

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Одесский национальный политехнический университет

На правах рукописи

МАКСИМОВА Оксана Борисовна

УДК 681.5:658.264

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО И
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 05.13.07 — Автоматизация процессов управления

Диссертация

на соискание научной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Тонконогий Владимир Михайлович,
доктор технических наук,
профессор

Одесса–2012

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень уловных сокращений	6
ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1 Состояние вопроса управления системами теплоснабжения с изменяемой структурой.....	15
1.1. Экономическая целесообразность повышения эффективности и надежности систем теплоснабжения	15
1.2. Анализ состояния вопроса определения надежности технических систем	26
1.3. Состояние вопроса по совершенствованию управления теплогенерирующими установками	31
1.3.1. Новые технологии получения тепловой энергии	31
1.3.2. Объединение АСУП и АСУТП	31
1.3.3. Анализ применяемых регуляторов для оборудования по производству и использованию тепловой энергии.....	34
1.4. Выбор прототипа системы теплоснабжения.....	37
1.5. Постановка задачи диссертационного исследования.....	41
1.6. Выводы	43
РАЗДЕЛ 2 Имитационная модель технической системы теплоснабжения с изменяемой структурой объекта управления.....	45
2.1. Объектно-ориентированное моделирование системы теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств.....	46
2.1.1. Информационная модель.....	46
2.1.2. Модели состояний.....	47
2.2. Результаты синтеза технологических алгоритмов.....	50
2.2.1. Математическая модель теплопотребителя.....	52
2.2.2. Математическая модель котла.....	59
2.2.3. Математическая модель теплонасосной установки.....	63

2.3. Математические модели системы теплоснабжения.....	67
2.3.1. Оценочные математические модели объекта управления.....	67
2.3.2. Модель окружающей среды.....	67
2.3.2.1. Модель инсоляции.....	68
2.3.2.2. Модель температуры окружающего воздуха.....	69
2.4. Выводы	73
РАЗДЕЛ 3 Информационное и математическое обеспечение для автоматизированного управления системой с изменяемой структурой технических средств.....	75
3.1. Постановка оптимизационной задачи оптимального управления.....	75
3.1.1. Математическая модель надежности оборудования.....	77
3.1.2. Математическая модель стоимости ресурсов.....	87
3.1.3. Математическая модель качества.....	87
3.1.4. Математическая модель эффективности.....	88
3.1.5. Нормирование и взвешивание.....	90
3.2. Ограничения и условия компьютерно-интегрированной системы управления.....	91
3.3. Выбор метода формирования плана переключения оборудования	93
3.3.1. Общие положения.....	93
3.3.2. Математическое обеспечение задачи оптимизации.....	95
3.4. Моделирование временных параметров КИСУ.....	100
3.5. Информационное обеспечение КИСУ.....	102
3.5.1. Управляющий алгоритм. Вариант 1.....	103
3.5.2. Управляющий алгоритм. Вариант 2.....	103
3.5.3. Управляющий алгоритм. Вариант 3.....	106
3.6. Реализация граничных условий математического обеспечения.....	108
3.7. Моделирование значений весовых коэффициентов.....	108

3.8. Моделирование системы в изменяющихся условиях и аварийных ситуациях.....	110
3.9 Выводы	111
РАЗДЕЛ 4 результаты моделирования управления системы	
теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств.....	113
4.1. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения.....	113
4.1.1. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения без ограничений на ресурсы.....	115
4.1.2. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения с ограничением ресурса надежности.....	115
4.1.3. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения при наличии лимитов ресурсов.....	119
4.1.4. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения при изменении весовых коэффициентов целевой функции оптимизационной задачи.....	123
4.1.5. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения при изменении соотношения стоимости ресурсов.....	123
4.1.6. Анализ полученных результатов.....	127
4.2. Совершенствование математического и информационного обеспечения.....	129
4.2.1. Модификация целевой функции оптимизационной задачи.....	129
4.2.2. Модернизация информационного обеспечения.....	130
4.2.3. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения с учетом модификации.....	130
4.3. Управляющий алгоритм, основанный на изменении структуры системы и заданий регуляторов.....	142
4.3.1. Модификация управляющего алгоритма.....	142
4.3.2. Оценка эффективности модифицированного информационного обеспечения.....	143
4.4. Выводы	156

ВЫВОДЫ	157
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	159
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Документы о внедрении	167

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АСУ	Автоматизированная система управления
АСУП	Автоматизированная система управления предприятием
АСУТП	Автоматизированная система управления технологическим процессом
ГНТП	Государственная научно-техническая программа
КИСУ	Компьютерно-интегрированная система управления
МПД	Марковские процессы с доходами
МКЭ	Метод конечных элементов
ООА	Объектно-ориентированный анализ
САР	Система автоматического регулирования
СТС	Сложная техническая система
ТНУ	Теплонасосная установка

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современном обществе с повышением качества жизни человека растет уровень требований к функциональным характеристикам различных компьютерно-интегрированных систем управления (КИСУ). Больше того, общество становится все более зависимо от таких систем. Процесс автоматизации различных процессов затрагивает все более широкие области сфер производства, коммерции, развлечения, быта и т.д. При этом задача управления также становится сложнее. Если в XX в. автоматизированные системы в основном проектировались для работы в конкретных условиях, а критерий управления был достаточно прост, то сегодня все чаще КИСУ должна работать 24 ч. в сутки 7 дней в неделю, порой круглый год, адаптируясь при этом к изменяющейся внешней среде, а критерий управления должен быть комплексным.

Так, например, система контроля микроклимата должна поддерживать заданную температуру круглый год. Это означает, что структура такой системы должна изменяться. Зимой задача управления должна решаться при помощи источников тепла, а летом — холода. Соответственно, если источников несколько, возникают вопросы: «Какой источник использовать дешевле?», «Какой источник более эффективен?», «Какой более надежен?».

Растущая сложность задач управления приводит к тому, что современные автоматизированные системы управления представляют собой сложные программно-технические комплексы, в которых программная часть по стоимости и сложности не уступает технической. Кроме того, от современных критически важных программных систем часто требуется надежная адаптация к изменениям среды их исполнения. Критическая значимость таких систем зачастую требует адаптации их поведения во время исполнения с отсутствием или минимизацией вмешательства человека. Это в свою очередь накладывает еще более жесткие требования к сложности и качеству программной составляющей.

Исследования в области адаптивных систем привели к ряду важных результатов, однако многие проблемы остались нерешенными. Одна из наиболее сложных проблем порождается обилием информации, связанной с выполнением программ. Перспективным подходом, позволяющим справиться со сложностью сред выполнения, является разработка алгоритмов, основанных на использовании моделей программного обеспечения. Этот подход называется *использованием моделей во время выполнения программ (models@run.time)*. Исследования в этом направлении направлены на применение в средах выполнения программ моделей, получаемых при использовании подхода управляемой моделями инженерии (model-driven engineering, MDE).

Современный уровень развития теории управления, теории адаптивных систем и также уровень совершенства программных систем позволяют сформулировать и решить новую задачу управления. Если мы располагаем для достижения цели управления множеством единиц оборудования различными по своей надежности, эффективности и стоимости, то как реализовать оптимальное управление процессом? Как выдержать наиболее эффективное соотношение надежности системы в целом, эффективности используемого в данный момент оборудования, стоимости потраченных ресурсов и качества управления? Как спланировать работу таким образом, чтобы надежность системы в определенные моменты времени была не ниже заданной? Как построить систему подобного класса так, чтобы она могла функционировать круглый год без участия человека, адаптируясь ко всем изменениям окружающей среды?

Для повышения эффективности эксплуатации автоматизированной системы теплоснабжения с изменяемой структурой объекта управления по критериям надежности, эффективности, стоимости и качества должна разрабатываться группа специальных методов управления, которая будет реализована в информационно-математическом обеспечении для изменения состояния системы при динамически изменяющихся внешних возмущениях.

Необходимость совершенствования моделей и методов управления системой теплоснабжения с изменяющейся структурой технических средств в зависимости от ограничений на ресурсы и заданной эффективности за счет информационного и математического обеспечения автоматизированной системы и определяет актуальность данной работы.

Диссертационная работа направлена на решение научно-технического противоречия, состоящего в поддержании оптимального соотношения в системе теплоснабжения за счет изменения текущей структуры объекта управления между максимальной эффективностью оборудования, используемого в данный момент, и минимумом стоимости использованных ресурсов при заданном качестве управления.

Для решения сформулированной задачи необходимо выработать научно обоснованные условия и требования к техническому состоянию системы с изменяющейся структурой оборудования и алгоритмам его переключения, к его надежности и эффективности методов, учитывающих ограничения на ресурсы в зависимости от режимов эксплуатации с целью обеспечения максимальной эффективности.

Однако в настоящее время недостаточно разработан единый подход к реализации управления структурой технических средств для обеспечения теплоснабжения и количественной оценки состояния системы при работе системы с регулярным изменением структуры при нормальных условиях эксплуатации и ограничений на все виды ресурсов.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с планами, утвержденными Министерством образования, науки, молодежи и спорта Украины и есть составной частью госбюджетных НИР «679-33» (№ ДР 0111U010453, по теме «Эволюционное моделирование нечетких объединенных процессов для автоматизированного проектирования и управления», НИР «645-47» (№ ДР 0109U002620, по теме «Изучение цикличности нагрузки ВВЭР-1000 с целью определения эффективности управления ресурсом ядерного топлива при поддержании

баланса мощности в энергосистеме». В этих работах аспирант принимала участие как исполнитель.

Цель и задачи исследования. Целью работы является усовершенствование информационного и математического обеспечения для повышения эффективности автоматизированной системы теплоснабжения за счет изменения текущей структуры объекта управления, которая характеризуется своей надежностью, эффективностью, стоимостью и качеством.

Достижение цели осуществляется решением сформулированной последовательности таких исследовательских задач:

- анализ способов управления процессом теплоснабжения при ограничениях на все виды ресурсов;
- разработка объектно-ориентированных и имитационных моделей объекта управления и системы управления;
- разработка оптимизационной задачи для управления системой теплоснабжения на основе технико-экономических показателей для сравнения различных конфигураций ее структуры;
- разработка информационного и математического обеспечения КИСУ теплоснабжением;
- внедрение и определение эффективности КИСУ на реальных объектах.

Объект исследования — компьютерно-интегрированная система управления теплоснабжением с изменяемой структурой технических средств объекта управления.

Предмет исследования — информационное и математическое обеспечение систем автоматизированного управления процессами теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств.

Методы исследования. Математический анализ позволил определить свойства анализируемых функций; объектно-ориентированный анализ (ООА) был применен для разработки системы управления технологическими

процессами, учитывающей надежность оборудования; имитационное моделирование подтвердило полученные теоретические результаты; методы системного анализа для декомпозиции технологического процесса; методы численного моделирования изменения свойств объекта управления и окружающей природной среды позволили определить вид критерия оптимальности; моделирование нестационарных процессов эксплуатации оборудования, обеспечивающего заданные параметры температуры в помещении с помощью метода конечных элементов (МКЭ), позволило учесть влияние переменных режимов на надежность оборудования; компьютерное моделирование переходных процессов в объекте управления позволило рассмотреть поле температуры в объекте управления; компьютерные информационные и программные технологии для реализации разработанного алгоритма оптимального управления в виде программного обеспечения.

Научная новизна полученных результатов:

— нашла дальнейшее развитие математическая модель системы теплоснабжения, основанная на формировании изменяемой структуры объекта управления согласно логической структуре объектно-ориентированного подхода, третьим этапом которого явились технологические алгоритмы оборудования, что позволило сформировать текущую модель структуры объекта управления;

— впервые предложена оптимизационная задача для системы теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств, целевая функция которой отличается от известных тем, что объединяет в себе такие характеристики, как качество процесса, эффективность используемого оборудования, его надежность и стоимость ресурсов, что позволяет комплексно оценивать процесс функционирования системы на основе технико-экономических показателей при ограничениях на ресурсы;

— получило дальнейшее развитие информационное и математическое обеспечение для управления системой теплоснабжения, которое отличается от известных тем, что выбор структуры объекта управления осуществляется

с использованием генетического алгоритма, что позволяет достигнуть рационального использования энергоресурсов;

— впервые показана возможность получения приемлемой структуры технических средств в условиях ограничений на ресурсы и изменения их стоимости путем изменения как структуры теплогенерирующих средств, так и настроек регуляторов теплопередающих технических средств, что позволяет реализовать высокую живучесть технической системы за счет снижения требований к качеству продукта при условии нехватки ресурсов для номинального режима работы.

Практическое значение полученных результатов заключается в:

— обеспечении регламентных температурных условий внутри жилого помещения в течение отопительного периода, повышении технико-экономических показателей процесса для обеспечения комфортных условий внутри отапливаемого помещения и продлении времени эксплуатации оборудования системы теплоснабжения;

— применении разработанных и апробированных подходов к усовершенствованию КИСУ, включая ее функциональный состав, информационное и математическое обеспечение, для достижения заданного качества при ограничениях на ресурсы и повышения энергетической эффективности системы теплоснабжения;

— использовании моделей теплогенерирующих технических средств с распределенными параметрами для моделирования типовых тепловых элементов;

— применении разработанного метода моделирования температуры окружающей среды для формирования структуры системы теплоснабжения.

Макетные образцы различных вариантов КИСУ прошли испытания в НИЛ «Атомспецавтоматика» ОНПУ. Испытания, проведенные на ПАТ «Лукойл-Одесский НПЗ» и ГП НАЭК «Энергоатом», подтвердили эффективность разработанных КИСУ. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедрах автоматизации теплоэнергетических

процессов и информационных технологий проектирования в машиностроении.

Личный вклад соискателя. Научные результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Автору принадлежат основные идеи при разработке информационного и математического обеспечения КИСУ теплоснабжением с изменяющейся структурой технических средств. Кроме того, показана возможность достижения оптимального управления в условиях ограничений на ресурсы.

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: в [35, 36, 45, 70] — математическая модель системы теплоснабжения с изменяемой структурой объекта управления, основанная на моделировании характеристик надежности; [44, 47] — математическая модель нестационарных процессов теплопередачи, в основе которой лежит метод конечных элементов; [68, 69] — предложено использование генетического алгоритма для изменения структуры объекта управления; [33, 51, 52, 50] — оптимизационная задача для управления системой теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств; [34, 46, 53] — математическая модель КИСУ теплоснабжением с изменяемой структурой объекта управления, основанная на моделировании характеристик теплотехнической эффективности на базе объектно-ориентированного подхода.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования докладывались, обсуждались и получили одобрение на Международных научно-практических конференциях и семинарах: «Автоматика 2007» (г. Севастополь), «Автоматика 2008» (г. Одесса), «Стратегия качества в промышленности и образовании» (г. Днепропетровск, 2008), «Информационные технологии и автоматизация» (г. Одесса, 2012), седьмой Международной научно-практической конференции «Развитие научных исследований» (г. Полтава, 2011).

Публикации. Результаты научных достижений изложены в 15 печатных трудах, из них 8 – в специализированных научных изданиях,

рекомендованных аттестационной комиссией МОНмолодьспорта Украины,
5 – докладов и тезисов докладов Международных, национальных,
региональных конференций.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

1.1. Экономическая целесообразность повышения эффективности и надежности систем теплоснабжения

На протяжении нескольких последних десятилетий проблемам теплоснабжения не уделялось должного внимания. Эффективность использования топлива практически во всех теплоэнергетических установках Украины очень низкая. Так, КПД энергоблоков, производящих электроэнергию, на 7...10% ниже, чем в США или Германии. Потери энергии топлива в газовых турбинах, двигателях внутреннего сгорания на 5...13% выше, чем у зарубежных. Тепловые потери отечественных промышленных печей в 1,5...2 раза больше, чем в США и Европейском Союзе [1]. В бывшем Советском Союзе практически отсутствовали какие-либо экономические стимулы для экономии топлива. Много лет цены на топливо не соответствовали мировым и были искусственно занижены.

Теперь в Украине другая обстановка. Цены на топливо соответствуют мировому уровню. Топлива собственной добычи не хватает, и большую часть его приходится закупать за рубежом по мировым ценам. Топливная составляющая себестоимости практически всех товаров, производимых в Украине, выросла почти в три-четыре раза, на 30...70% упал их экспортный потенциал. Такая ситуация должна вызвать мощный импульс для быстрого внедрения новых энергосберегающих технологий в национальную экономику. Однако сегодня, как и до скачка цен на топливо, эффективность производства электроэнергии и теплоты пока остается на прежнем уровне: КПД тепловых электростанций низкие — 35...39% (у угольных и того меньше), 60...80% энергии топлива промышленные печи бесполезно

выбрасывают в атмосферу, энергия большинства органических отходов промышленности и сельского хозяйства практически не используется [1].

В свою очередь наличие постоянных дотаций государства за использование энергоресурсов, особенно в коммунально-бытовом секторе, является мощным стимулом ничего не делать для внедрения новых технологий рационального производства и использования тепла.

В результате в Украине сложилась парадоксальная ситуация. С одной стороны, значительный рост цен на топливо, низкая эффективность его использования создали мощный экономический стимул для внедрения новых энергосберегающих технологий в практику. С другой — накопилось много новых разработок, внедрение которых могло бы существенно сократить потери при производстве тепла в Украине. Но, как и прежде, большинство из них остаются невостребованными. С третьей — дотации государства в коммунально-бытовой сектор нивелируют экономические предпосылки рачительного использования энергии.

В [2,3,4] отмечается, что действие экономического стимула искусственно блокируется. Этому, главным образом, способствует то, что в условиях крайне ограниченных финансовых ресурсов в правовом поле Украины господствует субъективный фактор. Сегодня свободный рынок новых разработок в стране отсутствует. Он, по сути дела, подменен своеобразным механизмом силового проталкивания каких-либо разработок преимущественно при помощи административно-командной системы. Это объясняет тот факт, что сегодня основные финансовые потоки обходят стороной главные источники потерь топлива в Украине. Из его общего потребляемого количества 70% идет на такое производство теплоты в промышленных и коммунальных котельных, при котором вырабатывать дополнительную электроэнергию нет никакой возможности.

Дальнейшее искусственное игнорирование экономических стимулов развития теплоэнергетики может серьезно подорвать энергетическую безопасность Украины. Нужна иная государственная энергетическая

политика, которая позволила бы закрепить новые правила игры на рынке научно-технических разработок.

Главным приоритетом в новой государственной энергетической политике на данном этапе должны стать проблемы теплоэнергетики. Именно здесь лежат основные финансовые ресурсы, которые могут быть высвобождены за счет повышения эффективности использования топлива и энергосбережения. Основные возможности повышения эффективности теплоэнергетики следующие.

1. Сегодня теплоэнергетические установки Украины потребляют в год угля, мазута и природного газа такое количество, которое эквивалентно 162 млн т.у.т. Это наносит Украине колоссальный финансовый ущерб, поскольку топливо приходится приобретать по международным ценам. Полезной же энергии вырабатывается в 1,2...2 раза меньше, чем в Европейском Союзе или США. Если бы удалось реально, хотя бы на 1% повысить эффективность использования топлива украинскими теплогенерирующими установками, то потери можно было бы сократить на эквивалентную сумму в 100 млн долларов США.

2. Если сравнивать удельное потребление энергии на единицу производственной продукции, то оказывается, что в Украине оно в 3...4 раза выше, чем на подобных предприятиях в Западной Европе. Такая большая разница в энергозатратах свидетельствует не только о низкой эффективности украинской теплоэнергетики, но еще и о наличии здесь больших резервов для экономии топлива.

3. Украинские ТЭЦ по эффективности использования топлива намного уступают западным. Эти электростанции наносят большой экономический и экологический ущерб: им приходится работать на низкосортных углях, зольность которых превышает 35%, расходовать на подсветку много мазута или природного газа. Если бы данную проблему можно было решить за счет использования дешевой и быстрореализуемой технологии сжигания низкосортных углей, то для Украины открылись бы большие

дополнительные финансовые ресурсы.

4. Практически не используются органические отходы промышленного и сельскохозяйственного производства (солома, древесные опилки, щепа, бытовой мусор, подсолнечная лузга и т.д.). Применение их в теплоэнергетических установках дало бы возможность существенно сократить потребление таких дорогих видов топлива, как уголь, мазут или природный газ. Ежегодно в Украине образуется около 40 млн т древесных отходов. Если их задействовать, то можно сократить покупку природного газа на 15...30 млрд куб. м в год. Практически не используются топливные ресурсы в виде торфа. А их запасы сегодня оцениваются в 2,2 млрд т.у.т. Мало добывается местных бурых углей, например александрийских, коростышевских и т.д.

5. В настоящее время в Украине имеется большое число пробуренных геотермальных скважин. Используемая из них теплота эквивалентна 12,6 млн т.у.т.

6. Эффективность большей части отечественных сушильных установок находится на уровне 25...35%. Если же иметь в виду, что сегодня 8% всей добываемой в мире энергии идет на сушку, то легко представить, какие большие резервы экономии топлива имеет эта отрасль.

7. Государственные дотации следует использовать не в системе уравниловки, а в системе индивидуальных целевых выплат. Любая льгота для конечного пользователя, способного оплатить полную стоимость услуги, также ликвидирует стимул к рачительному использованию энергоресурсов.

8. В сложившейся в настоящее время ситуации можно условно выделить двух собственников. Один — поставляет на рынок тепло. Другой — газ. Отсутствие возможности выбора конечным пользователем к чьим услугам прибегнуть, полностью исключает конкуренцию между этими поставщиками и, как следствие, ликвидирует стимул к внедрению ими новых ресурсосберегающих технологий.

Изменения в экономической сфере, которые произошли в Украине за

последние десятилетия, привели к необходимости поиска возможностей широкого применения ресурсосберегающих технологий во всех отраслях экономики. На практике это проявляется в принятии новых ресурсосберегающих концепций эксплуатации сложных технических систем (СТС). Суть этих концепций состоит в широком внедрении в практику систем мониторинга и прогнозирования технического состояния, эксплуатируемых СТС с целью повышения достоверности и оперативности информации для принятия решений, определяющих порядок их дальнейшей эксплуатации [5].

Принимаемые концепции, прежде всего, должны основываться на реалиях жизни. Планы по ремонту и повышению эффективности тепловых сетей, отслуживших более сорока лет, не были реализованы. В итоге техническое состояние этих сетей пришло в такой упадок, что единственным выходом является строительство новых. Кроме того, плохое состояние тепловых сетей влечет за собой повышение вероятности различных аварий, а следовательно, и стоимость ликвидации их последствий. Поэтому к внедряемым ресурсосберегающим концепциям необходимо также предъявлять требование по обеспечению заданного уровня надежности и безопасности.

Несмотря на множество проводимых исследований и значительные средства, привлекаемые для исследования проблемы обеспечения требуемой надежности и эффективности СТС, ее нельзя считать до конца решенной в теоретическом плане. Данный факт проявляется, прежде всего, в том, что до настоящего времени не разработаны научно-теоретические основы управления техническим состоянием СТС, отсутствуют адекватные показатели эффективности и методики их оценки.

С экономической точки зрения, расчет эффективности того или иного производства при заданных условиях не представляет сложности. Во времена закрытой плановой и стабильной экономики с программным управлением результаты такого расчета внедрялись на всех производствах данного типа и

могли использоваться десятилетиями. Сегодня наблюдается скачкообразное изменение цен на энергоресурсы. Как и раньше, экономисты могут провести соответствующий расчет и обосновать оптимальную структуру производства. Но проблема заключается в том, что сегодня подобные расчеты необходимо проводить постоянно. Кроме того, расчет оптимальной структуры крупной энергопотребляющей системы, например города, должен базироваться на соответствующих расчетах для каждой его подсистемы, что приводит к необходимости содержать целый штат экономистов. При этом каждый экономист обязан быть квалифицированным специалистом по вверенной ему подсистеме, поскольку только он может предсказать последствия того или иного управляющего воздействия, принятого на глобальном уровне.

Очевидно, что чем больше людей принимают решения по управлению отдельными подсистемами крупной технической системы, тем выше вероятность ошибки. В масштабах, например города, подобные ошибки могут означать отключение энергоснабжения больниц и других объектов.

Вследствие этого решение проблемы обеспечения требуемой надежности, безопасности и эффективности СТС в условиях установленных сроков эксплуатации требует изыскания и внедрения новых методов управления.

Переходная экономика Украины и как следствие этого – недостаточный уровень финансирования — привели к тому, что от 70 до 90% СТС специального назначения [5], а также предприятий промышленности, энергетики эксплуатируются на основании решений о продлении назначенных показателей ресурса и срока службы. Такие решения принимаются с учетом текущего технического состояния СТС, но при этом, как правило, упускаются вопросы, связанные с прогнозом изменения его технического состояния и безопасности эксплуатации. Причиной этого является отсутствие хорошо разработанного методического аппарата индивидуального прогноза изменения технического состояния как составных частей и систем, так и СТС в целом. Более того, все чаще возникает

необходимость в управлении надежностью как техническим ресурсом. Примером может служить следующая ситуация. Известен ресурс некоторой единицы оборудования и известно об отсутствии финансирования на восстановительный ресурс. Ресурса не хватит для обеспечения целевой функции в течение всего заданного интервала времени. Возникает вопрос, в каком режиме эксплуатировать данную единицу оборудования? Выработать весь ресурс сразу? Включить ее в конце рассматриваемого интервала времени?

Реальный уровень финансирования промышленности и энергетики, отсутствие прагматического энергорынка в настоящее время не позволяет проводить в полном объеме модернизацию и замену СТС, выработавших установленные сроки эксплуатации. При этом их дальнейшая эксплуатация в условиях действующих ограничений требует применения дополнительных компенсационных мер организационного и технического характера для обеспечения заданного уровня надежности, что приводит к снижению эффективности и, как следствие, экономичности.

Анализ отечественных и зарубежных работ по управлению ресурсами сложных технических систем показывает, что в настоящее время научно-методический аппарат, позволяющий реализовать современную концепцию адаптивного управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации, недостаточно разработан, что является препятствием для повышения эффективности системы поддержания СТС в готовности к применению по назначению. Отсюда следует вывод об актуальности проблемы разработки методов оптимального управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации СТС в условиях ресурсных и финансовых ограничений.

Противоречие между требованиями к надежности СТС и возможностями системы поддержания в исправном состоянии в условиях ресурсных и финансовых ограничений указывает на наличие проблемы — недостаточную эффективность управления их техническим состоянием и

безопасностью эксплуатации.

В настоящее время при эксплуатации СТС в основном принята "жесткая" стратегия технического обслуживания. Использование только априорной информации и применение "жестких" стратегий технического обслуживания эквивалентно построению разомкнутой системы программного управления по задающему и возмущающему воздействию [6]. Очевидно, что в качестве объекта управления в такой системе будет техническое состояние СТС, управляющим устройством — мероприятия технического обслуживания, воздействующие на объект с целью поддержания его в исправном и работоспособном состоянии.

Использование апостериорной информации о текущем техническом состоянии с коррекцией параметров программы поддержания СТС на основе оценки и прогноза его изменения приводит к замкнутым адаптивным системам управления техническим состоянием.

Решение проблемы управления техническим состоянием СТС предполагает преодоление различий между желаемым и фактическим результатами функционирования системы поддержания СТС в готовности к выполнению установленных функций. При этом новизна и комплексный характер рассматриваемых вопросов требуют разработки соответствующего специального методического аппарата оптимального управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации.

Решение рассматриваемой проблемы должно основываться на анализе и оценке фактического технического состояния СТС, прогнозе его изменения в процессе эксплуатации, оценке остаточного ресурса, корректировке параметров программы поддержания и функционирования в процессе эксплуатации.

Как уже отмечалось, наряду с управлением техническим состоянием важное значение имеют вопросы обеспечения безопасности эксплуатации СТС. В конце 1980-х годов была сформулирована Государственная научно-техническая программа (ГНТП) "Безопасность". Её целью была разработка

научных основ, методов, системы нормативно-технических средств, обеспечивающих безопасность населения и окружающей природной среды, функционирования и развития народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных, техногенных и природно-техногенных аварий и катастроф с региональными и глобальными экономическими и экологическими последствиями. В ГНТП "Безопасность" отмечено, что «... реальное обеспечение безопасности человека, сложных технических систем и окружающей среды возможно только на путях постановки на национальном, региональном и международном уровнях четырех базовых проблем:

- разработка фундаментальных основ теории техногенных и природных аварий и катастроф, теории защиты и безопасности;
- переход к проектированию, созданию и эксплуатации потенциально опасных производств и объектов на базе новых критериев, методов и средств обеспечения безопасности;
- создание методов и средств оповещения, защиты и спасения людей, а также ведения восстановительных работ в зонах возникновения и развития катастроф;
- создание единой национальной, региональной и международной нормативно-законодательной базы по техническому, правовому и экономическому регулированию вопросов безопасности».

Действительно, научный подход к проблеме безопасности требует проведения комплексного анализа, классификации аварий и катастроф с учетом характера и размера их последствий, основных поражающих факторов; учета предельных параметров прочности, износостойкости, виброактивности, акустики, сейсмостойкости, механики разрушения, надежности, риска и живучести технических объектов, персонала и окружающей среды. Для решения указанных вопросов необходимы соответствующие методы математического моделирования на ЭВМ, физические модели возникновения и развития катастроф и т.д.

В настоящее время в теории обеспечения безопасности сложных технических систем пройдено два больших этапа. На первом этапе предполагалось, что надлежащие инженерные решения, организационные меры, квалифицированные и дисциплинированные сотрудники могут обеспечить абсолютно надежное функционирование сколь угодно сложных технических или социально-технологических систем. Такой взгляд получил название теории абсолютной надежности [7]. Однако жизнь заставила скорректировать его. Начиная с определенного порога сложности, приходится иметь дело с вероятностными характеристиками аварий и катастроф в природной и техногенной сфере. Снижение соответствующих вероятностей до недавнего времени и рассматривалось как один из главных путей управления риском. Поэтому появился вероятностный подход к анализу надежности сложных технических систем. Трудности его применения заключаются в том, что приходится сталкиваться с редкими событиями и уникальными конструкциями, для которых корректно определить соответствующую вероятность очень трудно, поскольку, с одной стороны, нет достаточной статистики, чтобы опираться на опыт, а с другой - нет теории, которая позволяла бы выводить эти величины исходя из первых принципов [7].

Традиционный подход теории надежности, связанный с построением дерева отказов, учитывает лишь простейшие взаимосвязи между элементами сложной системы, в то время как для сложных систем характерно взаимное влияние различных элементов, более сложные причинно-следственные связи.

Поскольку зачастую «слабым звеном» является человек, то состояние сложной системы, ее безопасность нельзя оценивать без учета человеческого фактора. Отсюда возникает проблема комплексной оценки риска в социально-технологических системах.

В настоящее время значительный риск для обслуживающего персонала и населения представляют потенциально опасные объекты СТС, с которыми связаны аварии и катастрофы, приводящие к чрезвычайным техногенным

ситуациям. К таким объектам относятся промышленные и научно-исследовательские установки ядерной энергетики, химической промышленности, установки и комплексы вооружения военных систем, обладающие значительной потенциальной опасностью.

Рассмотренные особенности эксплуатации СТС обостряют проблему обеспечения ее безопасности. Острота и важность данной проблемы усугубляются тем, что она на научном уровне на сегодняшний день недостаточно разработана, а на инженерном уровне решается интуитивно. При этом практически отсутствует научно-методический аппарат нормирования требований к безопасной эксплуатации СТС, ее анализа, а также обоснования методов обеспечения ее требуемого уровня.

Приведенные выше рассуждения показывают актуальность исследований, направленных на разработку методов оценивания, анализа и обеспечения безопасности эксплуатации СТС с учетом фактического технического состояния их оборудования и функционального состояния обслуживающего персонала.

В настоящее время требования к эффективности систем обеспечения безопасности жизнедеятельности задаются, как правило, в качественной форме и трактуются однозначно - система обеспечения безопасности должна полностью исключить происшествия. Однако практика показывает, что ежегодно в процессе эксплуатации СТС возникает определенное число происшествий: катастрофы, аварии и поломки различных агрегатов и систем, гибель, увечье, травмы с временной потерей трудоспособности, профессиональные заболевания обслуживающего персонала и другие негативные события.

В соответствии с этим современная концепция обеспечения безопасности признает наличие опасности жизнедеятельности и, как следствие этого, возникает необходимость определения приемлемого уровня опасности, разработки механизма обеспечения этого уровня и внедрение такого механизма в практику эксплуатации СТС.

Для достижения поставленных целей необходимо на основе современных математических методов управления сложными организационно-техническими системами разработать научно-методический аппарат, позволяющий по результатам реальной оценки (достоверной информации о существовании предпосылок к аварийным ситуациям в СТС) принимать соответствующим органам своевременные управленческие решения по предупреждению возможных чрезвычайных ситуаций. Это требует заблаговременного прогнозирования динамики изменения опасности СТС и принятия адекватных компенсационных мер.

Таким образом, образовавшееся противоречие между заданным уровнем безопасности СТС, с одной стороны, реальным техническим состоянием, возможностями системы обеспечения безопасности по предупреждению недопустимого риска и уровнем финансирования, с другой — указывает на наличие проблемы. Проблема заключается в достижении приемлемого баланса между безопасностью и надежностью СТС с заданными характеристиками их эффективности и экономической целесообразности в условиях заданных сроков эксплуатации, финансовых и ресурсных ограничений.

1.2. Анализ состояния вопроса определения надежности технических систем

Первые исследования по проблеме надёжности технических систем были инициированы в 50-х годах XX в. членом-корреспондентом АН СССР Борисом Степановичем Сотсковым [8]. Полученные в то время результаты сводились к обобщению экспериментальных данных и разработке математической базы для анализа надёжности элементов автоматики. В то время основное внимание уделялось надёжности реле и другой коммутирующей аппаратуры. В [9,10] Б.С. Сотсковым описаны результаты этих исследований. В 60-е годы формулируется новое направление в

исследовании проблемы надёжности — физические основы надёжности элементов автоматики, в рамках которого создаются модели анализа влияния физических факторов процесса эксплуатации на показатели параметрических и катастрофических отказов элементов. Значительный вклад в это направление внесли И.Е. Декабрун, Б.П. Петрухин, С.Е. Ростковская, Н.А. Шавыкин.

