}) L}{G_{15} C_p},$$

где  $T_{oc}$  – температура окружающей среды;

$L$  – длина участка трубопровода между точками 15–17.

$$T_{24} = \frac{G_{22} T_{17} + 200 T_{24} + G_{25} T_{25}}{G_{22} + 200 + G_{25}};$$

$$T_{29} = T_{24} - \frac{\alpha_{\text{лин}}(T_{24} - T_{oc})L}{G_{27}C_p},$$

где  $L$  – длина участка трубопровода между точками 27–29.

$$T_{28} = T_{in} - \frac{\alpha_{\text{лин}}(T_{in} - T_{oc})L}{G_{30}C_p},$$

где  $T_{in}$  – температура на выходе из дома;

$L$  – длина участка трубопровода между точками 30–28.

$$T_{25} = \frac{G_{26}T_{24} + G_{28}T_{28}}{G_{25}};$$

$$T_{20} = \frac{G_{23}T_{24} + G_{21}T_{17}}{G_{20}};$$

$$T_{16} = T_{20} - \frac{\alpha_{\text{лин}}(T_{20} - T_{oc})L}{G_{18}C_p},$$

где  $L$  – длина участка трубопровода между точками 18–16.

$$T_{11} = \frac{G_{12}T_{10} + G_{14}T_{16}}{G_{11}};$$

$$T_3 = \frac{G_6T_{10} + G_4T_2}{G_3};$$

$$T_1 = \frac{G_3T_3 + G_0T_{xв}}{G_1},$$

где  $T_{xв}$  – температура сетевой воды, используемой для подпитки котла.

Проведенный расчет позволят также оценить тепловой КПД системы.

$$\eta_{\text{сис}} = \eta_1\eta_2\eta_3\eta_4\eta, \quad (2.19)$$

где  $\eta_1$  – КПД участка трубопровода между точками 15–17;

$\eta_2$  – КПД участка трубопровода между точками 27–29;

$\eta_3$  – КПД участка трубопровода между точками 30–28;

$\eta_4$  – КПД участка трубопровода между точками 18–16.

$$\eta_1 = \frac{G_{17}T_{17}}{G_{15}T_{15}};$$

$$\eta_2 = \frac{G_{29}T_{29}}{G_{27}T_{27}};$$

$$\eta_3 = \frac{G_{28}T_{28}}{G_{30}T_{30}};$$

$$\eta_4 = \frac{G_{16}T_{16}}{G_{18}T_{18}}.$$

Следует также отметить, что оценка теплового КПД системы по выражению (2.19) в переходном режиме может давать существенную погрешность.

Таким образом, предложенная модель транспортной системы теплоносителя городского района позволяет определить параметры теплоносителя в любой точке системы с учетом тепловых и физических потерь как при решении задачи отопления, так и при горячем водоснабжении. Варьируя количество веток и ЦТП, можно адаптировать данную модель для любых распределенных систем отопления, будь то модульные котельные, предназначенные для отопления группы домов, или крышные котельные.

## 2.5 Анализ потенциальных возможностей

В ходе предварительных исследований был проведен оценочный анализ стоимости тепловой энергии при решении задачи отопления городского района тремя способами: централизованной системой отопления, децентрализованным отоплением индивидуальными газовыми котлами и теплонасосными установками [20; 64]. Для примера был рассмотрен жилой район из 200 зданий с суммарной тепловой нагрузкой 70 МВт. При расчете стоимости тепловой энергии учитывались только затраты на первичные энергоресурсы и действующие тарифы. Результаты анализа приведены в табл. 2.2.

Из табл. 2.2 видно, что стоимость тепловой энергии для выбранных источников изменяется в существенных пределах. Совместное влияние таких факторов, как зависимость стоимости электроэнергии от времени суток, уже потребленного количества, а также существенный диапазон изменения температурного коэффициента преобразования тепла у теплового насоса, приводит к тому, что для ТНУ диапазон изменения стоимости тепловой энергии намного больше, чем в других источниках.

Таблица 2.2. – Результаты анализа оценки стоимости тепловой энергии от различных источников

Тепловой источник	Минимальная стоимость тепловой энергии, грн/кВт*ч	Максимальная стоимость тепловой энергии, грн/кВт*ч
Централизованное отопление	0,066	0,423
Децентрализованное газовое отопление	0,067	0,25
Индивидуальное отопление тепловым насосом	0,01	1,242

Следует также учитывать высокий износ современных тепловых сетей в городах Украины. В некоторых городах износ тепловых сетей таков, что до 50 % тепловой энергии не поступает к потребителю [23].

Рассмотрим для примера магистральный теплоизолированный трубопровод с диаметром условного прохода 300 мм, расположенный на открытом воздухе [20]. Примем температуру теплоносителя равной 100 °С. Согласно СнИП 41-03-2003, нормативные тепловые потери такого трубопровода составляют 76 Вт/м (80,7 Вт/м<sup>2</sup>). При подземной канальной и бесканальной прокладках этого же трубопровода эти величины соответственно составляют 105 Вт/м (111 Вт/м<sup>2</sup>) и 157 Вт/м (166,6 Вт/м<sup>2</sup>).

Примем, что жилой массив состоит из типовых 9-этажных зданий на 72 квартиры со средним уровнем тепловых потерь 204 кВт. В таком жилом массиве для подключения одного дома требуется в среднем 100 м трубопровода. Стоимость единицы тепловой энергии, получаемой на котельной, в первую очередь, определяется стоимостью сжигаемого газа. Затраты на электроэнергию, необходимую для приводов насосов, сознательно не рассматриваются, т. к. они только увеличивают себестоимость тепловой энергии. Примем, что тепловые потери в трубопроводе соответствуют нормативным. Тогда зависимость себестоимости тепла  $S$  (для действующих тарифов на газ) от количества подключенных домов  $N$  в системе централизованного отопления примет вид, показанный на рис. 2.7,а. Эффективность такой системы теплоснабжения при обеспечении теплом городского района, состоящего из 200 домов с суммарной тепловой нагрузкой 70 МВт, составляет 92,6 %.

Как уже отмечалось ранее, полное намокание изоляции на основе минеральной ваты приводит к увеличению тепловых потерь в 11 раз. Многочисленные проверки состояния тепловых сетей в различных городах свидетельствуют о том, что фактические тепловые потери в десятки и сотни раз превышают нормативные [21].

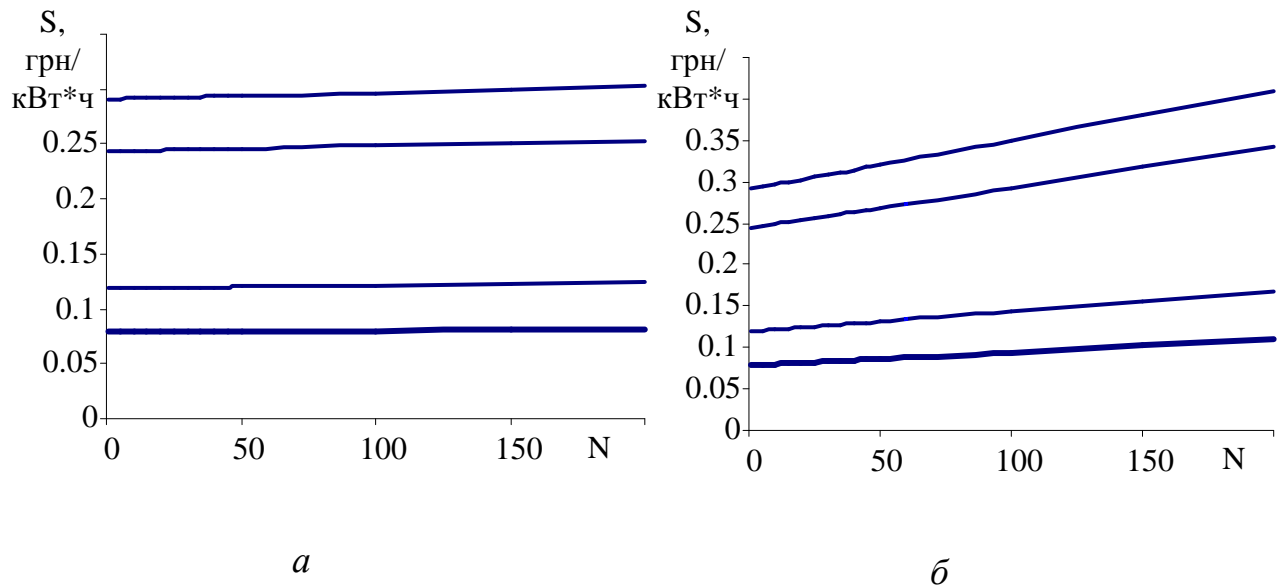


Рисунок 2.7 – Зависимость себестоимости  $S$  от  $N$ :

а – при уровне тепловых потерь, соответствующем нормам;

б – при среднем износе трубопровода

Согласно [22], нормированное значение физических потерь теплоносителя не должно превышать  $0,0025 \text{ кг}/(\text{ч}\cdot\text{м})$ . Фактическое состояние трубопроводов таково, что данные потери существенно выше и, по практическим данным, могут достигать значения  $0,01 \text{ кг}/(\text{ч}\cdot\text{м})$ .

Рассмотрим вариант средних потерь. Пусть тепловые потери в 5 раз превышают нормативные, а потери теплоносителя составляют  $0,005 \text{ кг}/(\text{ч}\cdot\text{м})$ . Соответствующий график зависимости себестоимости тепла  $S$  от количества подключенных домов  $N$  приведен на рис. 2.7,б. Эффективность такой системы теплоснабжения при обеспечении теплом вышеупомянутого городского района с суммарной тепловой нагрузкой 70 МВт составляет 63 %.

Сегодня фактический износ тепловых сетей таков, что он может полностью нивелировать высокую эффективность теплогенерирующего оборудования. Для сравнения на рис. 2.8 на зависимости себестоимости централизованного топления наложены зависимости себестоимости отопления индивидуальными газовыми котлами с КПД, равным 0,85.

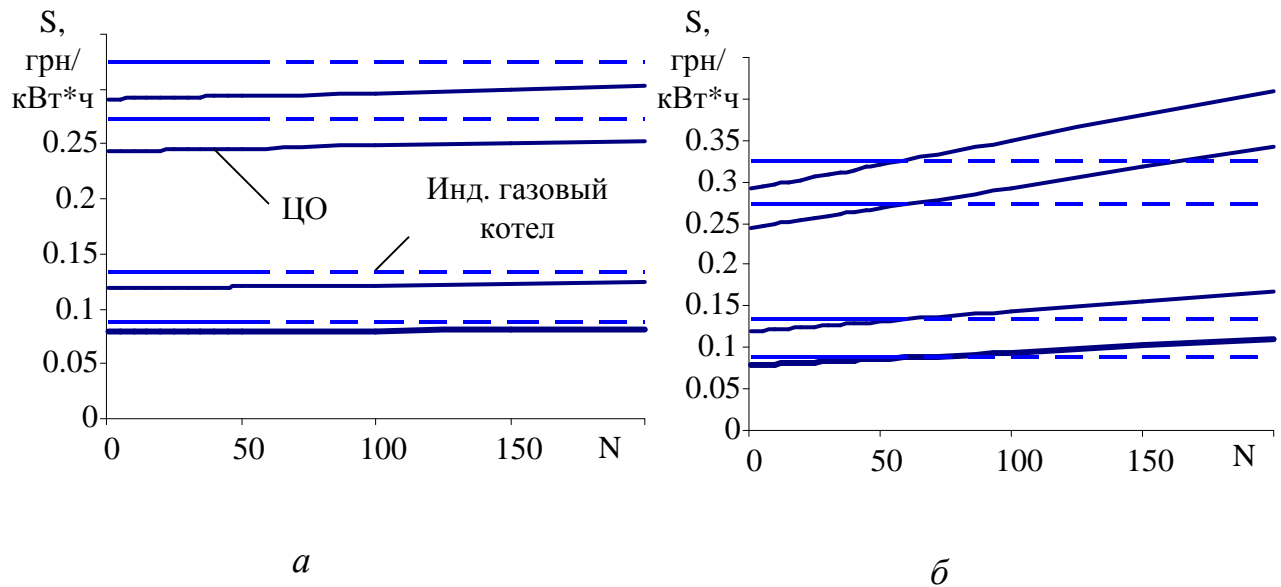


Рисунок 2.8 – Сравнение оценки себестоимости централизованного отопления и индивидуального газового:

а – при уровне тепловых потерь, соответствующих нормам;

б – при среднем износе трубопровода

Анализ рис. 2.9 показывает, что централизованное отопление в городах с изношенными тепловыми сетями уже не может конкурировать с низкоэффективными бытовыми газовыми котлами.

Очевидно, что при расчете полной себестоимости тепловой энергии с учетом капитальных и эксплуатационных затрат ее значения будут выше. В то же время полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале оптимизации процесса теплоснабжения городских районов.

Сегодня в среднестатистической квартире есть различные альтернативные источники тепловой энергии. Перебои с подачей горячей воды привели к тому, что в качестве резерва потребители устанавливают электрические бойлеры. Для компенсации низкой температуры теплоносителя в системе централизованного отопления приобретаются различного вида масляные радиаторы и тепловентиляторы. В последнее время широко используются кондиционеры с возможностью отопления и специальные тепловые насосы.

На промышленных предприятиях к задаче теплоснабжения дополнительно предъявляется требование к надежности процесса и широкому диапазону изменения требуемой тепловой мощности. Поэтому на таких предприятиях теплогенерирующее оборудование, хоть и может быть однотипным, но обладает многократным резервированием.

Все это приводит к тому, что сегодня как на предприятиях промышленности, так и в жилом секторе задача теплоснабжения, как правило, может решаться различными альтернативными способами. Приведенная выше классификация систем теплоснабжения и источников тепловой энергии показывает, что таких альтернатив может быть большое количество.

Каждый новый источник, подключаемый к потребителю, увеличивает количество возможных комбинаций. При этом каждому источнику в отдельности необязательно полностью обеспечивать потребность в тепловой энергии. Наличие альтернатив позволит обеспечить требуемую тепловую мощность путем оптимальной комбинации имеющегося оборудования и достичь цели с минимальными затратами.

## **Выводы к разделу 2**

1. Разработана имитационная модель многоквартирного высотного дома, которая позволяет вычислить изменения температур воздуха в  $i$ -й квартире и параметры теплоносителя в любой точке гидравлической системы отопления. Имитационная модель основана на обобщенной  $i$ -й квартире, в которой определяются затраты на подогрев приточного воздуха в системе вентиляции, теплопотери через строительные ограждающие конструкции и горячее водоснабжение. Имитационная модель учитывает энергию, выделяемую жильцами квартиры и бытовой техникой.

2. Разработаны имитационные модели промышленного и индивидуального газовых котлов, отопительных приборов и промышленной



и индивидуальной теплонасосной установки. Для расчета тепловых процессов между квартирами, а также между домом и окружающей средой был использован математический аппарат для моделирования нестационарных процессов теплообмена и теплопередачи.

3. Разработана имитационная модель транспортной системы, используемая в распределенных системах теплоснабжения для обеспечения процесса доставки теплоносителя от источника тепловой энергии к потребителю с учетом тепловых и физических потерь теплоносителя.

4. Представлены технико-экономические показатели эффективности систем теплоснабжения. Приведены средние значения эффективности отдельных элементов при различных условиях. Приведено выражение, позволяющее определить минимально допустимое значение эффективности системы теплоснабжения.

5. Предварительный анализ позволил оценить диапазоны изменения удельной стоимости тепловой энергии для различных источников:

- для централизованного газового отопления  $0,066 \div 0,423$  грн/кВт·ч;
- для индивидуального газового отопления  $0,067 \div 0,25$  грн/кВт·ч;
- для индивидуального отопления тепловым насосом  $0,01 \div 1,242$  грн/кВт·ч.

6. Предложенная математическая модель позволила сформировать текущую модель объекта управления в зависимости от возмущений и различных затрат финансовых ресурсов.

### РАЗДЕЛ 3

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКИХ РАЙОНОВ

При решении задачи отопления одной квартиры структура системы теплоснабжения достаточно проста и очевидна. Как правило, это централизованное отопление и горячее водоснабжение, а также комбинация из альтернативных источников, таких как электрический бойлер, масляный радиатор, тепловентилятор и т. п. Напомним, что в квартирах, как правило, запрещена установка газовых котлов.

При отоплении частного дома количество вариаций источников тепла возрастает. Прежде всего, это различные котлы, работающие на газе и альтернативных видах топлива (биотопливо, опилки, торф и т. п.). Также в последнее время активно внедряются системы отопления, использующие тепловые насосы.

Рачительные хозяева промышленных предприятий и фабрик зачастую, помимо существующих котельных, налаживают альтернативные системы отопления, использующие отходы производства, например опилки в мебельной промышленности. Нередко такие решения потенциально позволяют дополнительно отапливать и прилегающий городской район, при этом существенно снижая затраты на первичные энергоресурсы.

Следует также отметить, что с увеличением мощности теплового насоса в нем применяются принципиально другие компрессоры с более высокой степенью термодинамического совершенства. Так, в бытовых тепловых насосах мощностью до 25 кВт используются герметичные компрессоры, для которых данная характеристика лежит в диапазоне  $0,2 \div 0,5$ . В тепловых насосах мощностью более 300 кВт используются открытые

центробежные компрессоры, для которых степень термодинамического совершенства лежит в пределах  $0,55 \div 0,75$ .

В разд. 2 было показано, что изменение себестоимости тепловой энергии, поставляемой от различных источников, даже применительно к типовой квартире может приводить к появлению альтернатив в вопросах отопления и горячего водоснабжения.

Таким образом, современное тепловое хозяйство города, состоящее из множества различных по своей природе тепловых источников, потенциально позволяет производить тепловую энергию, себестоимость которой изменяется в широких пределах. Использование плавающих тарифов еще больше увеличивает диапазон изменения себестоимости. В свою очередь, колебания себестоимости тепловой энергии потенциально открывают широкие возможности по оптимизации процесса теплоснабжения отдельных потребителей и городских районов в целом.

### 3.1 Исходные данные

Примем следующие исходные данные. Имеется распределенная система теплоснабжения городского района (рис. 3.1). Система состоит из множества потребителей тепловой энергии, находящихся на территории данного района. Под потребителями будем понимать квартиры, частные дома, офисные помещения и т. п. На той же территории расположено множество источников тепловой энергии. Под источниками будем понимать все генераторы тепловой энергии, предназначенные для решения задачи теплоснабжения, начиная от районных котельных и заканчивая индивидуальными тепловентиляторами.

Каждый потребитель потенциально имеет в своем распоряжении тепловую энергию от более чем одного источника. Подключенные к потребителю источники могут функционировать одновременно. Факт подключения  $i$ -го источника к  $j$ -му потребителю определяется наличием

связи  $C_{ij} = 1$  (рис. 3.1). При отключении источника соответствующая связь  $C_{ij}$  принимает значение 0.