Впоследствии результаты теоретических исследований вошли в инженерную практику в качестве стандартов и типовых методик расчёта надёжности элементов, приборов и устройств, а также планов их испытаний. Эти методики с середины 60-х годов имели статус официальных документов в Минприборе и Минсудпроме. Последняя версия типовой методики издана в 1998 г. [11].

Начало 60-х годов можно считать началом эпохи бурного развития автоматизации, создания крупных автоматизированных комплексов в оборонной промышленности, химической, металлургической и других отраслях народного хозяйства.

Резко возросла цена отказов, особую актуальность приобрели методы прогнозирования и обеспечения надёжности систем на всех стадиях их жизненного цикла, особенно стадии проектирования. Наряду с ростом требований к достоверности оценок надёжности технических средств автоматизации возросли требования к достоверности оценок влияния выбора структуры и регламентов технического обслуживания на надёжность систем. В ряде исследовательских организаций были развёрнуты теоретические и прикладные работы по исследованию проблем надёжности. Хорошим импульсом к развитию работ этого направления послужил доклад члена-корреспондента АН СССР Михаила Александровича Гаврилова на первом Международном конгрессе ИФАК “Структурная избыточность и надёжность работы релейных устройств” [12].

В последующие годы вышел ряд работ [13,14,15], замечательной особенностью которых была демонстрация предлагаемых методов на

примерах реальных классов систем сложной структуры. Универсальное значение имели рекомендации по обеспечению отказоустойчивости систем посредством введения различных видов избыточности: структурной, временной, информационной. Одним из таких предложений оказалось исследование А.Л. Райкиным и А.С. Манделем нового класса методов введения избыточности – динамического резервирования аппаратуры.

В этот период проблема надёжности отечественной техники была поднята на государственный уровень. В центральных газетах публиковались статьи академиков В.А. Трапезникова, А.И. Берга, В.А. Котельникова.

В 70-е годы задача анализа надёжности становится неотъемлемым компонентом процесса проектирования: в число обязательных проектных документов при создании технических систем стали включать раздел “Проектный анализ надёжности”. Резко вырос уровень требований к точности расчётов, понадобились новые методы, которые более полно учитывали особенности структур систем и снижение их работоспособности при отказе отдельных компонент.

В период 70...80-х годов теория надёжности решительно шагнула в класс динамических моделей надёжности, позволяющих количественно учитывать влияние таких факторов, как развёрнутая во времени последовательность отказов элементов системы. Н.В. Лубковым был предложен новый метод количественной оценки надёжности с использованием класса динамических моделей. В качестве такого класса моделей использовались введённые Р. Ховардом марковские процессы с доходами, соответственно и метод Лубкова получил название МПД-метода [16]. Главные достоинства МПД-метода заключались в возможности анализировать системы сложной структуры с несколькими допустимыми уровнями работоспособности и получать разнообразные количественные оценки — от полного набора стандартизованных показателей надёжности до таких специальных показателей, как работоспособность системы, временное распределение состояний и значения отвечающих этим состояниям доходов

и потерь. МПД-метод был принят Минприбором в качестве нормативного документа. В те же годы Н.В. Лубковым при участии В.И. Злобинского был разработан метод ускоренного статистического моделирования надёжности систем сложной структуры [17]. Программный комплекс, реализующий этот метод, был зарегистрирован во Всесоюзном фонде алгоритмов и программ. Оба метода применяются для анализа систем в авиации, ядерной энергетике, химических и других производствах.

Динамические модели надёжности открыли новый путь к решению важной проблемы оценки качества функционирования систем. Появилась возможность научно обоснованной оценки эффективности системы, и в частности её экономической эффективности. Впервые была продемонстрирована возможность формирования показателей, которые органично связывали между собой динамические, надёжностные и ресурсные особенности систем, позволяя оценить их вклад в техническую и экономическую эффективность. В это же время удалось обосновать необходимость проведения анализа динамики показателей эффективности при выборе наиболее предпочтительного варианта проектируемой технической системы [18].

Совокупность методов анализа структур и выбора наилучшего варианта проектируемой системы была представлена в [19].

Естественным развитием работ по проблемам надёжности стала постановка в 80-е годы вопроса об исследовании свойства живучести систем. Живучесть определяется как способность системы сохранять допустимый уровень работоспособности при поражающих внешних воздействиях. Специфическая особенность анализа живучести заключается в необходимости формирования моделей развития поражающих факторов и утраты стойкости элементов системы по отношению к этим факторам. Новые результаты по этой проблеме были получены А.В. Антоновым. Им разработаны детерминированный и статистический методы формирования оценок показателей живучести. В 1988 г. понятие “живучесть” было впервые

включено в терминологию автоматики [20]. Анализ живучести позволяет оценить пространственную (топологическую) структуру системы, т.е. изучить влияние пространственного размещения элементов системы на её стойкость к поражающим факторам внешней среды.

В последующем был выполнен значительный объём теоретических и прикладных исследований по обеспечению надёжности отдельных классов элементов и систем (интегральных схем, элементов пневмо- и гидроавтоматики, блоков логических устройств и др.). Для этого класса задач основное внимание уделялось разработке идеи обеспечения отказоустойчивости с помощью встроенных в структуру системы схем или блоков самодиагностики. В конце 60-х годов группа под руководством А.Ф. Волкова разработала вычислительный комплекс оборонного объекта, в архитектуру которого было включено диагностическое ядро. С целью сокращения объёма тестовых программ был использован принцип диагностирующих подсистем переменной структуры. Результаты этой разработки изложены в [21].

Работы по технической диагностике, начатые в конце 50-х годов под руководством П.П. Пархоменко, стали новым направлением в теории обеспечения работоспособности систем. В 1981 г. вышла обобщающая работа [22]. Достаточно полное представление о разработках в области исследования влияния диагностики на отказоустойчивость систем можно получить по [23].

В 90-е годы были начаты работы по анализу и обеспечению техногенной безопасности систем [24,25].

Таким образом, в настоящий момент существует полный комплекс исследовательских методов для проведения самых разнообразных исследовательских и проектных работ — начиная с обработки исходных экспериментальных данных о работоспособности элементов и кончая получением оценок надёжности, живучести и эффективности систем сложной структуры.

1.3. Состояние вопроса по совершенствованию управления теплогенерирующими установками

1.3.1. Новые технологии получения тепловой энергии. Дальнейшим перспективам развития теплоэнергетики Украины посвящено много работ. Так, например, в [26] приведен обзор различных решений предлагаемых Институтом технической теплофизики НАН Украины. Стоит отметить метод, снижающий потери при подводе энергии к той или иной технологии, и термохимический метод повышения КПД теплоэнергетических установок за счет уменьшения потерь при горении. Также разработаны различные проекты по адаптации и совершенствованию существующих мировых технологий повышения эффективности использования тепловой энергии для применения в Украине с учетом существенных финансовых ограничений.

В [26] также отмечается, что сегодня научные работы в области теплоэнергетики ведутся разрозненно, имеет место дублирование, некоторые из них неактуальны. Нередки случаи распыления средств по мелким темам. Не ведется координация работ. Устранить некоторые из вышеперечисленных недостатков можно было бы, восстановив функции головных организаций ведущим научным учреждениям НАН Украины.

1.3.2. Объединение АСУП и АСУТП. Ранее уже отмечалось, что с экономической точки зрения можно найти оптимальное решение по организации того или иного производства в заданных условиях. Фактически сегодня такие задачи решаются в рамках автоматизированных систем управления предприятием АСУП [27].

Несмотря на то, что АСУП существуют уже десятки лет, они до сих пор выполняют роль справочных систем. В рамках АСУП можно получить ответы на вопросы: у кого купить сырье, как организовать производство и кому продать готовую продукцию. Но ответы на эти вопросы по-прежнему являются лишь рекомендациями лицу, принимающему решения.

На рис. 1.1 представлена типовая структура АСУП. Несмотря на широкий спектр задач, решаемых АСУП, проблема ее эксплуатации заключается в том, что в контуре управления нет обратной связи между производимой продукцией и потребляемыми ресурсами.

АСУП может спланировать, сколько потребуется ресурсов для поддержания технологического процесса, но не в состоянии повлиять на сам процесс, в случае появления проблем с ресурсами. АСУТП, в свою очередь, пытается поддержать параметры технологического процесса, исходя из предположения, что имеется неограниченный источник ресурсов.

Таким образом, решение задачи объединения АСУП и АСУТП предоставит возможность гибкого автоматического управления производством и использованием тепловой энергии при постоянно изменяющихся условиях, будь то цены на энергоресурсы или их количество.

Хотя в доступной литературе данный вопрос практически не рассматривается, в последнее время все же начали появляться работы, посвященные проблеме интеграции АСУП и АСУТП и различным путям ее решения. Так, например, в [28] для интеграции предлагается использовать существующие на АСУП и АСУТП реляционные базы данных.

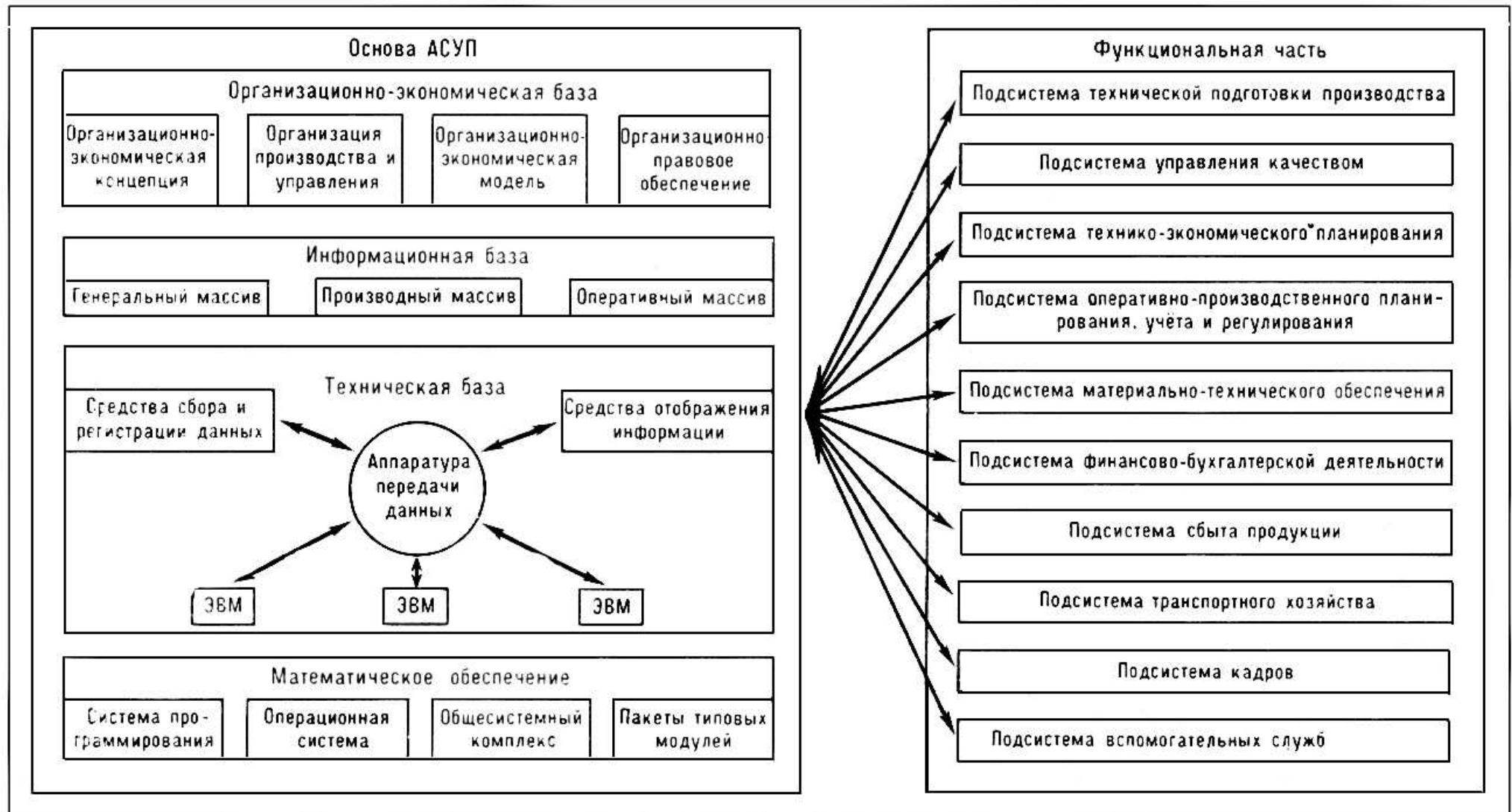


Рис. 1.1. Структурная схема АСУП

1.3.3. Анализ применяемых регуляторов для оборудования по производству и использованию тепловой энергии. Рассматриваемые системы теплоснабжения является замкнутыми активными динамическими системами автоматической стабилизации направленного действия, так как регулируемые переменные представляют собой заданные постоянные величины [29].

По условиям задания значения регулируемых переменных могут быть изменяемыми во времени дискретно, в этом случае системы автоматического регулирования (САР) называются программными, или в виде линейных функций переменных состояния, в таком случае они называются логическими.

Принято, что в системах теплоснабжения как для программных, так и логических САР мгновенные значения регулируемых переменных являются постоянными. Под мгновенными понимаются заданные значения регулируемых переменных, постоянные в течение момента времени, соизмеримого со временем переходного процесса по каналу регулирования.

Для таких САР законом регулирования является выраженная в явном виде зависимость $r(\tau) = F[\varepsilon(\tau)]$. Представленная зависимость отражает смысл принципа регулирования по отклонению: при наличии отклонения $\varepsilon(\tau)$ регулируемой переменной $x(\tau)$ от ее заданного значения $x_s(\tau)$ с помощью регулятора вырабатывается такое воздействие $r(\tau)$, которое может свести отклонение к минимуму. При этом уравнение имеет вид $\varepsilon(\tau) = x_s(\tau) - x(\tau)$.

В системах автоматической стабилизации температуры воздуха используются регуляторы, реализующие разнообразные законы регулирования. Аналоговые регуляторы реализуют линейную непрерывную функцию $F[\varepsilon(\tau)]$, а дискретные или позиционные

осуществляют дискретную выборку значений $F[\varepsilon(\tau)]$, по которым формируются дискретные регулирующие воздействия $r(\tau)$.

К аналоговым регуляторам относятся регуляторы, реализующие пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) законы регулирования:

$$\left. \begin{aligned} r(\tau) &= k_n \varepsilon(\tau) \\ r(\tau) &= k_n \varepsilon(\tau) + k_u \int \varepsilon(\tau) d\tau \\ r(\tau) &= k_n \varepsilon(\tau) + k_u \int \varepsilon(\tau) d\tau + k_d \varepsilon(\tau) / d\tau \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Основной смысл закона регулирования заключается, как следует из (1.1), в представлении линейной зависимости значения регулирующего воздействия от значения рассогласования.

В отличие от аналоговых регуляторов позиционные регуляторы формируют командный сигнал $r(\tau)$, который может иметь только определенное число постоянных независимых от времени значений $r_i(\tau)$, соответствующих заданному числу позиций отклонения $\varepsilon_i(\tau)$.

Наиболее распространенным регулятором является двухпозиционный. В этом регуляторе при переходе измеренной регулируемой переменной $x(\tau)$ через заданное значение $x_s(\tau)$, т. е. при изменении знака $\varepsilon(\tau)$, изменяется регулирующее воздействие r . При этом регулирующее воздействие переводится из одного крайнего положения r_i в другое. Характеристика идеального двухпозиционного регулятора является релейной однозначной и представляется в форме

$$r_i(\varepsilon) = \begin{cases} r_{\max}, & \text{где } \varepsilon(\tau) > 0 \\ r_{\min}, & \text{где } \varepsilon(\tau) < 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Другим по распространению является трехпозиционный дискретный регулятор. В этом регуляторе, кроме крайних значений регулирующего воздействия, имеется промежуточное, как бы среднее

значение r . Характеристика идеального трехпозиционного регулятора, являющаяся релейной однозначной с зоной нечувствительности, может быть записана в следующей форме:

$$r_i(\varepsilon) = \begin{cases} r_{\max}, & \text{где } \varepsilon(\tau) > \Delta\varepsilon \\ r_0, & \text{где } \varepsilon(\tau) < |\Delta\varepsilon| \\ r_{\min}, & \text{где } \varepsilon(\tau) < -\Delta\varepsilon \end{cases} \quad (1.3)$$

Анализ выражений (1.2) и (1.3) показывает, что введение зоны нечувствительности существенно меняет характеристику регулятора. Такое изменение необходимо при использовании регулятора в контуре стабилизации, обладающем возможностью двух противоположно направленных управляющих воздействий. Автоколебательность процесса регулирования в таком случае может быть ликвидирована за счет наличия области нечувствительности, внутри которой формируется команда, где нет изменения $\varepsilon(\tau)$. Такая область получается в результате введения зоны нечувствительности $\Delta\varepsilon$ [29].

В системах автоматической стабилизации температуры или влажности воздуха позиционные регуляторы используются в совокупности с корректирующими устройствами. Это объясняется тем, что существенная нелинейность характеристик регуляторов является причиной возникновения в контуре регулирования автоколебательных режимов. Использование в качестве корректирующих устройств жесткой обратной связи или импульсных прерывателей позволяет получить с некоторыми допущениями линейные законы регулирования.

Анализ типовых принципов управления процессом теплоснабжения показал, что несмотря на использование типовых решений автоматизации рассматриваемого технологического процесса низшего уровня управления, как правило, задача сводится к разработке контуров регулирования для каждой единицы оборудования.

На основе простых типовых схем возможен синтез сложных систем для различного набора технических средств, обеспечивающих заданные

температурные условия при сформулированных требованиях к автоматизированной системе управления. В основу решения задачи синтеза системы управления должно быть положено оптимальное управление структурой технических средств, так как возможно изменение их структуры.

Наличие в синтезируемой системе теплоснабжения множества регуляторов должно обусловить применение интеллектуального контроллера для управления ими. Кроме того, необходимость контроллера определяется возможностью установки разных настроек регуляторов, например, из-за изменения технологических функций. При этом возникает необходимость проведения предварительного моделирования изменяемой структуры технических средств с целью определения термодинамической эффективности и определения минимума затрат энергетических ресурсов при различной комбинации технологических установок, а также определения их надежностных характеристик. Решение такой задачи предполагает разработку методики анализа, учитывающей изменяющиеся характеристики надежности технических средств при минимизации затрат первичных энергоресурсов для обеспечения заданных условий.

1.4. Выбор прототипа системы теплоснабжения

На основании проведенного анализа текущего состояния теплогенерирующего оборудования было принято выбрать в качестве объекта исследования комбинированную систему теплоснабжения. Структурная схема системы представлена на рис 1.2.

Было принято, что система теплоснабжения состоит из подсистемы отопления, кондиционирования и вентиляции. Теплогенерирующее оборудование включает в себя два газовых котла и теплонасосную установку (ТНУ). ТНУ может работать в двух режимах: как источник тепла и как источник холода. Теплообмен горячего теплоносителя с воздухом внутри теплопотребителя осуществляется посредством системы теплых полов.

Предполагалось, что система управления будет обеспечивать комфортную температуру у теплопотребителя. При этом решения по управлению будут представлять собой некий план переключения оборудования, обеспечивающий оптимальное соотношение стоимости затраченных ресурсов, эффективности и надежности работающего оборудования, а также качества решения задачи обеспечения комфортной температуры.

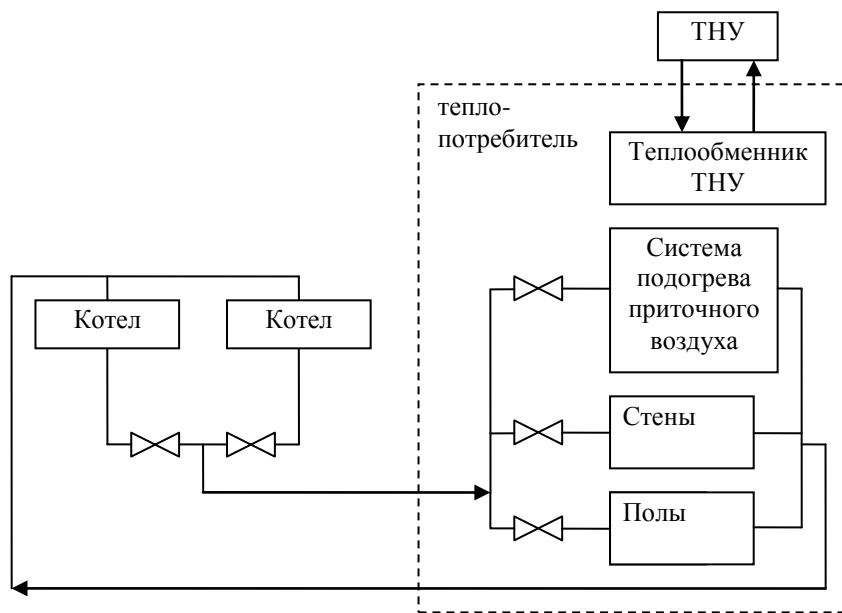


Рис. 1.2 Структурная схема системы отопления теплопотребителя

От современных КИСУ технологическими процессами требуется надежная адаптация к изменению среды их использования при отсутствии или минимальном вмешательстве оператора при их функционировании. Современный уровень развития теории оптимального управления, теории адаптивных систем и также уровень совершенства КИСУ позволяет решить новую задачу управления техническими структурами не только по параметрам, но и по структуре взаимозаменяемого оборудования системы, которое отличается своей надежностью, эффективностью и стоимостью. Целью управления является поддержание оптимального соотношения в системе между максимальной эффективностью используемого оборудования

и минимумом стоимости затраченных ресурсов при заданном качестве управления.

Структурная схема типовой системы управления в самом общем виде представлена на рис. 1.3. Множество таких систем управления составляет АСУТП.

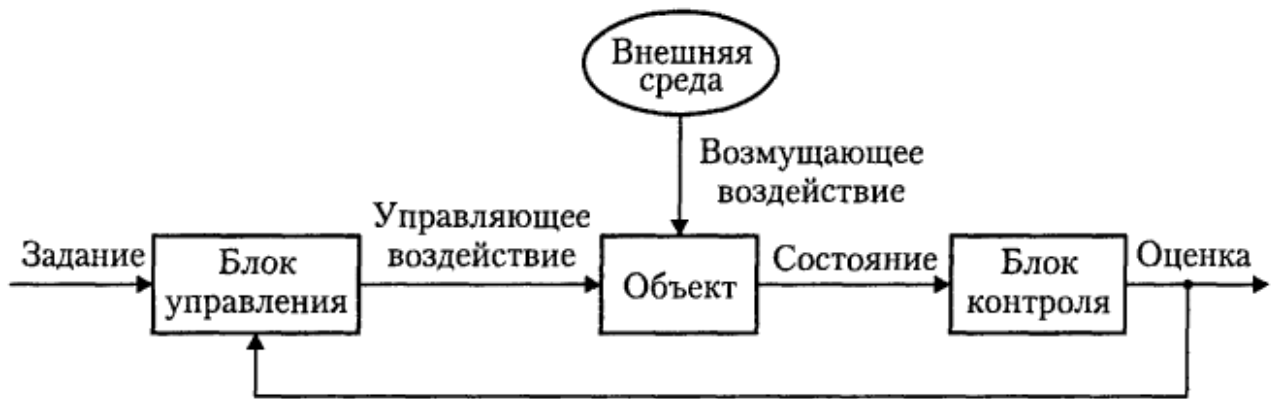


Рис. 1.3 Обобщенная структурная схема системы управления

В новом классе систем связь между технико-экономическими показателями должна осуществляться по каналу «Задание» (рис. 1.3). Только на основании анализа материальных и энергетических потоков должно приниматься решение о требуемом значении технологических параметров, которое будет соответствовать оптимальному режиму работы.

Учитывая, что в современных СТС теплоснабжения задача управления может решаться при помощи различного оборудования, отдельные подсистемы объекта управления можно рассматривать как сложный объект, структура которого представлена на рис. 1.4. Для достижения цели управления оборудование может подключаться в схему объекта управления как последовательно, так и параллельно. Это приводит к необходимости появления в новом классе систем подсистемы управления структурой технических средств.

Таким образом, в новом классе систем решение задачи управления можно достичь: подсистемой управления заданными значениями технологических параметров и подсистемой управления структурой

технических средств. Обобщенная структурная схема прототипа новой системы управления представлена на рис. 1.5.

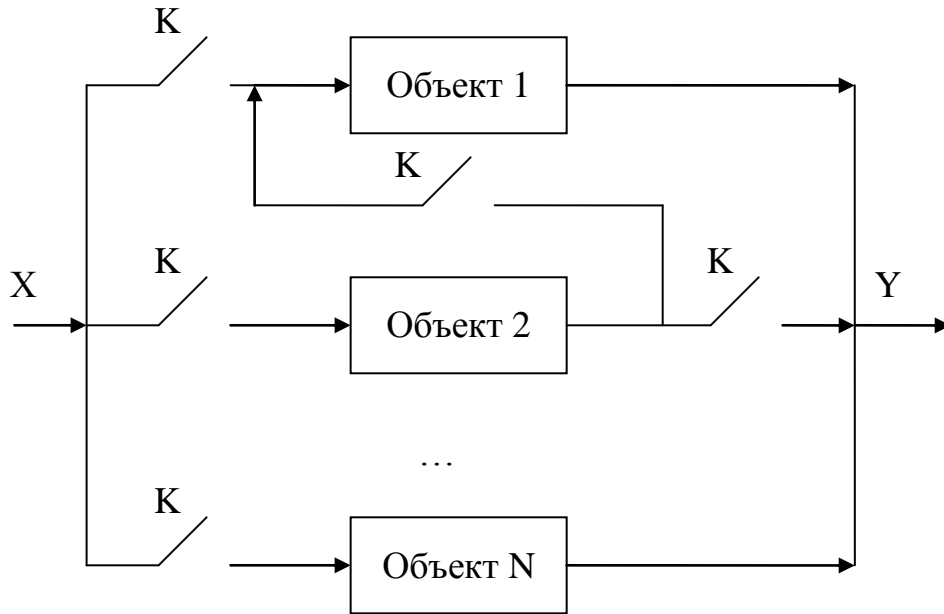


Рис. 1.4 Обобщенная структурная схема подсистем объекта управления

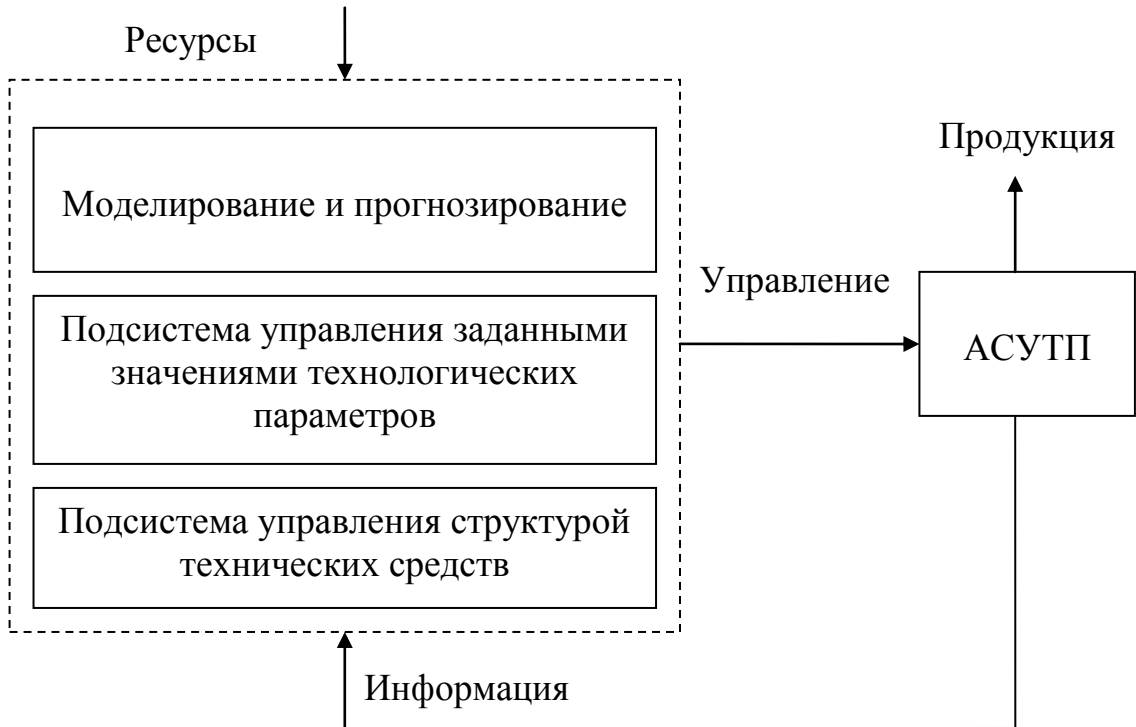


Рис. 1.5 Обобщенная структурная схема прототипа нового класса систем управления

1.5. Постановка задачи диссертационного исследования

Проведенный анализ показал, что под управлением системы теплоснабжения понимается управление структурой регулятора и оптимизацией его текущих настроек. Анализ литературно-патентных источников показал, что исследователи в области автоматизации обратили внимание на задачи управления изменением структуры технических средств сравнительно давно, на этапе классификации автоматизированных систем, однако в открытой литературе не обнаружено никаких методов управления структурой технической системы для повышения эффективности.

Целью диссертационного исследования является усовершенствование информационного и математического обеспечения для повышения эффективности автоматизированной системы теплоснабжения за счет изменения текущей структуры объекта управления, каждая из которых характеризуется своей надежностью, эффективностью, стоимостью и качеством.

Эффективность эксплуатации системы теплоснабжения с изменяемой структурой объекта управления при ограничениях на ресурсы для обеспечения заданного качества определяется неформализованностью условий, определяющих целесообразность текущего изменения структуры технических средств и состоянием настроек регуляторов каждой единицы оборудования, обеспечивающего теплоснабжение, вплоть до состояния перерегулирования.

Для решения главной задачи диссертационного исследования — разработки компьютерно-интегрированной системы управления процессом теплоснабжения, которая осуществляла бы оптимальное управление по критериям стоимости затрачиваемых ресурсов, качества управления, эффективности и надежности работающего оборудования за счет совершенствования математического и информационного обеспечения необходимо рассмотреть следующие вспомогательные задачи.

1. Для проведения исследования, прежде всего, необходимо разработать имитационные модели объекта управления.

В данном случае к математическим моделям объекта управления относятся:

- модель теплопотребителя;
- окружающей среды;
- газового котла;
- теплонасосной установки.

Математическая модель теплопотребителя должна позволять определить температуру воздуха внутри него в любой момент времени. При этом должны учитываться такие факторы, как: температура окружающей среды, величина инсоляции, материал стен, толщина стен, расход и температура теплоносителя в отопительной системе, расход и температура воздуха в системе вентиляции. Также должны моделироваться расходы теплоносителя во всех узлах гидравлической системы.

Математическая модель окружающей среды должна позволять определить значения температуры воздуха и инсоляции в любое время года.

Математическая модель газового котла должна позволять определить температуру теплоносителя на выходе из котла в зависимости от температуры и расхода на входе в него.

Математическая модель теплонасосной установки должна позволять определить количество поступающего тепла (холода) в зависимости от потребляемой мощности и температуры окружающей среды.

2. Для оценки оптимальности процесса управления процессом теплоснабжения необходимо разработать математические модели, позволяющие определить значения критериев стоимости, эффективности, качества и надежности для каждой единицы оборудования и для системы в целом.

3. Для исследования объекта управления как единого целого необходимо провести объектно-ориентированный анализ и синтезировать

информационную модель объекта управления и модели состояний для объектов: теплопотребитель, ТНУ, котел и окружающая среда.

4. Для решения задачи оптимального управления необходимо сформулировать оптимизационную задачу, целевая функция которой будет основываться на текущем значении таких составляющих, как стоимость затрачиваемых ресурсов, качество управления, эффективность и надежность работающего оборудования.

5. Необходимо разработать комплекс управляющих алгоритмов для выбора оптимальной текущей структуры технических средств в зависимости от ограничений на ресурсы, изменения температуры окружающей среды.

6. Исследовать усовершенствованное информационное и математическое обеспечение КИСУ на имитационной модели на возможность адаптировать стратегию управления при введении ограничения на ресурсы и на весовые коэффициенты критерия управления.

1.6. Выводы

1. Задачи обеспечения требуемой надежности СТС в теоретическом плане до конца не решены. До настоящего времени не разработаны научно-теоретические основы адаптивного управления техническим состоянием СТС, отсутствуют адекватные показатели эффективности и методики их оценки. Вследствие этого решение задачи обеспечения требуемой надежности и безопасности СТС в условиях установленных сроков эксплуатации требует изыскания и внедрения новых методов управления.

2. Особенности эксплуатации современных СТС обостряют проблему обеспечения ее безопасности. Острота и важность данной проблемы усугубляются тем, что она на научном уровне на сегодняшний день недостаточно разработана, а на инженерном уровне решается интуитивно. При этом практически отсутствует научно-методический аппарат

нормирования требований к безопасной эксплуатации СТС, ее анализа, а также обоснования методов обеспечения ее требуемого уровня.

3. Теплоснабжение Украины представляет собой огромное поле для разработки и внедрения новых методов управления и автоматизированных систем, которые позволят повысить эффективность технологических процессов сжигания топлива, а также осуществить переход к комбинированному управлению.

4. Анализ перспектив развития современных систем управления показывает, что в дальнейшем для создания систем, позволяющих эффективно управлять качеством и надежностью технических процессов, необходимо идти по пути объединения АСУП и АСУТП.

5. Выбран прототип структурной схемы системы управления, обоснована структура информационного обеспечения и сформулированы задачи диссертационного исследования.

РАЗДЕЛ 2

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Проведенный анализ и обобщение различных литературных источников [27,28,30,31] показали, что для исследования поведения объектов с изменяемой структурой, в частности теплотехнических, целесообразно применить методологию объектно-ориентированного анализа. Поэтому в основу имитационных моделей был положен модифицированный автором объектно-ориентированный подход в нотации С. Шлеер [32]. Так, классический подход предусматривает три этапа анализа, рабочими продуктами которых являются информационные модели, модели состояний и диаграммы потоков данных действий.

Опыт разработки современного программного обеспечения показал, что третий этап анализа целесообразно заменить на этап разработки технологических алгоритмов [33]. Под ними понимается комплекс математических моделей и информационного обеспечения, регламентирующий порядок проведения различных технологических процедур, а также описывающий действия, выполняемые в том или ином состоянии.

Кроме того для достижения цели данного диссертационного исследования необходимо выбрать комплексный критерий управления и разработать математический аппарат для его количественной оценки.

Таким образом, для решения задачи синтеза имитационных моделей необходимо рассмотреть следующий ряд дополнительных задач:

- провести объектно-ориентированный анализ предметной области и разработать информационную модель и модели состояний;
- синтезировать, в рамках технологических алгоритмов,

математические модели теплопотребителя и оборудования системы теплоснабжения, а также модель окружающей среды;

— выбрать структуру комплексного критерия управления и разработать математическое обеспечение для его расчета.

2.1. Объектно-ориентированное моделирование системы теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств

Объектно-ориентированный анализ, проведённый для рассматриваемой компьютерно-интегрированной системы управления составной части системы теплоснабжения, показал помимо оговоренных в условии задачи объектов (теплопотребитель, котел, ТНУ), что каждая единица оборудования может состоять из трех компонент, определяющих ее работоспособность: «хрупкая», «средняя» и «надежная» [34, 35]. У «хрупкой» компоненты малые как время наработки на отказ, так и время, необходимое для замены компоненты в случае ее выхода из строя. У «надежной» компоненты — наоборот. В случае поломки любой из компонент оборудование считается вышедшим из строя на время, соответствующее времени восстановления сломанной компоненты. По окончании данного временного интервала надежность сломанной компоненты полностью восстанавливается и оборудование считается готовым к работе [36].

2.1.1. Информационная модель. К сожалению, в полном объеме со всеми атрибутами (более 150) информационная модель является слишком громоздкой, поэтому на рис. 2.1 приведен ее сокращенный вариант, демонстрирующий только основные атрибуты и связи.

Предварительный анализ показал, что нет смысла выделять окружающую среду в отдельный объект. Достаточно реализовать ее модель на уровне отдельных функций.

2.1.2. Модели состояний. Модель состояний для объекта «Теплопотребитель» является простой, так как состоит из двух состояний: «ожидание сообщений» и «расчет». По этой причине графическое представление модели не приводится.

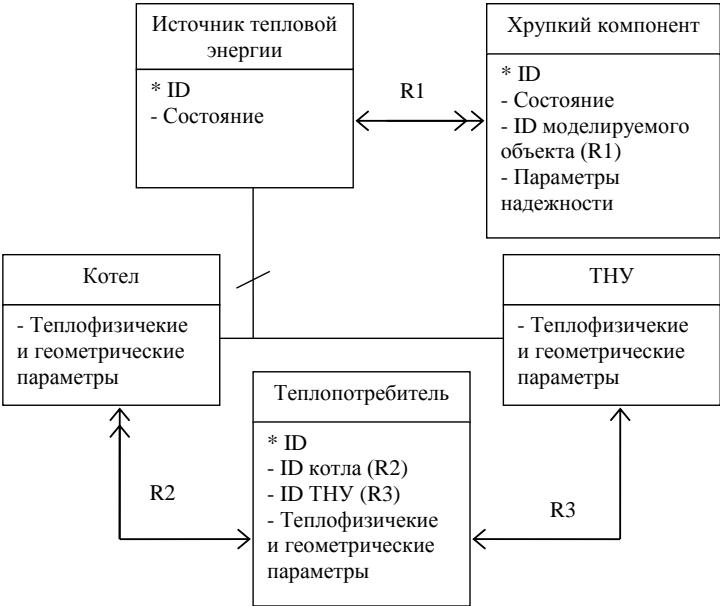


Рис. 2.1 Информационная модель системы теплоснабжения

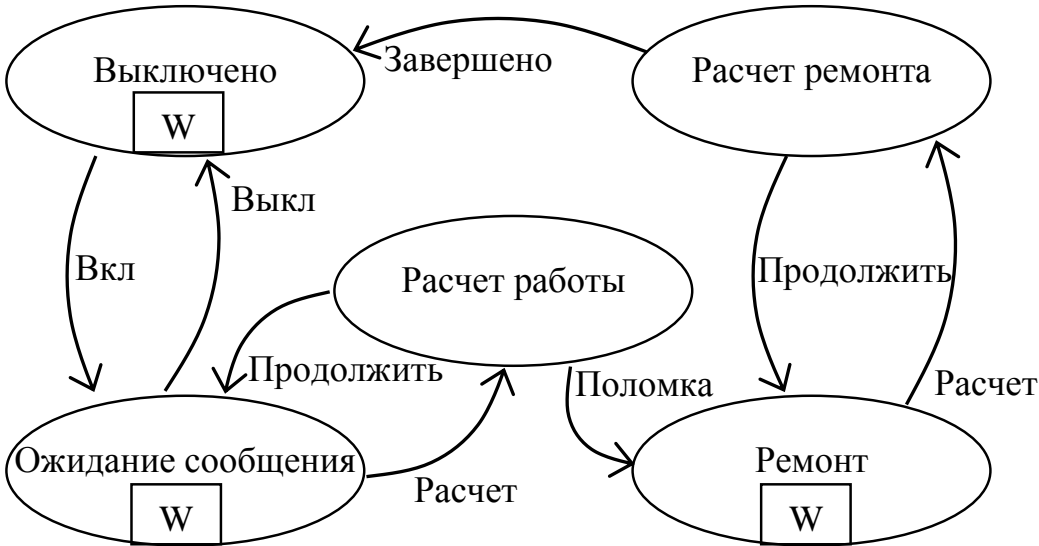


Рис. 2.2 Модель состояний «хрупкой компоненты»

Жизненный цикл модели «хрупкой» компоненты (рис. 2.2) начинается в момент создания экземпляра объекта, при этом он переходит в состояние

«Выключено». По событию «Вкл» объект активируется и переходит в состояние «Ожидание сообщения», в котором ожидает поступление извне управляющих команд. По событию «Расчет» объект переходит в состояние расчета «Расчет работы». В этом состоянии должна реализовываться математическая модель «хрупкого компонента». При возникновении поломки объект переходит в состояние «Ремонт», фиксирует время начала ремонта и на последующие события «Расчет» реагирует переходом в состояние «Расчет ремонта». В этом состоянии проверяется, не завершен ли ремонт, и если да, то по событию «Завершено» объект возвращается в исходное состояние «Выключено».



Рис. 2.3 Модель состояний объекта «ТНУ»

На рис. 2.3 приведена модель состояний объекта ТНУ. Как и в модели компонент надежности, исходным состоянием является «Выключено». Переходы «Выключено» -> «Ожидание сообщения» и «Ожидание сообщения» -> «Выключено» возможны только через промежуточные состояния «Включить подачу фреона» и «Выключить подачу фреона», в которых посылаются команды включения и выключения хрупким

компонентам (события «Вкл» и «Выкл» рис. 2.2). В отличие от модели на рис. 2.2 по событию «Расчет» объект ТНУ сначала переходит в состояние «Расчет хрупкой компоненты», в котором моделируется работа хрупких компонент. По результатам моделирования можно перейти либо к расчету матмодели ТНУ в состоянии «Расчет работы», либо к ожиданию восстановления сломанной компоненты в состоянии «Ремонт». Дальнейшее поведение ТНУ аналогично модели на рис. 2.2.

Дальнейший анализ показал, что для объекта «Теплопотребитель», а в перспективе и для объекта «Система управления» можно обойтись простыми моделями состояний, состоящими всего из 2-х состояний «Ожидание сообщения» и «Расчет».

На рис. 2.4 представлена модель состояний объекта «Котел». Несмотря на свою сложность, данная модель во многом повторяет принципы, заложенные в модель ТНУ.

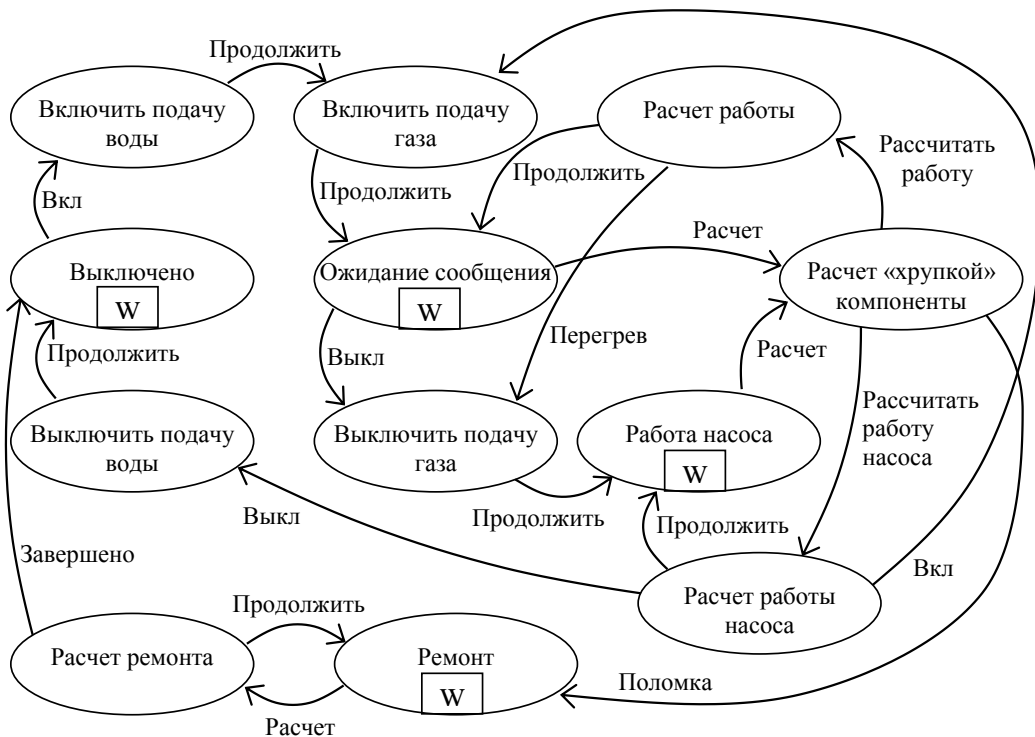


Рис. 2.4 Модель состояний объекта «Котел»

Так как газовый котел может находиться в режимах, когда насос качает

воду, но горелки выключены, например произошел перегрев воды, введены соответствующие состояния, позволяющие смоделировать подобные ситуации. Так, разделены процедуры включения/выключения воды и газа и введены состояния «Включить подачу воды», «Выключить подачу воды», «Включить подачу газа», «Выключить подачу газа». По аналогии с моделью рис. 2.2 в состояниях «Включить подачу воды» и «Выключить подачу воды» помимо моделирования включения/выключения имитации движения воды, также посылаются команды включения/выключения соответствующим котлу хрупким компонентам. В состояниях «Включить подачу газа» и «Выключить подачу газа» моделируется включение/выключение подачи газа. Нормальная работа котла характеризуется цепочкой состояний «Ожидание сообщения» -> «Расчет «хрупкой» компоненты» -> «Расчет работы» -> «Ожидание сообщения». При этом считается, что работают и насос, качающий воду через котел, и горелка. В случае перегрева воды в котле по событию «Перегрев», а также при поступлении команды выключения котла (событие «Выкл») объект переходит через состояние «Выключить подачу газа» в состояние «Работа насоса». Теперь цепочка состояний «Работа насоса» -> «Расчет «хрупкой» компоненты» -> «Расчет работы насоса» -> «Работа насоса» имитирует работу только насоса при выключенном газе. Анализ причины перехода в состояние «Работа насоса» позволяет в дальнейшем либо снова включить газ и перейти к основному циклу работы, либо через состояние «Выключить подачу воды» вернуться в исходное состояние «Выключено». Цепочка состояний «Расчет «хрупкой» компоненты» -> «Ремонт» -> «Расчет ремонта» -> «Выключено» так же, как и на модели ТНУ, позволяет смоделировать процесс ремонта и вернуться в исходное состояние.

2.2. Результаты синтеза технологических алгоритмов

Анализ учебной литературы [37,38] показал, что для решения нестационарной задачи теплопроводности в случае, когда объект имеет

сложную форму, чем фактически и является теплопотребитель, целесообразно использовать численные методы расчета температурных полей. Кроме того, в ряде работ обосновывается использование методики расчета температурного поля для синтеза имитационных моделей, позволяющих повысить точность моделирования объекта управления.

Так, в [39] рассматривается вопрос проектирования высоконадежных тормозных систем с целью обеспечения безопасности железнодорожных перевозок. Показано, что различные приближения и упрощения приводят к ошибкам в определении температурного поля, что в свою очередь ведет к накоплению ошибок при последующем определении температурных напряжений, деформаций ползучести и термопластичности, которые в конечном итоге приводят к существенной ошибке при оценках надежности и в прогнозах ресурса деталей тормоза.

В [40] рассмотрен вопрос повышения надежности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов и сосудов для транспортировки, хранения и переработки нефтегазопродуктов. Приведены результаты имитационного моделирования температурных полей трубопроводов и показана целесообразность использования данных полей для оперативного неразрушающего контроля их состояния в процессе эксплуатации и профилактического осмотра.

В [41] обосновывается необходимость расчета температурного поля как составляющей инструмента расчета вольт-амперных характеристик термоиммиссионных электрогенерирующих сборок.

Основной недостаток моделей, основанных на расчете температурных полей, заключается в их значительной вычислительной емкости, поэтому целесообразно синтезировать имитационные модели для проектируемого класса систем на основе двух наборов.

Первый — это точные модели, адекватно отражающие физику теплоэнергетических процессов по всему объему объекта управления, что позволит вести точную оценку надежности и ресурса оборудования.

Второй — упрощенные модели, которые отражают лишь общие тенденции в процессах, что позволит существенно снизить вычислительную емкость моделей и проводить исследование управляющих алгоритмов на значительных временных промежутках, таких как месяц, сезон, год.

2.2.1. Математическая модель теплопотребителя. В целом модель теплопотребителя представляет собой комплекс моделей, описывающих:

- расходы теплоносителя в системе теплых полов и стен;
- процесс теплопередачи от теплоносителя материалу стен и полов;
- температурное поле во внутренних стенах, полах и внешних стенах;
- процесс теплопередачи от поверхности внутренних стен и полов воздуху в помещениях;
- процесс теплопередачи от ТНУ воздуху в помещениях;
- процесс теплопередачи от воздуха внутри помещения внешним стенам;
- процесс теплопередачи от внешних стен окружающей среде;
- потери тепла через оконные проемы и крышу;
- аккумулятирование внешними стенами тепла, поступающего от солнца.

Предварительные исследования показали, что расчет температурного поля всего теплопотребителя является слишком требовательным с вычислительной точки зрения [34]. Поэтому было решено ограничиться моделированием одной комнаты и интерполировать результаты на весь теплопотребитель. В качестве объекта исследования была выбрана угловая комната с двумя оконными проемами во внешних стенах.

Были приняты следующие величины: площадь комнаты — $5 \times 5 = 25 \text{ м}^2$, высота — 3 м, площадь оконных проемов — $2 \times 5 = 10 \text{ м}^2$, площадь внешних стен — $2 \times 12 = 24 \text{ м}^2$, материал внутренних стен — красный кирпич, расход воздуха в системе вентиляции — $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Толщина внешних стен 59 см. Структура внешней стены — штукатурка (с внутренней стороны), основной

материал, слой минеральной ваты, штукатурка. Трубы с теплоносителем проложены в полу на глубине 10 см с шагом 15 см. Во внутренних стенах трубы с теплоносителем проложены в центральной части стены с шагом 15 см. Ориентация труб в стенах горизонтальная. Нагреваемая часть стены по высоте занимала 1,5 м.

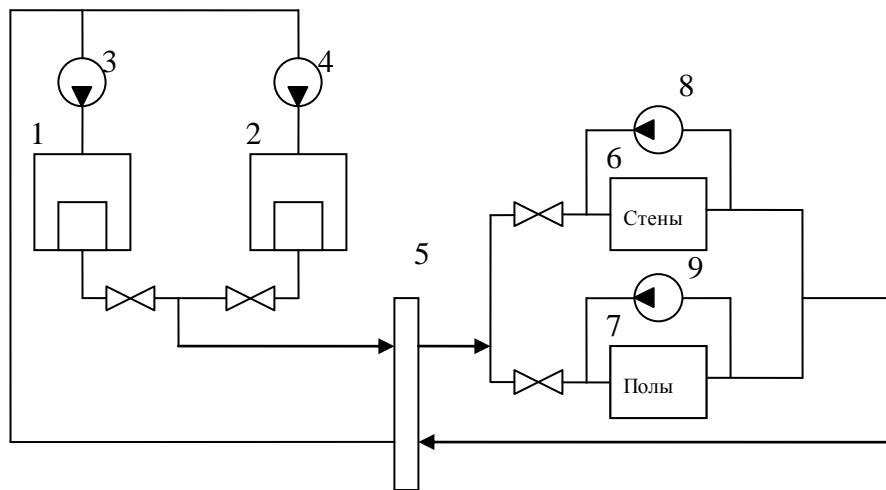


Рис. 2.5 Схема отопления теплотребителя системой теплых полов и стен

На рис. 2.5 представлена схема отопления теплотребителя системой теплых полов и стен. Два котла (1) и (2) посредством гидроразделителя (5) связаны с системой теплых стен (6) и системой теплых полов (7). Каждый котел обладает собственным насосом (3) и (4). Системы теплых полов и стен содержат циркуляционные насосы (8) и (9).

Такая схема позволяет при необходимости подключать любой котел отдельно либо оба вместе. При этом контуры движения теплоносителя в стенах и полах также разделены и могут управляться отдельно.

Решение задачи расчета расходов теплоносителя на первый взгляд кажется простым. В любом учебнике или справочнике приводится пример гидравлического расчета. Но задача такого расчета — определить по тепловой нагрузке, какой необходим расход теплоносителя и, следовательно, какой необходимо выбрать диаметр труб.

В данном случае необходимо решить обратную задачу. Зная диаметр труб и давление, определить, каков будет расход во всех точках гидравлической системы.

Несмотря на кажущуюся простоту, данная задача не имеет однозначного решения. Так, в [42] предлагается итерационный метод, по сути заключающийся в угадывании значений расходов в узловых точках системы. При этом рекомендовано на каждой итерации проверять выполнение законов Кирхгофа.

После ряда предварительных экспериментов было решено часть значений расходов теплоносителя принять, а остальные рассчитать исходя из закона Кирхгофа:

$$\sum_i G_i = const, \quad (2.1)$$

где G_i — расходы теплоносителя в одном узле гидравлической сети.

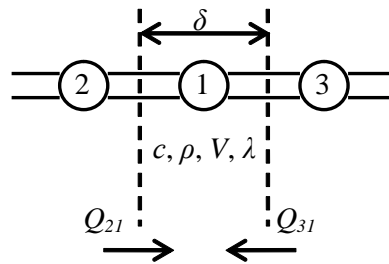


Рис. 2.6 Разбиение и числовая сетка для нестационарной одномерной задачи

Для решения задачи построения температурного поля теплопотребителя было решено использовать метод тепловых балансов.

Суть метода заключается в следующем. Объект разбивается на элементарные объемы $V = \delta \times \delta \times 1 = \delta^2$ (рис. 2.6). Полагаем, что удельная теплоемкость c и коэффициент теплопроводности λ 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. 2.6) 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

$$t'_1 = \frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho V} \left(t_2 + t_3 + \frac{t_1}{\frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho V}} - 2t_1 \right) \quad (2.2)$$

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 (2.2) принимает вид

$$t'_1 = Fo \left[t_2 + t_3 + t_1 \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) \right]. \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) является основой численного метода расчета нестационарной теплопроводности [43]. При этом важно помнить, что выбор

Fo ограничен условием:

$$Fo \leq \frac{1}{2}. \quad (2.4)$$

Отметим, что данный подход применим и для решения задачи теплопередачи. Предположим, что между элементами 2 и 1 (рис. 2.2) осуществляется теплопередача с коэффициентом теплопередачи α , а через элементы 3 и 1 — теплопроводность, тогда температура t'_1 будет определяться по выражению

$$t'_1 = t_1 + \frac{\alpha \Delta \tau}{c \rho \delta} (t_2 - t_1) + \frac{\lambda \Delta \tau}{c \rho \delta^2} (t_3 - t_1). \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) легко обобщить на n -мерный случай для объекта с переменными по объему теплофизическими свойствами:

$$t'_i = t_i + \sum \frac{\alpha_j \Delta \tau}{c_j \rho_j \delta} \Delta t_{пер} + \sum \frac{\lambda_k \Delta \tau}{c_k \rho_k \delta^2} \Delta t_{пров}, \quad (2.6)$$

где $\Delta t_{пер}$, $\Delta t_{пров}$ — температурные напоры между элементами объекта, через которые осуществляются теплопередача и теплопроводность соответственно.

Выражение (2.6) позволяет построить температурное поле объекта исследования в любой момент времени, учитывая как процессы теплопроводности, так и процессы теплопередачи [44]. Следует отметить, что для компьютерной реализации данного выражения требуются ЭВМ огромной производительности. Еще 10 лет назад моделирование подобного температурного поля было бы невозможно. Поэтому в данном исследовании

для моделирования было выделено по одному характерному сегменту внутренних стен, пола и внешних стен. Элементарные объемы, на которые разбивались сегменты, представляли собой кубы со стороной $\delta = 1$ см. Шаг по времени моделирования $\Delta\tau = 1$ с.

Полученное по (2.6) температурное поле пола или стены затем корректировалось с целью имитации движения теплоносителя. Для упрощения было принято, что теплоноситель движется по квадратным трубам, сечение которых соответствует сечению элементарного объема температурного поля. Учитывая геометрию расположения труб, а также расход теплоносителя, легко можно вычислить, какие элементы поля необходимо модифицировать, чтобы имитировать движение теплоносителя. Так, если объемный расход G теплоносителя в трубе равен $5 \text{ см}^3/\text{с}$, то при $\delta = 1$ см данный расход займет за 1 с $n = 5$ сегментов трубы. Это означает, что температуру теплоносителя по всей длине трубы необходимо модифицировать по выражению

$$\begin{cases} t_i = T_{mn}, i = 1, \dots, n \\ t_i = t_{i-n}, i = n + 1, \dots, N \end{cases}, \quad (2.7)$$

где T_{mn} — температура теплоносителя на входе в трубу;

N — количество сегментов в трубе.

Ввиду того, что построение температурного поля всего объекта исследования без применения суперкомпьютера весьма затруднительно, для определения температуры воздуха внутри комнаты был также использован метод тепловых балансов. Для каждого элемента поверхности внутренних и внешних стен и пола уравнение теплового баланса имеет вид

$$\alpha F(t_i - t_g)\Delta\tau = m_g c_g \Delta t_g = m_i c_i \Delta t_i \quad (2.8)$$

где $F = \delta^2$ — площадь элемента поверхности пола или стены;

t_g — температура воздуха в комнате;

Δt_g — изменение температуры воздуха в комнате;

m_g — масса воздуха в комнате;

c_g — теплоемкость воздуха в комнате;

t_i — температура i -го элемента поверхности пола или стены;

Δt_i — изменение температуры i -го элемента поверхности пола или стены;

c_i — теплоемкость i -го элемента поверхности пола или стены;

m_i — масса i -го элемента поверхности пола или стены.

Выражение (2.8) также использовалось для построения модели системы вентиляции, в которой предполагалось использовать тепло уходящего воздуха для предварительного нагрева холодного приточного воздуха. Ряд предварительных экспериментов позволил для выбранной геометрии теплообменника системы вентиляции получить простую зависимость для изменения температуры Δt_{np} приточного воздуха:

$$\Delta t_{np} = 0.21(t_g - t_{np}). \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) позволило в дальнейшем существенно уменьшить объем вычислений.

Для определения температуры внешней поверхности наружных стен при теплообмене с окружающей средой и аккумулировании тепла солнца также использовалось выражение (2.8).

Приняв, что тепло/холод от ТНУ распространяется в объеме воздуха мгновенно, можно использовать для расчета изменения температуры внутреннего воздуха теплопотребителя следующее выражение:

$$Q_{ТНУ} = m_g c_g \Delta t_g, \quad (2.10)$$

где $Q_{ТНУ}$ — количество тепла/холода, генерируемых ТНУ.

Для определения количества тепла, уходящего через оконные проемы и крышу, было использовано выражение

$$Q_{nom} = \sum_i F_i \frac{1}{R_i} (t_g - t_{oc}) \cdot \Delta\tau \quad (2.11)$$

где F_i — площадь i -го элемента ограждающей конструкции теплопотребителя (оконного проема, крыши и т.п.);

R_i — температурное сопротивление элемента;

t_{oc} — температура окружающей среды

$\Delta\tau$ — время моделирования.

Таким образом, если пренебречь явлениями конвективного теплообмена и теплообмена излучением, совокупность уравнений (2.6)—(2.11) полностью описывает теплопотребитель.

2.2.2. Математическая модель котла. Конструктивные и теплотехнические параметры котла представлены в табл. 2.1.

Предварительные исследования показали, что нет необходимости моделировать в котле реальные процессы горения. В данном случае в котле интерес представляют процесс теплообмена и его инерционность. Для моделирования этих параметров также была использована идея расчета температурного поля [34].

Из всего пакета труб выделяется одна трубка. Она разбивается по длине на множество маленьких сегментов. Имитация движения теплоносителя осуществляется таким же образом, как это было реализовано для модели теплопотребителя (см. 2.7).

Таблица 2.1

Параметры используемого котла

Наименование характеристики	Значение
Максимальная тепловая мощность	30 кВт
Нормативный КПД	$\eta = \text{до } 90\%$
Диаметр трубок	$d = 0.012 \text{ м}$
Длина топки котла	$L = 0.3 \text{ м}$
Ширина топки котла	$W = 0.3 \text{ м}$
Высота топки котла	$H = 0.3 \text{ м}$
Температура теплоносителя на выходе из котла	70°
Расход воды через котел	0.18 кг/с
Шаг труб в пакете	$1 d$
Шаг пакетов труб	$1.5 d$

Температура t_i в i -м сегменте определяется как

$$t_i = t_i + \Delta t, \quad (2.12)$$

где Δt — изменение температуры теплоносителя в сегменте, обусловленное сжиганием газа.

Величина Δt определяется по выражению

$$\Delta t = \frac{Q_{\text{газ}}}{N_{\text{тр}} \cdot N \cdot c_p \cdot m_{\text{сег}}} \quad (2.13)$$

где $Q_{\text{газ}}$ — количество полезной теплоты, использованной при сжигании газа;

$N_{\text{тр}}$ — общее количество трубок в теплообменнике котла;

N — количество сегментов в одной трубке;

c_p — теплоемкость теплоносителя;

$m_{сез}$ — масса теплоносителя в одном сегменте.

$$N_{mp} = \frac{W}{2d} \cdot \frac{H}{2.5d}. \quad (2.14)$$

$$Q_{газ} = G_{газ} \cdot q_{газ} \cdot \eta, \quad (2.15)$$

где $G_{газ}$ — расход газа;

$q_{газ}$ — теплотворная способность газа.

$$m_{сез} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_{сез} \cdot \rho, \quad (2.16)$$

где $L_{сез}$ — длина одного сегмента трубки

$$L_{сез} = \frac{H}{N}. \quad (2.17)$$

В комплекте с блоком котлов используется гидроразделитель, задача которого отделить первичный контур (котлы) от вторичного (отопление). При использовании гидравлического разделителя давление ΔP между коллекторами подачи и возврата близко к нулю. Давление ΔP определяется гидравлическим сопротивлением разделителя, которое незначительно. Кроме этого, данное значение — постоянная величина, не зависящая от количества одновременно функционирующих насосов во вторичном контуре [45].

Внутри гидроразделителя происходит перемешивание входной и обратной воды. Он может работать в трех режимах.

1. Поток контура котлов равен потоку контура отопления (рис. 2.7).

Соотношение между температурами: $T_1 = T_3$ и $T_4 = T_2$. Такая картина наблюдается при правильно подобранных насосах, при этом система отопления функционирует в стандартном расчетном режиме.

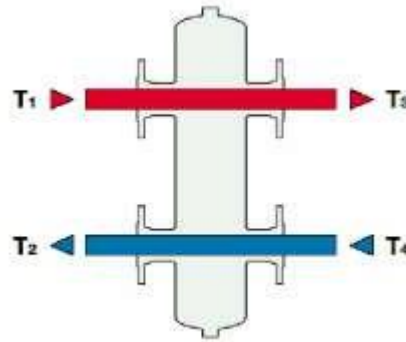


Рис. 2.7 Схема движения теплоносителя при равенстве потоков

2. Поток контура отопления больше потока контура котлов (рис. 2.8).

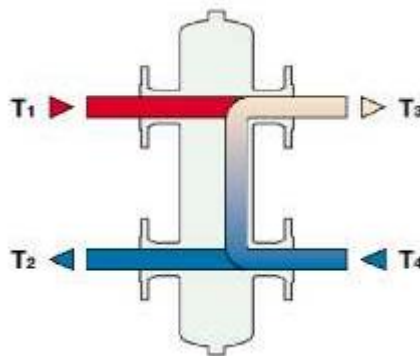


Рис. 2.8 Схема движения теплоносителя, при котором поток обратки больше потока от котлов

Соотношение между температурами: $T_1 > T_3$ и $T_4 = T_2$. Такая картина наблюдается в случае, когда для отопления достаточно подмешивать горячую воду от котлов во вторичный контур. В этом случае температура на выходе в цепь отопления определяется по выражению

$$T_3 = \frac{G_1 \cdot T_1 + G_4 \cdot T_4 + m_{разд} \cdot T_2}{G_1 + G_4 + m_{разд}}, \quad (2.18)$$

где G_1, G_4 — массовые расходы теплоносителя от блока котлов и цепи отопления соответственно, $\frac{кг}{с}$;

$m_{разд}$ — масса теплоносителя в гидроразделителе.

3. Поток контура котлов больше потока контура отопления (рис. 2.9).

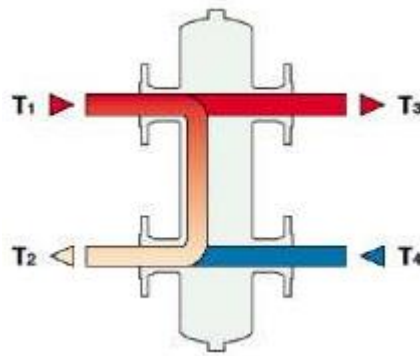


Рис. 2.9 Схема движения теплоносителя, при котором поток обратки меньше потока от котлов

Соотношение между температурами: $T_1 = T_3$ и $T_4 > T_2$. Такая ситуация может возникнуть, когда теплоноситель поступает не во все зоны отопления, например, только в цепь теплых полов. Температура теплоносителя на входе в блок котлов определяется по выражению

$$T_2 = \frac{G_1 \cdot T_1 + G_4 \cdot T_4 + m_{разд} \cdot T_3}{G_1 + G_4 + m_{разд}} \quad (2.19)$$

2.2.3. Математическая модель теплонасосной установки. В основу модели ТНУ был положен ее термодинамический цикл, представленный в T-S диаграмме (рис. 2.10).

Суть модели заключается в том, что отдельные элементы диаграммы аппроксимированы набором полиномов, которые в совокупности позволяют

определить необходимые величины.

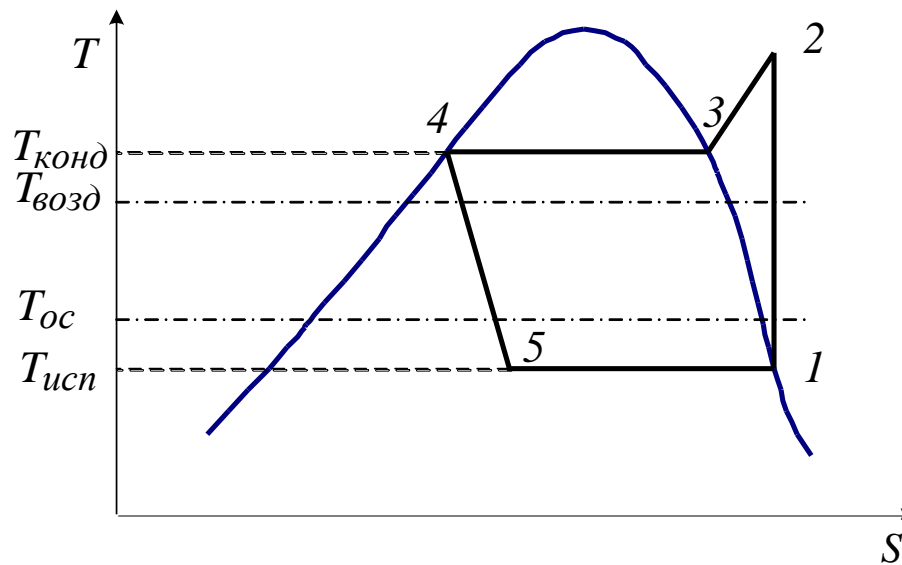


Рис. 2.10 Термодинамический цикл ТНУ в T-S диаграмме

Было принято, что температура $T_{исп}$ фреона в испарителе на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше температуры $T_{ос}$ окружающей среды, а температура фреона в конденсаторе $T_{конд}$ равна 40°C . По справочным данным были аппроксимированы зависимости энтальпии $h_1'' = f(T_{исп})$ и энтропии $s_1'' = f(T_{исп})$ в точке 1 как функции температуры в испарителе. Зависимости представляют собой полиномы 3-й степени вида

$$f(T) = a_3 \cdot T^3 + a_2 \cdot T^2 + a_1 \cdot T + a_0.$$

В результате аппроксимации были получены следующие выражения для энтальпии и энтропии в точке 1:

$$h_1''(T) = -0.008 \cdot T^3 - 0.786 \cdot T^2 + 441.4 \cdot T + 288329, \quad (2.20)$$

$$s_1''(T) = -0.00004 \cdot T^3 + 0.0046 \cdot T^2 - 0.4688 \cdot T + 2344. \quad (2.21)$$

Энтальпия h_2 в точке 2 определяется на основании температуры фреона в конденсаторе $T_{конд}$ и энтропии s_1'' . Для этого необходимо найти на диаграмме изобару, соответствующую температуре $T_{конд}$. Далее на ней определяется точка, соответствующая энтропии s_1'' . Это и есть точка 2. Задача несколько усложняется тем, что хотя изобары в данном случае можно рассматривать как прямые линии, их угол наклона зависит от температуры фреона. Поэтому, прежде всего, были получены зависимости коэффициентов уравнения прямой $f(T) = k \cdot T + b$, описывающей изобары как функции температуры.