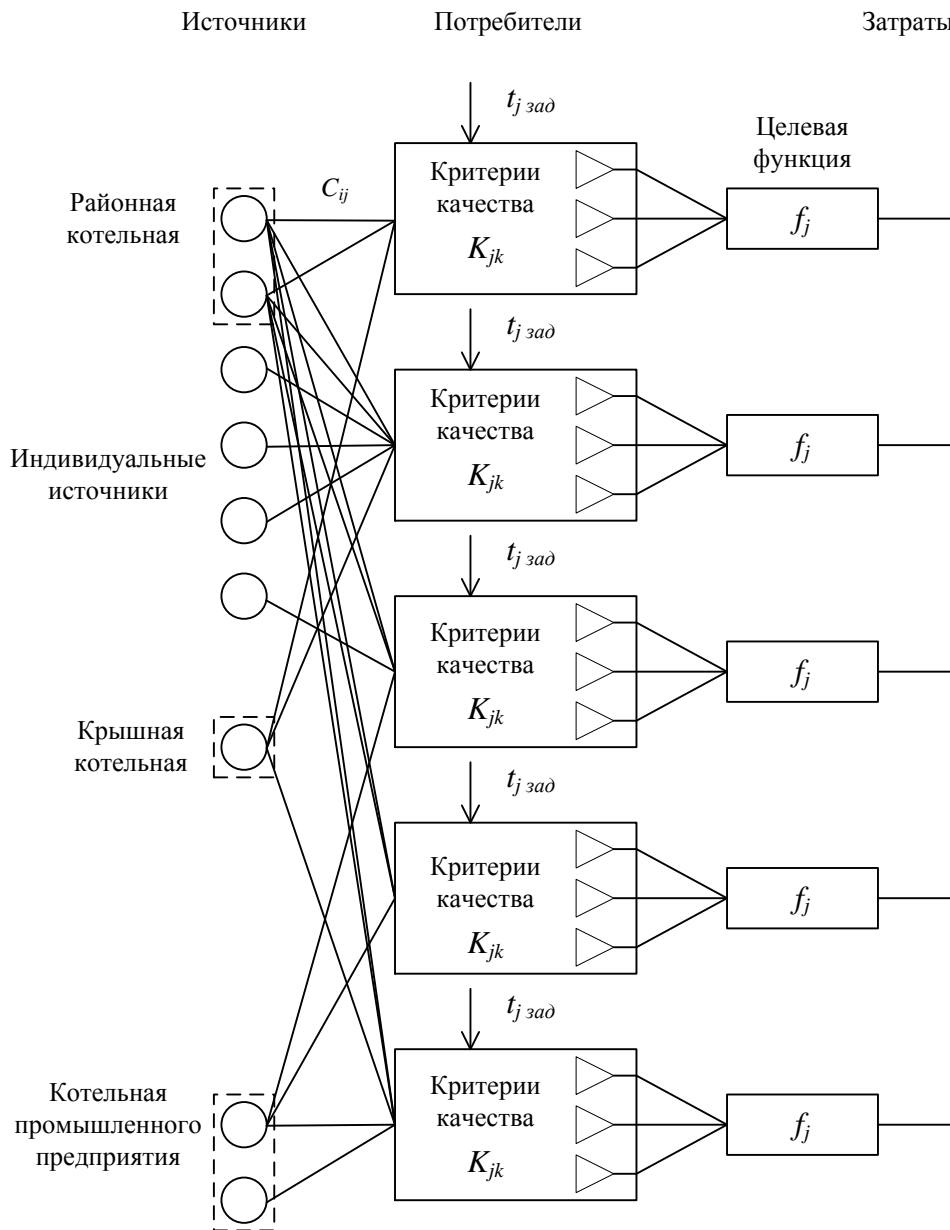


Рисунок 3.1 – Пример структуры  
распределенной системы теплоснабжения городского района

С точки зрения конкретного потребителя  $j$ , каждый источник  $i$  характеризуется себестоимостью генерируемой тепловой энергии. Себестоимость определяется следующими факторами: эффективностью преобразования первичных энергоресурсов в тепловую энергию, эффективностью доставки тепловой энергии конечному потребителю и ее

возврата к источнику, надежностью оборудования источника и стоимостью потребляемых первичных энергоресурсов. Множество влияющих факторов образует множество критериев качества  $K_{jk}$ .

Критерии качества для  $j$ -го потребителя лежат в основе локальных целевых функций  $f_j$ .

Предполагается, что тариф на газ зависит от количества уже потребленного объема газа. Тариф на электроэнергию зависит как от объема уже потребленной энергии, так и от времени суток.

В произвольный момент времени каждый потребитель может подключиться к любому источнику либо их комбинации. Также каждый потребитель по своему усмотрению может изменять заданные значения поддерживаемых в помещениях температур.

### 3.2 Постановка задачи управления

Прежде всего, следует отметить, что разрабатываемая в данной работе система управления несколько отличается от традиционных. В ней не преследуются цели управления температурой воздуха у потребителей или обеспечения качества отопления и ГВС. Априори считается, что эти задачи решаются локальными средствами автоматизации.

Основная задача разрабатываемой системы: повышение эффективности процесса теплоснабжения городских районов путем снижения финансовых затрат за счет оптимизации структуры системы теплоснабжения.

Для формализации задачи управления введем ряд множеств. Пусть множества источников  $A_u = \{a_{u_i}\}, i = \overline{1, m_u}$  и потребителей  $A_n = \{a_{n_i}\}, i = \overline{1, m_n}$  формируют множество всех элементов системы  $A = \{a_i\}, i = \overline{1, m}$  и связаны соотношением  $A = A_u \cup A_n$ . Связи между элементами системы  $a_i$  и  $a'_i$  обозначим через множество  $C = \{c_{i i'}\}, i, i' = \overline{1, m}$ . Множество ресурсов,

используемых системой в процессе функционирования, обозначим через  $R = \{r_i\}, i = \overline{1, n}$ . Множество параметров, описывающих свойства элементов системы, обозначим через  $V = \{v_i\}, i = \overline{1, k}$ .

Определим множество структур системы теплоснабжения как  $W = A \times C$ . Тогда произвольное состояние системы будет определяться соотношением

$$S \subset A \times C \times V = W \times V. \quad (3.1)$$

Произвольная структура системы теплоснабжения будет описываться парой  $(w, v), w \in W, v \in V$ . Конкретный вариант структуры, заданный парой  $(w, v)$ , обозначим как  $S_{wv} \in S$ .

Обозначим через  $F$  множество внешних воздействующих факторов, а для оценки текущего состояния системы теплоснабжения определим критериальное ограничение в виде  $K: S \times F \rightarrow X^l$ , где  $X^l$  – множество значений целевой функции, описываемой  $l$  критериями эффективности.

Для каждого конкретного потребителя множество возможных структур  $S_i$  ограничивается подведенными коммуникациями. В нашем случае это 5 источников. Обозначим множество допустимых структур как  $S_D$ .

Рассмотрим теплоснабжение городского района как непрерывный процесс производства элементарных количеств тепловой энергии  $e_i$  для каждого из  $a_{n_i}$  потребителей. В общем случае

$$e_i = f(\Delta\tau, F_i^{out}, F_i^{in}), \quad (3.2)$$

где  $F_i^{out}$  – вектор внешних воздействующих на систему факторов, например температура окружающей среды;

$F_i^{in}$  – вектор внутренних воздействующих на систему факторов, например расход горячей воды.

Обозначим стоимость производства  $e_i$  на  $j$ -м источнике тепловой энергии как  $\beta_j(e_i)$ , а соответствующий расход  $k$ -го энергоресурса –  $r_{jk}(e_i)$ .

Тогда задача управления будет заключаться в выборе из множества  $S_D$  таких структур, для которых будет выполняться условие

$$\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^5 \beta_j(e_i) \rightarrow \min, \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^5 \sum_k r_{jk}(e_i) \geq M_k, \quad (3.3)$$

где  $M_k$  – лимит  $k$ -го энергоресурса.

### 3.3 Постановка задачи оптимизации

Как отмечалось выше, существует ряд физических, экономических и политических факторов, определяющих себестоимость тепловой энергии, генерируемой конкретным источником. Для конечного потребителя, в распоряжении которого находится множество альтернативных источников тепловой энергии, становится актуальной задача выбора в каждый момент времени той структуры системы теплоснабжения, которая обеспечивает минимальные затраты на решение задачи теплоснабжения.

Примем, что структурная оптимизация локальной системы теплоснабжения конкретного потребителя будет преследовать цель минимизации целевой функции. Тогда задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: в каждый момент времени  $\tau$  выбирать такие функции  $c_{ij}(\tau)$ , что

$$f_j(c_{ij}(\tau)) \rightarrow \min, \text{ при } K_{jk}(\tau) \leq K_{jk \max}. \quad (3.4)$$

Условие  $K_{jk}(\tau) \leq K_{jk \max}$  означает, что нельзя бесконечно улучшать одни критерии за счет ухудшения других. Каждый критерий имеет максимально допустимое значение.

### 3.4 Выбор критериев управления и целевой функции

#### 3.4.1 Общие теоретические сведения

В общем случае рассматриваемая задача структурной оптимизации относится к классу задач многокритериальной оптимизации [58; 59; 60; 61; 42]. При этом каждый критерий качества – эффективность, стоимость, надежность – обладает своими единицами измерения.

В данной диссертационной работе за основу были взяты результаты исследования вопросов структурой оптимизации систем теплоснабжения, представленные в работах [50; 52; 63; 65; 66; 67; 68]. Согласно предложенной концепции, каждый план  $x$  переключения оборудования оценивался с помощью целевой функции

$$J(x; \tau) = \sqrt{(w_r R_H(x; \tau))^2 + (w_q Q_H(x; \tau))^2 + (w_s S_H(x; \tau))^2 + (w_e E_H(x; \tau))^2}, \quad (3.5)$$

где  $w_r, w_q, w_s, w_e$  – весовые коэффициенты, которые определяются экспертным методом;

$R_H(x; \tau)$  – нормированное значение надежности системы;

$Q_H(x; \tau)$  – нормированное значение качества управления;

$S_H(x; \tau)$  – нормированное значение стоимостного показателя затрачиваемых ресурсов;

$E_H(x; \tau)$  – нормированное значение эффективности оборудования;

$\tau$  – время.

Недостатки целевой функции (3.5) следующие:



– применение методики многокритериальной оптимизации сделало ее достаточно субъективной оценкой оптимальности, зависящей от конкретного лица, принимающего решение;

– она не учитывает весь комплекс капитальных затрат на монтаж, наладку, обслуживание и эксплуатацию;

– изначально все составляющие целевой функции имеют свои единицы измерения и даже после нормировки их тяжело адекватно сравнивать между собой;

– целевая функция использовалась для формирования плана переключения оборудования  $x$ , что являлось ресурсоемкой вычислительной задачей и требовало наличия достаточно сложной и многофакторной модели окружающей среды;

– составляющая эффективности в целевой функции (3.5) оценивала только эффективность оборудования, а не всего процесса в целом.

Несмотря на все недостатки, при отсутствии альтернатив управление системой теплоснабжения с использованием целевой функции (3.5) действительно позволяет поддерживать некий баланс между эффективностью преобразования ресурсов в тепловую энергию, надежностью оборудования, качеством обеспечения заданной температуры и стоимостью затрат на ресурсы.

На основе опыта проведенных в работах [50; 67] исследований был предложен ряд идей по улучшению целевой функции для управления структурой систем теплоснабжения.

Прежде всего, было решено выразить все составляющие целевой функции через единую денежную единицу измерения. Это позволило перейти к однокритериальной задаче оптимизации. Также было решено отказаться от решения задачи прогнозирования и формирования плана переключения оборудования и искать оптимальное решение в каждый момент времени. Это позволило исключить из математического аппарата такие ресурсоемкие методы, как динамическое программирование,

генетические алгоритмы и пр. В качестве эффективности было предложено оценивать эффективность всего процесса по генерации тепловой энергии и ее доставке конечному потребителю.

Дальнейший анализ показал, что из целевой функции (3.5) можно исключить составляющую качества. При наличии нескольких альтернативных источников тепла заданную температуру всегда можно поддерживать, управляя количеством включенных источников. Если наблюдается перегрев отапливаемых помещений, что может быть, например, в случае с централизованным отоплением, заданное значение температуры поддерживается путем сброса излишков тепловой энергии в окружающую среду через систему вентиляции. При этом потребитель оплачивает стоимость всей утилизируемой тепловой энергии, а следовательно, удельная стоимость единицы тепла может превысить стоимость тепла от альтернативных источников, что должно привести к изменению структуры системы теплоснабжения. Кроме того, в ряде случаев потребитель не захочет, чтобы автоматика управляла за него заданной температурой. Поэтому оценка качества поддерживаемой температуры теряет смысл.

Себестоимость тепловой энергии было принято нормировать на единицу мощности.

Предварительный анализ показал, что оценка эффективности процесса теплоснабжения от любого источника возможна только при включенном источнике [70]. Кроме того, чем более распределена система теплоснабжения, тем больше различных факторов, влияющих на эффективность процесса. Также на эффективность существенно влияют результаты техобслуживания и ремонта. В целом же эффективность процесса теплоснабжения носит вероятностный характер и ее точная оценка возможна только в результате непосредственного измерения.

На основании анализа результатов предварительного исследования был сделан ряд предложений. Было решено рассматривать для каждого источника

два КПД: теоретический  $\eta(\tau)$  и фактический  $\eta^*$ . В качестве теоретического КПД было принято считать зависимость КПД процесса теплоснабжения, вычисленного либо измеренного заранее. При этом имеется в виду не паспортное значение эффективности для определенных условий, а эффективность с учетом изменения внешних факторов на всем рабочем диапазоне оборудования. Исходной точкой для определения теоретического КПД может являться паспортное значение эффективности источника тепловой энергии. В дальнейшем теоретический КПД должен постоянно корректироваться на основании результатов измерения фактического КПД в зависимости от текущего значения параметров окружающей среды. Со временем накопленная статистика позволит сформировать достаточно точную зависимость эффективности всего процесса теплоснабжения от влияющих параметров.

Следует отметить, что для индивидуальных источников тепла, таких как бойлеры, котлы, ТНУ, в качестве первого приближения теоретического КПД можно принимать паспортное значение эффективности источника. Но чем в большей степени распределена система теплоснабжения, тем больше в транспортной системе потенциальных потерь, которые невозможно оценить без практических измерений. Поэтому для различного рода котельных паспортный КПД теплогенерирующего оборудования становится малоинформативным и определение первого значения теоретического КПД становится возможным только по результатам практических измерений.

Фактический КПД было предложено рассматривать как сумму теоретического и некоего корректирующего слагаемого  $\Delta\eta$

$$\eta^* = \eta(\tau) + \Delta\eta(\tau). \quad (3.6)$$

Величина  $\eta^*$  определяется по результатам фактического запуска системы теплоснабжения с подключением рассматриваемого источника. При

каждом последующем подключении значение  $\Delta\eta(\tau)$  будет корректироваться. Очевидно, что на величину  $\Delta\eta(\tau)$  влияют факты техобслуживания, ремонта, длительного межсезонного простоя, а также различные аварии в транспортной системе. Вероятностный характер рассматриваемых событий обуславливает необходимость разового подключения каждого источника тепловой энергии перед началом эксплуатации с целью определения фактического значения величины  $\Delta\eta(\tau)$ .

### 3.4.2 Экспериментальное определение КПД процесса теплоснабжения

К сожалению, определение эффективности всего процесса теплоснабжения без знания фактических тепловых потерь каждого потребителя невозможно. Поэтому главным условием для решения задачи оптимизации процесса является наличие индивидуальных приборов учета у каждого потребителя. Зная суммарную мощность тепловых потерь потребителей  $N_{\Sigma}^{номп}$  и текущую суммарную мощность источника  $N_{\Sigma}^{уст}$ , фактический КПД определяется как

$$\eta^* = \frac{N_{\Sigma}^{номп}}{N_{\Sigma}^{уст}}. \quad (3.7)$$

Здесь следует отметить, что мощность источника  $N_{\Sigma}^{уст}$  является суммой мощностей всех составляющих процесса генерации тепловой энергии. Для котлов это, например, сумма тепловой мощности и мощности электрооборудования, в частности насосов.

### 3.4.3 Синтез стоимостной составляющей критерия оптимальности

В качестве исходных данных было принято, что обобщенная система теплоснабжения обладает следующими характеристиками:

$T$  – ресурс системы, с;

$\Delta\tau$  – интервал моделирования или интервал, на котором оценивается работа системы, с;

$C_e$  – стоимость оборудования, грн;

$C_{ia}$  – стоимость монтажа и наладки, грн;

$C_s$  – стоимость обслуживания системы за период времени  $T$ , грн;

$C^*$  – прочие расходы за отчетный период  $T_{om}$ , грн;

$G_c^i$  – количество уже потребленного  $i$ -го ресурса за отчетный период  $T_{om}$  (месяц), в зависимости от типа источника может измеряться в кг, м<sup>3</sup>, кВтч;

$C_r^i(\tau, G_c^i)$  – текущая цена  $i$ -го ресурса, зависящая как от времени суток, так и от количества уже потребленного энергоресурса, в зависимости от типа источника может измеряться в грн/кг, грн/Дж, грн/кВтч, грн/м<sup>3</sup>;

$G_r^i$  – текущий расход  $i$ -го ресурса за отчетный период  $T_{om}$  (месяц);

$N_c$  – количество подключенных потребителей;

$N_{\Sigma}^{nomp}$  – суммарная мощность тепловых потерь потребителей, Вт;

$N_{\Sigma}^{ucm}$  – суммарная мощность теплогенерирующего оборудования.

Расчет стоимостной составляющей  $S(\tau)$  целевой функции было предложено осуществлять по выражению

$$S(\tau) = \frac{(C_e + C_{ia} + C_s)\Delta\tau}{N_c T} + \frac{C^* \Delta\tau}{N_c T_{om}} + C_r^i(\tau, G_c^i) \frac{3600000}{R_i \eta_i^*} + \Delta S, \quad (3.8)$$

где  $R_i$  – удельная энергоемкость  $i$ -го энергоресурса, для топлива это удельная теплота сгорания, для электричества  $R_i = 1$ ;

$\Delta S$  – стоимость дополнительных затрат ресурсов для обеспечения процесса и компенсации потерь, грн

$$\Delta S = \frac{\sum_j C_r^j(\tau, G_c^j) G_r^j \Delta \tau}{N_c}. \quad (3.9)$$

Первое слагаемое в выражении (3.8) учитывает капитальные затраты на покупку, монтаж, наладку и эксплуатацию оборудования в пересчете на одного потребителя за время  $\Delta \tau$ . Второе слагаемое позволяет учесть все прочие расходы на эксплуатацию оборудования. Третье слагаемое учитывает стоимость топлива, необходимого для получения 1 кВтч энергии. И, наконец, последнее слагаемое учитывает стоимость сопутствующих ресурсов, например стоимость холодной воды для компенсации физических потерь в котельной.

Как и в случае с фактическим КПД, величина  $\Delta S$  может быть определена только при фактическом включении источника тепловой энергии. На нее также будут влиять факты техобслуживания, ремонта и длительного простоя оборудования. Поэтому, как и в случае с КПД, для величины  $\Delta S$  в ходе эксплуатации должна накапливаться и постоянно уточняться статистика по текущему значению.

#### 3.4.4 Синтез составляющей надежности критерия оптимальности

Анализ показал, что надежность элементов системы теплоснабжения целесообразно оценивать суперпозицией двух составляющих: вероятностью внезапных отказов и вероятностью износных отказов [41; 58]. Вероятность внезапных отказов описывается выражением

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.10)$$

где  $\lambda$  – интенсивность внезапных отказов.

Со временем в процессе эксплуатации к внезапным отказам добавляются износные

$$P_u(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-(t-M)^2/2\sigma^2} dt, \quad (3.11)$$

где  $M$  – среднее значение долговечности элемента с учетом износа.