Для величины k было получено выражение

$$k(T) = 0.1118 \cdot T^3 + 6.7452 \cdot T^2 + 555.83 \cdot T + 287759 . \quad (2.22)$$

Для величины b было получено выражение:

$$b(T) = -0.254 \cdot T^3 - 17.8451 \cdot T^2 - 716.28 \cdot T - 386442 . \quad (2.23)$$

Искомая энтальпия h_2 в точке 2 определяется по выражению

$$h_2 = k(T) \cdot s'' + b(T) . \quad (2.24)$$

Необходимая мощность компрессора ТНУ определяется по выражению

$$N_{ТНУ} = \frac{(h_2 - h_1'') \cdot G_{фр}}{\eta_{комп}} , \quad (2.25)$$

где $\eta_{комп}$ — КПД компрессора;

$G_{фр}$ — удельный расход фреона в секунду.

Далее определяется значение энтальпии h_3'' в точке 3. Для этого используется ранее полученный полином для энтальпии h_1'' .

Последней величиной, которую необходимо знать для определения количества выделяемой ТНУ тепловой энергии, является удельная теплота парообразования r . Данная величина также зависит от температуры. Используя справочные данные, был получен еще один аппроксимирующий полином 3-й степени с коэффициентами:

$$r(T) = -0.0167 \cdot T^3 - 2.0952 \cdot T^2 - 468.07 \cdot T + 153383. \quad (2.26)$$

Теперь расчет количества теплоты, выделяемого в конденсаторе, можно провести по выражению

$$Q_{\text{конд}} = G_{\text{фр}} \cdot (h_2'' - h_3'' + r(T_{\text{конд}})). \quad (2.27)$$

В случае, когда ТНУ работает на генерацию холода, температура испарителя принимается на 5°C ниже температуры в охлаждаемом помещении. Далее точно так же, как это описано выше, определяются величины h_1'' , s_1'' и h_2 . Дополнительно необходимо определить энтальпию h_4' в точке 4. Для этого используется аппроксимирующий полином:

$$h_4'(T) = 0.0083 \cdot T^3 + 1.3179 \cdot T^2 + 909.63 \cdot T + 134942. \quad (2.28)$$

Количество теплоты, отбираемое из помещения в испарителе, теперь можно рассчитать по выражению

$$Q_{\text{конд}} = G_{\text{фр}} \cdot (h_1'' - h_4'). \quad (2.29)$$

Таким образом, была получена имитационная модель теплонасосной установки.

2.3. Математические модели системы теплоснабжения

2.3.1. Оценочные математические модели объекта управления. Для синтеза грубых математических моделей объекта управления, было использовано дифференциальное уравнение

$$a_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial y}{\partial t} + a_2 y = b_0 \frac{\partial x}{\partial t} + b_1 x. \quad (2.30)$$

Из общей теории автоматического управления известно, что подбирая значения коэффициентов в (2.30), можно получить широкий набор типовых звеньев. Преобразуя (2.30) в конечно-разностное уравнение, получаем простое выражение, которое уже не требует существенных вычислительных ресурсов ЭВМ

$$y_i = \frac{(b_0 \Delta t + b_1 \Delta t^2) x_i - b_0 x_{i-1} + (2a_0 + a_1 \Delta t) y_{i-1} - a_0 y_{i-2}}{a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2}. \quad (2.31)$$

Для определения конкретных значений коэффициентов для различных объектов можно воспользоваться типовыми методиками, основывающимися на анализе разгонных характеристик. Сами характеристики можно получить на основе имитационного моделирования объекта управления с использованием точных имитационных моделей.

2.3.2. Модель окружающей среды. За основу была принята модель окружающей среды, предложенная в [27]. В работе автор провел статистические исследования и вывел ряд аппроксимирующих полиномов,

описывающих уровень инсоляции и температуры воздуха в окружающей среде.

2.3.2.1. Модель инсоляции. В качестве исходных данных в [27] взяты данные по суточному распределению инсоляции в течение года (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Суточное распределение инсоляции (Вт/м²) в течение года по месяцам

Ме- сяц	Время суток, ч															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
I	0	0	0	4	34	78	120	138	137	120	75	33	8	0	0	0
II	0	0	0	18	77	129	181	208	199	182	137	76	25	0	0	0
III	0	0	17	86	164	233	296	322	322	303	232	170	82	24	0	0
IV	0	16	76	181	277	358	428	454	445	409	345	248	161	58	4	0
V	9	49	136	239	356	445	506	532	541	496	425	333	228	123	49	0
VI	16	82	177	291	401	488	558	589	566	523	462	364	262	155	65	7
VII	8	65	167	281	405	504	577	602	582	539	469	366	258	145	32	7
VIII	0	31	116	219	344	434	513	542	521	478	413	311	206	103	8	0
IX	0	0	48	149	254	345	422	453	441	396	321	223	118	17	0	0
X	0	0	9	59	143	204	257	284	284	256	186	118	41	7	0	0
XI	0	0	0	9	51	95	138	156	146	129	92	41	8	0	0	0
XII	0	0	0	0	18	68	103	127	129	102	67	17	0	0	0	0

После проведения исследований автор приводит следующие зависимости.

Среднесуточное изменение инсоляции:

$$I_{\text{сут}}(t) = 0.165t^4 - 8.262t^3 + 140.15t^2 - 919.3t + 2028.4, \quad (2.32)$$

где t — время в часах.

Изменение максимума инсоляции:

$$I_{\text{зод}}^{\text{max}}(m) = 0.4497m^4 - 11.755m^3 + 85.929m^2 - 112.53m + 191.42, \quad (2.33)$$

где m — время в месяцах.

Значение инсоляции в произвольный момент времени:

$$I(t, m) = Scale_I(m) \cdot I_{сут}(t) \cdot I^*(t, m), \quad (2.34)$$

где $Scale_I(m) = \frac{I_{год}^{max}(m)}{I_{сут}^{max}}$ — масштабный коэффициент ($I_{сут}^{max}$ определяется по

(2.26) для 12 ч дня);

$I^*(t, m)$ — функция, задающая длительность светового дня.

Если рассматриваемый момент времени (t, m) приходится на светлое время суток, функция $I^*(t, m)$ принимает значение 1. В противном случае - 1. В данном случае значения функции $I^*(t, m)$ можно определить по табл. 2.2.

2.3.2.2. Модель температуры окружающего воздуха. Предлагаемая в [27] модель изменения температуры воздуха построена на основе анализа метеорологических данных по городу Одесса. Автор выводит такие зависимости.

Среднесуточное изменение температуры:

$$T_{сут}(t) = 0.00038t^4 - 0.02214t^3 + 0.38157t^2 - 1.72648t + 19.5, \quad (2.35)$$

где t — время в часах.

Изменение максимального значения температуры:

$$T_{год}^{max}(m) = 0.0036m^5 - 0.1013m^4 + 0.8979m^3 - 3.1137m^2 + 8.465t - 4,6261. \quad (2.36)$$

Изменение минимального значения температуры

$$T_{\text{год}}^{\min}(m) = 0.0035m^5 - 0.1018m^4 + 0.9818m^3 - 3.8951m^2 + 9.8625m - 8,8486, \quad (2.37)$$

где m — время в месяцах.

Величины $T_{\text{год}}^{\max}(m)$ и $T_{\text{год}}^{\min}(m)$ позволяют определить масштабный коэффициент

$$Scale_T(m) = \frac{T_{\text{год}}^{\max}(m) - T_{\text{год}}^{\min}(m)}{T_{\text{сут}}^{\max} - T_{\text{сут}}^{\min}}. \quad (2.38)$$

Минимальная и максимальная температура воздуха в течение суток определяется по (2.35) соответственно в 4 ч и 15 ч.

Температура воздуха в произвольный момент времени определяется по выражению

$$T(t, m) = Scale_T(m) \cdot T_{\text{сут}}(t). \quad (2.39)$$

Анализ предложенных в [27] зависимостей для температуры воздуха показал, что на стыках аппроксимирующих полиномов наблюдаются резкие скачки (рис. 2.11). Кроме того, значения максимальной и минимальной температур соответствуют мягкому морскому климату, а для данного диссертационного исследования хотелось бы получить модель, описывающую широкий диапазон изменения температур от -20 до $+35^\circ\text{C}$.

Поэтому были проведены дополнительные исследования, которые позволили уточнить коэффициенты аппроксимирующих полиномов [46, 47]. Так, значение среднесуточной температуры предлагается определять полиномом 6-й степени с коэффициентами:

$$a_0 = 19.3404175,$$

$$a_1 = -1.51764404,$$

$$a_2 = 0.29938328,$$

$$a_3 = -0.00828687.$$

$$a_4 = -0.00073943.$$

$$a_5 = 0.00004251.$$

$$a_6 = -0.0000006.$$

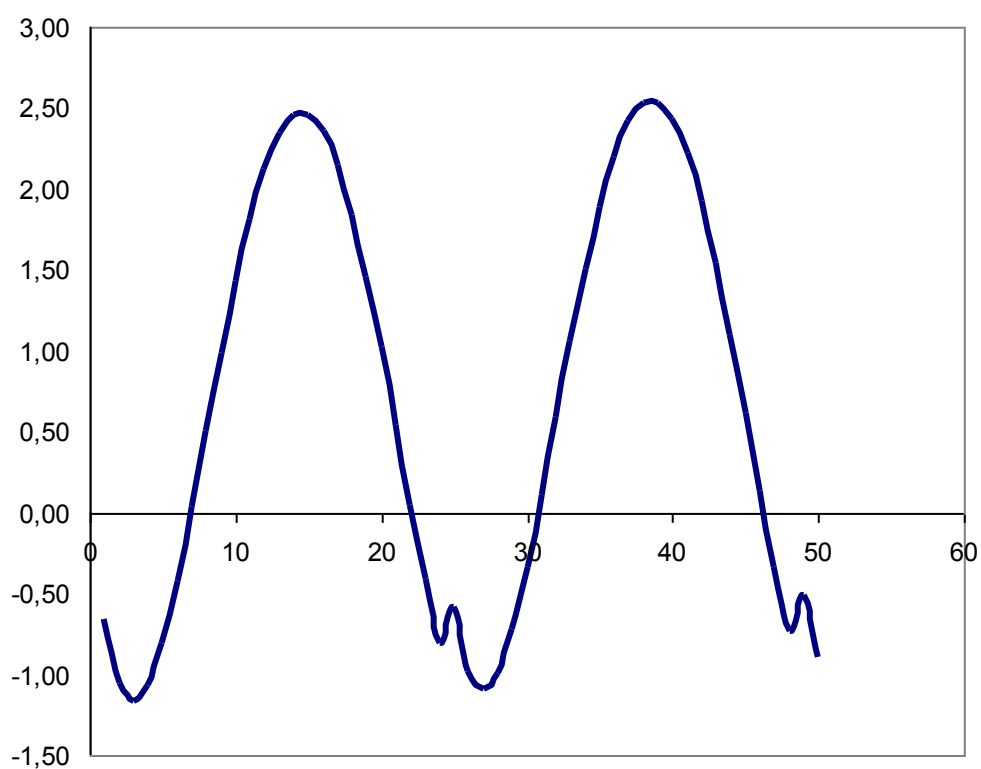


Рис. 2.11 Иллюстрация разрывов в точках стыков
аппроксимирующих полиномов

Изменение максимального значения температуры — полиномом 6-й степени с коэффициентами:

$$a_0 = -38.420095,$$

$$a_1 = 39.812446,$$

$$a_2 = -19.851794,$$

$$a_3 = 5.233268.$$

$$a_4 = -0.64279.$$

$$a_5 = 0.035444.$$

$$a_6 = -0.000712.$$

Изменение минимального значения температуры — полиномом 6-й степени с коэффициентами:

$$a_0 = -38.404545,$$

$$a_1 = 33.6616665,$$

$$a_2 = -17.199342,$$

$$a_3 = 4.7237565.$$

$$a_4 = -0.6026205.$$

$$a_5 = 0.0344505.$$

$$a_6 = -0.0007185.$$

Уточненные значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов позволили добиться более плавного хода температуры на стыках полиномов (рис. 2.12). Кроме этого, был расширен диапазон возможных температур.

Таким образом, были получены модель инсоляции, а после доработки и модели изменения температуры воздуха.

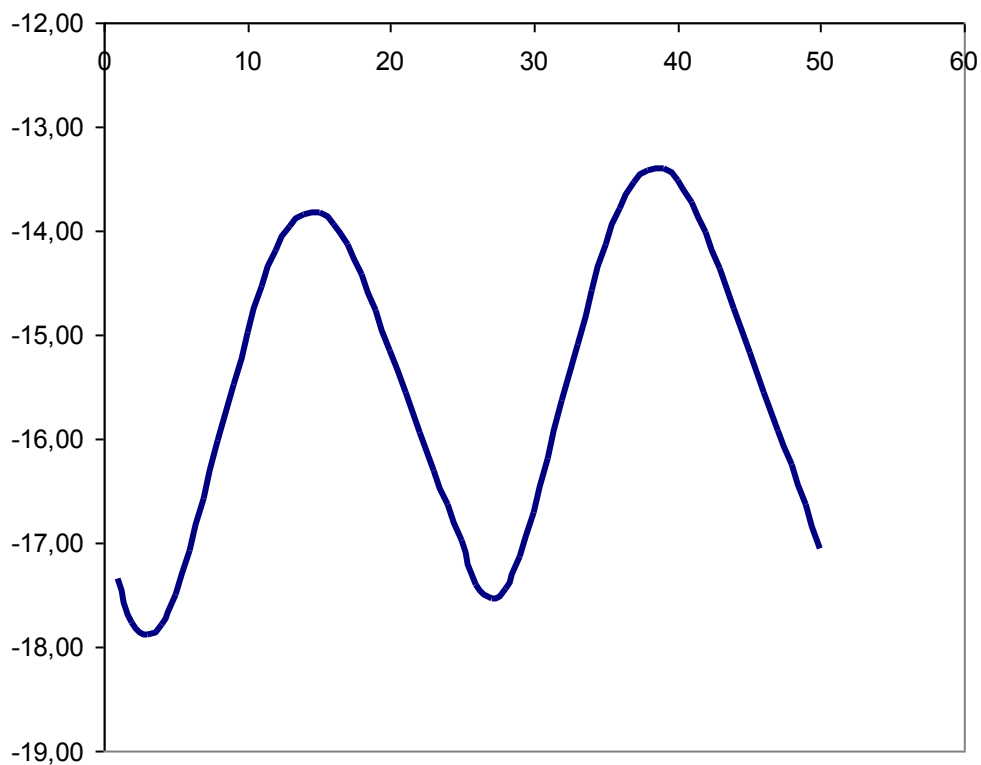


Рис. 2.12 Ход температуры при использовании уточненных значений коэффициентов аппроксимирующих полиномов

2.4. Выводы

1. Для проведения ООА специализированных технологических систем было предложено модифицировать процесс анализа заменой модели потока действий данных на технологические алгоритмы оборудования, под которыми понимается математическое и информационное обеспечение, определяющее порядок проведения различных технологических регламентов, а также формализующее действия, выполняемые в том или ином состоянии.

2. Для исследования объектов теплоснабжения с изменяемой структурой нашло дальнейшее развитие информационное обеспечение, заключающееся в разработке комплекса информационных моделей системы теплоснабжения, использующего характеристики надежности и теплотехнической эффективности, что позволит провести оценку

эффективности текущей структуры объекта управления при ограничениях на ресурсы.

3. Для моделирования работы системы теплоснабжения с изменяемой структурой нашло дальнейшее развитие математическое обеспечение, заключающееся в разработке технологических алгоритмов, что позволит рассчитать значения всех параметров для дальнейшего исследования.

4. Для возможности моделирования влияния на систему теплоснабжения окружающей среды совершенствованы математические модели инсоляции и температуры наружного воздуха в течение года.

5. Для дальнейшего совершенствования информационного и математического обеспечения необходимо осуществить постановку оптимизационной задачи оптимального управления.

РАЗДЕЛ 3

ИНФОРМАЦИОННОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Разработанные во втором разделе основы информационного и математического обеспечения в дальнейшем позволят усовершенствовать информационное и математическое обеспечение компьютерно-интегрированной системы управления теплоснабжением потребителя. Для поиска оптимального плана переключений теплогенерирующего оборудования системы теплоснабжения необходима постановка оптимизационной задачи оптимального управления.

3.1. Постановка оптимизационной задачи оптимального управления

Анализ доступных литературных источников показал, что на практике оценка эффективности систем теплоснабжения, как правило, осуществляется при помощи таких показателей как: удельная дневная производительность (Дж), удельная экономия топлива (т усл. топл./год), коэффициент замещения тепла (%), КПД, количество сберегаемой теплоты (Дж/год), годовая выработка теплоты (Дж) и т.п. [48, 49, 50].

В [51] для оценки эффективности управления системой теплоснабжения с изменяемой структурой был предложен критерий:

$$k = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^n E_i \Delta \tau_i}{\int_0^{\tau} Q(t) d\tau} \right), \quad (3.1)$$

где E_i — первичные энергетические ресурсы, используемые системой для

обеспечения заданной температуры, ГДж;

$Q(t)$ — текущая нормированная потребность в энергии (тепловая нагрузка) для обеспечения заданной температуры, ГДж;

τ — конечный временной интервал, на котором происходят обмен и потребление энергоресурсов, с;

i — вид традиционного энергетического ресурса, используемого системой для обеспечения заданной температуры;

n — количество различных видов энергетических ресурсов системы.

Знаменатель выражения для рассматриваемого периода (сутки, неделя, сезон, год) отражает текущую потребность в энергии для обеспечения заданной температуры. Числитель представляет все суммарные затраты энергии во все агрегаты системы с изменяемой структурой (электроэнергия в насосы и компрессоры, органическое топливо в котлы) для работы системы по обеспечению заданной температуры в процессах снабжения теплоносителями потребителя.

Критерий является безразмерной величиной и находится между двумя предельными значениями, характеризующими максимальную и минимальную эффективность управления процессом снабжения теплоносителями потребителя для обеспечения заданной температуры. Он оценивает эффективность системы в интегральной форме, которая может быть отнесена к суточным, недельным, сезонным и годовым показателям.

Очевидно, что подобные критерии для решения поставленной нами задачи не подходят. В первом разделе упоминалось, что для оценки оптимальности управления необходимо использовать комплексный критерий, который учитывал бы такие составляющие, как: надежность системы $R(t)$, качество управления $Q(t)$, стоимостный показатель ресурсов $S(t)$ и эффективность оборудования $E(t)$ [33, 51, 52].

Система теплоснабжения состоит из трех теплогенерирующих технических средств (см. рис 1.2), которые могут включаться и работать независимо друг от друга. Рассмотрим промежуток времени $\Delta\tau$, за который

структура системы не меняется. В течение каждого из таких промежутков система может находиться в одном из восьми различных состояний, которые определяются комбинацией включенных или выключенных технических средств, характеризующихся своими технико-экономическими показателями, а именно $R(t)$ — вероятностью отказа системы; $Q(t)$ — качеством поддержания заданной температуры; $S(t)$ — стоимостью энергоресурсов; $E(t)$ — эффективностью преобразования энергии. В двоичной системе исчисления рассматриваемые состояния соответствуют числам десятичной системы от 0 до 7. Например, состояние № 3, в котором выключен котел №1 и работают котел №2 и ТНУ, должно соответствовать бинарному представлению 011. Если же рассматривать N интервалов $\Delta\tau$, то получим план переключения оборудования, который состоит из N состояний системы. В двоичной системе исчисления план переключения технических средств соответствует числам от 0 до 8^N десятичной системы. Задачей исследования является выбор наилучшего плана переключения технических средств, который обеспечит наименьшие стоимость энергоресурсов и вероятность отказа системы, а также наибольшие показатели эффективности оборудования и качества процесса теплоснабжения [53]. Так как показатели имеют различную физическую природу, то для их одновременного учета необходима нормировка. Составим математические модели каждого из указанных показателей.

3.1.1. Математическая модель надежности оборудования. На практике надежность любого элемента определяется двумя составляющими: вероятностью внезапных отказов и вероятностью износных отказов [54]. Случайные отказы описываются экспоненциальным законом, при котором надежность или вероятность безотказной работы определяется выражением

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.2)$$

где λ — интенсивность внезапных отказов.

Для экспоненциального случая средняя наработка на отказ определяется как

$$m = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.3)$$

В общем случае

$$\lambda = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (3.4)$$

Также для любого закона распределения справедлива формула

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (3.5)$$

где $f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}$ — плотность вероятности отказов.

В период нормальной работы для экспоненциального закона интенсивность отказов является постоянной величиной.

Когда наступает износ, интенсивность отказов начинает расти и к внезапным отказам добавляются износные, которые обычно подчиняются нормальному закону распределения

$$P_u(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-(t-M)^2 / 2\sigma^2} dt, \quad (3.6)$$

где M — среднее значение долговечности элемента с учетом износа.

Стандартное отклонение от средней долговечности определяется как

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (t - M)^2}{N}}, \quad (3.7)$$

где N — число отказов за время t .

Совместная вероятность безотказной работы элемента с учетом внезапных и износных отказов в период от $t = 0$, когда элемент новый, до времени t определяется выражением

$$P(t) = e^{-\lambda t} P_u(t). \quad (3.8)$$

Формулу (3.8) можно использовать только для случая, когда элемент новый. Если элемент уже имеет какую-то наработку t_0 , то совместная вероятность безотказной работы определяется так:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \frac{P_u(t_0 + t)}{P_u(t_0)}. \quad (3.9)$$

Хотя выражение (3.9) позволяет определить надежность элемента в любой момент времени, в рамках данного исследования оно обладает рядом недостатков. Так, например, факт включения/выключения различного оборудования приводит к его форсированному износу. Кроме того, согласно практическим наблюдениям [54], интенсивность отказов существенно зависит от изменения уровня нагрузки элемента относительно ее номинального значения. Когда нагрузка элемента превышает номинальную, наблюдается довольно быстрый рост интенсивности отказов. С другой стороны, интенсивность отказов уменьшается, когда нагрузка становится ниже номинального уровня.

Также хорошо известно, что на работу элементов существенно влияют параметры окружающей среды. Степень сопротивляемости элементов воздействиям со стороны окружающей среды можно условно назвать «прочностью» [54]. «Прочность» элемента означает не только его сопротивление механическим нагрузкам, вибрациям, ударам, давлению или ускорению; к категории прочности относятся также: сопротивление тепловым нагрузкам, электрическая прочность, влагоустойчивость, коррозионностойкость, стойкость к излучениям и т.д. Поэтому очевидно, что прочность элемента не может быть выражена некоторой числовой величиной.

На практике генеральную совокупность элементов подвергают воздействию рабочей нагрузки и определяют количество элементов, отказавших в течение заданного периода работы. В результате получается оценка интенсивности отказов элемента для заданного уровня нагрузки. Затем можно по одному изменять некоторые параметры окружающей среды, например, увеличивать или уменьшать электрическое напряжение или температуру и повторять весь эксперимент в новых условиях. При этом получают информацию о характере изменения интенсивности отказов рассматриваемых элементов от величины приложенного напряжения или температуры окружающей среды. Таким образом, интенсивность отказов заменяет точную меру прочности элемента.

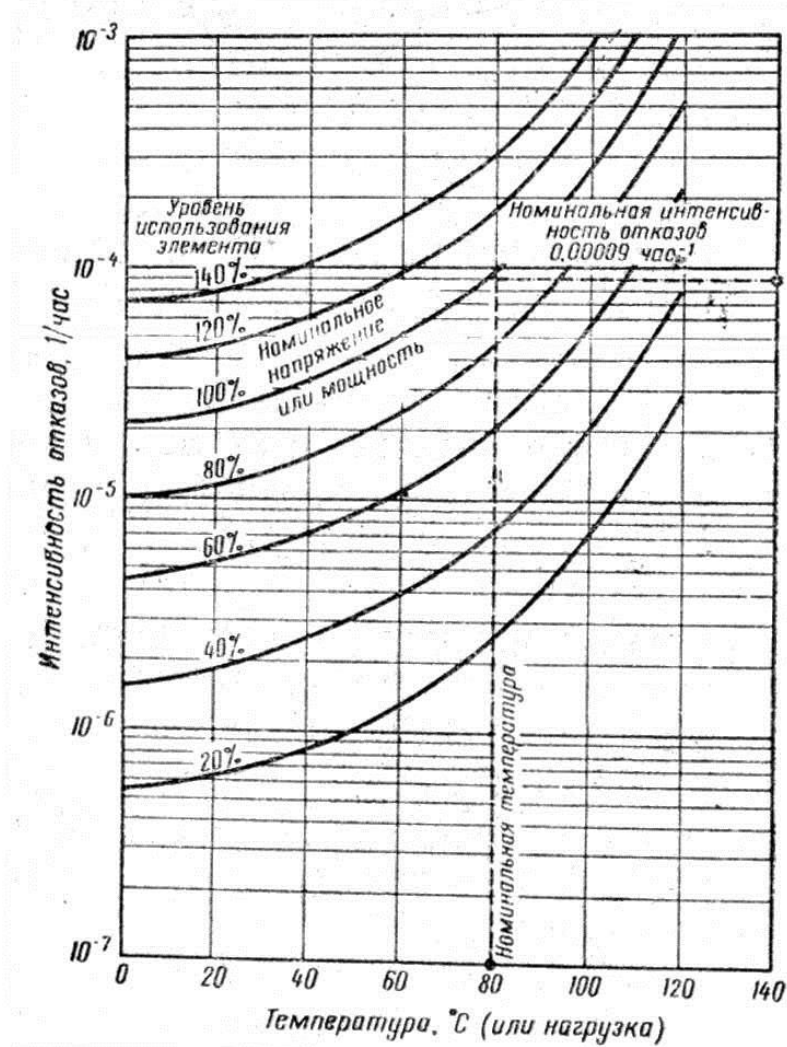


Рис. 3.1 Интенсивность отказов в зависимости от окружающих условий

На рис. 3.1 приведены кривые, иллюстрирующие общий характер изменения интенсивности отказов электрических и электронных и электромеханических элементов [55].

Такая же тенденция наблюдается на практике и для других видов элементов: механических, теплотехнических и т.д.

Так как описанные факторы влияют в первую очередь на интенсивность отказов, для моделирования надежности целесообразно вместо (3.9) использовать выражение

$$P(t) = e^{-\int_T^{T+t} \lambda dt} = e^{-\lambda_0 t + \int_T^{T+t} \lambda_u dt}, \quad (3.10)$$

где λ_g — интенсивность внезапных отказов;

λ_u — интенсивность износочных отказов.

В период нормальной эксплуатации интенсивность внезапных отказов постоянна и определяется так:

$$\lambda_g = \frac{1}{m}. \quad (3.11)$$

Для определения интенсивности износочных отказов можно воспользоваться следующим подходом [56]. Из формулы (3.5) в общем случае интенсивность отказов определяется как $\lambda = f(t)/P(t)$. Рассмотрим случай нормального распределения. На рис. 3.2 изображены кривые плотности нормального распределения $f(t)$, функции $P_u(t)$ и интенсивности отказов $r(t)$. Рассмотрен стандартизованный вариант, при котором функция плотности отказов выражена в единицах стандартного отклонения:

$$\varphi(t) = \sigma f(t) \quad (3.12)$$

Значения $\varphi(t)$ и $P(t)$ могут быть получены непосредственно из таблиц нормального распределения.

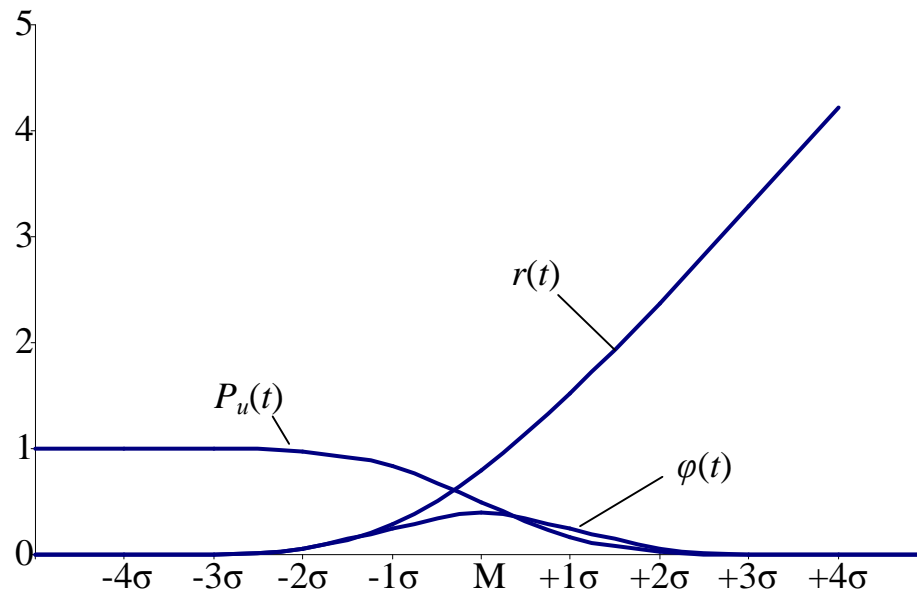


Рис. 3.2 Интенсивность отказов при нормальном распределении:

$\varphi(t)$ — стандартная функция плотности износных отказов;

$P_u(t)$ — вероятность безотказной работы при износных отказах;

$r(t)$ — стандартная кривая интенсивности отказов

Таким путем получается стандартизованная функция интенсивности отказов:

$$r(t) = \frac{\varphi(t)}{P_u(t)}. \quad (3.13)$$

Тогда интенсивность износных отказов:

$$\lambda_u = \frac{f(t)}{P_u(t)} = \frac{\varphi(t)}{\sigma P_u(t)} = \frac{r(t)}{\sigma}. \quad (3.14)$$

Рассмотрим теперь следующую ситуацию. В ходе имитационного моделирования надежности элемента на очередной итерации текущее время работы было увеличено на некоторый шаг Δt , а затем по формуле (3.10) было определено значение текущей интенсивности износных отказов. Допустим,

что на рассматриваемой итерации элемент был включен или выключен, что должно было привести к его повышенному износу. Тогда для моделирования повышенного износа достаточно добавить к текущему времени элемента некую величину Δt_u , соответствующую величине уменьшения ресурса элемента при его включении/выключении. Результат аналогичного моделирования представлен на рис. 3.3. Кривая $e^{-\lambda t}$ соответствует теоретическому изменению надежности для внезапных отказов. Кривая $P_u(T+t)/P_u(t)$ описывает изменение надежности при износе. Кривая 1 показывает, как изменялась бы надежность при совместном действии внезапных и износных отказов при номинальном режиме работы. Кривая 2 соответствует реальному изменению надежности элемента с учетом форсированного износа.

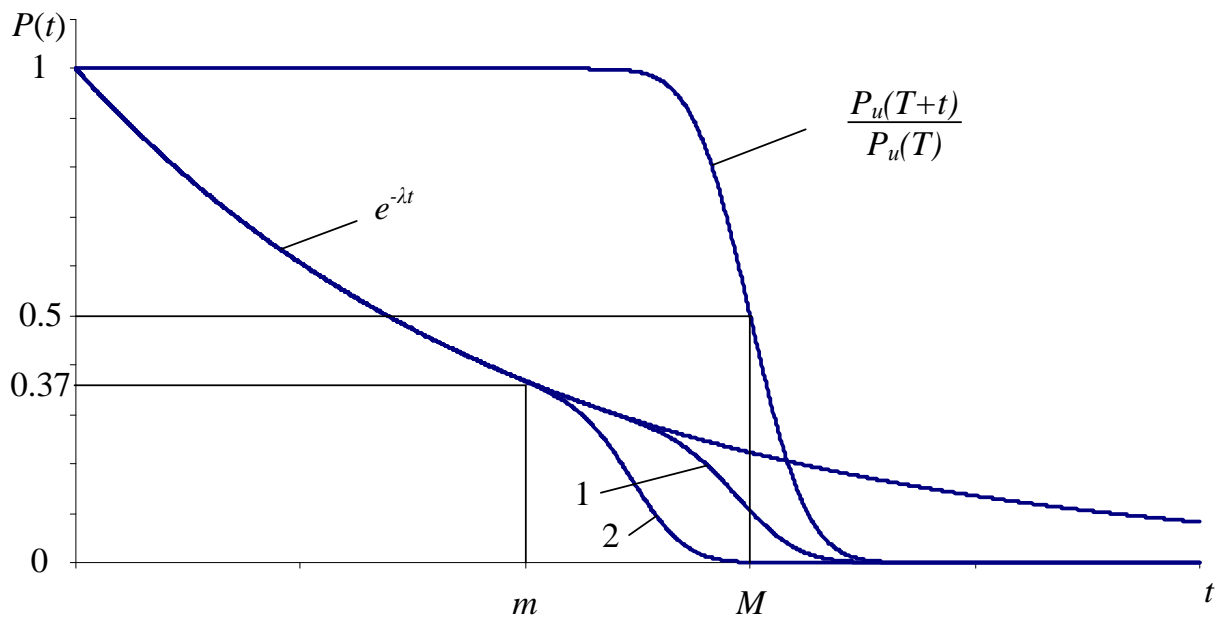


Рис. 3.3 Надежность элемента:

- 1 — при нормальной эксплуатации;
- 2 — при повышенном износе

В дальнейшем в выражение (3.14) были добавлены поправочный коэффициент на текущую рабочую мощность $K_{\text{мощ}}(N_{\text{пр}})$ и поправочный

коэффициент на параметры окружающей среды $K_{oc}(x_{np})$:

$$\lambda_u = \frac{r(t)}{\sigma} K_{моц}(N_{np}) K_{oc}(x_{np}), \quad (3.15)$$

где N_{np} — приведенная рабочая мощность;

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

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

где N — текущая рабочая мощность;

$N_{ном}$ — номинальная рабочая мощность;

x — текущее значение параметра окружающей среды;

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

Для случая использования электрических и электронных элементов представленного на рис. 3.1

$$K_{моц} = 0.0375e^{3.2842N_{np}} \quad (3.16)$$

$$K_{oc} = 0.8583e^{0.4706e^{(1.5205_{np})-2}}, \quad (3.17)$$

где t_{np} — приведенная температура окружающей среды.

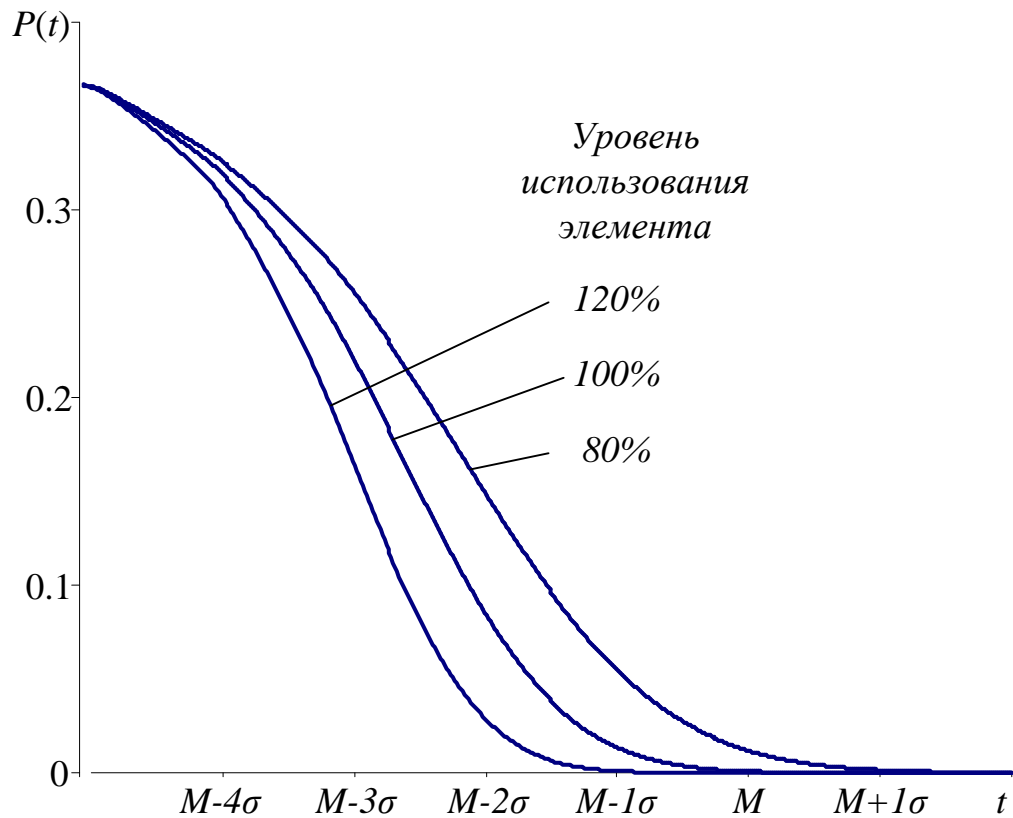


Рис. 3.4 Изменение кривой надежности элемента при работе на различных мощностях

На рис. 3.4 представлен результат моделирования кривых надежности элемента при его работе на различных уровнях мощности.

При определении надежности всей системы в целом [56] необходимо помнить, что при последовательном соединении n компонентов надежность определяется как

$$P_{\text{послед}}(t) = P_1(t) * P_2(t) * \dots * P_n(t), \quad (3.18)$$

а при параллельном

$$P_{\text{парал}}(t) = 1 - (1 - P_1(t)) * (1 - P_2(t)) * \dots * (1 - P_n(t)). \quad (3.19)$$

Так как в дальнейшем будет рассматриваться задача минимизации, то

составляющая $R(t)$ описывает вероятность отказа оборудования

$$R(t) = 1 - P(t). \quad (3.20)$$

Учитывая, что система состоит из трех теплогенерирующих технических средств, соединенных параллельно, то вероятность отказа системы теплогенерирующего оборудования для текущего плана x переключения оборудования имеет вид

$$R(x; t) = \prod_{i=1}^3 (1 - P(t_i)), \quad (3.21)$$

где $P(t_i)$ - вероятность безотказной работы i -й единицы оборудования для текущего плана переключения оборудования x в конце заданного интервала времени $\Delta\tau \cdot N$, а t_i — общее время работы этой единицы оборудования на интервале времени $[t_0; t]$. $P(t_i)$ вычисляется по формуле (3.10). При этом учитывается, что каждый элемент системы имеет некоторую наработку t_0 , поэтому $P(t_i) \neq 0$.

3.1.2. Математическая модель стоимости ресурсов. Стоимостный показатель ресурсов $S(x; t)$ для текущего плана x переключения оборудования определяется выражением

$$S(x; t) = \sum_{i=1}^k G_i S_i, \quad (3.22)$$

где k — количество используемых первичных ресурсов; G_i — расход i -го ресурса на рассматриваемом интервале времени $\Delta\tau \cdot N$; S_i — стоимость i -го ресурса.

3.1.3 Математическая модель качества. Качество переходных процессов, т.е. характер их протекания, численно характеризуется временем и колебательностью переходного процесса, а также максимальным отклонением в переходный период. Такие величины качества

автоматизированной системы управления (АСУ), оценивающие параметры завершеного переходного процесса, здесь мало информативны, так как рассматриваемая система все время находится в незавершеном переходном режиме. В этом случае целесообразным является использование дисперсии $D(x;t)$ отклонения текущей температуры воздуха в помещении от заданной на минимальном интервале для текущего плана x переключения оборудования

$$Q(x;t) = D(x;t). \quad (3.23)$$

3.1.4. Математическая модель эффективности. Эффективность оборудования $E(t)$ была вычислена по энергетическому КПД с последующей модификацией.

Использование в рассматриваемой технической системе различных физических принципов получения тепловой энергии не позволяет применить для оценки $E(t)$ обычный коэффициент полезного действия. Преимуществом КПД является его значение, принадлежащее интервалу $(0;1)$. Для приведения к равенству качества рассматриваемых различных энергоносителей (газ, электроэнергия) было принято использовать для оценки эффективности оборудования $E(t)$ энергетический КПД η_3 с учетом поправки Карно для приведения энергоносителей, поступающих в систему и выходящих из системы, к одному качеству энергетической продукции.

В случае с газовым котлом КПД с поправкой определяется как

$$\eta_3^k = \eta_3 * \left(1 - \frac{T_{oc}}{T_m}\right), \quad (3.24)$$

где η_3 — энергетический КПД котла;

T_{oc} — температура окружающей среды, К;

T_m — температура теплоносителя на выходе из котла, К.

Если ТНУ работает в режиме теплоснабжения, то η_3 определяется так:

$$\eta_{\circ}^{THV} = \frac{Q_{\kappa} * \left(1 - \frac{T_{oc}}{T_{\kappa}}\right)}{N_{\text{ком}} \cdot \Delta \tau}, \quad (3.25)$$

где Q_{κ} — количество теплоты, выделяемое на конденсаторе ТНУ на рассматриваемом интервале времени $\Delta \tau$, Дж;

T_{κ} — температура фреона в конденсаторе, К;

$N_{\text{ком}}$ — мощность компрессора ТНУ, Вт.

Если ТНУ работает в режиме хладоснабжения, то η_{\circ} определяется таким образом:

$$\eta_{\circ}^{THV} = \frac{Q_u * \left(\frac{T_{\kappa}}{T_{oc}} - 1\right)}{N_{\text{ком}} \cdot \Delta \tau}, \quad (3.26)$$

где Q_u — удельное количество энергии, выделяемое в испарителе, Дж.

Эффективность системы теплоснабжения вычисляется с учетом входных E^{ex} и выходных E^{ex} потоков энергии: $\eta_{\circ}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N E_i^{ex}}{\sum_{i=1}^N E_i^{ex}}$.

Так как в дальнейшем будет рассматриваться задача минимизации, то составляющая эффективности системы теплоснабжения для текущего плана x переключения оборудования представляет собой величину потерь энергии и имеет вид

$$E(x;t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 (Q_i^{\kappa}(t) \cdot \eta_{\circ}^{\kappa}) + Q^{THV}(t) \cdot \eta_{\circ}^{THV}}{\sum_{i=1}^2 (G_i^{gaz}(t_i) \cdot t_i \cdot Q_p^H) + N(t_{THV}) \cdot t_{THV} / 0,4}, \quad (3.27)$$

где $Q_i^{\kappa}(t)$ — тепловая энергия, поступающая от i -го котла для

теплоснабжения, Дж; $Q^{THV}(t)$ — тепловая энергия, поступающая от ТНУ для теплоснабжения, Дж; t_i — время работы i -го котла на интервале $[t_0; t]$, с; $G_i^{gas}(t_i)$ — расход газа при работе i -го котла за время t_i , кг/с; Q_p^u — теплотворная способность газа, Дж/кг; t_{THV} — время работы ТНУ на интервале $[t_0; t]$, с; $N(t_{THV})$ — мощность ТНУ, Вт.

3.1.5. Нормирование и взвешивание. Так как составляющие предлагаемой далее целевой функции оптимизационной задачи могут отличаться по абсолютной величине на несколько порядков и имеют различную физическую природу, очевидно, что необходимо провести их нормировку. Кроме того, для большей гибкости процесса управления предлагается также провести взвешивание составляющих.

Для определения нормированного значения надежности было принято, что максимальное значение вероятности отказа единицы оборудования составляет 0,05. Если эта вероятность становится выше, оборудование необходимо останавливать и выводить в ремонт. Поэтому нормированная величина определяется как

$$R_n(x; t) = \frac{\prod_{i=1}^3 (1 - P(t_i))}{r_{\max}^3}, \quad (3.28)$$

где $r_{\max} = 0,05$ — максимальное значение вероятности отказа единицы оборудования.

Для стоимостной оценки ресурсов $S(x; t)$ за норму была принята стоимость ресурсов S_{\max} , затрачиваемых на функционирование системы при условии, что все оборудование работало, не выключаясь, весь рассматриваемый интервал времени $[t_0; t]$. При этом нормированное значение $S_n(x; t)$:

$$S_n(x; t) = \frac{S(x; t)}{S_{\max}}.$$

Составляющая качества обеспечения заданной температуры воздуха в помещении имеет размерность ($^{\circ}\text{C}$). Поэтому нормированное ее значение имеет вид

$$Q_n(x;t) = Q(x;t) / (1^{\circ})^2. \quad (3.29)$$

Так как составляющая энергетической эффективности — безразмерная величина, то

$$E_n(x;t) = E(x;t).$$

Составим математическую модель задачи выбора оптимальной структуры системы. Введем дискретную функцию, аргументами которой являются планы переключения технических средств x за время t . В окончательной форме с учетом взвешивания целевая функция принимает вид

$$J(x;t) = \sqrt{(w_r R_n(x;t))^2 + (w_q Q_n(x;t))^2 + (w_s S_n(x;t))^2 + (w_e E_n(x;t))^2}, \quad (3.30)$$

где w_r, w_q, w_s, w_e — весовые коэффициенты, которые определяются экспертным методом. Данные коэффициенты вводятся для обеспечения гибкости процесса управления.

Таким образом, имеем задачу оптимизации функции двух переменных, которые относятся к классу задач дискретного программирования:

$$J(x;t) \rightarrow \min_{x \in X, t \in T}. \quad (3.31)$$

Решая предложенную оптимизационную задачу на имитационных моделях, можно оценить эффективность переключения оборудования [53].

3.2. Ограничения и условия компьютерно-интегрированной системы управления

Прежде всего наложим на процесс управления следующие ограничения и условия.

1. Необходимо обеспечить максимально возможное качество, т.е. минимизировать отклонения текущей температуры воздуха в помещении от заданной.

2. Необходимо обеспечить максимально возможную надежность оборудования.

3. Так как различное оборудование обладает различным КПД, необходимо стремиться в процессе управления к использованию наиболее эффективного оборудования. В свою очередь данное требование может привести к тому, что в зимний период будет интенсивно использоваться ТНУ и к летнему периоду она полностью выработает свой ресурс. Поэтому необходимо ввести следующее требование.

4. В заранее определенные моменты времени надежность оборудования не должна быть ниже заданной.

5. Система теплоснабжения должна по мере возможности сохранять работоспособность в условиях ограниченности энергоресурсов. Это важное требование подводит нас к концепции рационального использования имеющихся ресурсов.

Допустим, что имеющегося газа не достаточно для поддержания комфортной температуры в зимний период. Задача управления при этом — растянуть имеющееся количество газа на весь период отопления, обеспечив максимально возможную температуру воздуха в помещении.

6. Так как цены на газ и электроэнергию, а также их соотношение могут постоянно меняться, необходимо стремиться к использованию наиболее дешевого ресурса.

7. Как следствие, главную задачу управления можно сформулировать следующим образом: обеспечить оптимальный баланс между качеством технологического процесса, надежностью, эффективностью и стоимостью. При этом следует учитывать, что окружающая среда может изменяться непредсказуемым образом.

Будем рассматривать текущее состояние системы теплоснабжения через равные интервалы времени Δt . Примем, что в пределах интервала Δt структура системы не изменяется, т.е. оборудование не включается и не выключается и эксплуатируется в номинальном режиме.

Таким образом, задача управляющего алгоритма — получить некий план переключения оборудования, соответствующий оптимальному решению с точки зрения оптимизационной задачи (3.31).

3.3. Выбор метода формирования плана переключения оборудования

3.3.1. Общие положения. Сложность решения задачи формирования плана переключения оборудования обусловлена тем, что нет четкой зависимости оптимальной структуры системы теплоснабжения от ее текущего и требуемого состояния. Так как целевая функция может достигаться различными альтернативными структурами системы, в каждый момент времени мы сталкиваемся с необходимостью выбора, последствия которого можем оценить только в будущем. Учитывая, что система теплоснабжения состоит из трех объектов (два газовых котла и ТНУ), каждый из которых может быть либо включен, либо выключен, получаем $2^3 = 8$ возможных состояний системы в каждый момент времени. Соответственно множество из N интервалов $\Delta\tau$ дает нам 8^N возможных планов переключения оборудования.

Очевидно, что простой перебор всех вариантов может занимать слишком много времени. Таким образом, возникает вопрос, как за приемлемое время найти оптимальное или близкое к оптимальному решение.

Можно провести определенные аналогии между решаемой задачей и задачами планирования распределения ресурсов. Наиболее близкой по смыслу является задача о составлении рациона [57], пример которой можно сформулировать следующим образом.

При откорме каждое животное ежедневно должно получать не менее 9 единиц питательного вещества S_1 , не менее 8 единиц питательного вещества S_2 и не менее 12 единиц S_3 . Для составления рациона используют два вида корма. Содержание количества единиц питательных веществ в 1 кг каждого вида корма и стоимость одного кг корма таковы:

Питательные вещества	Количество единиц питательных веществ в 1 кг корма	
	Корм 1	Корм 2
S_1	3	1
S_2	1	2
S_3	1	6
Стоимость 1 кг корма (кол)	4	6

Необходимо составить дневной рацион нужной питательности, причем затраты на него должны быть минимальны.

Для решения таких задач используются методы линейного программирования.

Пусть в рацион входной входит x_1 кг 1-го корма и x_2 2-го корма, тогда в рацион входит: $3x_1+x_2$ единиц 1-го вещества (S_1), x_1+2x_2 — 2-го вещества (S_2) и x_1+6x_2 — 3-го вещества (S_3).

Для полноценного рациона должны выполняться условия:

$$3x_1 + x_2 \geq 9$$

$$x_1 + 2x_2 \geq 8$$

$$x_1 + 6x_2 \geq 12$$

Стоимость полноценного рациона $Z=4x_1+6x_2$, так как $4x_1$ - стоимость x_1 кг 1-го корма, $6x_2$ — стоимость x_2 кг 2-го корма.

Искомое решение является минимумом функции $Z=4x_1+6x_2$ при ограничениях:

$$\begin{cases} 3x_1 + x_2 \geq 9 \\ x_1 + 2x_2 \geq 8 \\ x_1 + 6x_2 \geq 12 \end{cases} \quad x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0.$$

В нашем случае вещество S — это тепловая энергия, а корм — газ и электроэнергия, преобразованные котлами и ТНУ. Очевидно, что эта задача позволяет получить лишь частное решение в данный момент времени. Кроме того, в ней не учитываются дополнительные ограничения наподобие тех, что были оговорены в начале данного раздела. Поэтому методы линейного программирования в данном случае не применимы [58,59,60].

Также не применимы различные статистические методы в силу того, что им требуются наборы данных для анализа, т.е. информация о том, как оборудование системы теплоснабжения работало в прошлом, как это было связано с текущим состоянием системы и как это влияло на целевую функцию. Кроме того, учитывая, что количество альтернативных решений определяется величиной порядка 8^N , сбор подобных данных привел бы к формированию огромной базы данных.

По тем же причинам не применимы метод аналогий и нейронные сети. Им также требуются примеры, на основе которых можно обучиться или экстраполировать решение. Очевидно также, что отсутствие четких зависимостей текущим и требуемым состояниям системы теплоснабжения не позволяет прибегнуть к экспертным системам, как это было реализовано, например, в работе [61].

3.3.2. Математическое обеспечение задачи оптимизации. Следует также учитывать, что ввиду большого числа степеней свободы в нашем случае целевая функция может иметь множество локальных экстремумов, что также затруднит поиск оптимального решения.

Итак, сформулируем основные свойства решаемой задачи:

- огромное количество альтернативных решений;
- нет информации о зависимости плана переключения оборудования от текущего состояния СОКТ;
- целевая функция может иметь множество локальных экстремумов.

Анализ различных литературных источников [62,63,64,65,66] показал,

что для решения подобных задач хорошо используются генетические алгоритмы. Поэтому было принято использовать их для получения плана переключения оборудования достаточно близкого к оптимальному с точки зрения оптимизационной задачи (3.31).

При описании генетических алгоритмов используются определения, заимствованные из генетики. Например, речь идет о популяции особей, а в качестве базовых понятий применяются ген, хромосома, генотип, фенотип, аллель. Также используются соответствующие этим терминам определения из технического лексикона, в частности цепь, двоичная последовательность, структура [67].

Популяция — это конечное множество особей.

Особи, входящие в популяцию, в генетических алгоритмах представляются хромосомами с закодированными в них множествами параметров задачи, т.е. решений, которые иначе называются точками в пространстве поиска. В некоторых работах особи называются организмами.

Хромосомы (другие названия — цепочки или кодовые последовательности) — это упорядоченные последовательности генов.

Ген (также называемый свойством, знаком или детектором) — это атомарный элемент генотипа, в частности хромосомы.

Генотип или **структура** — это набор хромосом данной особи. Следовательно, особями популяции могут быть генотипы либо единичные хромосомы (в довольно распространенном случае, когда генотип состоит из одной хромосомы).

Фенотип — это набор значений, соответствующих данному генотипу, т.е. декодированная структура или множество параметров задачи (решение, точка пространства поиска).

Аллель — это значение конкретного гена, также определяемое как значение свойства или вариант свойства.

Локус или позиция указывает место размещения данного гена в хромосоме (цепочке). Множество позиций генов — это локи.

Очень важным понятием в генетических алгоритмах считается функция приспособленности, иначе называемая функцией оценки. Она представляет меру приспособленности данной особи в популяции. Эта функция играет важнейшую роль, поскольку позволяет оценить степень приспособленности конкретных особей в популяции и выбрать из них наиболее приспособленные (т.е. имеющие наибольшие значения функции приспособленности) в соответствии с эволюционным принципом выживания «сильнейших» (лучше всего приспособившихся). Функция приспособленности также получила свое название непосредственно из генетики. Она оказывает сильное влияние на функционирование генетических алгоритмов и должна иметь точное и корректное определение. В задачах оптимизации функция приспособленности, как правило, оптимизируется (точнее говоря, максимизируется) и называется целевой функцией. В задачах минимизации целевая функция преобразуется, и проблема сводится к максимизации. В теории управления функция приспособленности может принимать вид функции погрешности, а в теории игр — стоимостной функцией. На каждой итерации генетического алгоритма приспособленность каждой особи данной популяции оценивается при помощи функции приспособленности, и на этой основе создается следующая популяция особей, составляющих множество потенциальных решений проблемы, например задачи оптимизации.

Очередная популяция в генетическом алгоритме называется поколением, а к вновь создаваемой популяции особей применяется термин «новое поколение», или «поколение потомков». Блок-схема классического генетического алгоритма изображена на рис. 3.5.

Рассмотрим применение генетического алгоритма для решения нашей задачи составления плана переключения оборудования [68,69,70].

Прежде всего, необходимо закодировать искомое решение в виде последовательности генов.

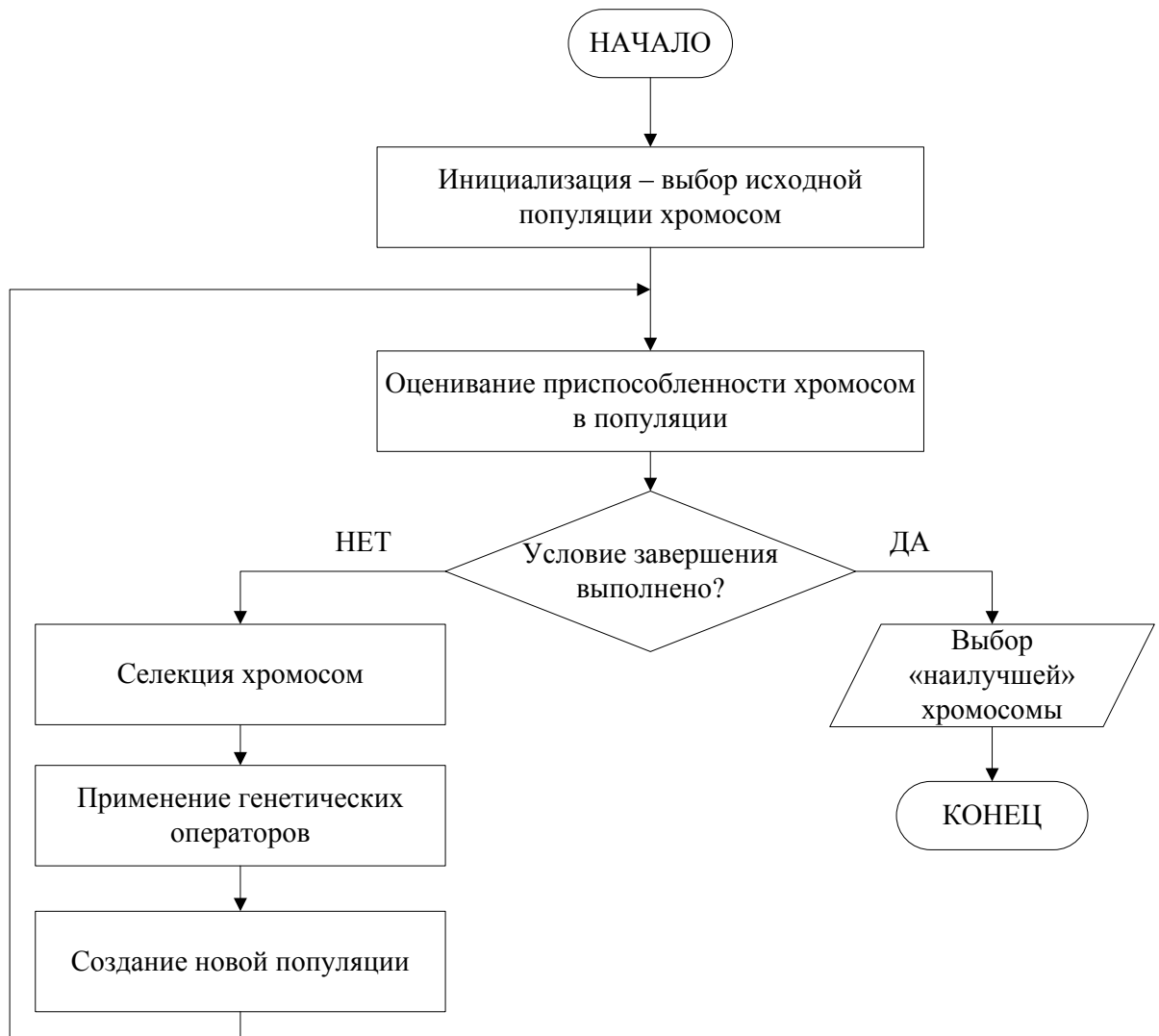


Рис. 3.5 Блок-схема основного генетического алгоритма

Ранее уже отмечалось, что в каждый момент времени $\Delta\tau$ система теплоснабжения может находиться в одном из 8-ми различных состояний, определяемых комбинацией включенного оборудования. Считая, что 1 соответствует включенному состоянию единицы оборудования, а 0 — выключенному, можно составить следующую таблицу кодировки состояний системы.

Очевидно, что в двоичной системе состояния системы теплоснабжения соответствуют числам от 0 до 7. Если принять, что каждый ген будет соответствовать интервалу времени $\Delta\tau$, то десятичные эквиваленты этих чисел будут составлять область возможных значений для каждого гена. Например, ген, имеющий значение 3, будет соответствовать двоичному

представлению 011, что означает выключенный котел №1, и включенные котел №2 и ТНУ.

Таблица 3.1

Таблица кодировки состояний системы теплоснабжения

Код состояния	Котел №1	Котел №2	ТНУ
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Последовательность генов образует хромосому. Длина хромосомы определяется количеством N интервалов $\Delta\tau$.

Таким образом, последовательность ген в любой хромосоме представляет план переключения оборудования.

Работа генетического алгоритма начинается с формирования первоначальной популяции хромосом. В данном случае эта популяция состояла из 10 хромосом и формировалась случайным образом.

Для оценки приспособленности каждой хромосомы использовалась оптимизационная задача (3.31). Для этого моделировалась работа СОКТ согласно с плану переключения оборудования, соответствующему данной хромосоме, и рассчитывались все необходимые составляющие.

Критерием остановки алгоритма было условие неизменности наиболее приспособленной хромосомы в течение 50 эпох.

3.4. Моделирование временных параметров КИСУ

До сих пор в данном диссертационном исследовании использовались

абстрактные величины длительности интервала моделирования $\Delta\tau$ и количества таких интервалов N . Возникает вопрос, как выбрать и обосновать конкретные значения для этих величин?

С одной стороны, увеличение интервала $\Delta\tau$ позволяет исследовать модель системы теплоснабжения на большем отрезке времени. С другой — в соответствии с теоремой Котельникова, если аналоговый сигнал $x(t)$ имеет ограниченный спектр, то он может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчётам, взятым с частотой, строго большей удвоенной максимальной частоты спектра f_c , т.е. $f > 2f_c$. Следовательно, на очередном этапе увеличения интервала $\Delta\tau$ в модели появятся искажения.

Аналогично, увеличивая количество интервалов N можно также исследовать поведение системы на большем отрезке времени, но это также приведет к существенным вычислительным и временным затратам.

Проведем вычислительный эксперимент, задачами которого будут оценки:

- временных затрат на решение задачи составления оптимального плана оборудования методом простого перебора;
- временных затрат на решение задачи составления оптимального плана оборудования с использованием генетического алгоритма;
- значения величин $\Delta\tau$ и N .

Прежде всего, было определено время, затрачиваемое ЭВМ на анализ одного варианта плана. Для ЭВМ со следующими характеристиками: AMD Athlon 64 X2 Dual 3800+ 2,02 ГГц, 2 ГБ ОЗУ, WindowsXP это время составило $4 \cdot 10^{-5}$ с. Ранее уже упоминалось, что количество всех планов определяется величиной 8^N . Таким образом, можно оценить время, затрачиваемое на полный перебор всех вариантов (см. табл. 3.2).

После ряда экспериментов по формированию оптимального плана с использованием генетического алгоритма были получены результаты, приведенные на рис. 3.6.

Временные затраты при использовании метода полного перебора

N	Время, с
100	$3,2 \cdot 10^{96}$
300	$3,2 \cdot 10^{296}$
500	$3,2 \cdot 10^{496}$
1000	$3,2 \cdot 10^{996}$
2000	$3,2 \cdot 10^{1996}$

Анализ рис. 3.6 подтверждает, что генетические алгоритмы позволяют находить в огромном множестве альтернатив приемлемое решение за приемлемое время. Так, даже при $N = 1000$ среднее время поиска решения составило всего 500 с, в то время как полный перебор всех вариантов занял бы $3,2 \cdot 10^{996}$ с.

Главный же вывод заключается в том, что выбрав конкретную конфигурацию ЭВМ, предназначенную для моделирования, и задавшись приемлемым временем поиска решения, по зависимости на рис. 3.6 можно определить максимальное значение параметра N .

С другой стороны, представляется нецелесообразным проводить моделирование на периоде, превышающем длительность самого большого переходного процесса τ_{nn} . Следовательно, разделив τ_{nn} на величину N , найденную по зависимости на рис. 3.6, можно определить предельное значение интервала $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau \leq \frac{\tau_{nn}}{N}. \quad (3.32)$$

Так, например, выбрав максимальное время поиска решения равным 120 с, по рис. 3.6 находим $N \approx 500$. Из предварительных исследований было установлено, что максимальная длительность переходного процесса в системе теплоснабжения составляет примерно 9500 с. Следовательно,

$$\Delta\tau \leq \frac{9500}{500} = 19 \text{ с.}$$

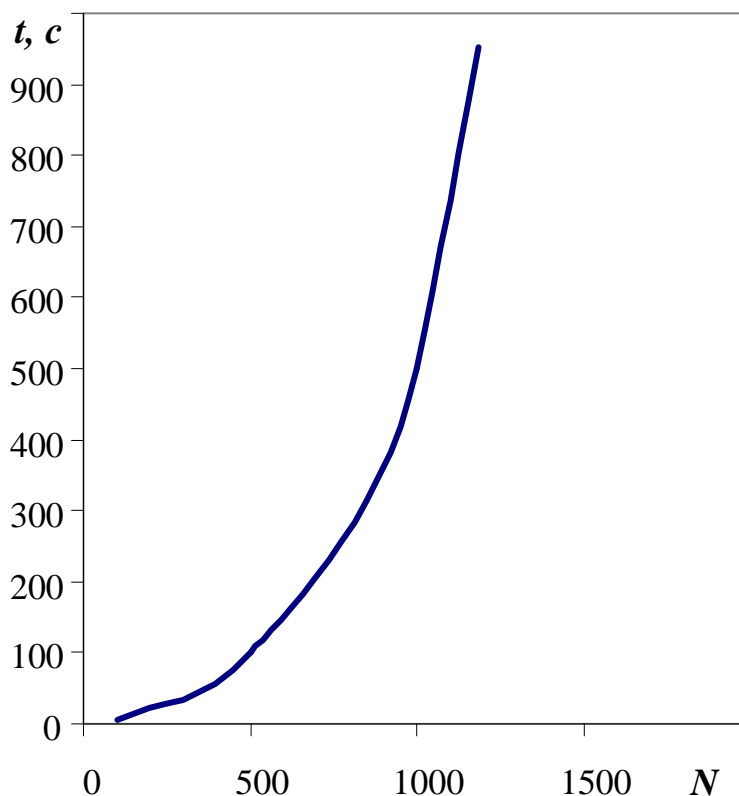


Рис. 3.6 Зависимость среднего времени поиска решения от количества интервалов N

На основании полученного результата дальнейшее моделирование системы теплоснабжения проводилось при $\Delta\tau = 15$ с.

3.5. Информационное обеспечение КИСУ

В ходе работы по разработке информационного обеспечения КИСУ были предложены различные варианты управляющих алгоритмов, отличающиеся сложностью и потенциальными возможностями [34, 46, 53].

3.5.1. Управляющий алгоритм. Вариант 1. Это простой вариант алгоритма, который в дальнейшем был использован в ходе имитационного

моделирования.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.7.

В данном алгоритме ввод ограничений на ресурсы и значения весовых коэффициентов оптимизационной задачи осуществляет оператор.

Алгоритм может быть использован для реализации автоматизированного управления или же как система поддержки принятия решений.

3.5.2. Управляющий алгоритм. Вариант 2. Хотя первый вариант управляющего алгоритма достаточен для проведения имитационного моделирования системы теплоснабжения, с практической точки зрения он малопригоден. Необходимо исключить человеческое вмешательство на каждой итерации расчета. Поэтому был разработан более интеллектуальный вариант двухуровневого управляющего алгоритма, который позволяет автоматически оценивать значения весовых коэффициентов составляющих оптимизационной задачи (3.31) на основании текущего наличия первичных энергоресурсов, их будущих поступлений, а также всех непредвиденных флуктуаций, влияющих на работу системы параметров. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.8.

Достоинство данного алгоритма заключается в том, что как только в системе наблюдается дефицит какого-либо ресурса (надежность, качество и т.д.), производится увеличение соответствующей весовой составляющей в критерии управления, что, в свою очередь, должно привести к снижению затрат данного ресурса.

На верхнем уровне решается классическая задача планирования распределения ресурсов, а на нижнем — принимается решение о том, как следует переключать конкретное оборудование для того, чтобы достичь оптимальное значение целевой функции.

На нижнем — принимается решение о том, как следует переключать конкретное оборудование для того, чтобы достичь оптимальное значение

целевой функции.