Формулу (3.11) можно использовать только для случая, когда элемент новый. Если элемент уже имеет какую-то наработку  $t_0$ , то совместная вероятность безотказной работы элемента определяется как

$$P(t) = e^{-\lambda t} \frac{P_u(t_0 + t)}{P_u(t_0)}, \quad (3.12)$$

где  $t_0$  – начальная наработка.

Определяющим фактором надежности является интенсивность отказов. Поэтому для моделирования целесообразно вместо выражения (3.12) использовать выражение

$$P(t) = e^{-\int_T^{T+t} \lambda dt} = e^{-\lambda_g t + \int_T^{T+t} \lambda_u dt}, \quad (3.13)$$

где  $\lambda_g$  – интенсивность внезапных отказов;

$\lambda_u$  – интенсивность износозависимых отказов.

Как показано в [50], интенсивность отказов с учетом изменения износа при переходе на другую мощность, а также при изменении параметров окружающей среды определяется как

$$\lambda_u = \frac{r(t)}{\sigma} K_{\text{моц}}(N_{np}) K_{oc}(x_{np}), \quad (3.14)$$

где  $r(t)$  – стандартная кривая интенсивности отказов;

$N_{np}$  – приведенная рабочая мощность;

$x_{np}$  – приведенный параметр окружающей среды (температура, частота, влажность и т. д.).

$$N_{np} = \frac{N}{N_{ном}}; x_{np} = \frac{x}{x_{ном}},$$

где  $N$  – текущая рабочая мощность;

$N_{ном}$  – номинальная рабочая мощность;

$x$  – текущее значение параметра окружающей среды;

$x_{ном}$  – номинальное значение параметра окружающей среды.

Дальнейший анализ показал, что для выражения в денежном эквиваленте характеристики надежности целесообразно использовать методы актуарной математики применяемой в страховом деле для расчета тарифных ставок по массовым рисковым видам страхования [71; 72; 73; 74].

Исходные данные для расчета:

$\bar{S}_n$  – средняя страховая сумма по одному договору;

$\bar{Q}$  – среднее возмещение по одному договору страхования;

$N$  – общее количество договоров, заключенных за некоторый период времени в прошлом;

$M$  – количество страховых случаев в  $N$  договорах;

$p$  – вероятность наступления страхового случая по одному договору;

$n$  – количество договоров страхования, отнесенных к периоду времени, на который проводится страхование.

Величина  $p$  определяется как

$$p = \frac{M}{N}.$$



Если статистика по величинам  $p$ ,  $\bar{S}_n$ ,  $\bar{Q}$  отсутствует, то их можно оценивать экспертным методом либо значениями показателей аналогов. Так, вероятность  $p$  наступления страхового случая можно заменить величиной, обратной надежности источника тепловой энергии  $p = 1 - P(\tau)$ . Среднюю страховую сумму по одному договору  $\bar{S}_n$  ориентировочно можно принять равной капитальным затратам на приобретение монтажа и наладку, отнесенным к количеству потребителей,

$$\bar{S}_n = \frac{C_e + C_{ia}}{n}. \quad (3.15)$$

Следует также учитывать, что количество договоров страхования не всегда определяется количеством подключенных потребителей  $N_c$ . Для случая с котельной такое допущение правомерно, т. к. в случае аварии котельной компенсации должны быть выплачены всем абонентам. Для индивидуальных источников тепла рекомендуется рассматривать некую ограниченную совокупность абонентов, например дом.

Требуемая денежная оценка надежности может быть получена на основе величины нетто-ставки  $T_n$

$$T_n = T_0 + T_p, \quad (3.16)$$

где  $T_0$  – основная часть нетто-ставки;

$T_p$  – рисковая надбавка.

$$T_0 = p \frac{\bar{Q}}{\bar{S}_n} = (1 - P(\tau)) \frac{\bar{Q}}{\bar{S}_n}; \quad (3.17)$$

$$T_p = 1.2T_0\alpha(\gamma)\sqrt{\frac{1-p}{np}} = 1.2T_0\alpha(\gamma)\sqrt{\frac{P(\tau)}{n(1-P(\tau))}}, \quad (3.18)$$

где  $\alpha(\gamma)$  – коэффициент, зависящий от гарантии безопасности  $\gamma$  (выбирается по справочным таблицам).

Получаемое по выражению (3.8) значение нетто-ставки представляет собой долю относительно страховой суммы. В качестве последней целесообразно брать суммарные капитальные затраты на монтаж и наладку источника тепловой энергии.

Согласно действующим методикам расчетов тарифных ставок, нижняя граница отношения величин  $\bar{Q}$  и  $\bar{S}_n$  в выражении (3.12) принимается в диапазоне от 0,3 для медицинского страхования до 0,7 для страхования ответственности [72]. В нашем случае можно принять отношение этих величин равным 0,7.

Расчет составляющей надежности  $R(\tau)$  можно осуществлять на некий период  $\Delta T$ , равный месяцу, кварталу, году, и таким образом учитывать изменения надежности в системе по факту случившихся аварий и проведенных ремонтных мероприятий.

В общем случае составляющая надежности с учетом выражений (3.15)–(3.18) определяется выражением

$$R(\tau) = \left( (1 - P(\tau))0,7 \left( 1 + 1,2\alpha(\gamma)\sqrt{\frac{P(\tau)}{n(1-P(\tau))}} \right) \right) \frac{(C_e + C_{ia})\Delta\tau}{\Delta T}. \quad (3.19)$$

Вероятность безотказной работы оборудования  $P(\tau)$  предлагается рассчитывать по методике, изложенной в [75], согласно которой надежность оборудования определяется двумя видами отказов: случайными и износowymi и зависит от состояния окружающей среды и относительной мощности, на которой функционирует оборудование.

### 3.4.5 Целевая функция локальной задачи оптимизации

Таким образом, целевая функция для решения локальной задачи оптимизации принимает вид

$$f_j(w_{ij}(\tau)) = S(\tau) + R(\tau) \rightarrow \min. \quad (3.20)$$

Все составляющие выражены в денежных единицах и, следовательно, поиск оптимального решения сводится к выбору в каждый момент времени самого дешевого источника тепловой энергии (см. рис. 3.1). В случае если его недостаточно для обеспечения заданной температуры, из оставшихся выбирается следующий источник с минимальной стоимостью генерируемой энергии.

Дальнейшие исследования выявили два недостатка предложенного способа расчета себестоимости тепловой энергии. Первый заключался в том, что величину  $G_r^i(\tau)$  в целевой функции (3.8) можно определить только при включенном источнике. Если источник выключен, необходимо ориентировочно оценить, какова будет себестоимость генерируемой им тепловой энергии.

### 3.5 Постановка глобальной задачи оптимизации

Очевидно, что в рамках города непосредственное управление структурой систем теплоснабжения каждого потребителя невозможно хотя бы потому, что они являются частной собственностью. С другой стороны, задача глобальной оптимизации становится актуальной в тех случаях, когда лимит газа и электроэнергии, отпускаемый городу, ограничен.

В общем случае глобальную задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: в условиях ограниченности доступных энергетических потоков необходимо обеспечить такую структуру

энергопотребления, которая обеспечит процесс теплоснабжения города на протяжении максимально длительного времени.

Единственным доступным рычагом управления процессом теплопотребления в масштабах города является цена на энергоресурсы. Увеличение или уменьшение цены на газ и электроэнергию приведет к изменению себестоимости тепловой энергии и, в свою очередь, к изменению структуры локальных систем теплоснабжения каждого потребителя.

Равномерное повышение цен на все энергоресурсы в целом приведет к удорожанию тепловой энергии и, как следствие, к потенциальному снижению заданной температуры у ряда потребителей. Это позволит снизить расход энергоресурсов за счет вынужденного снижения качества теплоснабжения потребителями.

С другой стороны, изменение соотношения цен на газ и электроэнергию позволит изменять структуру энергопотребления при сохранении суммарных поступлений в бюджет.

### **3.6 Определение решающего правила по изменению структуры цены на энергетические потоки**

Основная трудность в рассматриваемой глобальной задаче оптимизации заключается в том, что управление процессом теплоснабжения осуществляется только на основании косвенных воздействий и измерений, а также характеризуется существенной инерционностью. Изменение цены на тот или иной энергетический поток может дать эффект через часы или даже сутки. Поэтому главное требование к решению глобальной задачи оптимизации заключается в том, что период управляющих сигналов должен быть достаточно большим, чтобы можно было оценить эффект от их воздействия. Определение величины этого периода выходит за рамки данной работы и носит скорее социальный характер.

Основным критерием при решении глобальной задачи оптимизации следует принять время функционирования  $\tau_{\text{функ}}$  городских систем теплоснабжения при текущем расходе энергоресурсов  $G_i$  и их доступном лимите  $M_i$

$$\tau_{\text{функ}} = f(G_1, G_2, \dots, M_1, M_2, \dots).$$

Очевидно, что при  $M_i = \text{const}$  функция  $\tau_{\text{функ}} = f(G_1, G_2, \dots, M_1, M_2, \dots)$  не имеет оптимума и линейно возрастает с уменьшением расходов  $G_i$ , а после использования доступного количества энергоресурсов система умирает.

Если же принять, что доступное количество энергоресурсов постоянно обновляется с некоторым периодом  $\tau_M$ , то глобальная оптимизация будет достигнута при выполнении условия

$$M_i^{\text{ост}} - G_i(t_m - t) - M_i^{\text{нз}} \leq \delta_i, \quad (3.21)$$

где  $M_i^{\text{ост}}$  – остаток  $i$ -го энергоресурса;

$M_i^{\text{нз}}$  – неприкосновенный запас  $i$ -го энергоресурса;

$\delta_i$  – допустимая погрешность определения количества  $i$ -го энергоресурса.

При этом следует отметить, что величина  $G_i = f(C_r^i)$  носит вероятностный характер и не поддается точному определению.

Таким образом, глобальная оптимизация заключается в поддержании баланса между остатками ресурсов  $M_i^{\text{ост}}$  и скоростью их потребления  $G_i$  путем воздействия на цены энергоресурсов  $C_r^i$ .

### 3.7 Формализация алгоритмов системы управления

В предыдущих подразделах в математической форме были представлены решения локальной и глобальной задач оптимизации процесса теплоснабжения городских районов

В подразд. 3.1 показано, что локальная задача оптимизации заключается в выборе в каждый момент времени  $\tau$  таких связей  $w_{ij}(\tau)$  между источниками и потребителями, т. е. в организации такой структуры системы теплоснабжения, которая обеспечит минимум целевой функции  $f_j(\cdot)$  для каждого потребителя,

$$f_j(w_{ij}(\tau)) \rightarrow \min, \text{ при } K_{jk}(\tau) \leq K_{jk \max}.$$

В подразд. 3.4 показано, что глобальная оптимизация может быть достигнута при соблюдении баланса между остаточным количеством ресурсов  $M_i^{ост}$  и скоростью их расхода  $G_i$

$$M_i^{ост} - G_i(t_m - t) - M_i^{нз} \leq \delta_i.$$

Несмотря на кажущуюся простоту приведенных выражений, на практике их реализация для системы управления может потребовать синтеза достаточно сложной системы правил и условий. Поэтому перед проведением имитационного моделирования необходимо окончательно формализовать алгоритмы системы управления.

#### 3.7.1 Алгоритм управления для локальной задачи оптимизации

Предварительное моделирование показало, что к локальной оптимизации в общем случае возможны два подхода. Условно они определяются следующими двумя правилами:

– в каждый момент времени теплоснабжение потребителя может осуществляться только от одного источника тепловой энергии;

– в каждый момент времени теплоснабжение потребителя может осуществляться только от множества источников тепловой энергии.

Первый вариант на практике требует, чтобы каждый альтернативный источник мог полностью обеспечить потребителя теплом. Второй подход такого ограничения не имеет и является более универсальным. С другой стороны, второй подход требует внесения в алгоритм управления определенных ограничений. Так, например, если источник с меньшей стоимостью тепловой энергии работает не на полной мощности, нет смысла параллельно подключать еще один.

В общем виде алгоритм управления системой теплоснабжения для решения задачи локальной оптимизации представлен на рис. 3.2.

### 3.7.2 Алгоритм управления для глобальной задачи оптимизации

Следует отметить, что при дефиците какого-либо одного ресурса предлагаемая в данной работе система может увеличить стоимость этого ресурса и в рамках решения задачи локальной оптимизации перераспределить использование доступных ресурсов автоматически. В этом случае вмешательство потребителя не требуется, а изменение структуры цены непосредственно влияет на скорость потребления рассматриваемого ресурса.

В случае когда дефицит распространяется на все ресурсы, потенциально возможно два решения задачи глобальной оптимизации. Первое подразумевает возможность системы управления непосредственно изменять заданную температуру в помещениях потребителей. Появление дефицита всех ресурсов приведет к автоматическому снижению поддерживаемой температуры, т. е. к снижению качества обеспечения заданной температуры у потребителей, что непосредственно повлечет уменьшение скорости расхода ресурсов  $G_i$  за счет уменьшения тепловых

потерь. С другой стороны, все потребители будут находиться в равных условиях.

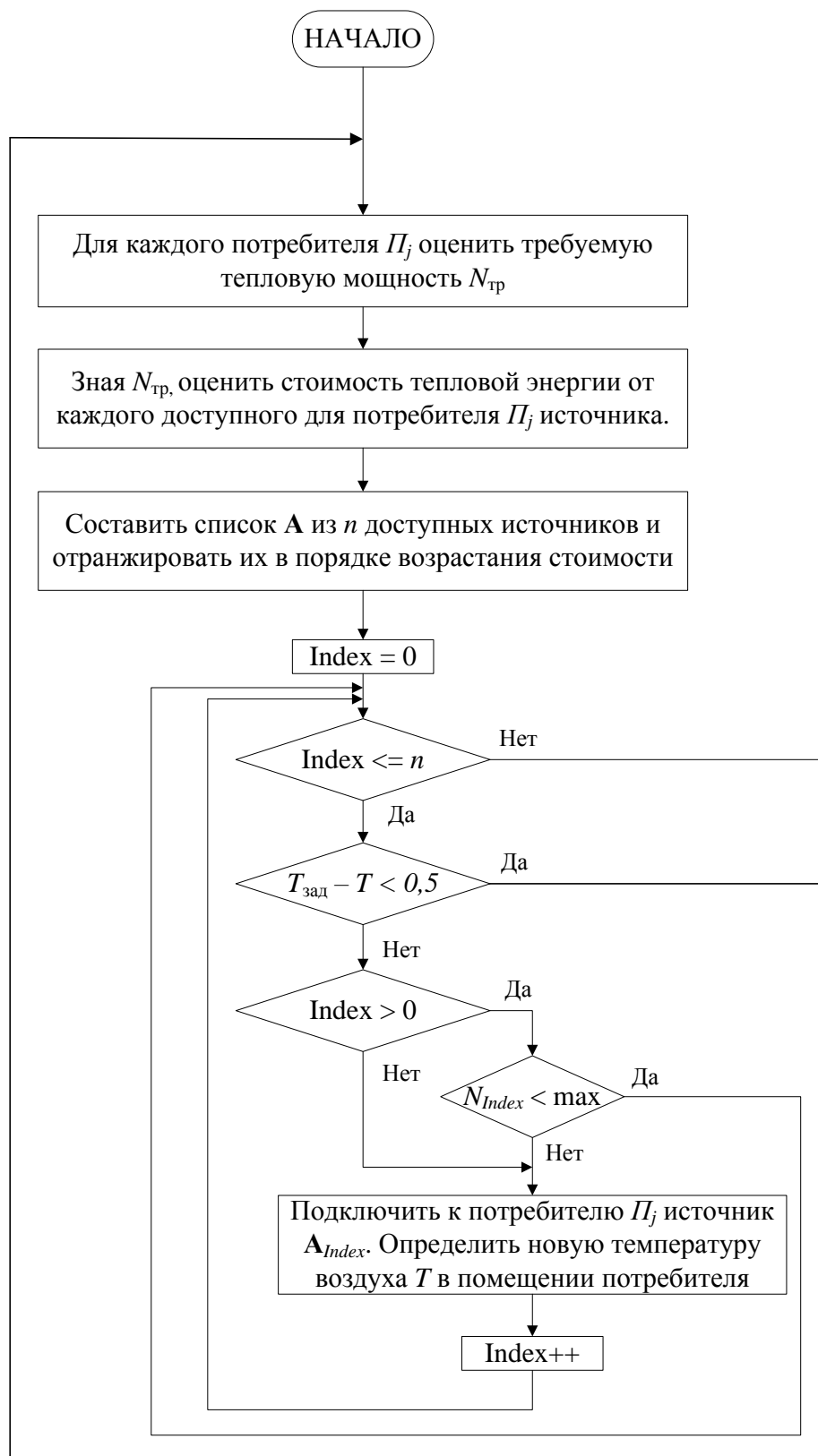


Рисунок 3.2 – Обобщенный алгоритм управления для задачи локальной оптимизации



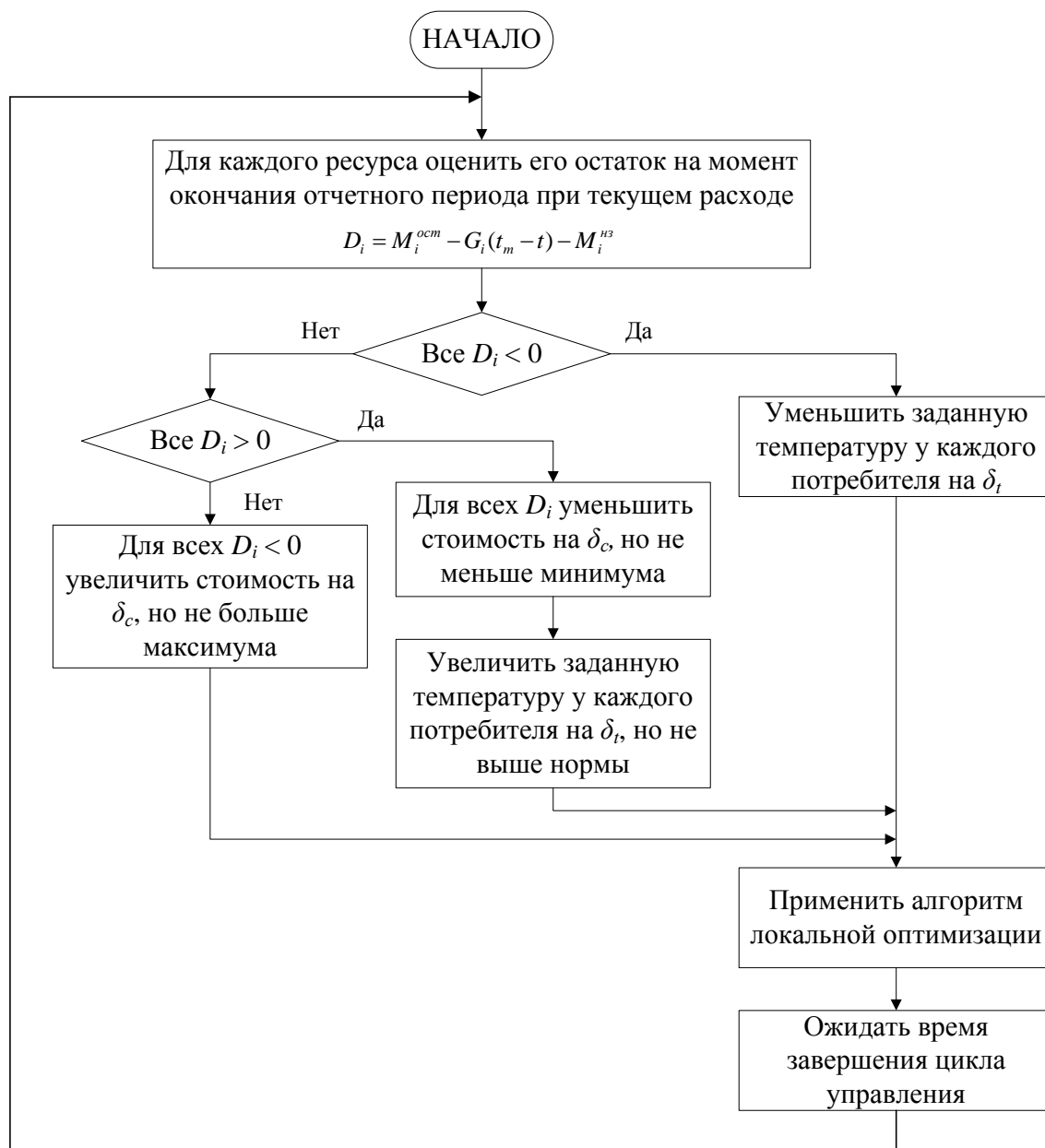


Рисунок 3.3 – Алгоритм управления для случая изменения заданной температуры потребителей

На рис. 3.3 представлен соответствующий алгоритм управления, предусматривающий возможность управления температурой потребителей. Алгоритм представляет собой бесконечную последовательность циклов управления. Учитывая, что на протяжении суток потребность в тепловой энергии существенно изменяется (в основном за счет горячего

водоснабжения), один цикл управления должен длиться достаточно долго, для того чтобы получить усредненное значение скорости потребления ресурсов. В рамках данного исследования было принято, что один цикл управления длится сутки.