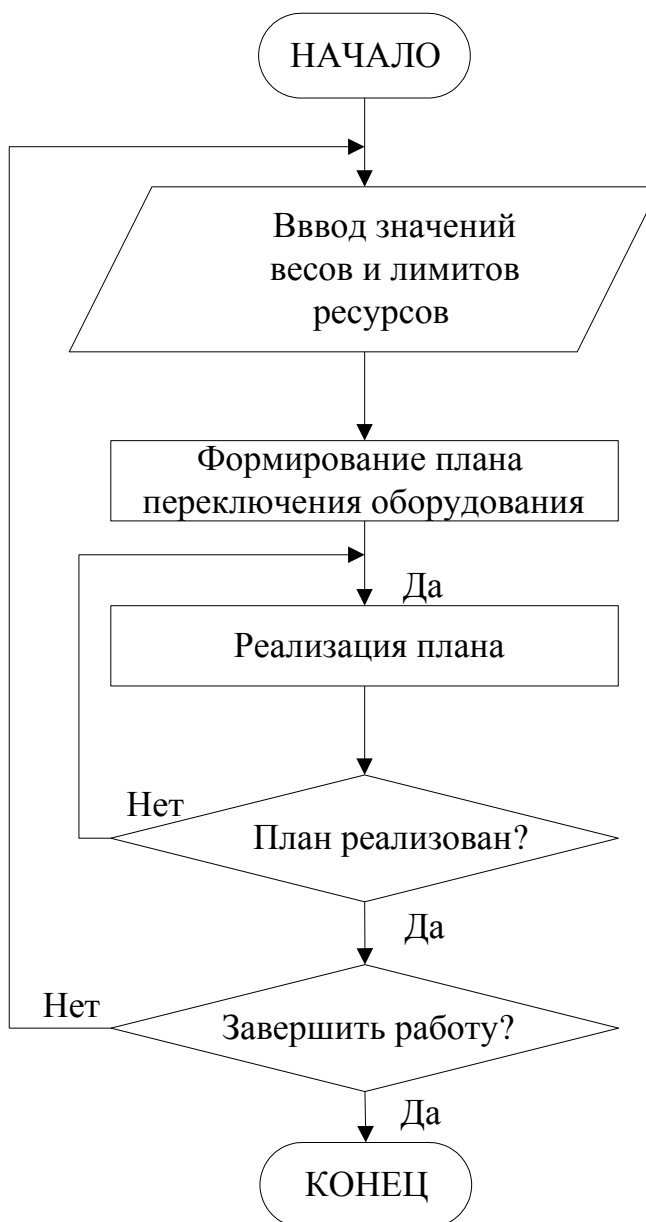


Рис. 3.7 Управляющий алгоритм. Вариант 1

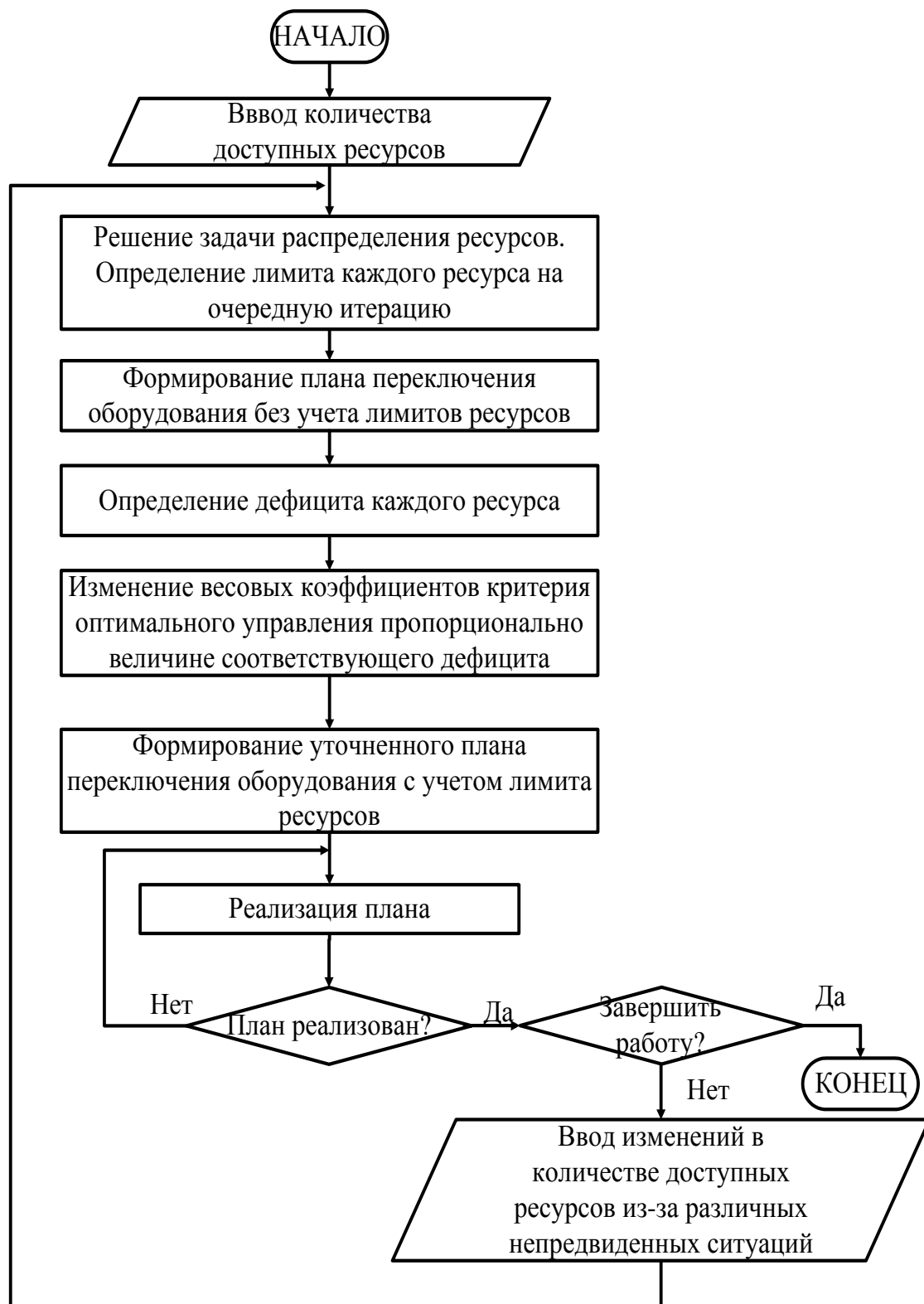


Рис. 3.8 Управляющий алгоритм. Вариант 2

3.5.3. Управляющий алгоритм. Вариант 3. Следует отметить, что в предложенных алгоритмах основные расчетные затраты происходят в момент формирования плана. После того как план сформирован, вычислительная мощность ЭВМ не используется. В итоге мы тратим несколько минут на формирование плана, который реализуется в течение нескольких часов.

С целью задействования вычислительных возможностей ЭВМ в процессе выполнения плана была предложена следующая концепция.

Допустим, что оборудование системы теплоснабжения работает не в релейном режиме, а на различных уровнях мощности. Для определенности примем, что таких уровней 5: 0, 25, 50, 75 и 100%. С вычислительной точки зрения задача поиска оптимального плана существенно усложняется, так как количество вариантов теперь $(5^3)^N = 125^N$. С другой стороны, маневрирование мощностью позволит более гибко использовать ресурсы внутри системы теплоснабжения. Кроме того, как уже было сказано, имеется большой потенциал не использованного времени работы ЭВМ.

Поэтому перспективным представляется гибридный подход. Вначале формируется предварительный план переключения оборудования, исходя из того, что оно работает в релейном режиме. Далее, пока этот план реализуется, параллельно формируется уточненный план, который предполагает работу оборудования на различных уровнях мощности. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.9.

Таким образом, появляется возможность более гибкого управления. Для дальнейшего исследования целесообразно принять алгоритм управления вариант 1 рис. 3.7 в связи с тем, что основной задачей исследования является поиск оптимальной структуры, а не оптимизация управляющих алгоритмов.

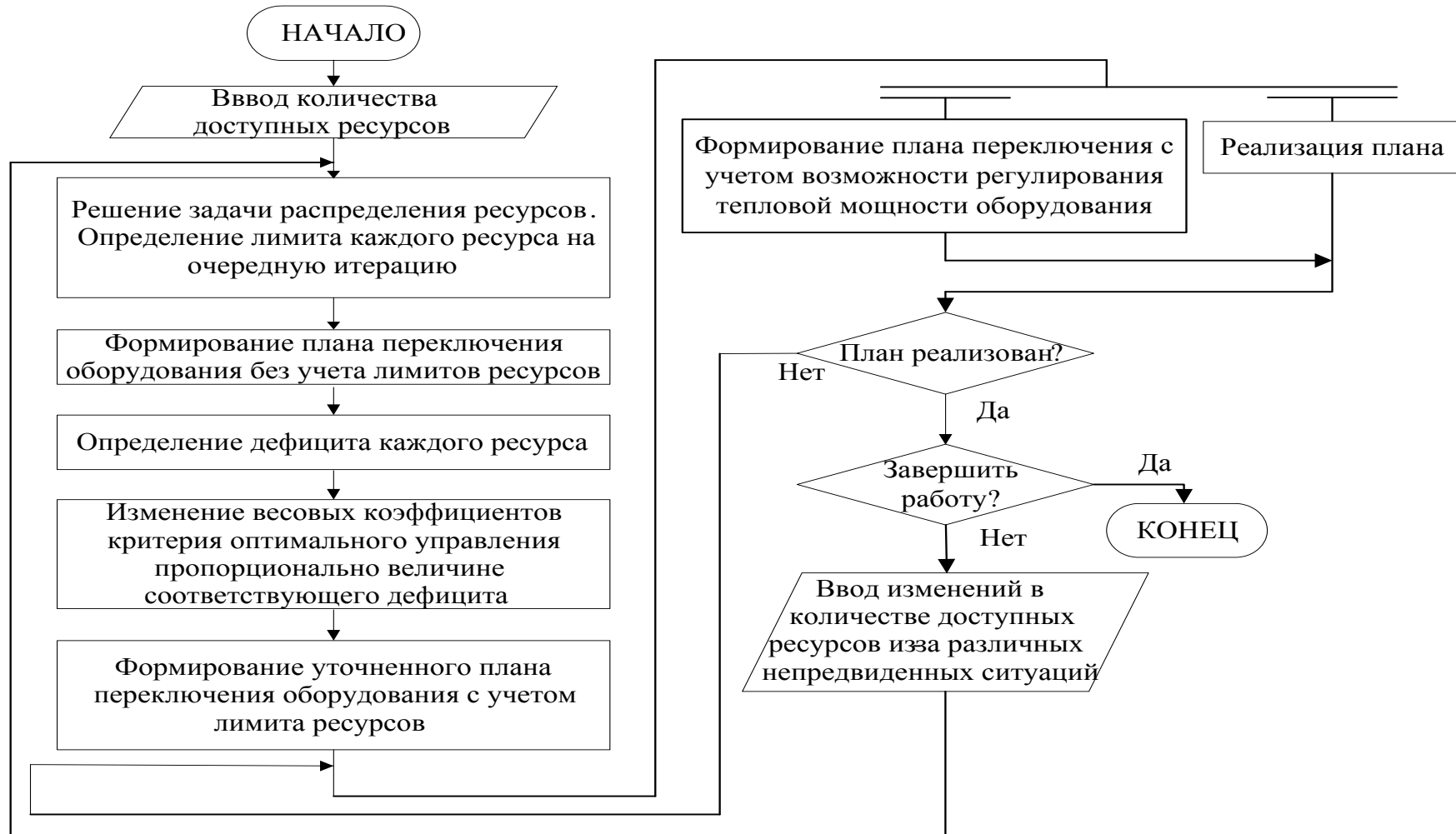


Рис. 3.9. Управляющий алгоритм. Вариант 3

3.6. Реализация граничных условий математического обеспечения

В начале данного раздела был оговорен ряд условий и ограничений, накладываемых на процесс управления системой теплоснабжения. Возникает задача практической реализации всех требований.

Так, требование 4 гласит, что в заранее определенные моменты времени надежность оборудования не должна быть ниже заданной.

Было принято исследовать реализацию данного требования на примере ТНУ. Для этого были заданы 2 параметра: контрольное время τ_k и предельная надежность R_n . При расчете составляющей $R_n(x;t)$ по выражению (2.57) была введена система штрафов. Если текущее время моделирования было меньше величины τ_k , а текущая надежность меньше R_n , то принималось, что текущая надежность ТНУ равна 0. При этом интегральная составляющая надежности $R_n(x;t)$ увеличивалась не на вероятность отказа ТНУ, а на 1.

Аналогичный механизм штрафа был введен для всех объектов системы теплоснабжения, если их надежность падала ниже 0,95.

Для имитации наличия ограниченного количества газа и электроэнергии в модель были внесены соответствующие параметры. Если на очередной итерации расчета определялось, что лимит газа или электроэнергии исчерпан, то в соответствующий данной итерации ген в хромосоме вносилось изменение, принудительно отключающее оборудование, использующее данный вид ресурса.

3.7. Моделирование значений весовых коэффициентов

Анализ различных литературных источников [71,72,73] показал, что для определения начальных значений весовых коэффициентов критерия (2.60) можно воспользоваться методами квалиметрии.

В настоящее время в практике конструирования используют пять групп методов определения весовых коэффициентов w_i : директивные, статистические, стоимостные, аналитические и экспертные. Директивный метод применяют в случаях, когда весовые коэффициенты показателей задаются заказчиком, определяются нормативными документами или назначаются вышестоящей организацией. Статистические методы определения весовых коэффициентов основаны на предположении, что при достаточно большом опыте проектирования системы одного класса чем важнее показатель качества, тем ближе его значение к эталонному показателю.

Основой стоимостного метода определения весовых коэффициентов является предположение о том, что коэффициент веса w_i — монотонно возрастающая функция от затрат C на его обеспечение [74].

Аналитические методы определения весовых коэффициентов подразумевают существование известных математических выражений, позволяющих вычислить необходимые значения. В нашем случае особый интерес представляет экспертный метод определения весов.

Оценим для нашего примера весовые коэффициенты четырех параметров: a_1 — качество $Q(t)$, a_2 — надежность $R(t)$, a_3 — стоимость $S(t)$, a_4 — эффективность $E(t)$.

Применим трехальтернативное предпочтение, т.е.:

— если $a_1 > a_2 \rightarrow a_1 = 2$;

— если $a_1 = a_2 \rightarrow a_1 = 1$;

— если $a_1 < a_2 \rightarrow a_1 = 0$.

Составим матрицу парных сравнений и вычислим вектор рангов $|M_i|$.

	a_1	a_2	a_3	a_4	$\sum a_i = M_i$	$w_i = M_i / \sum M_i$
a_1	1	1	0	2	4	0,24
a_2	1	1	0	2	4	0,24
a_3	2	2	1	2	7	0,41
a_4	1	0	0	1	2	0,11

Нормируя вектор рангов, получаем требуемые значения весовых коэффициентов.

В случае необходимости эксперт может увеличить вес самого важного показателя за счет менее важного. Для этого необходимо вектор-строку $|a_i|$ умножить на вектор-столбец рангов $|M_i|$.

$M'_i = a_i \cdot M_i $	M'_i	w'_i
$1 \cdot 4 + 1 \cdot 4 + 0 \cdot 7 + 2 \cdot 2$	12	0,21
$1 \cdot 4 + 1 \cdot 4 + 0 \cdot 7 + 2 \cdot 2$	12	0,21
$2 \cdot 4 + 2 \cdot 4 + 1 \cdot 7 + 2 \cdot 2$	27	0,47
$1 \cdot 4 + 0 \cdot 4 + 0 \cdot 7 + 1 \cdot 2$	6	0,11

3.8. Моделирование системы в изменяющихся условиях и аварийных ситуациях

Цикл работы обычной АСУ ТП можно разделить на три этапа [29]:

- опрос датчиков и ввод команд оператора;
- обработка показаний датчиков и выработка управляющих воздействий;

- подача управляющих воздействий.

Предлагаемые в данном диссертационном исследовании решения подразумевают несколько иную схему работы:

- опрос датчиков;
- прогноз изменения показаний датчиков за время T и формирование плана переключения оборудования;
- реализация плана в течение времени T .

Как видно, после начала этапа реализации плана переключения оборудования данные датчиков не влияют на процесс управления. Очевидно, что в идеальном случае работы системы теплоснабжения спрогнозированные значения показаний датчиков и их реальные значения будут идентичны. В реальности же такой режим работы маловероятен.

Расхождения в смоделированных и реальных показаниях датчиков обуславливаются множеством факторов, которые невозможно предусмотреть или смоделировать в рамках решаемой задачи. Например, невозможно построить абсолютно точную модель окружающей среды. Невозможно контролировать все форточки и двери в отапливаемых помещениях. Невозможно предсказать, когда и сколько там будет находиться людей и какая будет включена электронная аппаратура.

Широкий спектр неопределенностей приводит к тому, что процесс управления системой теплоснабжения необходимо постоянно контролировать на предмет расхождения моделируемых и реальных показаний датчиков. В случае отклонения какого-либо из параметров x_i , на критическую величину $\Delta_i^{крит}$ необходимо формировать новый план переключения оборудования.

Новый план также необходимо формировать и в случае поломки оборудования. Кроме того, такие события, как: изменение цен на ресурсы, изменение количества доступных ресурсов (пополнение запаса либо непредвиденный расход) также должны приводить к формированию новых планов переключения оборудования.

3.9. Выводы

1. Впервые предложена оптимизационная задача для оптимального управления системой теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств, которая объединяет в себе такие факторы, как качество процесса поддержания заданной температуры, эффективность используемого оборудования, его надежность и стоимость ресурсов, что позволяет комплексно оценивать процесс функционирования системы на основе технологических и экономических показателей.

2. Нашло дальнейшее развитие информационное и математическое обеспечение системой теплоснабжения с изменяемой структурой

технических средств, которое позволяет реализовать оптимальное управление за счет изменения структуры объекта управления.

3. Поиск оптимального решения в разработанном математическом обеспечении осуществляется с использованием генетического алгоритма, который позволил в большом множестве вариантов найти решение, близкое к оптимальному, за приемлемый временной интервал.

4. Поиск оптимального решения зависит от ограничений на ресурсы, которые могут задаваться оператором, либо рассчитываться системой управления на базе информации о планируемом количестве и времени поступления ресурсов.

5. Предложена группа алгоритмов поиска оптимальной конфигурации технических средств, которые позволяют за минимальное время находить предварительное решение, основанное на релейном режиме регулирования оборудованием с последующим нахождением точного решения, которое вычисляется в процессе реализации предварительного решения, и основывается на предположении о возможности регулирования мощностью теплогенерирующего оборудования.

6. Для апробирования разработанного информационного и математического обеспечения необходимо провести компьютерное моделирование КИСУ по определению оптимальной структуры теплогенерирующих технических средств по обеспечению заданных параметров температуры воздуха.

РАЗДЕЛ 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Итоговая задача данного диссертационного исследования заключается в проведении имитационного моделирования и анализе полученных результатов [75, 76].

Цель моделирования — всестороннее исследование работы системы теплоснабжения с использованием оптимизационной задачи (3.31) для оптимального управления. Для достижения данной цели необходимо было решить следующие дополнительные задачи:

- оценить эффективность эксплуатации системы теплоснабжения при управлении существующими методами;

- оценить эффективность эксплуатации системы теплоснабжения с использованием оптимизационной задачи (3.31) для оптимального управления;

- исследовать влияние на процесс оптимального управления введения ограничений на значение надежности оборудования и лимитов на первичные энергоресурсы;

- исследовать влияние на процесс оптимального управления изменения весовых коэффициентов в целевой функции оптимизационной задачи (3.31).

4.1. Оценка эффективности эксплуатации системы

Для оценки эффекта при использовании оптимизационной задачи (3.31) для оптимального управления необходимо провести исследование эффективности управления системы теплоснабжения традиционными методами.

Очевидно, что для сохранения условий эксперимента необходимо воспользоваться математическим аппаратом, разработанным во втором разделе, а оценку результата необходимо проводить на основе предложенной оптимизационной задачи (3.31) для оптимального управления [75, 76].

Рассмотрим следующий вариант управления, выбранный за прототип.

1. Если средняя температура пола меньше $27,5$ °С и оба котла выключены, то необходимо включить котел с наименьшей наработкой.
2. Если средняя температура пола меньше 27 °С, включить оба котла.
3. Если средняя температура пола больше 28 °С и оба котла включены, то выключить котел с наибольшей наработкой.
4. Если средняя температура пола больше $28,5$ °С, выключить оба котла.
5. Если температура внутри помещения на $0,5$ °С ниже заданной и ТНУ выключена, то включить ТНУ.
6. Если температура внутри помещения на $0,5$ °С выше заданной и ТНУ включена, то выключить ТНУ.

Результат моделирования работы системы теплоснабжения для описанного алгоритма управления приведен на рис. 4.1. Результат представляет собой временные диаграммы переключения газовых котлов (ГК) и ТНУ и график изменения температуры теплопотребителя. На рисунке также приведены нормированные значения составляющих целевой функции оптимального управления, абсолютные затраты на первичные ресурсы S и значение целевой функции $J(x;t)$ для рассматриваемого интервала времени.

Ресурс оборудования был выбран заведомо больше требуемого и составлял 30000 с для каждой единицы.

В третьем разделе был приведен алгоритм определения величин $\Delta\tau$ и N , в приводимых далее результатах значения этих параметров заведомо завышены, что позволило в дальнейшем более качественно оценить адекватность предложенного управляющего алгоритма. Время моделирования $\Delta\tau$ было выбрано равным 15 с. Количество интервалов

$N = 1000$. Это позволило исследовать поведение системы теплоснабжения на интервале в 15000 с.

Температура окружающей среды была неизменной и составляла $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельные стоимости тепловой энергии, полученной при сжигании газа и при использовании электроэнергии, были приняты равными 0,00000007 грн/Дж, что примерно соответствует рыночной цене газа и электроэнергии для бытового сектора.

4.1.1. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения без ограничений на ресурсы. На рис. 4.2 представлены результаты моделирования для случая, когда работа системы теплоснабжения оценивается по предложенному значению целевой функции оптимального управления. В данном режиме отсутствуют какие-либо ограничения на лимит ресурсов, а также особые требования к надежности и качеству.

В отличие от предыдущего опыта газовые котлы не работали постоянно, практически на всем промежутке времени отклонение температуры от заданной были незначительны и, что самое главное, абсолютная стоимость уменьшилась в 2 раза.

4.1.2. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения с ограничением ресурса надежности. На рис. 4.3 приведен результат моделирования работы системы теплоснабжения для случая, когда на ресурс ТНУ было наложено ограничение. Считалось, что в момент времени $t = 10000$ с надежность ТНУ должна быть не ниже 0,998.

Как видно из рис. 4.3, система управления прекрасно справилась с поставленной задачей: ТНУ включилась только спустя 1000 с. Кроме этого, данный эксперимент наглядно демонстрирует то, что качество поддержания заданной температуры обеспечивает ТНУ.

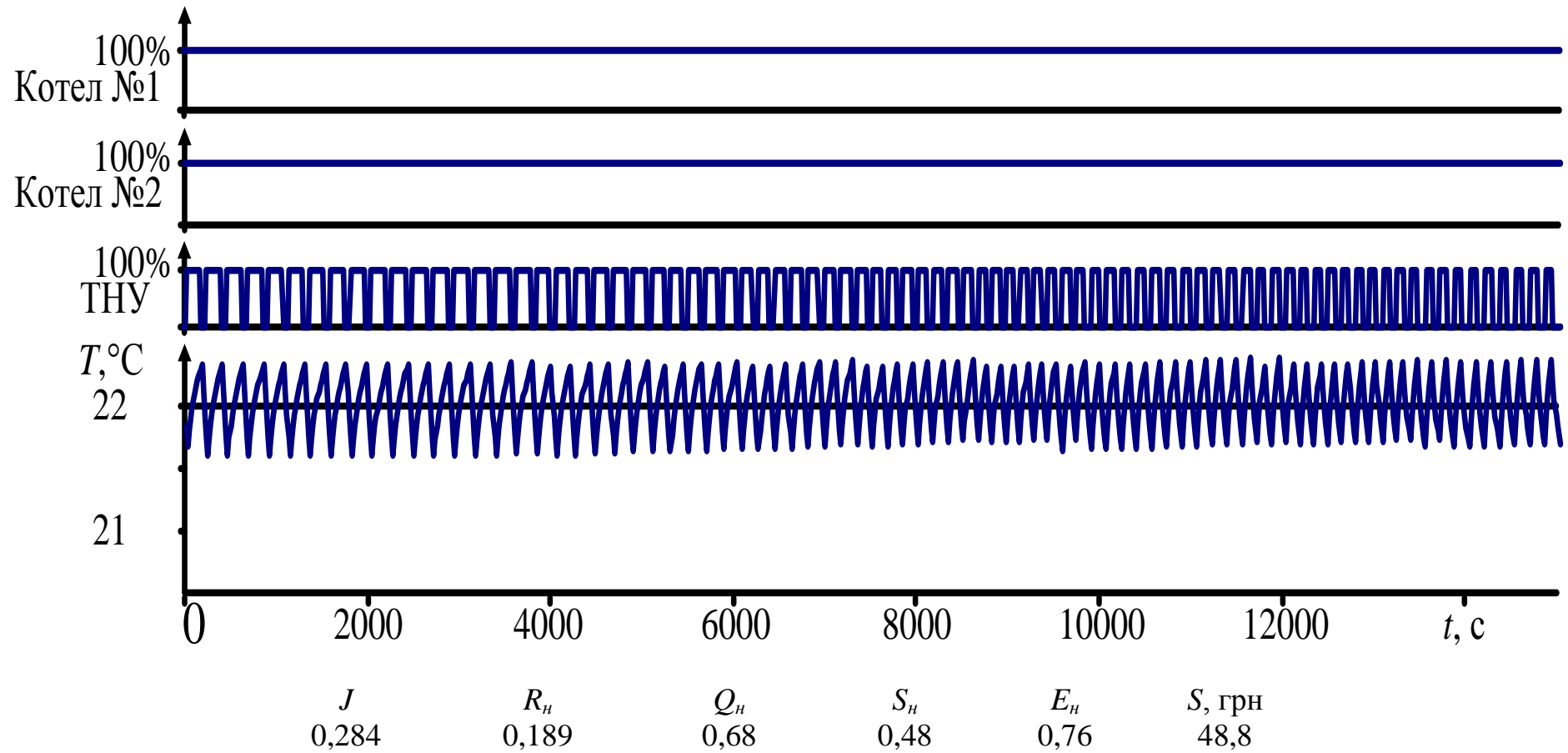
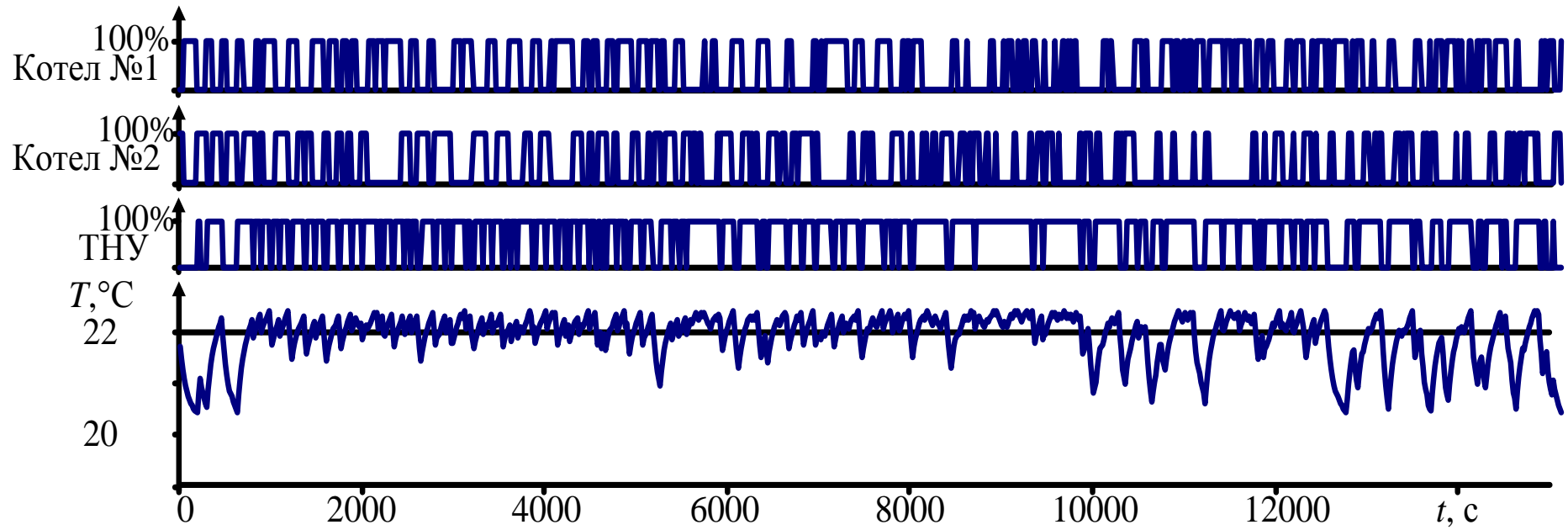


Рис. 4.1. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при управлении традиционным способом



J	R_H	Q_H	S_H	E_H	S , грн
0.344	0.334	1.10	0.23	0.72	23.3

Рис. 4.2. Результат моделирования работы системы теплоснабжения с использованием оптимизационной задачи для управления

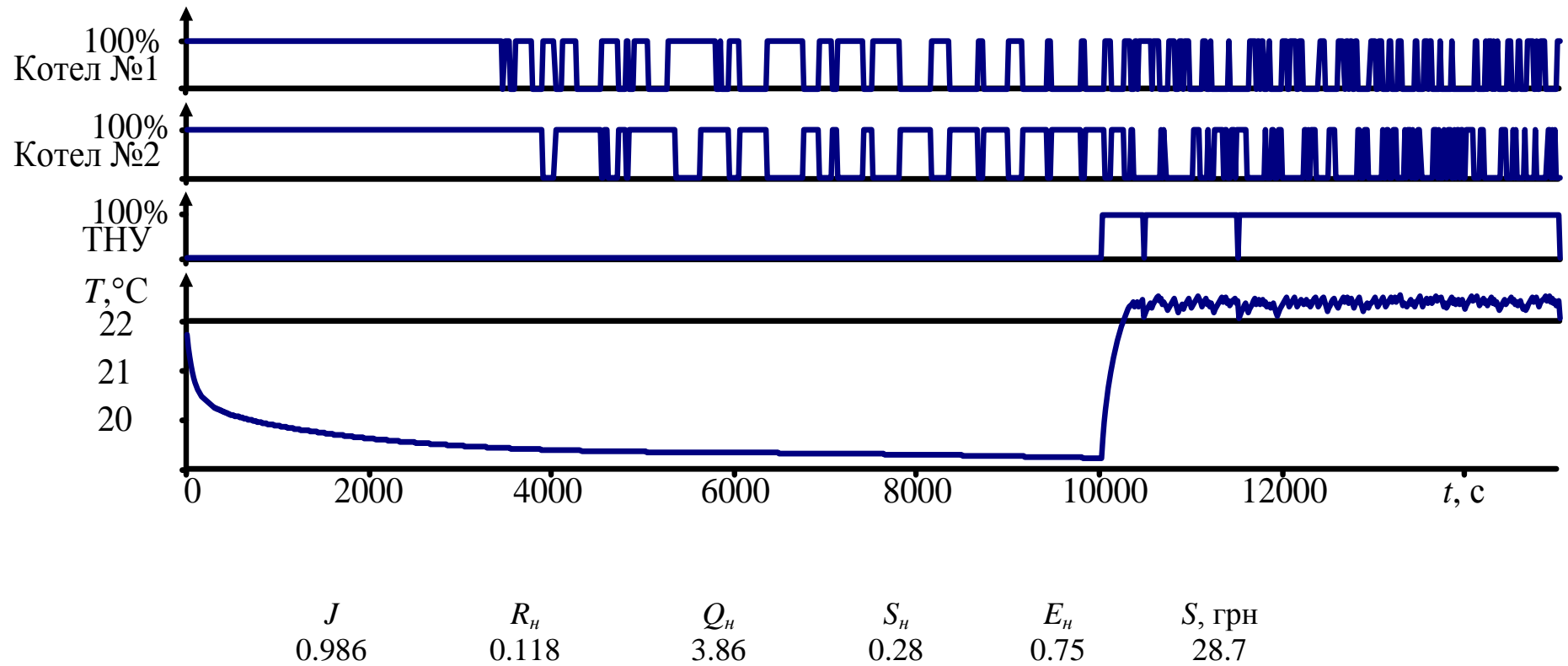


Рис. 4.3. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса ТНУ

Другой вариант управления при ограничении ресурса надежности приведен на рис. 4.4. В этом случае считалось, что ресурс котлов и ТНУ составляет не 30000 с, а всего 5000 с.

В результате 5000 с система нормально функционировала, после чего температура в помещении понизилась, но в конце рассматриваемого периода 15000 с заработал газовый котел, что демонстрирует свойство управляемости процессом даже при таких жестких условиях, т.е. о живучести данной системы теплоснабжения.

4.1.3. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения при наличии лимитов ресурсов. На рис. 4.5 представлен результат моделирования для случая наличия лишь 0,55 кВт·ч электроэнергии (обычно требуется в среднем 1,5 кВт·ч).

На рис. 4.6 представлен результат моделирования для случая ограничения ресурса надежности ТНУ и наличия лимита газа. Считалось, что в момент времени $t = 10000$ с надежность ТНУ должна быть не ниже 0,998 при этом в наличии имеется только 2 кг газа.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4.3-4.6, показывает, что в случае отсутствия ресурсов для работы в номинальном режиме система управления аккумулирует тепло в конструкциях теплопотребителя на будущее, что подтверждает высокую живучесть данной системы теплоснабжения при заданной системе управления.