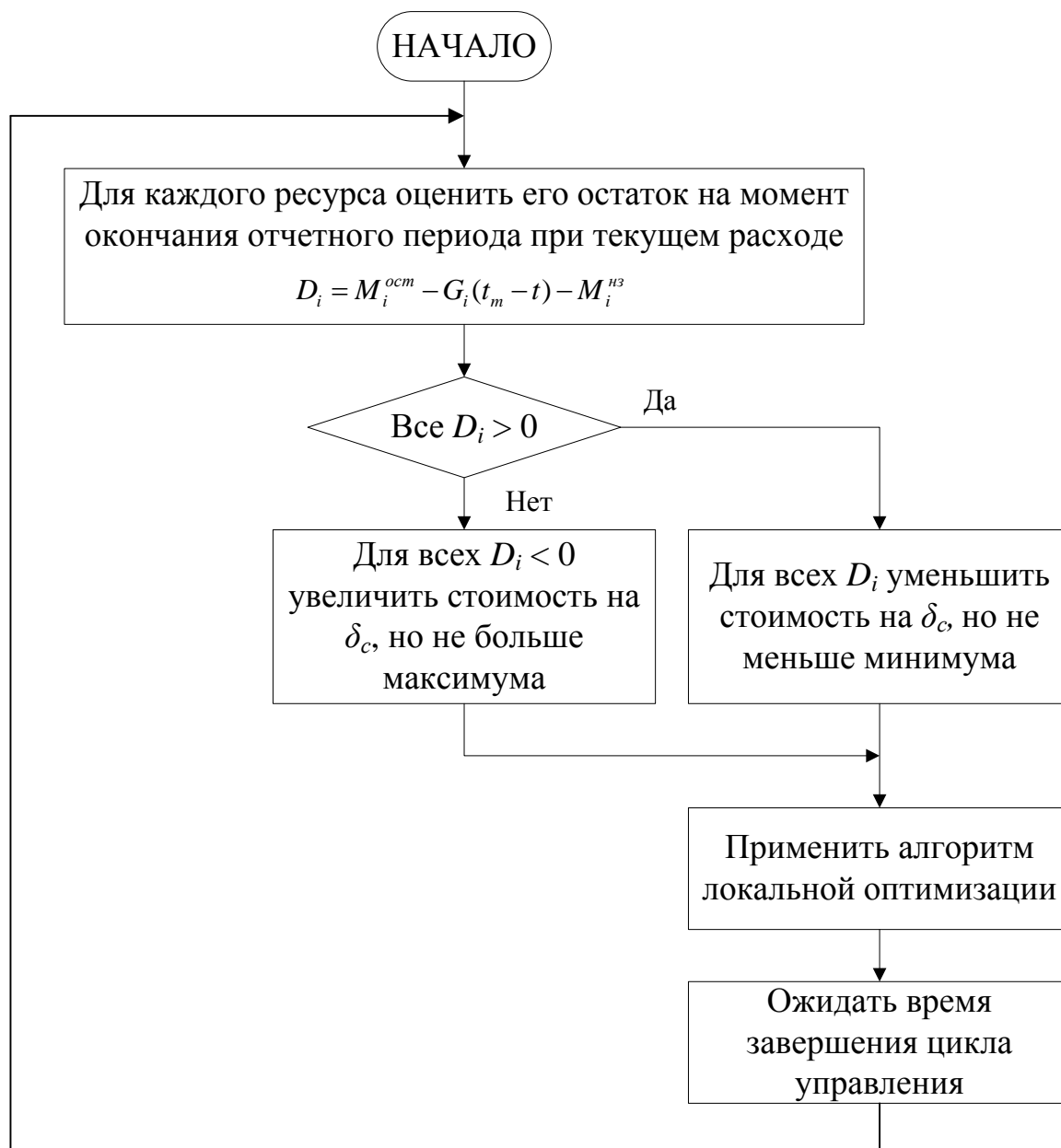


Рисунок 3.4 – Алгоритм управления для случая, когда изменения заданной температуры потребителей невозможны

Каждый цикл начинается с оценки остаточного количества ресурсов на момент времени  $t_m$ , когда планируется поступление новых запасов ресурсов,

$$D_i = M_i^{ocm} - G_i(t_m - t) - M_i^{H3}. \quad (3.22)$$

Если все остатки отрицательные, т. е. наблюдается дефицит всех ресурсов, уменьшается заданная температура потребителей и далее применяется алгоритм локальной оптимизации рис. 3.2. Если все остатки положительные, то стоимость ресурсов по возможности уменьшается до номинального значения, а поддерживаемая температура соответственно увеличивается до номинала.

Второй вариант управления основан на предположении о том, что система управления не может непосредственно влиять на заданные температуры у потребителей. В этом случае автоматизация управления в задаче глобальной оптимизации может быть выполнена лишь до определенной степени. Четкой зависимости  $G_i = f(C_r^i)$  между стоимостью ресурсов и скоростью их потребления не существует. Это случайная величина, полностью зависящая от человеческого фактора. Можно лишь ожидать, что с повышением стоимости того или иного ресурса потребители будут ограничивать его использование. Соответствующий алгоритм представлен на рис. 3.4.

Следует отдельно отметить предельные значения цен и температур. Очевидно, что бесконечно увеличивать или уменьшать эти величины нельзя. С другой стороны, определение их конкретных значений выходит за рамки данного исследования, т. к. это вопрос скорее из области социологии и политики.

### **3.8 Формализация метода управления структурой системы теплоснабжения в условиях ограничений на ресурсы**

Суть метода управления состоит в следующем.

1. Оценивается текущая потребность потребителя в тепловой энергии  $N_{треб}$  с учетом отопления и ГВС. Множество источников тепловой энергии может полностью обеспечить любого отдельного потребителя теплом и горячей водой, поэтому для оценки  $N_{треб}$  достаточно определить количество тепла, отдаваемое радиаторами отопления, а также текущее потребление горячей воды. Для крышных котельных и централизованных систем теплоснабжения определяется суммарная требуемая мощность с учетом всех подключенных абонентов.

2. Для каждого источника тепловой энергии оценивается тепловой КПД процесса теплоснабжения и определяется требуемая мощность источника. Определить тепловой КПД процесса без подключения источника к потребителю невозможно, поэтому данная оценка делается на основании данных имитационного моделирования. При этом величины тепловых и физических потерь в тепловых сетях моделируются либо по состоянию на момент последнего запуска системы, либо, при отсутствии необходимых данных, по регламентным значениям нормативной документации.

3. По требуемой мощности источника и его непосредственному КПД определяется расход первичных энергоресурсов, необходимых для обеспечения процесса теплоснабжения.

4. Анализируются величины тепловых и физических потерь, полученных либо путем непосредственного измерения, либо на основании имитационного моделирования. Определяется дополнительное количество тепловой энергии и первичных ресурсов, необходимых для компенсации тепловых и физических потерь. Полученные затраты выражаются в денежном эквиваленте.

5. С принятой периодичностью (месяц, квартал, год и т. д.) определяется текущее состояние надежности оборудования. Вычисляется величина страховых отчислений на текущий период. Данная величина является денежным эквивалентом надежности.

6. Для каждого источника проводится анализ капитальных и сопутствующих затрат, не зависящих от мощности источника. Сюда входят амортизация оборудования, заработная плата, отчисления по различного рода кредитам и т. д. При этом в затраты на амортизацию входит амортизация всех источников независимо от того, включены они или нет.

7. По каждому источнику сумма всех основных и дополнительных затрат нормируется на количество абонентов и определяется стоимость тепловой энергии для одного пользователя.

8. Для каждого потребителя составляется и сортируется по возрастанию цены список альтернативных источников, от которых может осуществляться теплоснабжение и ГВС.

9. Подключается очередной, в порядке возрастания цены, источник в списке. Если к потребителю уже подключен один и более источников и температура воздуха в помещениях ниже заданной на некую величину  $\delta$ , либо не хватает тепловой энергии для ГВС, подключается следующий в списке источник. Если наблюдается переизбыток тепловой энергии и подключено несколько источников, то отключается источник с самой высокой стоимостью. При этом подключение второго и далее источников может происходить только в случае достижения предыдущим источником максимальной тепловой мощности. При необходимости по результатам включения источника корректируют значения тепловых и физических потерь, затрат на их компенсацию и тепловой КПД процесса, что на последующих итерациях позволит уточнить стоимость тепловой энергии.

10. С принятой периодичностью (1 сутки) анализируются величины дефицитов энергоресурсов. При появлении потенциального отрицательного баланса количества энергоресурса на конец отчетного периода (месяц, квартал, год и т. д.) цена соответствующего ресурса увеличивается. При образовании потенциально положительного баланса энергоресурса его цена уменьшается. При наличии возможности непосредственного управления заданной температурой потребителя образование отрицательного баланса

приводит также к снижению данной температуры. Аналогичным образом положительный баланс приводит к возврату к номинальному значению температуры воздуха в помещениях потребителей.

На рис. 3.5 представлена обобщенная структурная схема системы управления теплоснабжением города.

Рассмотрим работу системы, с точки зрения разработанных ранее алгоритмов управления.

Вариант 1. При решении локальной задачи оптимизации (рис. 3.2) один цикл управления состоит в следующем. В блок анализа цены поступает информация от приборов учета источников и потребителей, а также данные модели ОУ. Сформированные для каждого потребителя списки источников тепловой энергии, отранжированные в порядке возрастания цены, передаются в блок управления структурой, который непосредственно осуществляет коммутацию выбранных источников и формирует текущую структуру системы теплоснабжения. Значения заданных температур воздуха и текущих расходов горячей воды от потребителей поступают в блок анализа требуемой мощности  $N_{треб}$ . После анализа текущей потребности каждого потребителя в тепловой энергии определяются требуемые мощности всех подключаемых в данный момент времени источников и через соответствующий блок управления  $N_{треб}$  управляющие воздействия поступают на конкретные источники.

Функционирующие в данный момент времени источники, требуют определенного расхода газа и электроэнергии, учет которых осуществляется в соответствующих приборах учета источников. Количество энергоресурсов, потребляемое в данный момент времени, а также уже потребленное, влияют на стоимость тепловой энергии на следующем цикле управления. На этом один цикл управления завершается.

Рассмотрим решение задачи глобальной оптимизации.

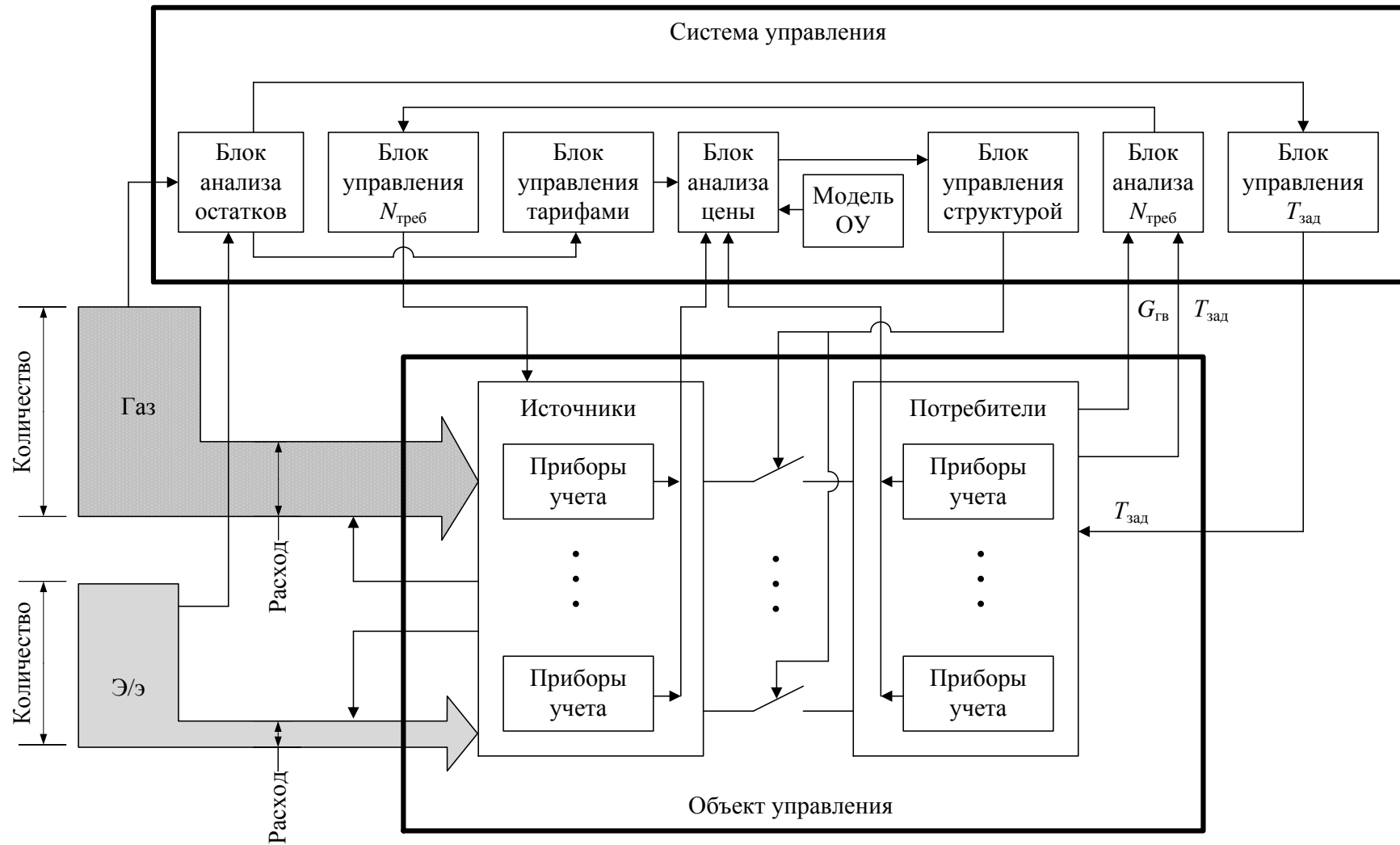


Рисунок 3.5 – Структурная схема системы автоматизированного управления теплоснабжением города

Вариант 2. Данные о доступном количестве энергоресурсов поступают в блок анализов их остатков, в котором определяется величина дефицита  $D_i$ . Если имеется дефицит только одного из энергоресурсов, то она поступает в блок управления тарифами и в зависимости от того, положительна величина  $D_i$  или отрицательна, цена соответствующего энергоресурса уменьшается или возрастает, что приводит к перераспределению потребления энергоресурсов. В остальном цикл управления такой же, как и для локальной оптимизации.

Вариант 3. В случае когда имеется возможность непосредственного управления величиной заданной температуры у каждого потребителя, в блоке анализа остатков определяется требуемое значение температуры и через блок управления  $T_{зад}$  управляющие воздействия передаются потребителям. Далее цикл управления такой же, как и для локальной оптимизации.

Вариант 4. В случае когда наблюдается дефицит всех энергоресурсов, а возможности управления заданной температурой нет, основной цикл управления соответствует варианту 2, с тем отличием что перераспределение потребления энергоресурсов невозможно без вмешательства потребителей. При отсутствии реакции потребителей блок управления тарифами будет повышать стоимость энергоресурсов до максимально возможного значения, и только снижение потребителями величин  $T_{зад}$ , а также  $G_{зв}$  приведет к снижению расхода энергоресурсов.

### **Выводы к разделу 3**

1. В общем случае система управления теплоснабжением для каждого  $i$ -го потребителя основывается на принятых критериях качества и формирует локальные целевые функции. При этом должна выбираться та структура



объекта управления, т. е. такие связи между источником и потребителем  $c_{ij}$ , при которой будет выполняться условие  $f_j(c_{ij}(\tau)) \rightarrow \min$ .

2. В качестве критериев целевой функции были выбраны стоимость ресурсов, эффективность оборудования и его надежность. Многокритериальная задача оптимизации была сведена к однокритериальной за счет приведения составляющих целевой функции к денежным единицам, т. е. оптимизация будет заключаться в поиске самого дешевого источника или группы источников.

3. Для представления показателя надежности в денежных единицах были использованы методы актуарной математики, применяемые при страховании рисков.

4. Исследования показали, что целевую функцию можно представить в виде суммы двух составляющих: аддитивной, зависящей только от времени, и мультипликативной. Аддитивная часть целевой функции является суммой всех затрат, не зависящих от мощности источника. Она состоит из капитальных затрат на сооружение. Мультипликативная часть целевой функции включает затраты на компенсацию тепловых и физических потерь в тепловых сетях  $\Delta S$  и компенсацию изменения надежности  $R(t, \Delta t)$ .

5. Решение задачи глобальной оптимизации сводится к обеспечению баланса между остатками ресурсов  $M_i^{ост}$  и скоростью их потребления  $G_i$  путем воздействия на цены энергоресурсов  $C_r^i$ .

6. Решение глобальной задачи оптимизации при дефиците одного вида ресурса сводится к решению локальной задачи оптимизации при перераспределении энергетических потоков расчетным путем в зависимости от текущих возмущений и ограничений.

7. Для решения задачи оптимизации при дефиците на все ресурсы было предложено два способа управления теплоснабжением.

Первый способ дает возможность поддерживать температуру в системе теплоснабжения автоматически, без вмешательства оператора. В случае

возникновения дефицита энергетических ресурсов система управления автоматически снижает заданную температуру и тем самым уменьшает тепловые потери зданий, что и определяет новый баланс системы.

При втором подходе решение задачи оптимизации без вмешательства оператора невозможно. Система может только до определенного уровня увеличивать цену на энергоресурсы с целью уменьшения их потребления

8. Рассмотрен и предложен метод управления процессом теплоснабжения городских районов в условиях ограничений на ресурсы за счет перехода от структурной оптимизации множества теплогенерирующих источников к управлению структурой цены, предложенной потребителю энергетического потока, что позволило достичь рационального использования энергоресурсов в системе.

## РАЗДЕЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В предыдущих разделах были приведены решения задач разработки имитационной модели объекта управления, выбора критериев и синтеза целевой функции оптимизации, а также были формализованы алгоритмы управления. Последним этапом данного диссертационного исследования будет проведение имитационного моделирования с целью проверки адекватности предложенных методов, моделей и алгоритмов.

#### 4.1 Исходные данные для моделирования

Напомним, что исследуемый объект управления представляет собой городской район из 200 многоэтажных жилых домов на 72 квартиры каждый. Для теплоснабжения района предусмотрены две районные котельные. Одна функционирует на газе, а другая использует тепловые насосы. В каждом доме есть крышная котельная. В каждой квартире – газовый котел и тепловой насос. Стоимость потребляемых ресурсов определяется действующими тарифами с учетом уже потребленного количества, а для электроэнергии также с учетом времени суток (по трехзонному тарифу).

Теплоснабжение отдельной квартиры может осуществляться одновременно от всех пяти источников или от любой их комбинации.

В рамках модели окружающей среды учитывается только температура воздуха.

Процессы теплообмена и теплопередачи в доме моделируются одномерными температурными полями во всех внешних и внутренних стенах.

Данные по тарифам на электроэнергию приведены в табл. 4.1 и 4.2. В табл. 4.3 приведены тарифы на газ.

Таблица 4.1. – Тарифы на электроэнергию

При условии, что объем потребленной э/э не превышает 150 кВт*ч/мес	При условии, что объем потребленной э/э не превышает 800 кВт*ч/мес	При условии, что объем потребленной э/э превышает 800 кВт*ч/мес
0,2802	0,3648	0,9576

Таблица 4.2. – Тарифные коэффициенты на электроэнергию, дифференцированные по периодам суток

Тарифная зона	Границы	Коэффициент
Пиковая	с 08-00 до 11-00 с 20-00 до 22-00	1,5
Полупиковая	с 07-00 до 08-00 с 11-00 до 20-00 с 22-00 до 23-00	1,0
Ночная	с 23-00 до 07-00	0,4

Таблица 4.3. – Тарифы на газ

При условии, что объем потребленного газа не превышает 2500 м <sup>3</sup> /год	При условии, что объем потребленного газа не превышает 6000 м <sup>3</sup> /год	При условии, что объем потребленного газа не превышает 12000 м <sup>3</sup> /год	При условии, что объем потребленного газа превышает 12000 м <sup>3</sup> /год
0,725	1,098	2,248	2,686

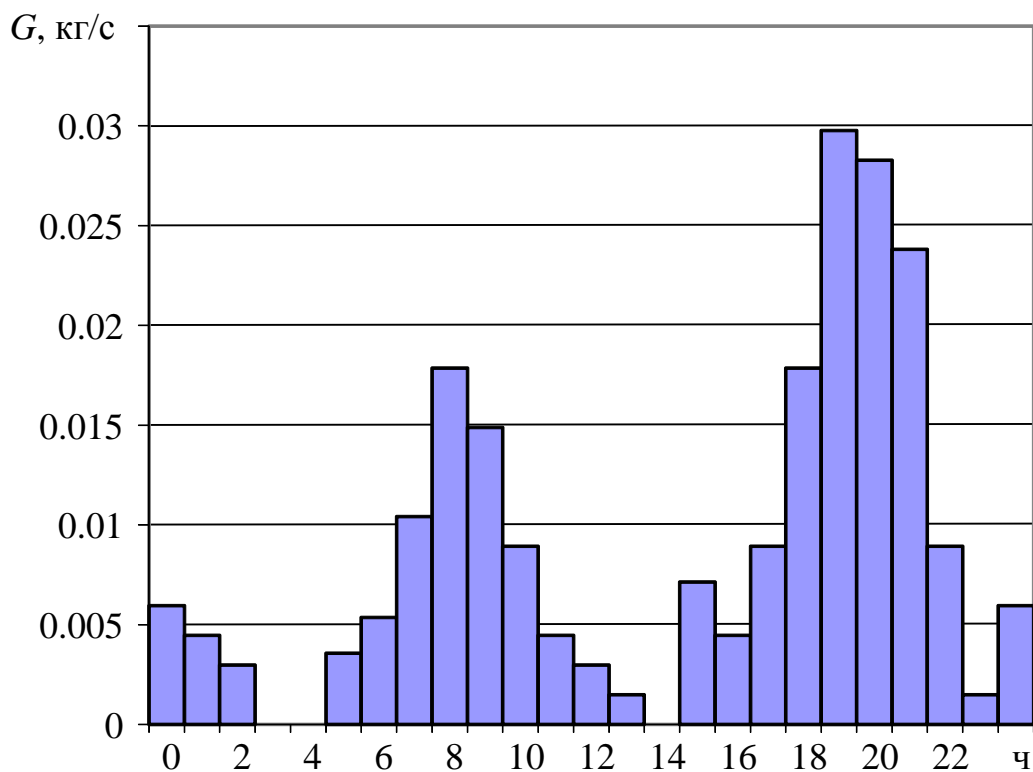


Рисунок 4.1– Суточный график потребления горячей воды одной квартирой

Таблица 4.4. – Параметры источников тепловой энергии

Источник тепловой энергии	Ресурс, лет	Стоимость, тыс. грн	КПД	Надежность	Количество абонентов	Страховые выплаты, грн	Электрическая мощность, кВт
Районная котельная на газе	30	13000	0,98	0,99	14400	1000	470
Районная котельная с ТНУ	30	200000	-	0,99	14400	1000	470
Крышная котельная	25	400	0,96	0,99	72	1000	5
Индивидуальный газовый котел	15	3	0,75	0,99	1	1000	0,05
Индивидуальная ТНУ	20	48	-	0,99	1	1000	0,05

Стандартный расчет тепловой мощности показал, что при выбранных параметрах модели дома (материал внешних стен кирпич, толщина – 57 см)

тепловые потери при  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляют примерно 200 000 Вт. Максимальная нагрузка на ГВС, согласно СНИП 2.04.01–85, составляет 450 000 Вт.

На рис. 4.1 приведен график потребления горячей воды одной квартирой в течение суток.

В табл. 4.4 приведены технико-экономические параметры источников тепловой энергии. В графе «Электрическая мощность» указана мощность, необходимая для работы насосов.

На рис. 4.2 представлен график изменения температуры воздуха окружающей среды начиная с 0-00 часов 1 января.

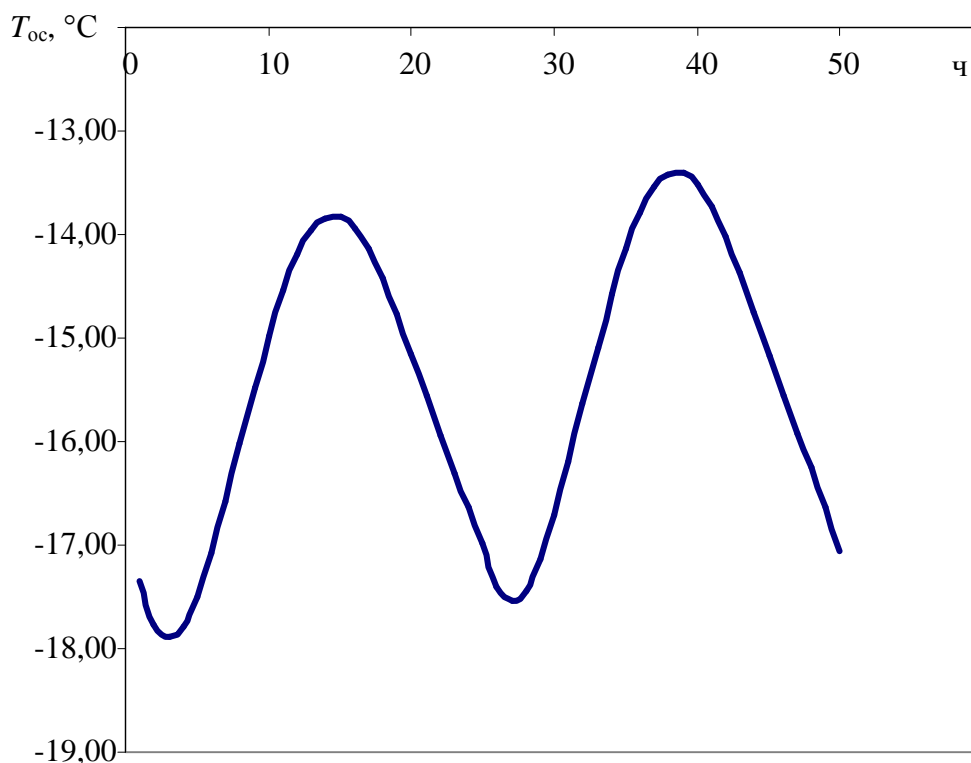


Рисунок 4.2 – Ход температуры воздуха окружающей среды

#### 4.2 Результаты анализа чувствительности целевой функции

С целью определения степени влияния различных аргументов целевой функции (3.8) был проведен анализ ее параметрической чувствительности [76; 77].

Для этого был проведен численный эксперимент, результаты которого представлены в табл. 4.5.

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

Прежде всего, отметим, что отрицательная чувствительность означает уменьшение целевой функции при увеличении данного параметра.

Основным влияющим фактором для всех источников является тепловая эффективность процесса генерации и передачи тепловой энергии от источника к потребителю. Исключением является индивидуальная ТНУ, для которой основным влияющим фактором является надежность.

Следующим по значимости влияющим фактором является цена на основной используемый ресурс. Для источников, функционирующих на газе, это цена на газ, а для ТНУ – на электроэнергию. Примерно такое же влияние оказывает требуемая мощность источника.

Еще меньшее влияние оказывает фактор надежности, а влиянием оставшихся параметров можно пренебречь.

Таблица 4.5. – Значения чувствительности целевой функции к вариациям параметров

	Капитальные затраты	Надежность	Ресурс	Тепловой КПД	Затраты э/э на работу насосов	Цена за х/в	Цена за газ	Цена за э/э	Расход х/в на подпитку	Требуемая мощность
РК	0.001	-0.030	-0.002	-3.867	0.012	0.002	0.985	0.012	0.042	0.945
РК с ТНУ	0.025	-0.656	-0.028	-2.385	0.018	0.004	-	0.972	0.028	0.930
КК	0.013	-0.381	-0.014	-2.171	0.002	-	0.985	0.002	-	0.985
АГВ	0.005	-0.089	-0.006	-2.161	0.015	-	0.980	0.015	-	0.980
ИТНУ	0.055	-1.681	-0.063	-1.090	0.010	-	-	0.945	-	0.934

Анализ полученных результатов наглядно показывает, что в системах теплоснабжения, особенно централизованных, в первую очередь необходимо направлять ресурсы на обслуживание магистральных трубопроводов, что повышает КПД процесса теплоснабжения.

### 4.3 Результаты имитационного моделирования

Моделирование системы теплоснабжения городского района осуществлялось на интервале 1 мес. Начиная с 0-00 часов 1 января с шагом 120 с. Для исследования ее свойств были проведены различные группы экспериментов [78; 79; 80].

В первой группе экспериментов теплоснабжение осуществлялось только от одного из рассматриваемых источников тепловой энергии. При этом мощности каждого источника хватало для полного покрытия потребности потребителей в тепле и горячей воде.

Условные обозначения те же, что и ранее: РК – районная котельная, функционирующая на газе; РК с ТНУ – районная котельная с теплонасосной установкой; КК – газовая крышная котельная; АГВ – индивидуальные газовые котлы; ИТНУ – индивидуальные теплонасосные установки.

Результаты моделирования теплоснабжения от одиночных источников представлены в табл. 4.6–4.10.

Анализ полученных результатов показал, что самым оптимальным источником являются индивидуальные ТНУ. Данные табл. 4.10 получены для случая утилизации тепла сточных вод со средней температурой 20 °С. Дополнительно был проведен эксперимент, в котором считалось, что тепло для ТНУ поступает от сетевой воды с температурой 5 °С (табл. 4.11). Он показал, что использование тепла сточных вод в качестве источника тепла для ИТНУ позволяет существенно (30 %) сократить затраты на решение задачи теплоснабжения. Стоит также отметить, что в летнее время средняя температура сточных вод может достигать 28 °С, что также может сократить затраты на ГВС в летнее время.



Таблица 4.6. – Результаты моделирования отопления городского района от РК

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч	0.00
Потреблено э/э, грн	0.00
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	9.04
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	9.00
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.19
Потреблено тепла радиаторами, грн	21527.60
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	10882.80
Дополнительные затраты, грн	3014.06
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.09
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	98632.25
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	2875902.30
на сумму, грн	6465028.37
Котельная потребила э/э, кВт*ч	349695.67
на сумму, грн	302769.44
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	7772.73
на сумму, грн	21266.19
Суммарные затраты на котельной, грн	6789064.00
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	4305520.00
ГВС, грн	2176560.00
Дополнительно, грн	602812.00
Итого, грн	7084892.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	6465028.37
х/в, грн	21266.19
э/э, грн	302769.44
Итого, грн	6789064.00
Прибыль, грн	
	295828.00

Таблица 4.7. – Результаты моделирования отопления городского района от РК с ТНУ

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч	0.00
Потреблено э/э, грн	0.00
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	12.68
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	16.95
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	319.75
Потреблено тепла радиаторами, грн	15543.50
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	10090.10
Дополнительные затраты, грн	4499.13
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.85
Итого по РК с ТНУ	
Источники ТНУ выдали тепла, ГДж	98108.65
Котельная потребила э/э, кВт*ч	5450612.28
на сумму, грн	5015212.28
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	8228.41
на сумму, грн	22512.94
Суммарные затраты на котельной, грн	5037725.22
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	3108700.00
ГВС, грн	2018020.00
Дополнительно, грн	899826.00
Итого, грн	6026546.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	0.00
х/в, грн	22512.94
э/э, грн	5015212.28
Итого, грн	5037725.22
Прибыль, грн	988820.78

Таблица 4.8. – Результаты моделирования отопления городского района от КК

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч	0.00
Потреблено э/э, грн	0.00
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	4.12
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	4.07
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн	16253.20
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	8498.75
Дополнительные затраты, грн	4232.41
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	0.63
Итого по КК	
Источники КК выдали тепла, ГДж	483.41
Крышная котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	14094.41
на сумму, грн	24769.93
Котельная потребила э/э, кВт*ч	3720.17
на сумму, грн	2785.43
Суммарные затраты на котельной, грн	27555.36
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	3250640.00
ГВС, грн	1699750.00
Дополнительно, грн	846482.00
Итого, грн	5796872.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	4953986.84
х/в, грн	0.00
э/э, грн	557085.76
Итого, грн	5511072.60
Прибыль, грн	285799.40

Таблица 4.9. – Результаты моделирования индивидуального отопления от АГВ

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч	2678.52
Потреблено э/э, грн	678.58
в т. ч. по пиковому тарифу, грн	236.61
по дневному тарифу, грн	340.85
по ночному тарифу, грн	101.12
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	4.10
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	4.05
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн	8842.87
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	4473.97
Дополнительные затраты, грн	732.89
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.72
Итого по АГВ	
АГВ потребили газа, м <sup>3</sup>	19055.89
на сумму, грн	13815.52
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	1768574.00
ГВС, грн	894794.00
Дополнительно, грн	146577.80
Итого, грн	2809945.80
Итого затраты источников по району	
газ, грн	2763104.23
х/в, грн	0.00
э/э, грн	135715.80
Итого, грн	2898820.03
Прибыль, грн	-88874.23

Таблица 4.10. – Результаты моделирования индивидуального отопления от ИТНУ с утилизацией сточных вод

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч	27806.40
Потреблено э/э, грн	9277.74
в т.ч. по пиковому тарифу, грн	4126.56
по дневному тарифу, грн	4262.55
по ночному тарифу, грн	888.64
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	4.10
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	4.05
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн	5424.11
Дополнительные затраты, грн	977.47
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.72
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	1084822.00
ГВС, грн	687040.00
Дополнительно, грн	195494.60
Итого, грн	1967356.60
Итого затраты источников по району	
газ, грн	0.00
х/в, грн	0.00
э/э, грн	1855548.00
Итого, грн	1855548.00
Прибыль, грн	111808.60

Таблица 4.11. – Результаты моделирования индивидуального отопления от ИТНУ без утилизации сточных вод

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч:	38245.50
Потреблено э/э, грн:	13770.70
в т.ч. по пиковому тарифу, грн:	6376.16
по дневному тарифу, грн:	6015.17
по ночному тарифу, грн:	1379.38
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж:	4.10678
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж:	4.06
Потреблено тепла радиаторами, ГДж:	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн:	8145.82
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup> :	859.74
Потреблено горячей воды, грн:	5011.16
Дополнительные затраты, грн	1001.17
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.72
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	1629164.00
ГВС, грн	1002232.00
Дополнительно, грн	200234.00
Итого, грн	2831630.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	0.00
х/в, грн	0.00
э/э, грн	2754140.00
Итого, грн	2754140.00
Прибыль, грн	77490.00

Таблица 4.12. – Результаты моделирования теплоснабжения от РК при уровне тепловых потерь, в 10 раз выше нормативных

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	9.22
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	9.22
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.18
Потреблено тепла радиаторами, грн	43938.80
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	22170.10
Дополнительные затраты, грн	4243.57
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.08
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	103341.09
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	3013581.90
на сумму, грн	13549064.23
Котельная потребила э/э, кВт*ч	349695.67
на сумму, грн	302769.44
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	7873.44
на сумму, грн	21541.73
Суммарные затраты на котельной, грн	13873375.39
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	8787760.00
ГВС, грн	4434020.00
Дополнительно, грн	848714.00
Итого, грн	14070494.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	13549064.23
х/в, грн	21541.73
э/э, грн	302769.44
Итого, грн	13873375.40
Прибыль, грн	197118.60

Таблица 4.13. – Результаты моделирования теплоснабжения от РК при уровне тепловых потерь, в 20 раз выше нормативных

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	9.65
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	9.84
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн	44952.70
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	22635.60
Дополнительные затраты, грн	4297.21
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.06
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	108490.51
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	3164214.13
на сумму, грн	14226306.71
Котельная потребила э/э, кВт*ч	349695.67
на сумму, грн	302769.44
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	7979.47
на сумму, грн	21831.84
Суммарные затраты на котельной, грн	14550907.99
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	8990540.00
ГВС, грн	4527120.00
Дополнительно, грн	859442.00
Итого, грн	14377102.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	14226306.71
х/в, грн	21831.84
э/э, грн	302769.44
Итого, грн	14550907.99
Прибыль, грн	-173805.99



Таблица 4.14. – Результаты моделирования теплоснабжения от РК при уровне физических потерь, в 10 раз выше нормативных

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	10.16
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	10.49
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.16
Потреблено тепла радиаторами, грн	52617.50
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	26610.20
Дополнительные затраты, грн	21413.40
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.50
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	110360.24
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	3218370.89
на сумму, грн	14469795.52
Котельная потребила э/э, кВт*ч	349695.67
на сумму, грн	302769.44
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	72638.93
на сумму, грн	198740.12
Суммарные затраты на котельной, грн	14971305.08
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	10523500.00
ГВС, грн	5322040.00
Дополнительно, грн	4282680.00
Итого, грн	20128220.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	14469795.52
х/в, грн	198740.12
э/э, грн	302769.44
Итого, грн	14971305.08
Прибыль, грн	
	5156914.93