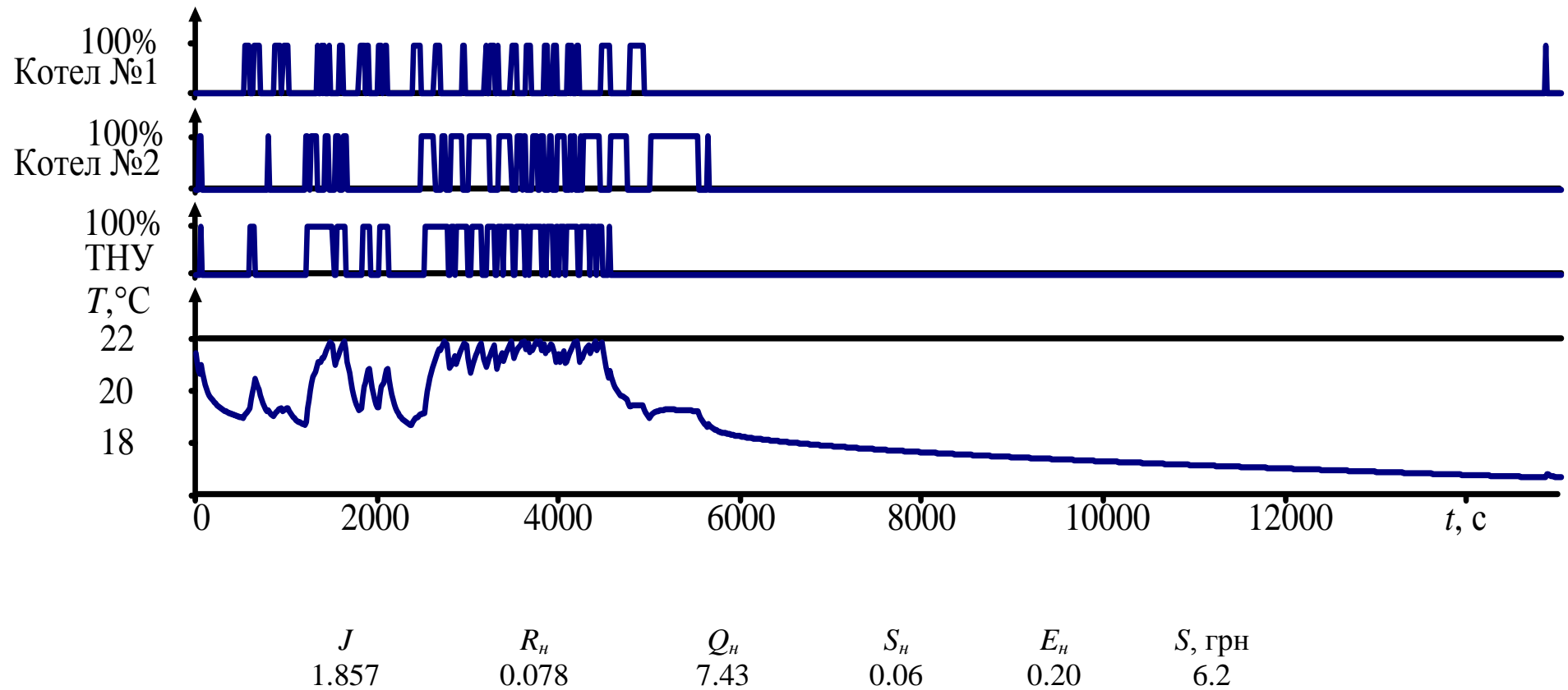


Рис. 4.4. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса котлов и ТНУ

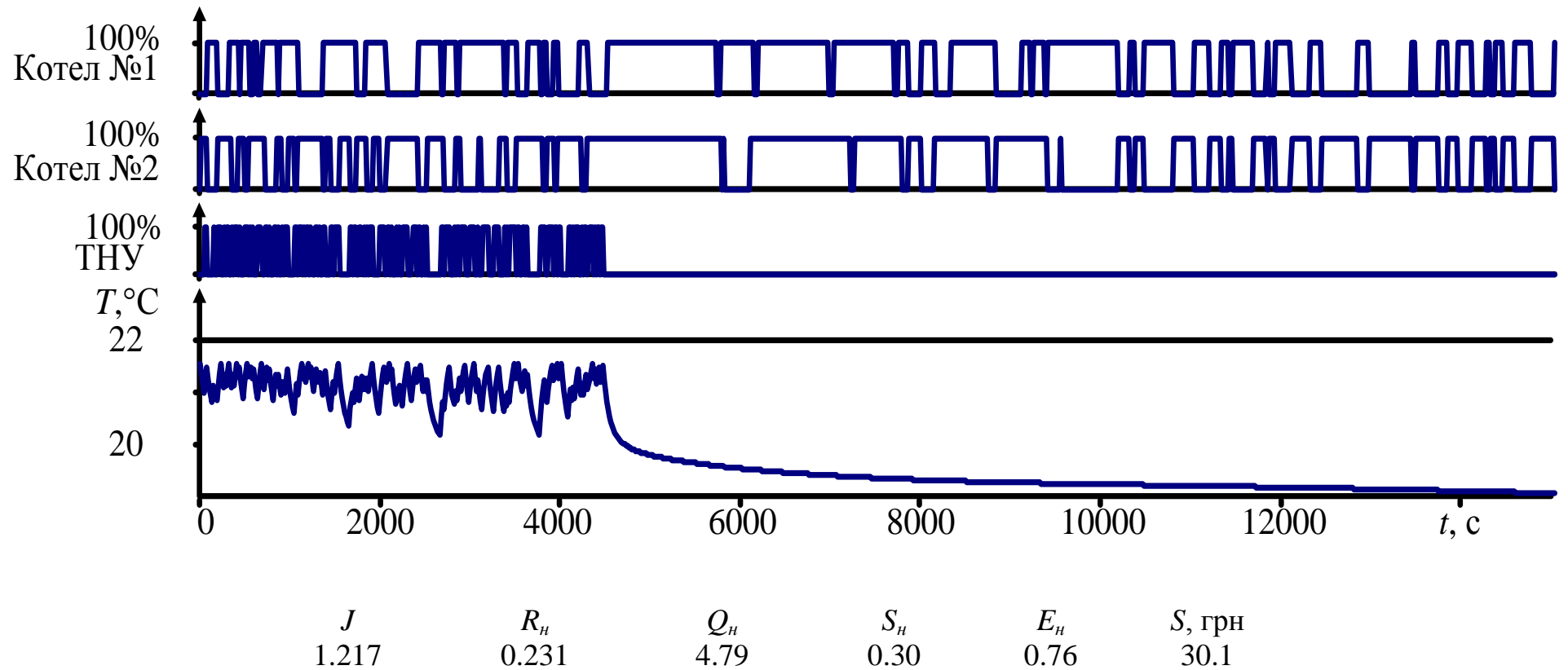


Рис. 4.5. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при наличии лимита электроэнергии

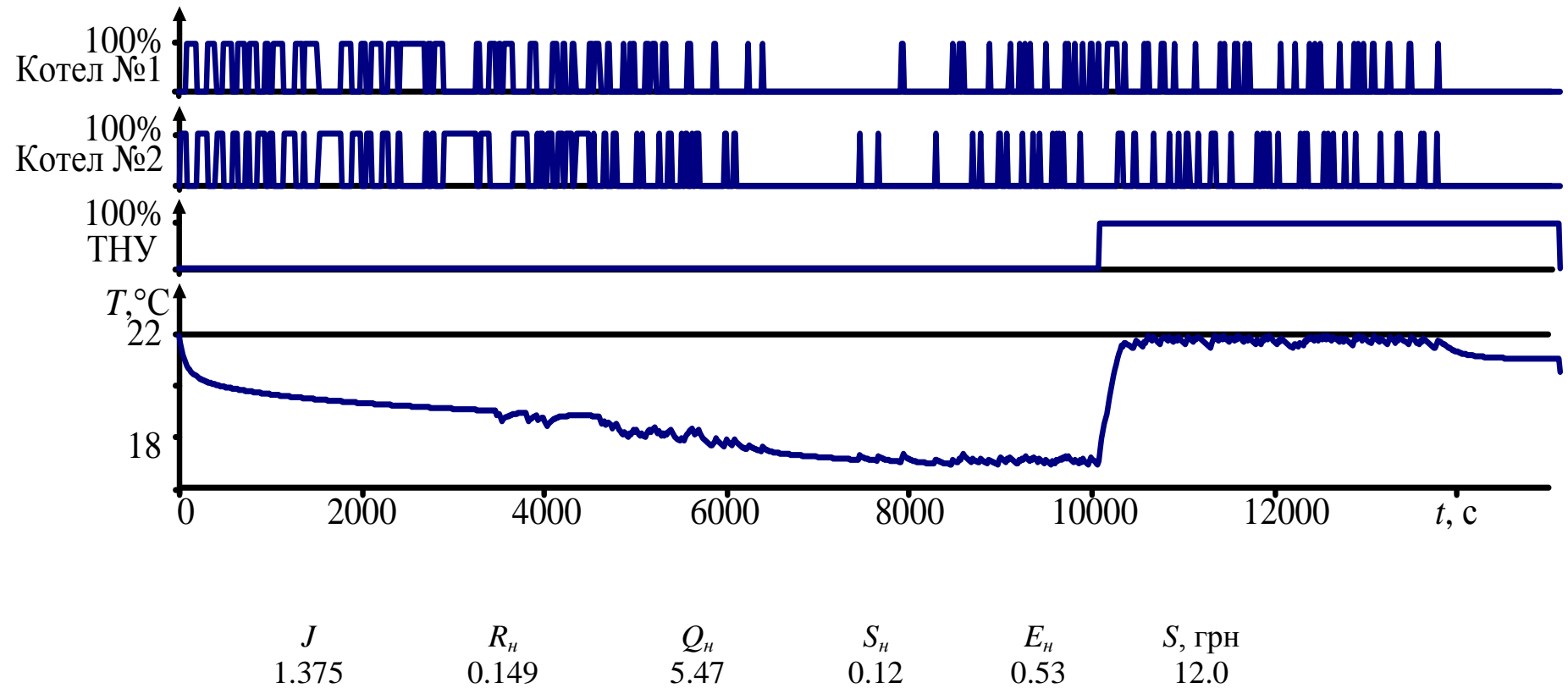


Рис. 4.6. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса ТНУ и наличии лимита газа

4.1.4. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения при изменении весовых коэффициентов целевой функции оптимизационной задачи. На рис. 4.7 представлен результат моделирования с измененными весовыми коэффициентами составляющих предложенного критерия оптимального управления. Условия проведения эксперимента соответствовали условиям опыта, представленного на рис. 4.2, т.е. отсутствовали какие-либо ограничения на ресурсы. При этом было принято, что весовые коэффициенты равны $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_q=0,9$. Предполагалось, что система управления реализует более качественный вариант управления.

Однако, сравнивая полученный результат с рис. 4.2, улучшения с точки зрения целевой функции и значений ее составляющих не произошло. Таким образом, можно сделать вывод, что модель составляющей качества необходимо изменить.

На рис. 4.8 представлен результат моделирования для случая $w_q=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$. В этом эксперименте системой управления реализован вариант с меньшим износом оборудования.

Положительный эффект от изменения весовых коэффициентов в данном опыте очевиден: значение целевой функции уменьшилось в три раза; уменьшилось количество переключений оборудования, что естественно привело к уменьшению R_n ; значительно снизилась абсолютная стоимость, но при этом существенно уменьшился показатель качества поддержания заданной температуры в помещении.

4.1.5. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения при изменении соотношения стоимости ресурсов. На рис. 4.9 представлен результат моделирования для случая, когда удельная стоимость электроэнергии в 20 раз больше удельной стоимости газа. Сравнивая данный результат с рис. 4.2, можно утверждать, что соотношение цен на ресурсы также влияет на характер принимаемого

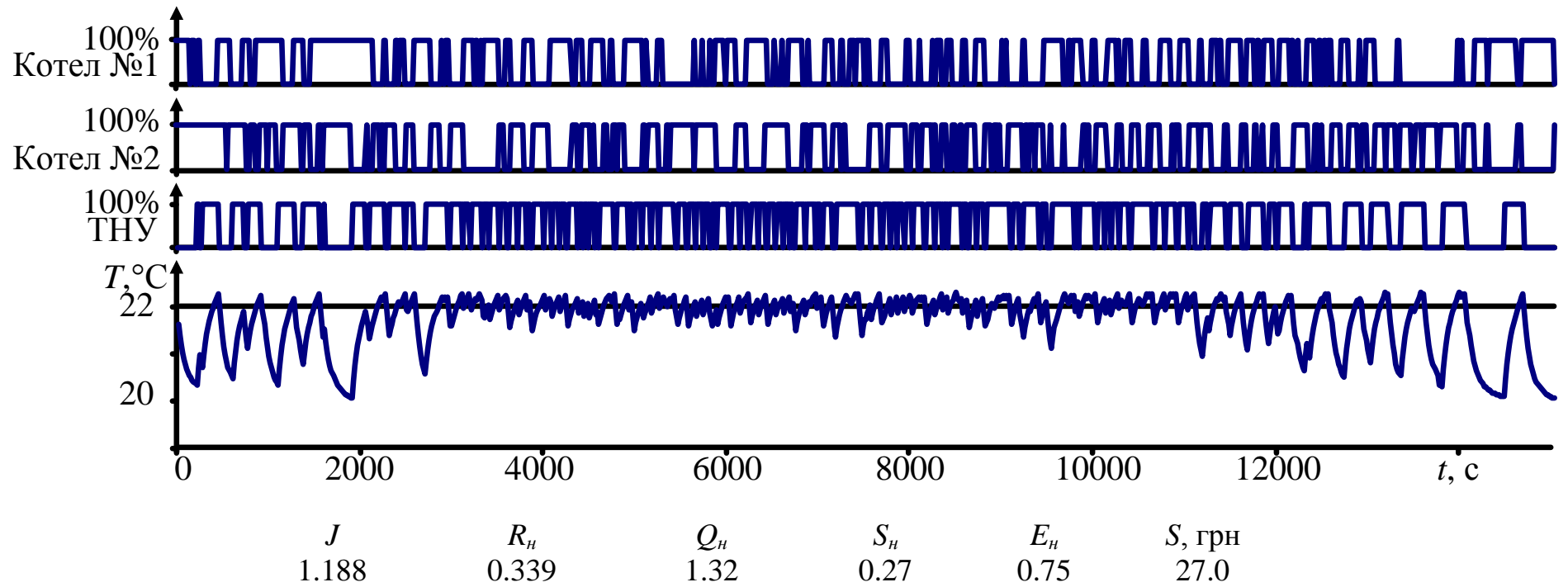
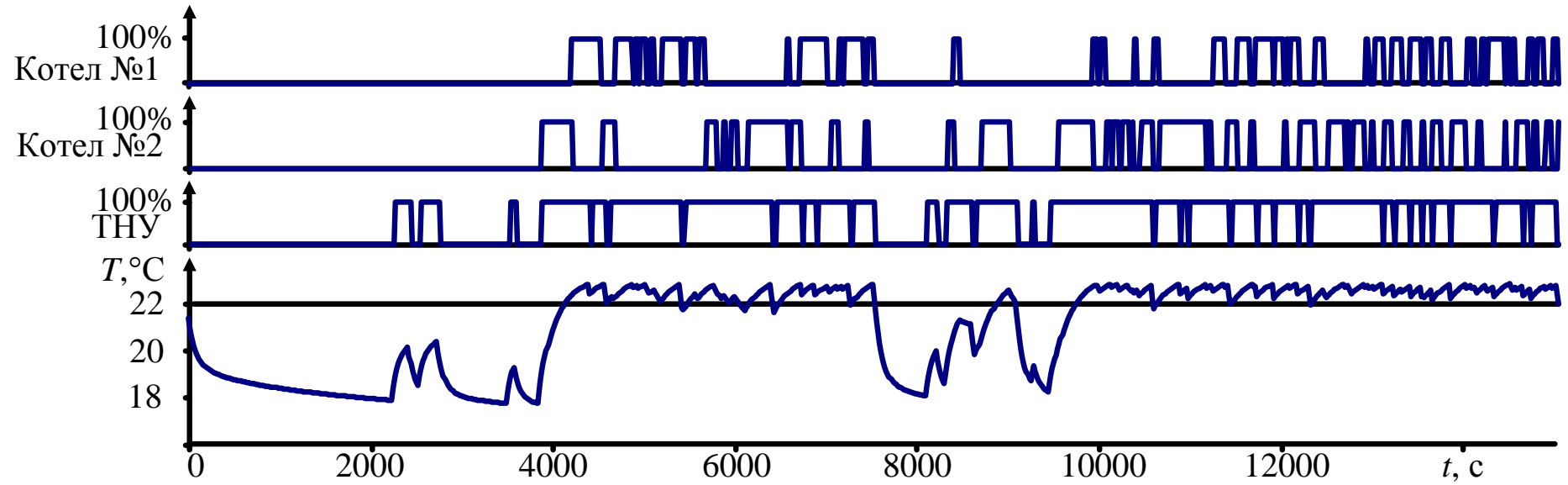


Рис. 4.7. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_q=0,9$



J	R_H	Q_H	S_H	E_H	S , грн
0.115	0.073	2.84	0.17	0.53	16.8

Рис. 4.8. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при $w_q=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$

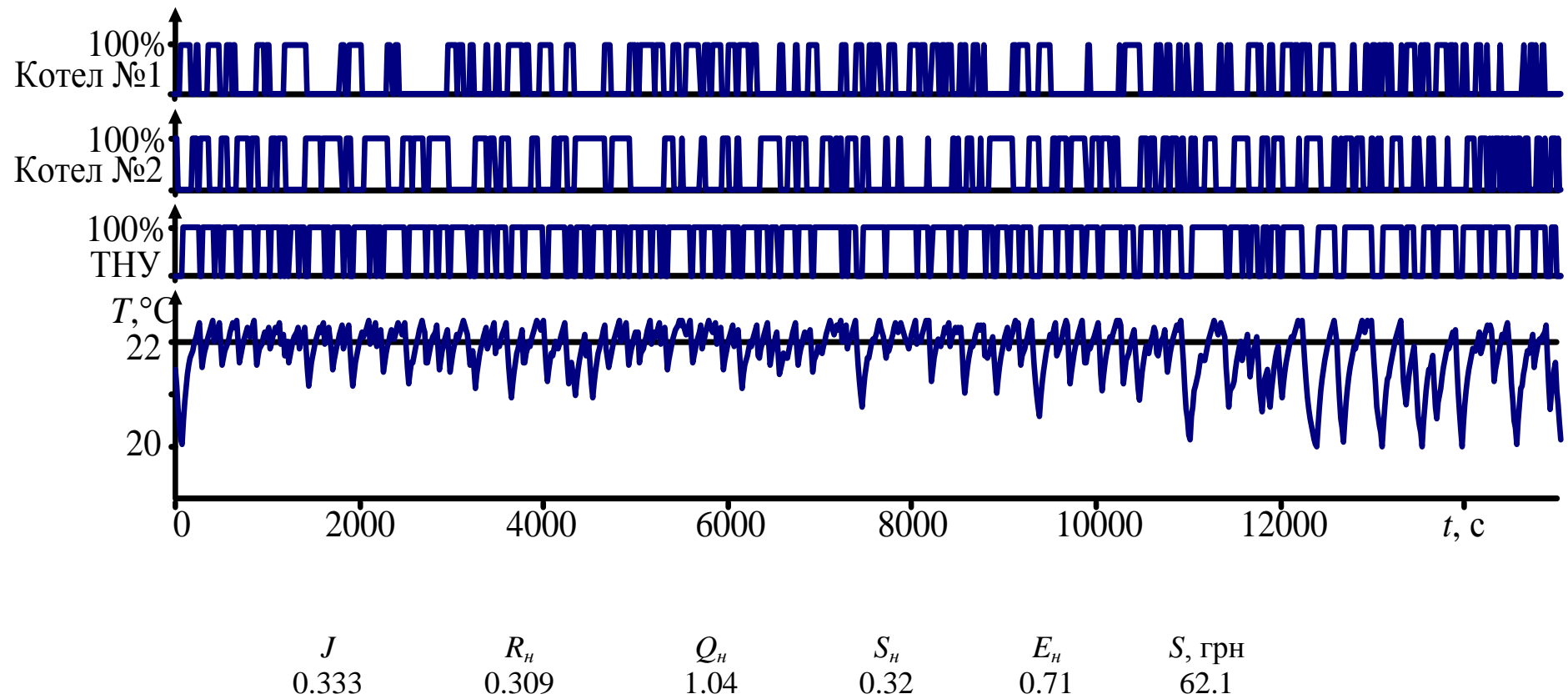


Рис. 4.9. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при соотношении цен э/э и газа, равном 20:1

системой управления решения, что заметно при сравнении значений абсолютной стоимости (практически в три раза увеличилась).

4.1.6. Анализ полученных результатов. В табл. 4.1 представлены результаты серии первых девяти экспериментов.

Таблица 4.1

Результаты имитационного моделирования первой серии экспериментов

№	Описание характера эксперимента управления	J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
1.	традиционным способом	0,284	0,189	0,68	0,48	0,76	48,8
2.	без ограничений на ресурсы	0.344	0.334	1.10	0.23	0.72	23.3
3.	при ограничении ресурса ТНУ	0.986	0.118	3.86	0.28	0.75	28.7
4.	при ограничении ресурса котлов и ТНУ	1.857	0.078	7.43	0.06	0.20	6.2
5.	при наличии лимита электроэнергии	1.217	0.231	4.79	0.30	0.76	30.1
6.	при ограничении ресурса ТНУ и наличии лимита газа	1.375	0.149	5.47	0.12	0.53	12.0
7.	при $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_q=0,9$	1.188	0.339	1.32	0.27	0.75	27.0
8.	при $w_q=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$	0.115	0.073	2.84	0.17	0.53	16.8
9.	при соотношении цен электроэнергии и газа, равном 20:1	0.333	0.309	1.04	0.32	0.71	62.1

Анализ результатов имитационного моделирования (рис. 4.2 — 4.10) позволил оценить преимущества и недостатки информационного обеспечения и оптимизационной задачи для управления структурой системы теплоснабжения.

Прежде всего, следует отметить, что предложенное информационное и математическое обеспечение показало свою состоятельность.

Результаты анализа рис. 4.3 — 4.6 свидетельствуют о возможности получать принципиально различные планы переключения оборудования в условиях действия ресурсных ограничений.

Результаты анализа рис. 4.7—4.8 свидетельствуют о потенциальной

возможности, путем изменения весовых коэффициентов целевой функции, ориентировать работу системы управления на получение максимального качества обеспечения температуры, надежности и эффективности оборудования и стоимости затрачиваемых ресурсов.

В целом анализ результатов рис. 4.2—4.9 показал, что система управления в зависимости от накладываемых ограничений адаптирует задачу управления к использованию имеющихся ресурсов.

В то же время были получены непрогнозируемые результаты. Так, решение, представленное на рис. 4.2, хоть и идеально с точки зрения качества обеспечения температуры, совершенно неприемлемо с точки зрения практики. Ни один инженер-эксплуатационник не допустит, чтобы котел включался и выключался каждые 15 – 30 с, так как это приведет к его форсированному износу. Кроме того, учет внезапных и износных отказов оборудования требует большого количества вычислительных ресурсов ЭВМ. Поиск оптимальной структуры системы с учетом ограничений на все виды ресурсов на интервале времени 15000 с занимал 400...3600 с. Поэтому следовало уменьшить вычислительные ресурсы на расчет составляющей надежности.

Более глубокий анализ данного вопроса показал, что подобные решения появляются из-за отсутствия ограничения на использование ресурса надежности. Хотя результаты на рис. 4.4, 4.6 свидетельствуют о том, что наличие таких ограничений хоть и существенно улучшает адекватность получаемого решения, все же не вполне соответствуют практике эксплуатации различного оборудования. Кроме того, задача планирования использования ресурсов сама по себе является достаточно сложной.

Другой существенный недочет рассматриваемой компьютерно-интегрированной системы управления теплоснабжением заключается в ее значительной требовательности к вычислительным ресурсам. Учитывая инерционность теплопотребителя, в котором переходные процессы могут длиться сутками, прогноз поведения системы на 4 ч вперед является

достаточно малым. И хотя сам управляющий алгоритм не содержит каких-либо вычислительных ограничений, поиск решения на больших интервалах потребует увеличения вычислительной мощности используемой ЭВМ.

4.2. Совершенствование математического и информационного обеспечения

4.2.1. Модификация целевой функции оптимизационной задачи. Учитывая вышесказанное, введем модификации составляющих целевой функции оптимизационной задачи $J(x;t)$. Остановимся на составляющей надежности, которая учитывала, вероятности отказов как внезапных, так и износных. Природа внезапных (случайных) отказов не позволяет управлять ими, поэтому для упрощения математического обеспечения их можно не учитывать. Износная составляющая на всем интервале долговечности (M) равна единице (см. рис. 3.3), но управление износом оборудования возможно. Поэтому необходимо перейти к новой характеристике, которая учитывает время реальной работы оборудования и количество его переключений.

С учетом нормирования составляющая надежности имеет вид

$$R_n(x;t) = \sqrt{\sum \alpha_i^2(x;t)},$$

где $\alpha_i(x;t) = \frac{t_i K_{oc} K_m + N_{sw} R_{sw}}{2t}$, t_i — время реальной работы i -й единицы оборудования, K_{oc} и K_m — поправочные коэффициенты на параметры окружающей среды и текущую рабочую мощность i -го оборудования, N_{sw} — суммарное количество переключений i -го оборудования, R_{sw} — время наработки на одно переключение, найденное из паспортных данных оборудования.

Нормированное значение составляющей качества найдем как разности максимальной (T_{\max}) и минимальной (T_{\min}) температур за интервал моделирования, так и отклонения средней температуры (T_s) от заданной (T_p):

$$Q_n = \sqrt{\left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2^\circ}\right)^2 + \left(\frac{T_s - T_p}{0,5^\circ}\right)^2}.$$

4.2.2. Модернизация информационного обеспечения. Кроме изменения математических моделей составляющих целевой функции, внесем некоторые изменения в процесс формирования популяции хромосом путем введения эталонных планов переключения оборудования. Каждый такой план состоит из множества идентичных циклов работы оборудования. Цикл работы оборудования представляет собой чередование одинаковых интервалов работы и остановки оборудования. Количество таких циклов от 1 до 100. Кроме того, добавим планы непрерывной работы и простоя оборудования на всем интервале моделирования.

Учитывая модификацию информационного и математического обеспечения, получаем новый вариант компьютерно-интегрированной системы управления теплоснабжением.

4.2.3. Оценка эффективности эксплуатации системы теплоснабжения с учетом модификации. Для оценки эффективности модифицированного информационного и математического обеспечения проведем вторую серию вычислительных экспериментов, аналогичную первой. Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 4.10—4.18. По результатам можно сделать следующие выводы. Количество кратковременных переключений оборудования резко уменьшилось. Появились характерные режимы работы оборудования как следствие введенных эталонных планов (см. рис. 4.12, 4.13, 4.15 и 4.18). Как и прежде, высокое качество процесса поддерживается менее инерционным объектом (ТНУ) (см. рис. 4.11, 4.16, 4.17). При этом следует отметить высокие стоимостные показатели для обеспечения качества. В случае ограничения на ресурс электроэнергии рис. 4.14 работа котлов не прекращается на всем интервале моделирования. Результаты второй группы экспериментов

приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты имитационного моделирования второй серии
экспериментов

№	Описание характера эксперимента управления	J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
1.	традиционным способом	0,402	1,144	0,68	0,49	0,76	48,8
2.	без ограничений на ресурсы	0,508	1,270	1,35	0,37	0,76	36,9
3.	при ограничении ресурса ТНУ	0,576	0,721	2,02	0,37	0,76	36,7
4.	при ограничении ресурса котлов и ТНУ	1,273	0,293	5,07	0,17	0,37	31,0
5.	при наличии лимита электроэнергии	1,068	0,882	4,10	0,29	0,76	53,1
6.	при ограничении ресурса ТНУ и наличии лимита газа	0,931	0,533	3,64	0,25	0,56	44,3
7.	при $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_q=0,9$	0,479	2,174	0,53	0,44	0,76	78,6
8.	при $w_q=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$	0,275	0,167	6,98	0,02	0,21	1,78
9.	при соотношении цен электроэнергии и газа, равном 20:1	0,503	1,285	1,31	0,35	0,76	62,8

В экспериментах с 1-го по 6-й весовые коэффициенты были равными $w_r=w_s=w_e=w_q=0,25$.

Анализ результатов моделирования доказал, что система управления в зависимости от ограничений (эксперименты 2—6) адаптирует соответствующим образом свою стратегию использования имеющихся ресурсов. Кроме того, изменением значений весовых коэффициентов (эксперименты 7—8) был определен приоритет одного из технико-экономических показателей целевой функции. Так, при приоритете показателя качества ($w_q=0,9$) было получено значение $J(x;t)=0,479$, но суммарные затраты имеют наибольшее значение $S=76,8$. В то же время при приоритете показателя надежности ($w_r=0,9$) были получены значения $J(x;t)=0,275$ та $S=1,78$.

Обобщение результатов позволило сделать следующие выводы. Модифицированное математическое и информационное обеспечение уменьшило время вычисления оптимального плана до 300 с и улучшило результаты с точки зрения качества и количества переключений оборудования, но не позволило существенно увеличить время прогнозирования. Следует отметить, что значение целевой функции таблиц первой и второй серии экспериментов нельзя сопоставлять между собой по причине существенного изменения составляющих.

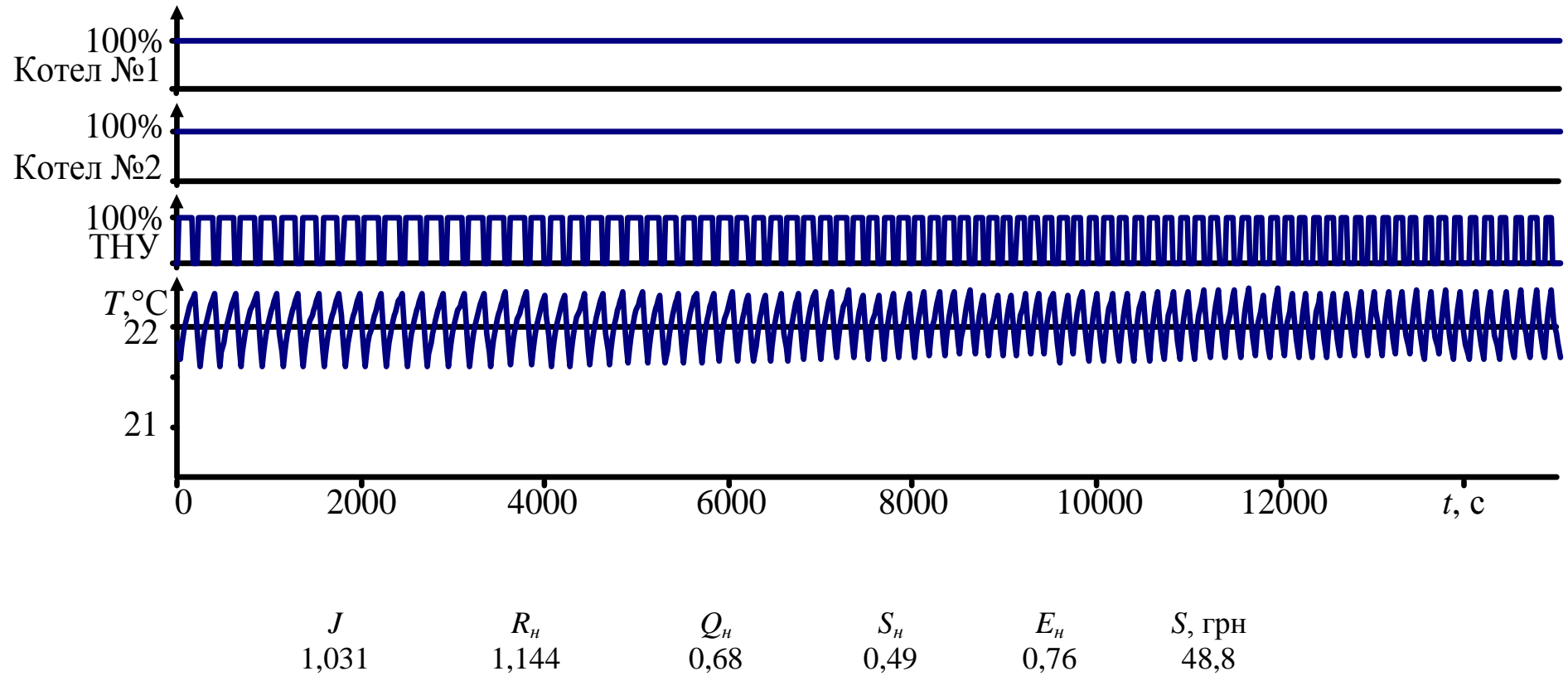


Рис. 4.10. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при управлении традиционным способом

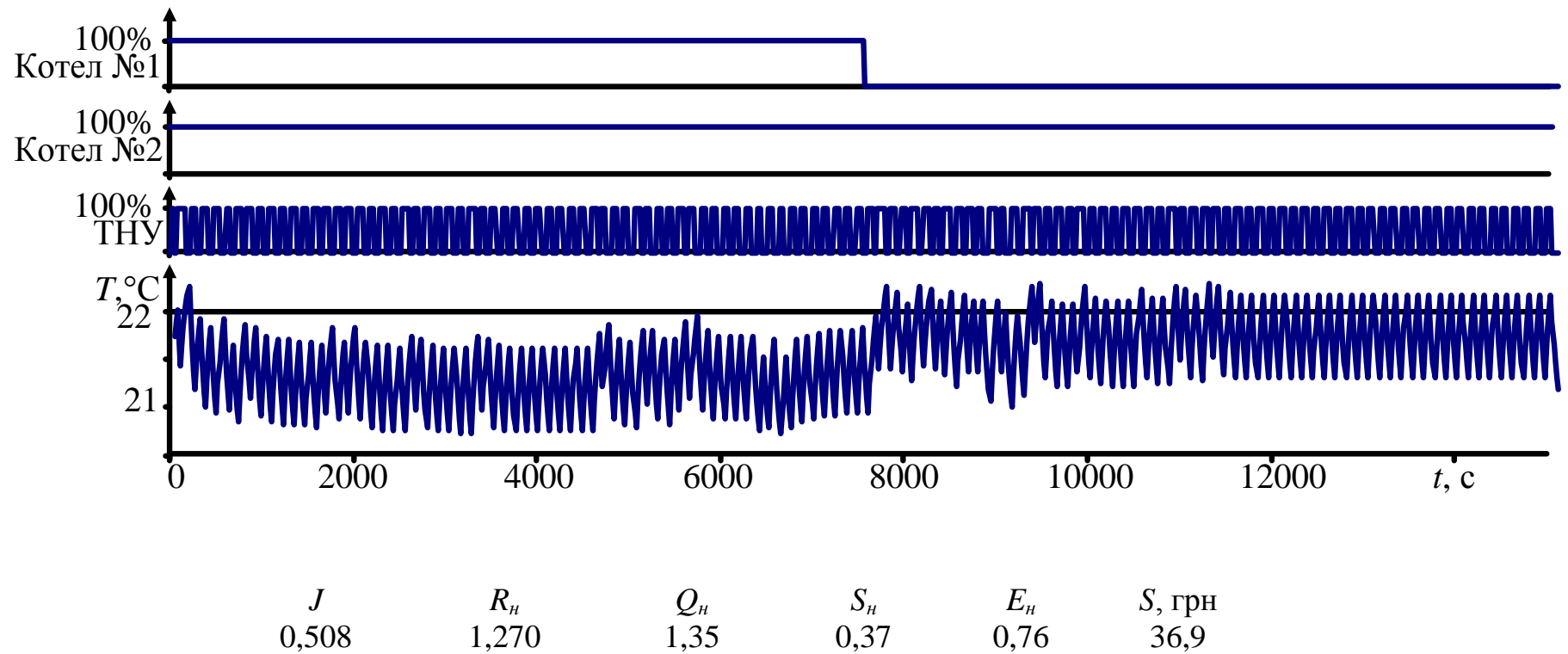
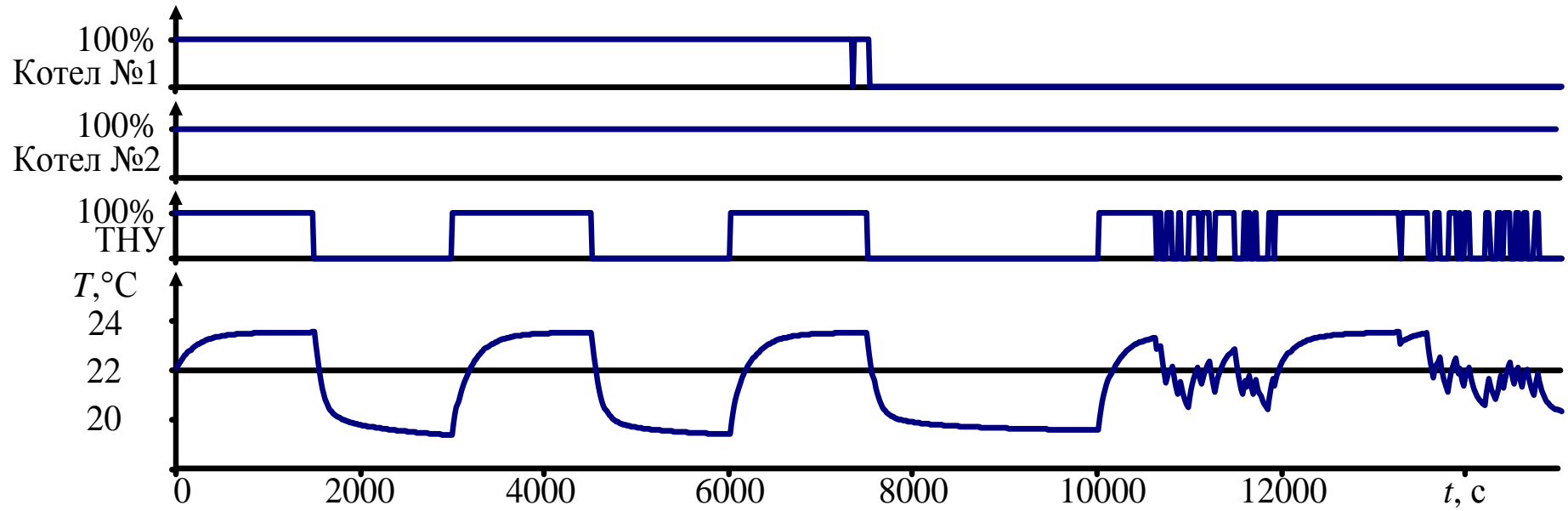