Таблица 4.15. – Результаты моделирования теплоснабжения от РК при уровне физических потерь, в 20 раз выше нормативных

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	10.40
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	10.42
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.16
Потреблено тепла радиаторами, грн	63472.60
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	32176.50
Дополнительные затраты, грн	31171.80
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	3.47
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	116839.51
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	3407294.76
на сумму, грн	15319197.24
Котельная потребила э/э, кВт*ч	349695.67
на сумму, грн	302769.44
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	131014.49
на сумму, грн	358455.64
Суммарные затраты на котельной, грн	15980422.31
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	12694520.00
ГВС, грн	6435300.00
Дополнительно, грн	6234360.00
Итого, грн	25364180.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	15319197.24
х/в, грн	358455.64
э/э, грн	302769.44
Итого, грн	15980422.31
Прибыль, грн	9383757.69

Таблица 4.16. – Результаты моделирования теплоснабжения от РК при уровне тепловых и физических потерь, в 20 раз выше нормативных

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	12.40
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	12.43
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.16
Потреблено тепла радиаторами, грн	64779.00
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	32629.20
Дополнительные затраты, грн	33685.40
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	3.04
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	3738688.48
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	16809143.40
на сумму, грн	349695.67
Котельная потребила э/э, кВт*ч	302769.44
на сумму, грн	138540.72
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	379047.41
на сумму, грн	17490960.24
Суммарные затраты на котельной, грн	3738688.48
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	12955800.00
ГВС, грн	6525840.00
Дополнительно, грн	6737080.00
Итого, грн	26218720.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	16809143.40
х/в, грн	379047.41
э/э, грн	302769.44
Итого, грн	17490960.25
Прибыль, грн	
	8727759.75

Таблица 4.17. – Сводная таблица результатов моделирования теплоснабжения одиночного источника тепловой энергии

	РК	РК с ТНУ	КК	АГВ	ИТНУ с утилиз. Сточ. Вод	ИТНУ без утилиз. Сточ. Вод	РК				
							Тепл. Потери x10	Тепл. Потери x20	Физ. потери x10	Физ. потери x20	Тепл. И физ. потери x20
Затраты потребителя, тыс. грн											
Основные, грн	6482,0	5126,7	4950,4	2663,4	1771,9	2631,4	13221,8	13517,7	15845,5	19129,8	19481,6
Дополнительно, грн	602,8	899,8	846,5	146,6	195,5	200,2	848,7	859,4	4282,7	6234,4	6737,1
Итого, грн	7084,9	6026,5	5796,8	2809,9	1967,4	2831,6	14070,5	14377,1	20128,2	25364,2	26218,7
Затраты источников, грн											
газ, грн	6465,0	0	4953,9	2763,1	0		13549,1	14226,3	14469,8	15319,2	16809,1
х/в, грн	21,3	22,5	0	0	0		21,5	21,8	198,7	358,5	379,0
э/э, грн	302,8	5015,2	557,1	135,7	1855,5	2754,1	302,8	302,8	302,8	302,8	302,8
Итого, грн	6789,1	5037,7	5511,1	2898,8	1855,5	2754,1	13873,4	14550,9	14971,3	15980,4	17491,0
Прибыль, грн	295,8	988,8	285,8	-88,9	111,8	77,5	197,1	-173,8	5156,9	9383,8	8727,8
Эффективность транспортной системы	0,98	0,98					0,93	0,89	0,87	0,82	0,75

Следует отметить, что результаты моделирования в табл. 4.6–4.7 были получены для нормативных значений тепловых и физических потерь теплоносителя. С целью анализа влияния на процесс теплоснабжения уровня потерь была проведена вторая группа экспериментов.

В табл. 4.12–4.13 представлены результаты моделирования теплоснабжения от РК при уровне тепловых потерь соответственно в 10 и 20 выше нормативных, а в табл. 4.14–4.15 – то же для физических потерь. В табл. 4.16 приведены результаты моделирования при уровне тепловых и физических потерь, в 20 раз выше нормативных.

Для удобства сравнения в табл. 4.17 сведены результаты первой и второй группы экспериментов. Также в графе «Эффективность транспортной системы» приведено отношение потребленной потребителем тепловой энергии к энергии, выработанной котлами в котельной.

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

Прежде всего, как было показано в анализе чувствительности целевой функции, принятые тарифы на энергоресурсы существенно влияют на итоговую стоимость тепловой энергии. Даже старые, низкоэффективные АГВ с КПД порядка 0,75 могут конкурировать с современными высокоэффективными котлами с КПД, равным 0,96, только за счет разницы в тарифах. Поэтому выбор и обоснование действующего тарифа является одним из важнейших факторов, влияющих на стоимость тепловой энергии для конечного потребителя.

Также полученные результаты свидетельствуют о важности эффективности транспортной системы для централизованных котельных. Если обслуживание магистральных трубопроводов ведется в соответствии с регламентом и их состояние и характеристики соответствуют нормативным значениям, то эффективность системы транспортировки теплоносителя почти равна 1. В то же время результаты энергоаудита тепловых сетей различных городов свидетельствуют о превышении уровня потерь в десятки и сотни раз по отношению к нормативным. Теплоизоляция трубопроводов сгнила,

местами полностью отсутствует. Утечки теплоносителя могут достигать огромных значений, вплоть до полного отсутствия «обратки». По данным, предоставленным КП «Тепловые сети города Южный», эффективность их процесса производства и транспортировки теплоносителя составляет всего 0,66. По данным учетных приборов, за январь 2015 года суммарно все потребители города получили 9291 Гкал, а оборудование котельной потребило газа на 13904 Гкал.

Таблица 4.18. – Результаты моделирования теплоснабжения от множества источников

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч	26376.40
Потреблено э/э, грн	6868.06
в т.ч. по пиковому тарифу, грн	268.36
по дневному тарифу, грн	5300.42
по ночному тарифу, грн	1299.28
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж	4.14
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	4.09
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн	6660.45
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	3952.99
Дополнительные затраты, грн	984.29
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.72
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	0.00
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	0.00
на сумму, грн	0.00
Котельная потребила э/э, кВт*ч	0.00
на сумму, грн	0.00
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	0.00
на сумму, грн	0.00
Суммарные затраты на котельной, грн:	0.00

Продолжение таблицы 4.18

Параметр	Значение
<b>Итого по РК с ТНУ</b>	
Источники ТНУ выдали тепла, ГДж:	0.00
Котельная потребила э/э, кВт*ч:	0.00
на сумму, грн:	0.00
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup> :	0.00
на сумму, грн:	0.00
Суммарные затраты на котельной, грн:	0.00
<b>Итого по КК</b>	
Источники КК выдали тепла, ГДж:	88.68
Крышная котельная потребила газа, м <sup>3</sup> :	2573.19
на сумму, грн:	1892.89
Котельная потребила э/э, кВт*ч:	611.33
на сумму, грн:	243.16
Суммарные затраты на котельной, грн:	2136.04
<b>Итого по АГВ</b>	
АГВ потребили газа, м <sup>3</sup> :	5182.39
на сумму, грн:	3757.23
<b>Итого затраты потребителей по району</b>	
Тепло, грн	1332090.00
ГВС, грн	790598.00
Дополнительно, грн	196857.80
Итого, грн	2319545.80
<b>Итого затраты источников по району</b>	
газ, грн	1130023.80
х/в, грн	0.00
э/э, грн	1422243.77
Итого, грн	2552267.57
Прибыль, грн	-232721.77

Таблица 4.19. – Результаты моделирования теплоснабжения от множества источников. Максимальная мощность ТНУ снижена на 50 %

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч:	26789.00
Потреблено э/э, грн:	7203.29
в т.ч. по пиковому тарифу, грн:	702.07
по дневному тарифу, грн:	5226.88
по ночному тарифу, грн:	1274.34
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж:	6.52
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж:	6.48
Потреблено тепла радиаторами, ГДж:	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн:	6949.74
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup> :	859.74
Потреблено горячей воды, грн:	4061.63
Дополнительные затраты, грн	1030.38
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	1.72
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж:	83.37
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup> :	2389.16
на сумму, грн:	5370.83
Котельная потребила э/э, кВт*ч:	564.00
на сумму, грн:	787.63
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup> :	12.90
на сумму, грн:	35.30
Суммарные затраты на котельной, грн:	6193.75
Итого по РК с ТНУ	
Источники ТНУ выдали тепла, ГДж:	15122.49
Котельная потребила э/э, кВт*ч:	831865.92
на сумму, грн:	323844.42
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup> :	1839.80
на сумму, грн:	5033.69
Суммарные затраты на котельной, грн:	328878.11
Итого по КК	
Источники КК выдали тепла, ГДж:	8.26



Продолжение таблицы 4.19

Параметр	Значение
Крышная котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	236.43
на сумму, грн	171.41
Котельная потребила э/э, кВт*ч	44.00
на сумму, грн	14.24
Суммарные затраты на котельной, грн	185.65
Итого по АГВ	
АГВ потребили газа, м <sup>3</sup>	5347.37
на сумму, грн	3876.85
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	1389948.00
ГВС, грн	812326.00
Дополнительно, грн	206076.00
Итого, грн	2408350.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	815022.00
х/в, грн	5068.99
э/э, грн	1768138.74
Итого, грн	2588229.73
Прибыль, грн	
	-179879.73

Таблица 4.20. – Результаты моделирования теплоснабжения от множества источников без ИТНУ

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч:	2033.60
Потреблено э/э, грн:	577.10
в т.ч. по пиковому тарифу, грн:	224.76
по дневному тарифу, грн:	306.66
по ночному тарифу, грн:	45.68
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж:	4.33

Продолжение таблицы 4.20

Параметр	Значение
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж	4.28
Потреблено тепла радиаторами, ГДж	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн	8247.34
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup>	859.74
Потреблено горячей воды, грн	4366.06
Дополнительные затраты, грн	1440.80
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	2.58
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж	0.00
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	0.00
на сумму, грн	0.00
Котельная потребила э/э, кВт*ч	0.00
на сумму, грн	0.00
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	0.00
на сумму, грн	0.00
Суммарные затраты на котельной, грн	0.00
Итого по РК с ТНУ	
Источники ТНУ выдали тепла, ГДж	25500.86
Котельная потребила э/э, кВт*ч	1402122.86
на сумму, грн	605992.94
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	2879.77
на сумму, грн	7879.04
Суммарные затраты на котельной, грн	613871.98
Итого по КК	
Источники КК выдали тепла, ГДж	90.85
Крышная котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	2645.71
на сумму, грн	1972.54
Котельная потребила э/э, кВт*ч	539.67
на сумму, грн	212.39
Суммарные затраты на котельной, грн	2184.93
Итого по АГВ	
АГВ потребили газа, м <sup>3</sup>	14256.60
на сумму, грн	10336.03
Итого затраты потребителей по району	

Продолжение таблицы 4.20

Параметр	Значение
Тепло, грн	1649468.00
ГВС, грн	873212.00
Дополнительно, грн	288160.00
Итого, грн	2810840.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	2461714.78
х/в, грн	7879.04
э/э, грн	763891.95
Итого, грн	3233485.77
Прибыль, грн	
	-422645.77

Таблица 4.21. – Результаты моделирования теплоснабжения от множества источников без АГВ

Параметр	Значение
Итого по отдельному дому	
Потреблено э/э, кВт*ч:	37105.50
Потреблено э/э, грн:	12688.80
в т.ч. по пиковому тарифу, грн:	5889.36
по дневному тарифу, грн:	5533.33
по ночному тарифу, грн:	1266.12
Перепроизведено тепловой энергии, ГДж:	4.17
Недопроизведено тепловой энергии, ГДж:	4.12
Потреблено тепла радиаторами, ГДж:	320.17
Потреблено тепла радиаторами, грн:	7783.50
Потреблено горячей воды, м <sup>3</sup> :	859.74
Потреблено горячей воды, грн:	4887.84
Дополнительные затраты, грн	1013.26
Максимальное отклонение температуры от заданной, °С	3.2
Итого по РК	
Источники РК выдали тепла, ГДж:	0.00
Котельная потребила газа, м <sup>3</sup> :	0.00

Продолжение таблицы 4.21

Параметр	Значение
на сумму, грн	0.00
Котельная потребила э/э, кВт*ч	0.00
на сумму, грн	0.00
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	0.00
на сумму, грн	0.00
Суммарные затраты на котельной, грн	0.00
Итого по РК с ТНУ	
Источники ТНУ выдали тепла, ГДж	7262.25
Котельная потребила э/э, кВт*ч	394148.62
на сумму, грн	225096.99
Котельная потребила х/воды, м <sup>3</sup>	846.40
на сумму, грн	2315.74
Суммарные затраты на котельной, грн	227412.73
Итого по КК	
Источники КК выдали тепла, ГДж	75.60
Крышная котельная потребила газа, м <sup>3</sup>	2188.39
на сумму, грн	3173.17
Котельная потребила э/э, кВт*ч	491.50
на сумму, грн	198.49
Суммарные затраты на котельной, грн	3371.66
Итого по АГВ	
АГВ потребили газа, м <sup>3</sup>	0.00
на сумму, грн	0.00
Итого затраты потребителей по району	
Тепло, грн	1556700.00
ГВС, грн	977568.00
Дополнительно, грн	202652.00
Итого, грн	2736920.00
Итого затраты источников по району	
газ, грн	634633.24
х/в, грн	2315.74
э/э, грн	2802555.68
Итого, грн	3439504.66
Прибыль, грн	-702584.66

Таблица 4.22. – Сводная таблица результатов моделирования теплоснабжения множеством источников тепловой энергии

	Без ограничений	Макс. Мощность ИТНУ снижена на 50%	Без ИТНУ	Без АГВ
Затраты потребителя, тыс. грн				
Основные, грн	2122,7	2202,3	2522,7	2534,3
Дополнительно, грн	196,9	206,1	288,2	202,7
Итого, грн	2319,5	2408,4	2810,8	2736,9
Затраты источников, тыс. грн				
газ, грн	1130,0	815,0	2461,7	634,6
х/в, грн	0	5,1	7,9	2,3
э/э, грн	1422,2	1768,1	763,9	2802,6
Итого, грн	2552,3	2588,2	3233,5	3439,5
Прибыль, грн	-232,7	-179,9	-422,7	-702,6

В третьей группе экспериментов все источники были взаимозаменяемыми и могли работать параллельно. Результаты моделирования представлены в табл. 4.18–4.21.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальное использование множества альтернативных источников тепловой энергии позволяет стабильно решать задачу теплоснабжения с меньшими затратами по сравнению с использованием только одного источника.

В последней группе экспериментов с целью исследования возможности перехода от структурной оптимизации множества теплогенерирующих источников к управлению структурой цены предложенного потребителю энергетического потока изучалось влияние цены энергоресурса на уровень его потребления.

В ходе экспериментов цена на электроэнергию и газ изменялась путем умножения соответствующих тарифов на масштабный множитель  $x$ . На рис. 4.3 приведена зависимость потребленного количества электроэнергии  $E$  от

множителя  $x$ . На рис. 4.4 приведена аналогичная зависимость потребленного объема газа.

Анализ полученных результатов свидетельствует о потенциальной возможности управлять потреблением энергоресурсов путем воздействия на их цену.

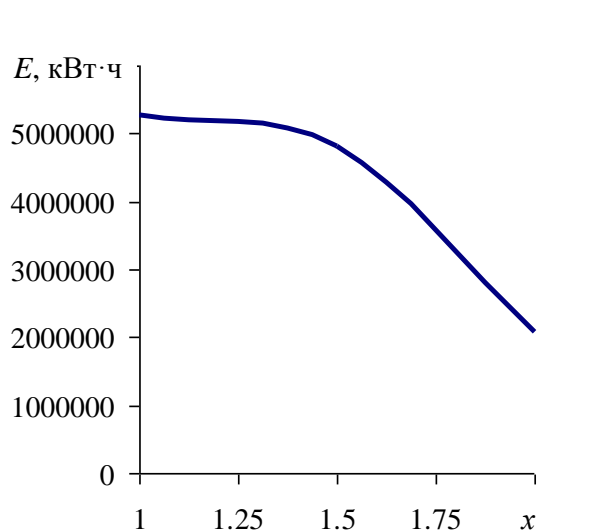


Рисунок 4.3 – Зависимость потребленного количества электроэнергии от величины  $x$

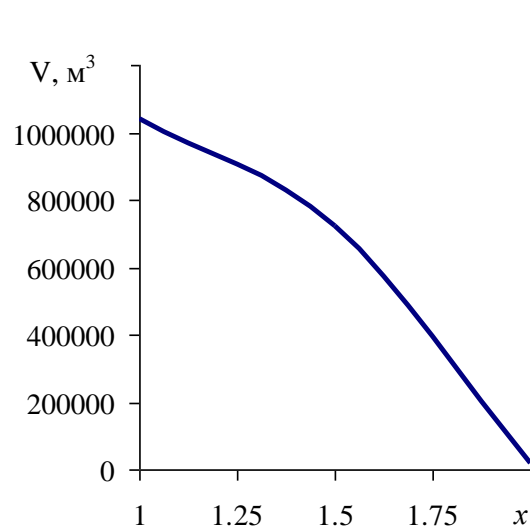


Рисунок 4.4 – Зависимость потребленного количества газа от величины  $x$

На рис. 4.5–4.8 представлены временные диаграммы включения источников системы теплоснабжения.

Диаграмма «Тариф э/э» демонстрирует суточное изменение трехзонного тарифа на электроэнергию. Отметим, что в обычной практике использование такого тарифа не оправдано, т. к. экономия на ночном тарифе полностью теряется в пиковое время. В то же время в рассматриваемой системе активно используются ночной и дневной тарифы для получения тепловой энергии из электрической, а в пиковое время происходит переключение на газовые источники. При введении ограничений на самые дешевые источники тепловой энергии можно наблюдать постепенный переход на менее оптимальные источники.

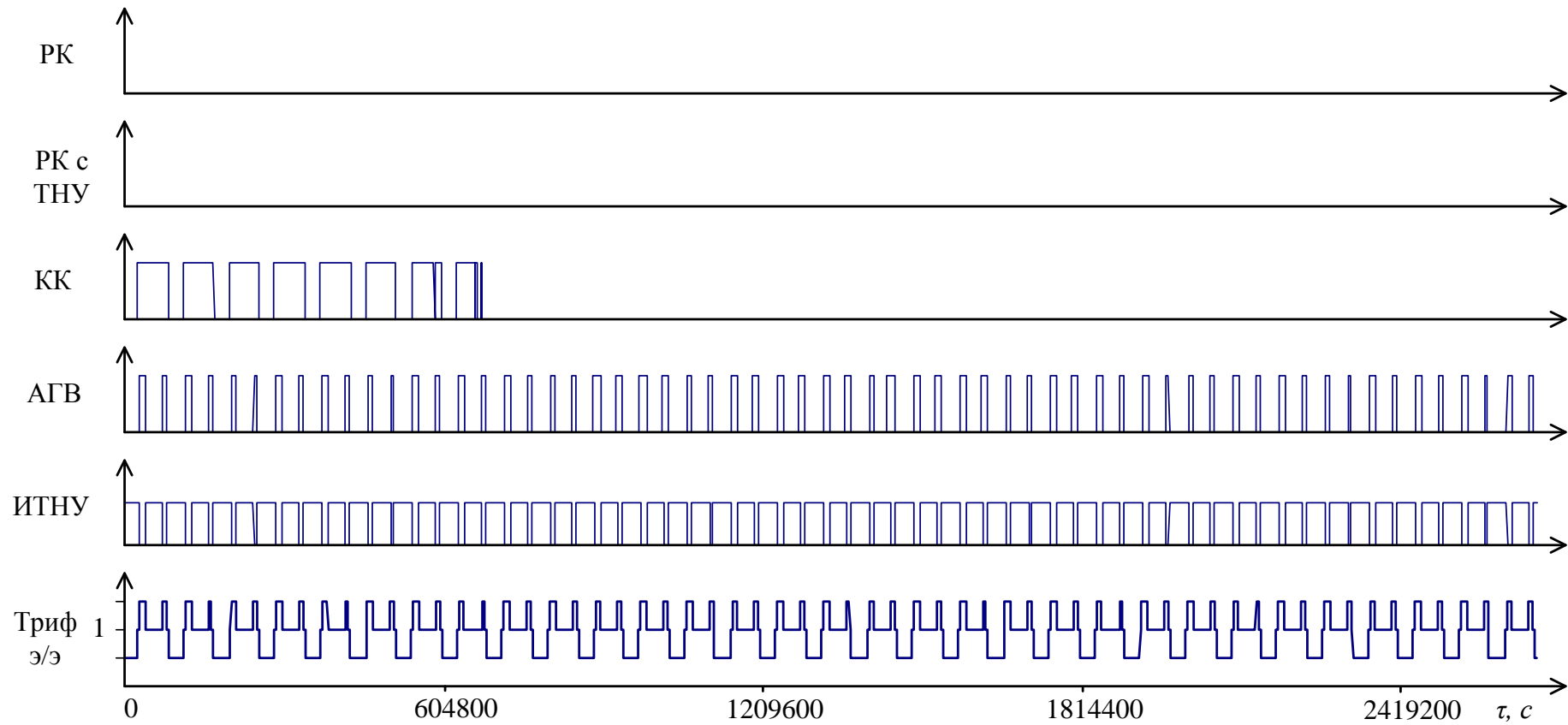


Рисунок 4.5 – Временная диаграмма включения оборудования без ограничений

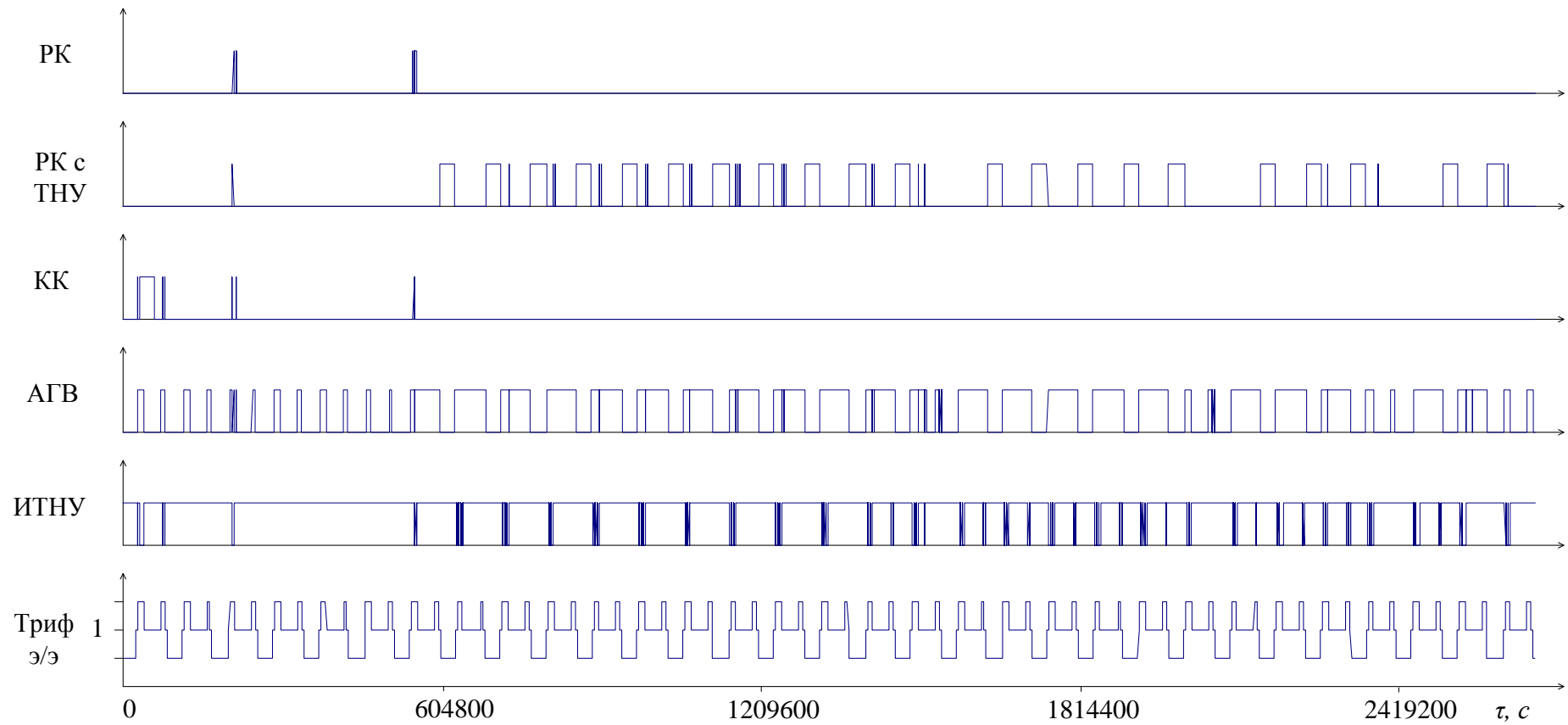


Рисунок 4.6 – Временная диаграмма включения оборудования  
при снижении максимальной мощности ИТНУ на 50 %



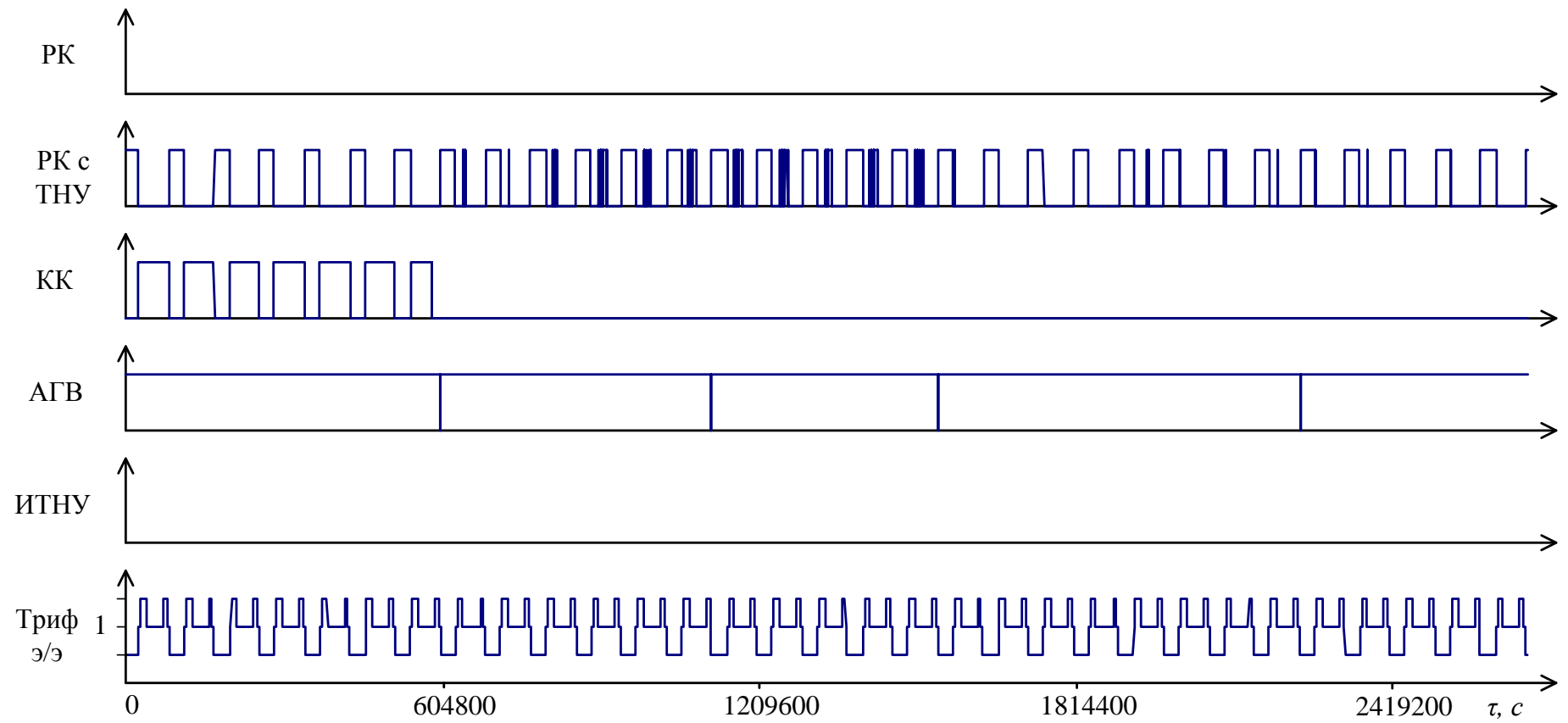


Рисунок 4.7 – Временная диаграмма включения оборудования без ИТНУ

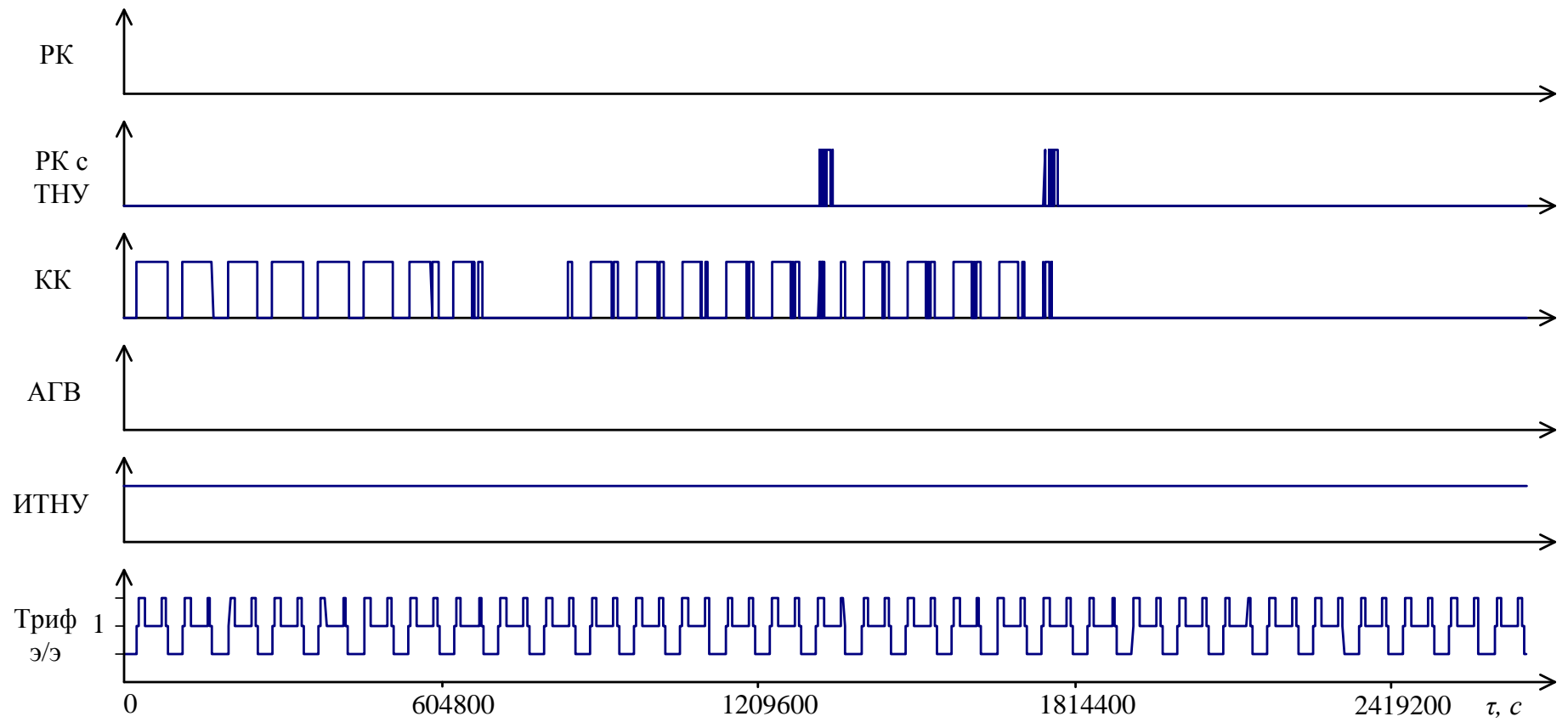


Рисунок 4.8 – Временная диаграмма включения оборудования без АГВ

В ряде случаев мы видим единичные включения централизованных котельных. Здесь следует отметить, что система управления приняла решение о включении этих источников во вторую и даже третью очередь, т. к. основной источник просто не успевает компенсировать резкое возрастание тепловой нагрузки. Хотя подобные решения не допустимы с точки зрения практики, они все же представлены на плакатах для более полного понимания логики работы системы управления. При практической реализации такие решения можно исключить элементарными фильтрами.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о возможности оптимизации финансовых затрат на теплоснабжение городских районов путем управления структурой системы теплоснабжения города при условии наличия альтернативных источников тепловой энергии.

#### **Выводы к разделу 4**

1. Практическое значение полученных результатов заключается в обеспечении минимальных финансовых затрат для потребителя в течение отопительного периода при наличии альтернативных источников и применении разработанных и апробированных подходов к совершенствованию существующей КИСУ, включая ее информационное и математическое обеспечение, что позволило минимизировать финансовые затраты при любых ограничениях на ресурсы.

2. Проведен анализ параметрической чувствительности разработанной целевой функции оптимизации. Основным влияющим фактором для всех видов используемых источников является тепловой КПД. Для централизованных котельных на газе и ТНУ чувствительность составила  $-3,8$  и  $-2,3$  соответственно. Для крышной котельной и АГВ –  $-2,1$ . Для ИТНУ –  $-1,1$ .

3. Показано, что эффективность централизованных систем теплоснабжения в первую очередь определяется эффективностью тепловых сетей. При нормативном значении тепловых и физических потерь эффективность рассмотренной тепловой сети составляет 97 %. При увеличении потерь в 20 раз эффективность снижается до 75 %.

4. Показано, что при идеальных условиях (потери соответствуют нормативным, реализована возможность утилизации тепла сточных вод в тепловых насосах, используется трехзонный тариф на электроэнергию) месячная стоимость тепловой энергии для рассмотренного городского района из 200 домов составляет 1,97 млн грн. При использовании индивидуальных газовых котлов с КПД 0,75 стоимость составила 2,8 млн грн. Соответственно при использовании современных высокоэффективных водогрейных котлов с КПД  $0,8 \div 0,85$  затраты будут еще ниже. При утилизации в тепловых насосах тепла грунтовых вод или морской воды с температурой 10 °C стоимость составляет 2,83 млн грн. Для крышной котельной затраты составили 5,8 млн грн. Для централизованных котельных при идеальном состоянии тепловых сетей стоимость тепловой энергии лежит в пределах  $6 \div 7$  млн грн, но с ухудшением состояния тепловых сетей она резко увеличивается. Так, для тепловых и физических потерь, превышающих нормативные значения в 20 раз, затраты составили 26 млн грн.

5. Показано, что оптимальное управление альтернативными источниками позволяет снизить финансовые затраты на обеспечение процесса теплоснабжения. Так, для одиночных источников при условии утилизации тепла грунтовых вод минимальная стоимость была у АГВ (2,8 млн грн). При оптимальном управлении всеми источниками эта стоимость была снижена до 2,3 млн грн.

6. Результаты диссертационной работы введены в учебный процесс на кафедре «АТП» ОНПУ. На ОАО «Одессаоблэнерго» и КП тепловых сетей «Южтеплокоммунэнерго» внедрены модели большой распределенной системы тепло- и энергоснабжения городских районов для анализа.

## ВЫВОДЫ

Диссертация содержит полученные автором научно обоснованные результаты, которые заключаются в совершенствовании методов и моделей автоматизированного управления системой теплоснабжения города, что повысило эффективность КИСУ теплоснабжения за счет целевого изменения структуры объекта управления, целевая функция которой учитывает технико-экономические показатели.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Для расчетов предложена математическая модель системы теплоснабжения потребителя тепла при любых возмущениях. Такая модель определяет структуру объекта управления на базе всего множества технических средств, которые рассматриваются в системе. Вычисление тепловых потоков в оборудовании выполнено на базе решения нестационарной задачи теплопередачи. Предложенная математическая модель позволила сформировать текущую модель объекта управления в зависимости от возмущений и различных затрат финансовых ресурсов.

2. Для решения задачи управления предложена целевая функция оптимизационной задачи для системы теплоснабжения с переменной структурой объекта управления. Целевая функция объединяет в себе эффективность применяемого оборудования, его надежность и стоимость ресурсов. Целевая функция отличается от известных тем, что критерий надежности рассчитывается на базе методов актуарной математики, что позволило свести оптимизационные задачи к одному аргументу (расходы) и находить значение функции в реальном времени управления при любых ограничениях и возмущениях.

3. Для управления структурой системы теплоснабжения в условиях ограничений на ресурсы и возмущений развит метод, который заключается в том, что решение задачи управления теплоснабжением на каждом шагу моделирования обеспечивается множеством источников тепловой энергии,

которые, в свою очередь, обеспечивают минимальное значение целевой функции, что позволило получить высокую эффективность.

4. Рассмотрен и предложен метод управления процессом теплоснабжения городских районов в условиях ограничений на ресурсы за счет перехода от структурной оптимизации множества теплогенерирующих источников к управлению структурой цены, предложенной потребителю энергетического потока, что позволило достичь рационального использования энергоресурсов в системе.

5. Практическое значение полученных результатов заключается в обеспечении минимальных финансовых затрат для потребителя в течение отопительного периода при наличии альтернативных источников и применении разработанных и апробированных подходов к совершенствованию существующей КИСУ, включая ее информационное и математическое обеспечение, что позволило минимизировать финансовые затраты при любых ограничениях на ресурсы. Результаты диссертационной работы введены в учебный процесс на кафедре «АТП» ОНПУ. На ОАО «Одессаоблэнерго» и КП тепловых сетей «Южтеплокоммунэнерго» внедрены модели большой распределенной системы тепло- и энергоснабжения городских районов для анализа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jiang X.S. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system / X.S. Jiang, Z.X. Jing, Y.Z. Li [et al.] // Energy. – 2014. – Vol. 64. – P. 375–388.
2. Verda V. Reduction of primary energy needs in urban areas trough optimal planning of district heating and heat pump installations / V. Verda, E. Guelpa, F. Kona [et al.] // Energy. – 2012. – № 48 (1). – P. 40–46.
3. Kozlov S.A. Energy conservation in heat supply systems / S.A. Kozlov // Tyazheloe Mashinostroenie. – 1996. – № 1. – P. 36–37.
4. Verda V. Impact of district heating and groundwater heat pump systems on the primary energy needs in urban areas / V. Verda, G. Baccino, A. Sciacovelli [et al.] // APPLIED THERMAL ENGINEERING. Elsevier. – 2012. – Vol. 9. – P. 18–26.
5. Shu H.W. Energy-Saving Judgment of Electric-Driven Seawater Source Heat Pump District Heating System over Boiler House District Heating System / H.W. Shu, D.M. Lin, X.L. Li [et al.] // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42. – № 6. – P. 889–895.
6. Chen C.M. Assessment for Central Heating Systems with Different Heat Sources : A Case Study / C.M. Chen, Y.F. Zhang, L.J. Ma // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 48. – P. 168–174.
7. Hepbaslia A. A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings / A. Hepbaslia, M.T. Balta // Building and Environment. – 2007. – Vol. 42. – P. 3747–3756.
8. Verda V. A thermoeconomic approach for the analysis of district heating systems / V. Verda, R. Borchiellini, M. Cali // The International Journal of Applied Thermodynamics. – 2001. – Vol. 4. – № 4. – P. 183–190.

9. Виды источников тепловой энергии [Электронный ресурс] // VEMIRU, – Режим доступа : <http://www.vemiru.ru/index.php?r=19&sid=1181&page=13>.
10. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети : учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – М. : Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
11. Попель О.С. Тепловые насосы – эффективный путь энергосбережения / О.С. Попель // Проблемы энергосбережения. – № 1. – 1999. – С. 7 – 10.
12. Проблемы энергетики и их решение [Электронный ресурс] // Энергосбережение в Украине. – Режим доступа : <http://max-energy-saving.info/index.php?pg=referat/120.html>.
13. Васильев Г.П. Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли : моногр. / Г.П. Васильев. – М. : Изд. дом «Граница», 2006. – 176 с.
14. Классификация потребителей тепла и методы определения его расходов [Электронный ресурс] // Мастерская своего дела. – Режим доступа : <http://msd.com.ua/teplosnabzhenie/klassifikaciya-potrebitelej-tepla-i-metody-opredeleniya-ego-rasxodov/>.
15. Теплоснабжение : учеб. для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков и др.; под ред. А.А. Ионина. – М. : Стройиздат, 1982. – 336 с.
16. Европейский опыт строительства и модернизации систем теплоснабжения [Электронный ресурс] // Строительство и недвижимость. – Режим доступа : <http://www.nestor.minsk.by/sn/2009/29/92904.html>.
17. Клименко В.А. Техничко-экономический анализ систем теплоснабжения / В.А. Клименко, А.И. Егорова, С.В.Димитров // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 6. – С. 4–8.
18. Рындин Д. Эффективность системы отопления : как вычислить общий коэффициент [Электронный ресурс] / Д. Рындин // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2007. – № 1. – Режим доступа : [http://esco-ecosys.narod.ru/2007\\_1/art64.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2007_1/art64.htm).



19. Бабич С.В. Анализ экономической эффективности систем теплоснабжения городских районов / С.В. Бабич, В.О. Давыдов // Пр. Одес. політехн. ун-ту. – 2014. – Вип. 1 (43). – С. 141–147.

20. Кузнецов, Г.В. Заторпление каналов тепловых сетей : причины и последствия / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Новости теплоснабжения. – 2006. – № 8. – С. 49–50.

21. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий : метод. указания. – 4-е изд. – М. : АКХ им. Памфилова, 2002. – 129 с.

22. Машенков, А.Н. О контроле состояния тепловых сетей / А.Н. Машенков, А.В. Филимонов // Новости теплоснабжения. – 2003. – № 10. – С. 37–40.

23. Добромыслов А.Я. Проблема долговечности и надежности трубопроводных систем [Электронный ресурс] / А.Я. Добромыслов // Сантехника. – 2003. – № 5. – Режим доступа : [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2233](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2233).

24. Самойленко Н.И. Анализ функциональной надежности различных конструкций магистральных трубопроводов / Н.И. Самойленко, И.А. Гавриленко // Коммун. хоз-во городов. – 2009. – № 86. – С. 197–203.

25. Надежность систем энергетики и их оборудования : справ. : в 4-х т. / под общ. ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2. Надежность электроэнергетических систем / под ред. М.Н. Розанова. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.

26. Рудь И.А. Расчет надежности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммун. хоз-во городов : науч.-техн. сб. – Вып. 20. – К. : Техніка, 1999. – С. 37–42.

27. Рудаченко А.В. Эксплуатационная надежность трубопроводных систем: учеб. пособие / А.В. Рудаченко, С.С. Байкин. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. – 118 с.

28. Шилькрот Е.О. Эффективность систем отопления и вентиляции зданий / Е. О. Шилькрот // АВОК. – 2003. – № 4. – С. 6–12.
29. Ливчак В.И. Энергосбережение в системах централизованного теплоснабжения на новом этапе развития / В.И. Ливчак // Энергосбережение. – 2000. – № 2. – С. 4–10.
30. Рымаров А.Г. Воздушно-тепловой режим помещения / А.Г. Рымаров, А.С. Маркевич // СОК. – 2010. – № 1. – С. 8–12.
31. Ужанский В.С. Автоматизация холодильных машин и установок / В.С. Ужанский. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 304 с.
32. Системы с переменной структурой [Электронный ресурс] // От эры Трапезникова к новым временам. – Режим доступа : [http://www.ipu65.narod.ru/Sist\\_s\\_peremen.htm](http://www.ipu65.narod.ru/Sist_s_peremen.htm).
33. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой / С.В. Емельянов. – М. : Наука, 1967. – 336 с.
34. Казаков И.Е. Оптимизация динамических систем случайной структуры / И.Е. Казаков, В.М. Артемьев. – М. : Наука, 1980. – 384 с.
35. Михайлова О.В. Системы управления объектами с изменяемой структурой (на примере углеобогачительных и металлургических производств) : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / О.В. Михайлова. – Новокузнецк, 2003. – 181 с.
36. Глумов В.М. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами : некоторые результаты и направления развития / В.М. Глумов, С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 6. – С. 100–116.
37. Земляков С.Д. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах / С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский, А.В. Силаев // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 2. – С. 3–20.
38. Mockler R.J. Situational Theory of Management / R.J. Mockler // Harvard Business Review. – 1971. – Vol. 49. – № 3. – P. 151.

39. Поспелов Д.А. Ситуационное управление : теория и практика / Д.А. Поспелов. – М. : Наука, 1986. – 288 с.
40. Полянська А.С. Використання ситуаційного підходу в управлінні розвитком підприємств : моногр. / А.С. Полянська. – Івано-Франківськ : Акцент, 2011. – 432 с.
41. Добановский С.А. Системы автоматического управления с реконфигурацией / С.А. Добановский, Н.А. Озерянный // Измерение, контроль, автоматизация. – 1990. – № 4 (76). – С. 62–80.
42. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп ; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
43. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Б.Г. Волик, Б.Б. Буянов [и др.]; под ред. Б.Г. Волика. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 296 с. : ил.
44. Новые методы управления сложными системами / отв. ред. В.М. Лохин ; отд-ние информац. технологий и вычисл. систем. – М. : Наука, 2004. – 333 с.
45. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М. : Наука, 2006. – 410 с.
46. Сирота А.А. Основы теории управления в простых и сложных системах / А.А. Сирота. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2005. – 182 с.
47. Максимов М.В. Дослідження питань автоматизації керування системою теплопостачання міста з оптимізацією структури об'єкта / М.В. Максимов, С.В. Бабич // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Вып. 2 (2). – С. 64–68.
48. Казанский Д.Л. Исследование и разработка методов управления технологическими процессами на основе их событийно-динамического моделирования (на примере производств подготовки и перекачки нефти) : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.11 / Д.Л. Казанский. – М., 2003. – 172 с.

49. Максименко И.Н. Автоматизация систем обеспечения заданной температуры с альтернативными источниками энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Ирина Николаевна Максименко. – О., 2007. – 150 с.

50. Максимова О.Б. Совершенствование информационного и математического обеспечения для автоматизированного управления системой теплоснабжения с изменяемой структурой : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Оксана Борисовна Максимова. – О., 2012. – 165 с.

51. Щекин Р.В. Расчет систем центрального отопления / Р.В. Щекин, В.А. Березовский, В.А. Потапов. – К. : Вища шк. 1975. – 215 с.

52. Максимова О.Б. Управление системой теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов, С.В. Бабич // Проблемы управления и информатики : междунар. науч.-техн. журн. – 2014. – № 3. – С. 50–60.

53. Исаченко В.П. Теплопередача : учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.

54. Давыдов В. О. Компьютерное моделирование тепловых режимов жилых помещений / В.О. Давыдов, О.Б. Максимова // Тр. Одес. политехн. ун-та. – О., 2009. – Вып. 1 (31). – С. 67–72.

55. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М. : Наука, 1985. – 280 с.

56. Максимов М.В. Математическая модель сжигания несертифицированных видов топлива / М.В. Максимов, С.В. Бабич // Вост.-европ. журн. перед. технологий. – 2015. – Вып. 2. – С. 47–50.

57. Бабич С.В. Влияние стабильности температуры теплоносителя на входе в объект управления на его устойчивость / С.В. Бабич, М.В. Максимов // Новые технологии в автоматизированном управлении : Теория и практика–2013 : Міжнар. наук.-практ. конф., 12–15 вересн. 2013 р. : доп. – О. : ОНПУ, 2013. – С. 41–45.

58. Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. – М., 1981. – 448 с.

59 Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркун. – М. : Наука, 1982. – 197 с.

60. Цвиркун А.Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем : Синтез и планирование развития / А.Д. Цвиркун, В.И.Акинфиев. – М. : Наука, 1993. – 157 с.

61. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. – М. : Радио и связь, 1992. – 504 с.

62. Березовский Б. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты / Б. Березовский, Ю. Барышников, В. Борзенко [и др.]. – М. : Наука, 1989. – 128 с.

63. Максимова О. Б. Методика расчета критерия управления структурой сложных технических систем / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов, В.М. Тонконогий // Вісн. Сумськ. держ. ун-ту. – Суми. – 2011. – № 3. – С. 19 – 23. – (Серія «Технічні науки»).

64. Бабич С.В. Оптимизация процесса управления теплоснабжением города / С. В. Бабич, В.О. Давыдов // Автоматика–2014 : XXI міжнар. конф. з автоматизації управління, 23-27 верес. 2014 р. : матеріали. – К. : НТУУ «КПІ», ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. – С. 264–265.

65. Максимова О.Б. Оценка эффективности управления системы теплоснабжения переменной структуры / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов // Автоматика–2007 : тез. доп. XIV міжнар. конф. з автоматизації управління, 10-14 верес. 2007 р. – Севастополь : СНУЯЕтаП, 2007. – Ч. 1. – С. 125–126.

66. Максимова О.Б. Исследование адаптивных самоорганизующихся автоматизированных систем обеспечения комфортной температуры воздуха / О.Б. Максимова, В. О. Давыдов, В. М. Тонконогий // Пр. Одес. політехн. ун-ту. – О., 2011. – Вип. 2 (36). – С. 155–160.

67. Максимова О.Б. Синтез усовершенствованного алгоритма управления технологическим оборудованием / О.Б. Максимова, В.О.

Давыдов // Инф. технологии и автоматизация–2012 : тез. докл. Всеукр. науч.-практ. конф., Одесса, 10-11 октяб. 2012 г. ; ОНАПТ. – О., 2012. – С. 70–71.

68. Максимова О.Б. Метод управления структурой технических средств системы теплоснабжения / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов // Совр. технологии управления : в 2 кн. : монография / под. общ. ред. С. В. Куприенко; SWorld. – О., 2012. – Кн. 1. – С. 95–108.

69. Бабич С.В. Оптимальное управление структурой объекта управления в задачах теплоснабжения / С.В. Бабич // Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листоп. 2014 р. : доп. – К. : НУХТ, 2014. – С. 19–21.

70. Babich S.V. Objective function for municipal heat supply system's structural optimization / S.V. Babich, V.O. Davydov // Пр. Одес. нац. політехн. ун-ту. – О., 2015. – Вып. 1 (45). – С. 134–140.

71. Страхование : учеб. / под ред. Т.А. Федоровой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Экономистъ, 2004. – 875 с.

72. Щербаков В.А. Страхование : учеб. пособие / В.А. Щербаков, Е.В. Костяева. – М. : КНОРУС, 2007. – 312 с.

73. Сплетугов В.А. Страхование : учеб. пособие / В.А. Сплетугов, Е.Ф. Дюжиков. – М. : ИНФА-М, 2006. – 312 с.

74. Бауэрс Н. Актуарная математика : пер. с англ. / Н. Бауэрс, Х. Гербе, Д. Джонс [и др.]; под ред. В.К. Малиновского. – М. : Янус-К, 2001. – 656 с.

75. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.

76. Томович Р. Общая теория чувствительности : пер. с серб. и с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. – М. : Изд-во «Совет. радио». – 1972. – 240 с.

77. Бабич С.В. Анализ чувствительности целевой функции для управления системами теплоснабжения городских районов / С.В. Бабич // Автоматизация технол. та бізнес-процесів. – О. : ОНАХТ, 2014. – Т. 6. – Кн. 4. – С. 90–95.

78. Бабич С.В. Управление системой теплоснабжения города за счет целевой оптимизации структуры технических средств / С.В. Бабич // Автоматизація технол. та бізнес-процесів. – О., 2015. – Т. 6. – Кн. 4. – С. 90–95.

79. Бабич С.В. Оценка эффективности управления системы теплоснабжения переменной структуры / С.В. Бабич, В.О. Давыдов // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами : міжнар. науч.-техн. конф., 26–27 листоп. 2014 р. : матеріали. – К. : НУХТ, 2014. – С. 19–20.

80. Бабич С.В. Моделирование автоматизированных систем управления теплоснабжением / С.В. Бабич, В.О. Давыдов // Инф. технологии и автоматизация–2014 : VII міжнар. наук.-практ. конф., 16–17 жовт. 2014 р. : доп. – О. : ОНАХТ, 2014. – С. 5–6.

## **Приложение**

### **Документы о внедрении**



Публічне акціонерне товариство  
**«Енергопостачальна  
 Компанія Одесаобленерго»**  
 Вул. М. Боровського, 28 Б, м. Одеса, 65031  
 Тел. (048) 705-22-59; факс (048) 705-20-79  
 Код ЗКПО 00131713  
 E-mail: kanc@obl.od.energy.gov.ua



Публичное акционерное общество  
**«Энергоснабжающая  
 Компания Одессаоблэнерго»**  
 Ул. Н. Боровского, 28 Б, г. Одесса, 65031  
 Тел. (048) 705-22-59; факс (048) 705-20-79  
 Код ОКПО 00131713  
 E-mail: kanc@obl.od.energy.gov.ua

23.03.15 № 171

Ректору ОНПУ  
 проф. Оборському Г.О.

### ДОВІДКА

про впровадження в тематиці ПАО «Одесаобленерго» результатів  
 дисертаційної роботи Баби́ча Сергі́я Володи́мировича  
 “Автоматизоване керування системою теплопостачання міста за рахунок  
 оптимізації структури об’єкта керування” виконаної на здобуття наукового  
 ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
 05.13.07 — Автоматизація процесів керування

ПАО «Одесаобленерго», використовує наступні результати дисертаційної  
 роботи Баби́ча Сергі́я Володи́мировича:

- забезпечення мінімальних фінансових витрат для споживача протягом опалювального періоду, при наявності альтернативних джерел;
- застосування розроблених і апробованих підходів, до удосконалення комп’ютерно-інтегрованих систем керування, включаючи її інформаційне та математичне забезпечення, для мінімізації фінансових витрат при будь яких обмеженнях на ресурси;
- використання моделі великої розподіленої системи теплопостачання міських районів;
- застосування методів актуарної математики для оцінки критерію надійності окремого джерела теплової енергії.

Директор технічний



Песков С.А.



УКРАЇНА  
КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ «ЮЖТЕПЛОКОМУНЕНЕРГО»

УКРАЇНА, 65481, Одеська обл., м. Южне, Старомиколаївське шосе, 8 тел. (04842) 2-39-42, 2-39-38

№ 01-10-394 від 27.03 2015р.

Ректору ОНПУ  
проф. Оборському Г.О.

**ДОВІДКА**

про впровадження в тематиці комунального підприємства  
теплових мереж «Южтеплокомуненерго»  
результатів дисергаційної роботи Бабича Сергія Володимировича  
“Автоматизоване керування системою теплопостачання міста за рахунок  
оптимізації структури об’єкта керування” виконаної на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Комунальне підприємство теплових мереж «Южтеплокомуненерго»,  
використовує наступні результати дисертаційної роботи Бабича Сергія  
Володимировича:

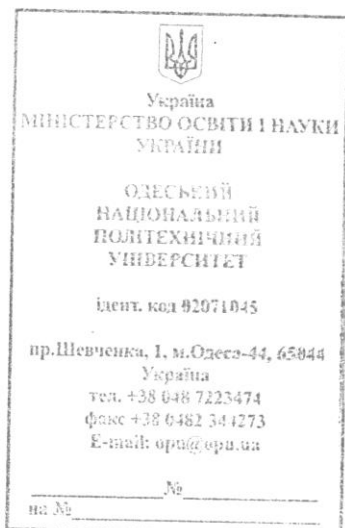
- використанні моделі великої розподіленої системи теплопостачання міських районів;
- застосуванні методів актуарної математики для оцінки критерію надійності окремого джерела теплової енергії.
- забезпеченні мінімальних фінансових витрат для споживача протягом опалювального періоду, при наявності альтернативних джерел;
- застосуванні розроблених і апробованих підходів, до удосконалення систем керування, включаючи її інформаційне та математичне забезпечення, для мінімізації фінансових витрат при будь яких обмеженнях на ресурси;

Директор



Г.В.Чугунников

Викл.Пашенко М.Ж.



### ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи  
 Бабича Сергія Володимировича,  
 представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
 спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

Надана довідка затверджує, що дисертаційна робота Бабича С.В. «Автоматизоване керування системою теплопостачання міста з оптимізацією структури об'єкта» виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, і є складовою частиною держбюджетних НДР «698-47» (№ ДР 0115U000411) за темою «Удосконалення теоретичних та експериментальних методів дослідження перехідних процесів в енергетичних установках за рахунок структурної оптимізації моделей і технічних систем». У цих роботах аспірант брав участь як виконавець.

Довідка надана для подання до спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01.

Проректор з наукової та  
 науково-педагогічної роботи

Вик. Максимов М.В.  
 Тел. 705-83-71



Д.В. Дмитришин



### ДОВІДКА

Надана Бабичу Сергію Володимировичу в тому, що матеріали дисертаційного дослідження «Автоматизоване керування системою теплопостачання міста з оптимізацією структури об'єкта» використовуються при підготовці магістрів та бакалаврів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи керування» в Інституті енергетики та комп'ютерно-інтегрованих систем управління (ІЕКСУ) на кафедрі Автоматизації теплоенергетичних процесів (АТП) в наступних курсах:

- «Оптимізація програмного забезпечення»;
- «Оптимізація проектів систем автоматизації».

Довідка надана для подання до спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01.

Проректор з науково-педагогічної та виховної роботи



С.А. Нестеренко

Вик. Максимов М.В.

Тел. 705-83-71