Рис. 4.11 Результат моделирования работы системы теплоснабжения с учетом модификации составляющих целевой функции без ограничений



J	R_H	Q_H	S_H	E_H	S , грн
0,576	0,721	2,02	0,37	0,76	36,7

Рис. 4.12. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса ТНУ с учетом модификации составляющих целевой функции

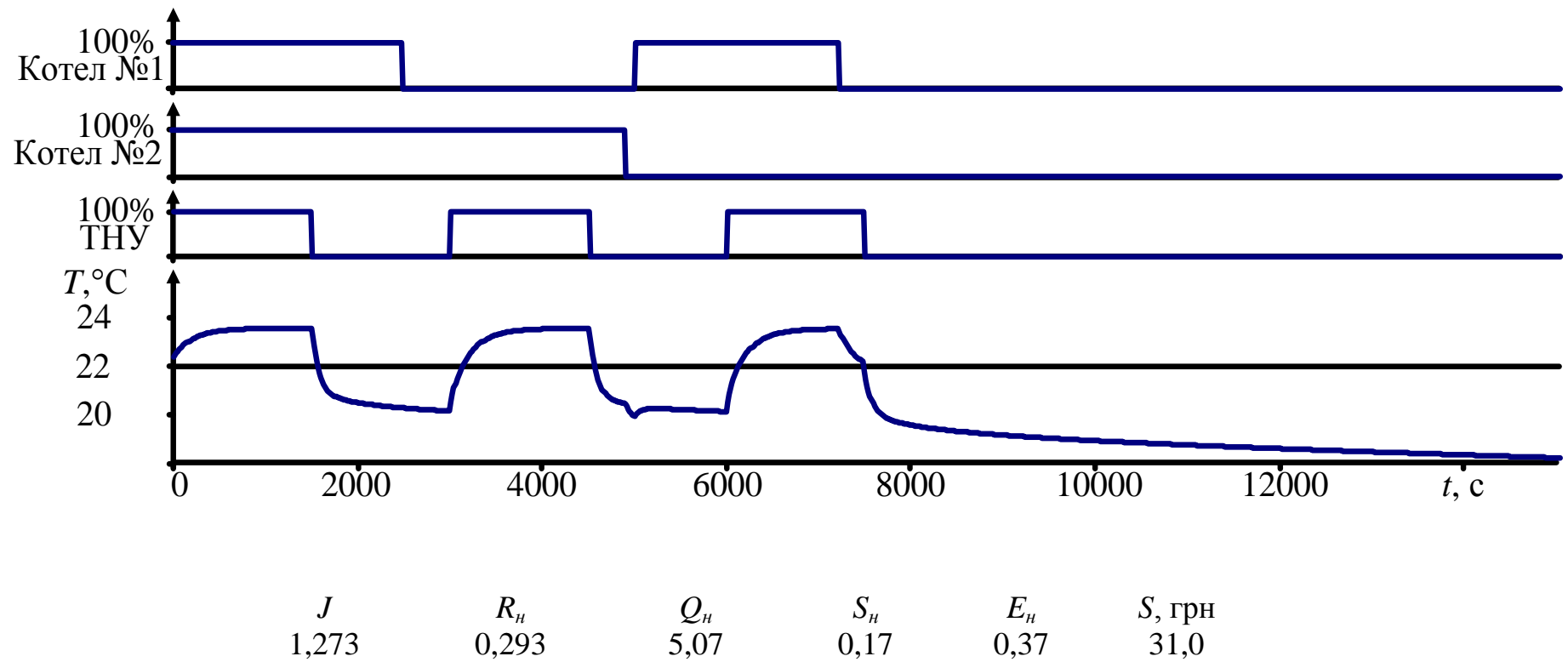
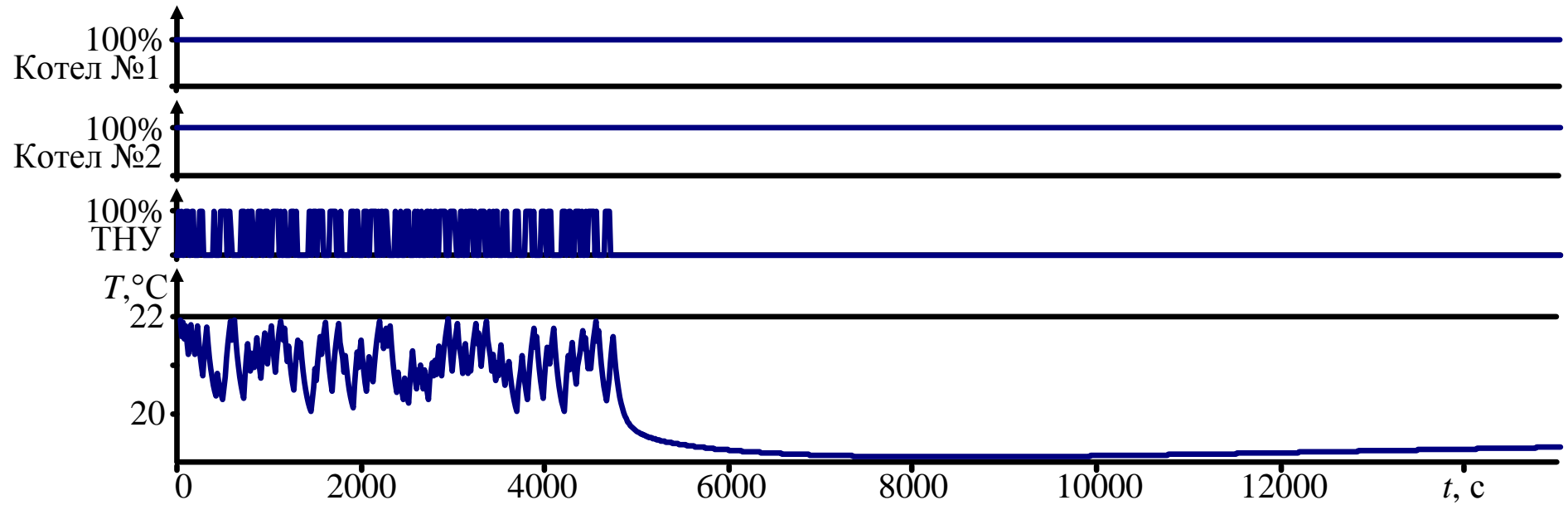
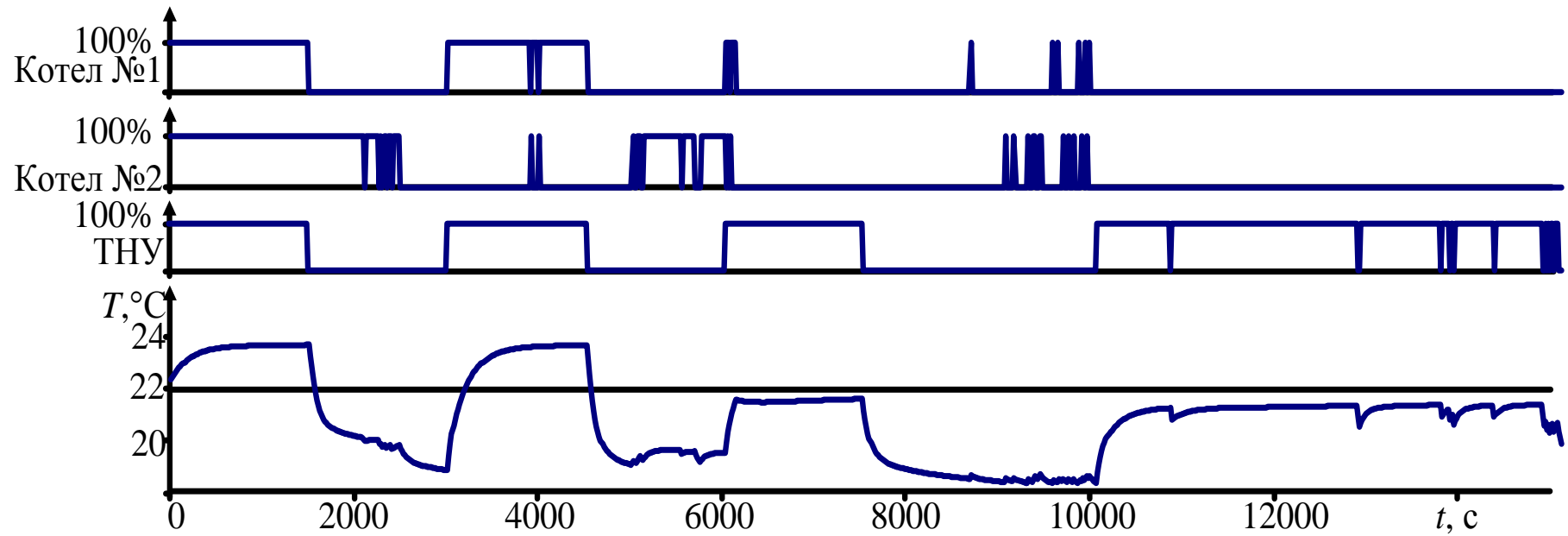


Рис. 4.13. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса котлов и ТНУ с учетом модификации составляющих целевой функции



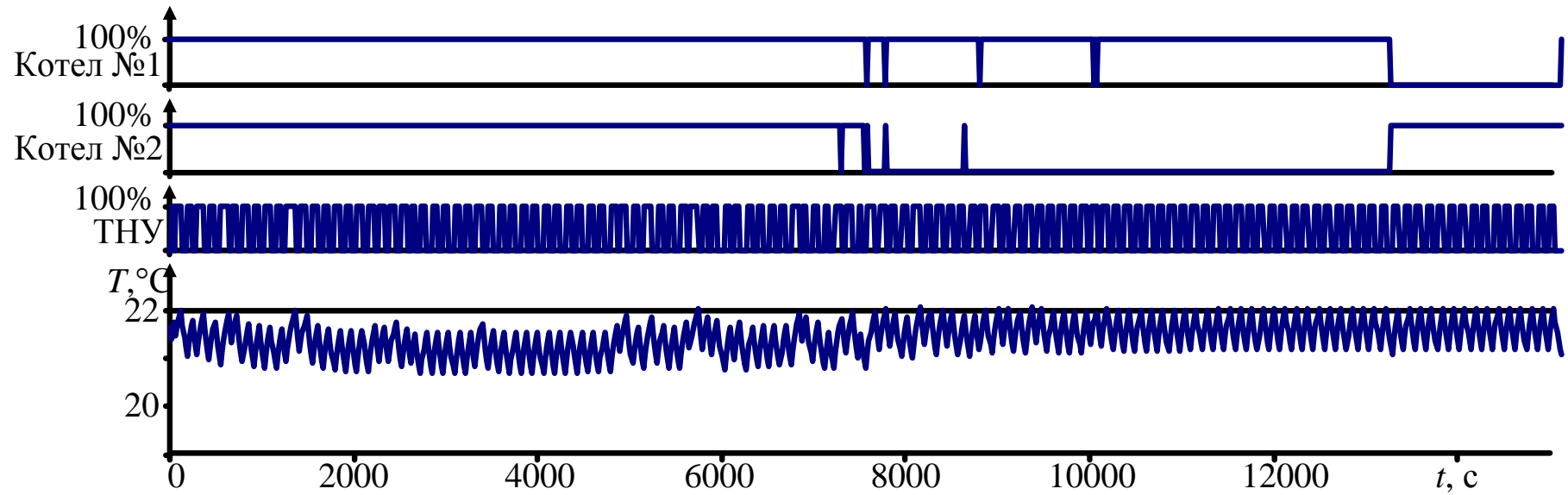
J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
1,068	0,882	4,10	0,29	0,76	53,1

Рис. 4.14. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при наличии лимита электроэнергии с учетом модификации составляющих целевой функции



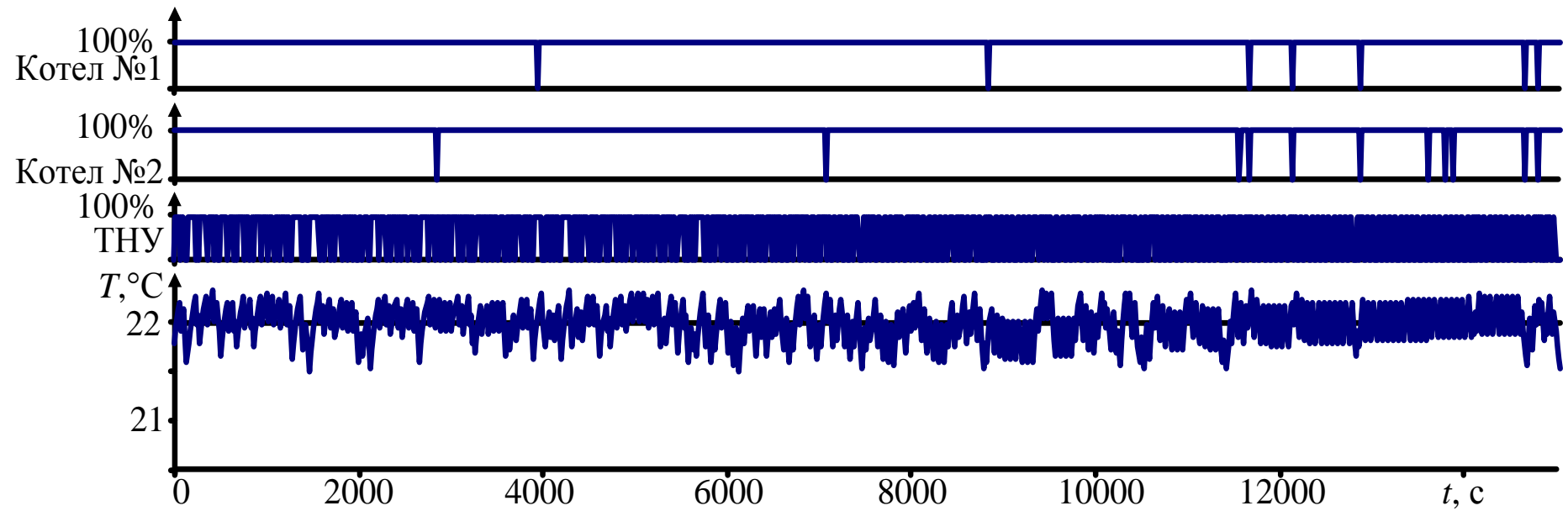
J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
0,931	0,533	3,64	0,25	0,56	44,3

Рис. 4.15. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса ТНУ и наличии лимита газа с учетом модификации составляющих целевой функции



J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
0,503	1,284	1,31	0,35	0,76	62,7

Рис. 4.16. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при соотношении цен э/э и газа, равном 20:1 с учетом модификации составляющих целевой функции



J	R_H	Q_H	S_H	E_H	S , грн
0,479	2,174	0,53	0,44	0,76	78,6

Рис. 4.17. Результат моделирования при $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_q=0,9$ с учетом модификации составляющих целевой функции

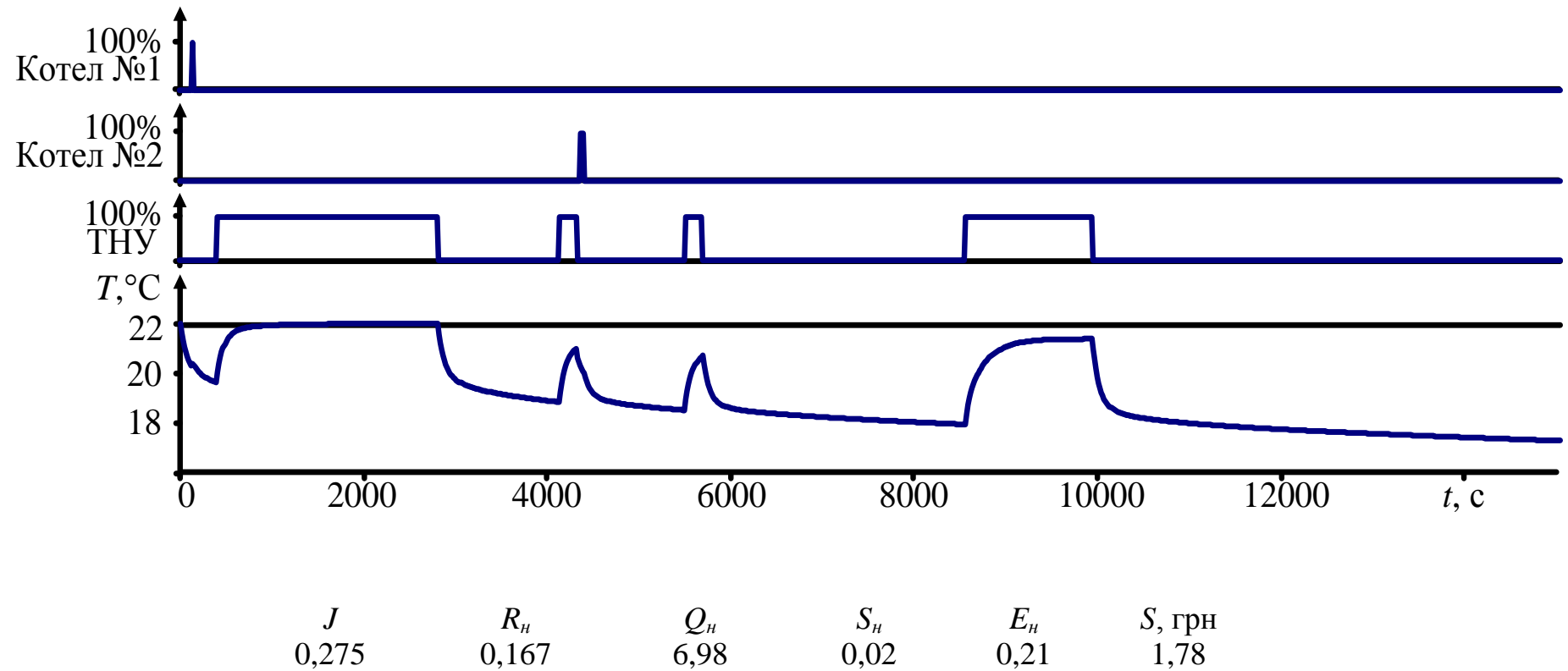


Рис. 4.18. Результат моделирования при $w_q=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$ с учетом модификации составляющих целевой функции

4.3. Управляющий алгоритм, основанный на изменении структуры системы и заданий регуляторов

4.3.1. Модификация управляющего алгоритма. Предыдущие два варианта информационного обеспечения были основаны на использовании генетического алгоритма для поиска оптимального плана переключения оборудования.

В рассматриваемом управляющем алгоритме будет реализован принципиально другой подход. Теперь управление будет осуществляться не только путем включения/выключения оборудования, а и путем изменения заданий регуляторов [69].

В основу работы системы теплоснабжения был положен следующий алгоритм переключения оборудования.

1. Если средняя температура на поверхности пола ниже минимально допустимой T_{\min}^K и оба котла выключены, то необходимо включить котел с наименьшей наработкой.

2. Если средняя температура на поверхности пола на $0,5$ °C ниже минимально допустимой T_{\min}^K , то необходимо включить оба котла.

3. Если средняя температура на поверхности пола выше максимально допустимой T_{\max}^K и оба котла включены, то необходимо включить котел с наибольшей наработкой.

4. Если средняя температура на поверхности пола на $0,5$ °C выше максимально допустимой T_{\max}^K , то необходимо выключить оба котла.

5. Если температура внутри помещения ниже минимально допустимой T_{\min}^{THU} , то необходимо включить ТНУ.

6. Если температура внутри помещения выше максимально допустимой T_{\max}^{THU} , то необходимо выключить ТНУ.

Суть управления заключалась в изменении во времени величин T_{\min}^K , T_{\max}^K , T_{\min}^{THU} и T_{\max}^{THU} таким образом, чтобы в итоге получить оптимальное

решение с точки зрения выбранного критерия.

Для этого была модифицирована процедура поиска решения с использованием генетического алгоритма. Теперь один ген представлял собой не код структуры системы теплоснабжения, а четыре числа, определяющие величины заданий регуляторов T_{\min}^K , T_{\max}^K , T_{\min}^{THV} , T_{\max}^{THV} . Было принято, что в течение одного часа задания регуляторов не меняются. Таким образом, один ген соответствовал одному часу работы системы управления, а вся хромосома — некоторому интервалу моделирования с шагом $\Delta\tau = 1$ ч. Моделирование работы системы теплоснабжения по-прежнему осуществлялось с шагом 15 с.

4.3.2. Оценка эффективности модифицированного информационного обеспечения. Для оценки эффективности модифицированного информационного и математического обеспечения проведем третью серию вычислительных экспериментов, аналогичную первой и второй. На рис. 4.19 приведены результаты имитационного моделирования работы системы теплоснабжения для случая, когда управление уставками не осуществлялось. Интервал моделирования был выбран равным 120 ч. Соответственно на рис. 4.20 приведены результаты моделирования для случая, когда осуществлялось управление заданиями регуляторов. Здесь и далее результаты представляют собой временные диаграммы переключения котлов и ТНУ, график изменения температуры воздуха внутри помещения, график изменения средней температуры воздуха, график изменения величин T_{\min}^K , T_{\max}^K и график изменения величин T_{\min}^{THV} , T_{\max}^{THV} . Также приводятся нормированные значения составляющих оптимального критерия управления, абсолютные затраты на первичные ресурсы S и значение целевой функции $J(x;t)$ на интервале моделирования.

Процесс формирования плана переключения оборудования, представленного на рис. 4.21, занял ~ 4 ч. В то же время решение, ограниченное интервалом в 24 ч, в среднем получалось за 3-5 мин.

Далее на рис. 4.21-4.27 приведены результаты моделирования для условий, сходных с экспериментами, результаты которых представлены на рис. 4.2-4.9, но с использованием рассматриваемого управляющего алгоритма. Все решения были получены для интервала в 24 ч.

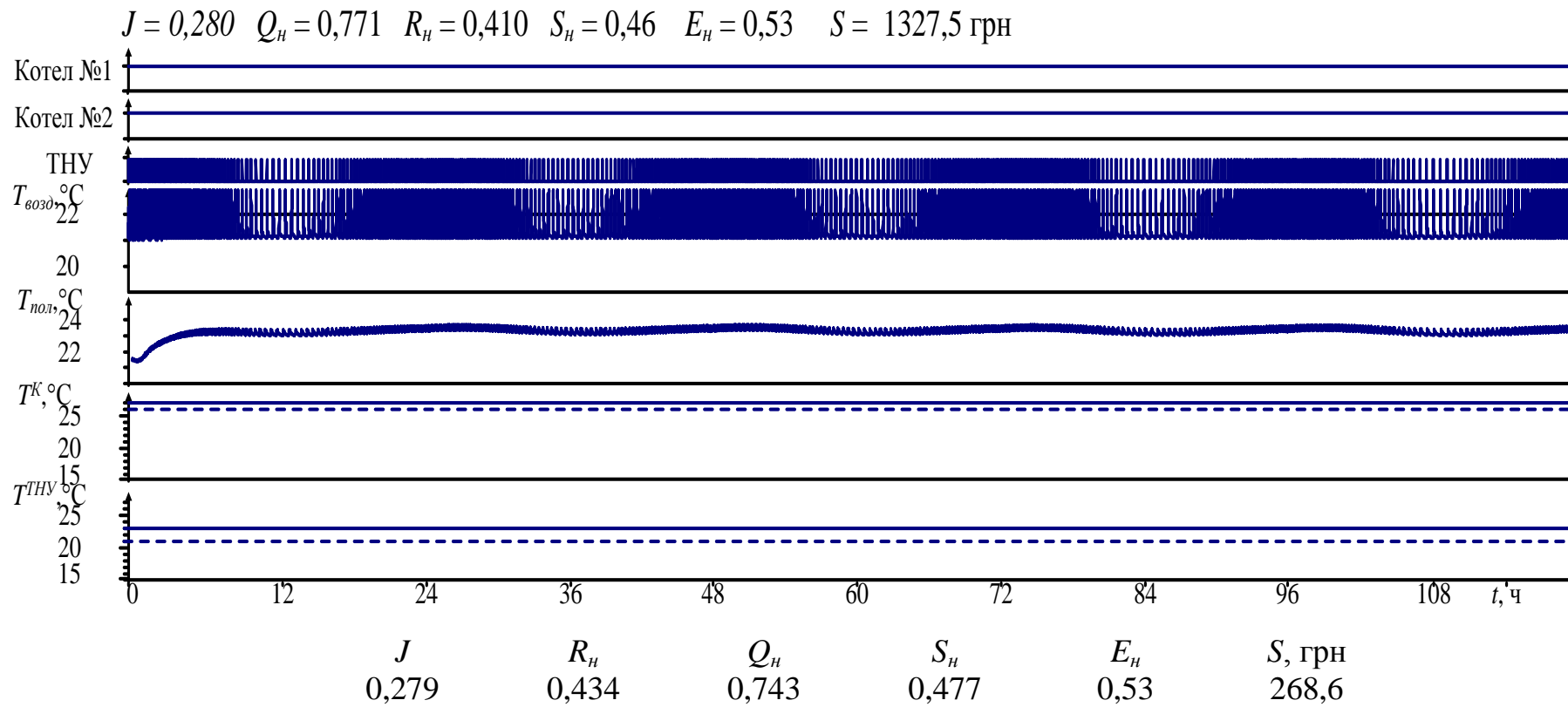
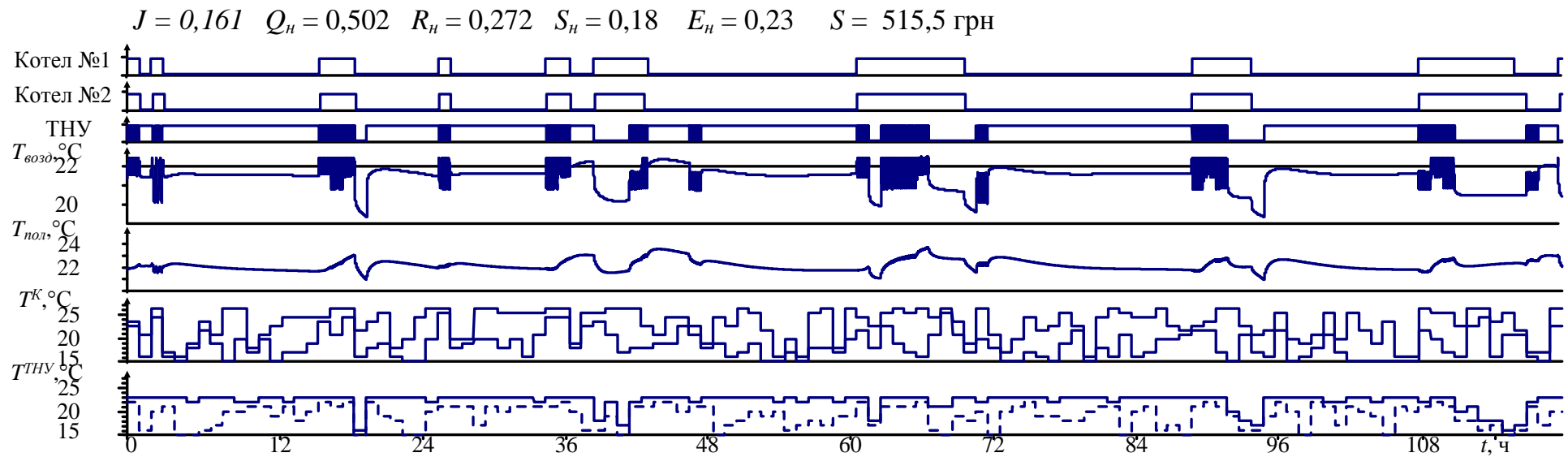


Рис. 4.19. Результат моделирования работы системы теплоснабжения без управления уставками



J	R_H	Q_H	S_H	E_H	$S, \text{ грн}$
0,106	0,213	0,316	0,097	0,15	56,2

Рис. 4.20. Результат моделирования работы системы теплоснабжения с управлением уставками без ограничений на ресурсы

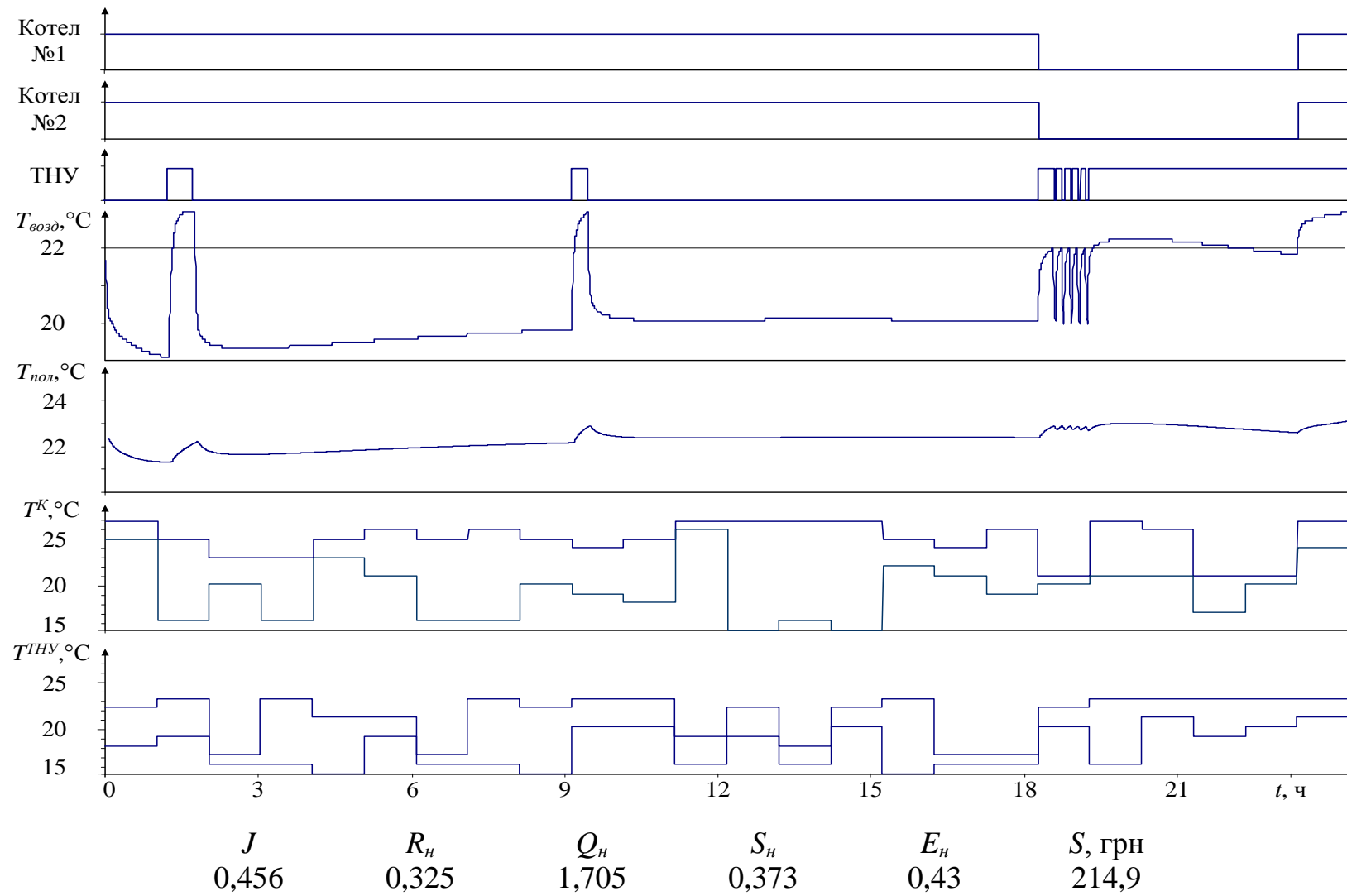


Рис. 4.21. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса ТНУ

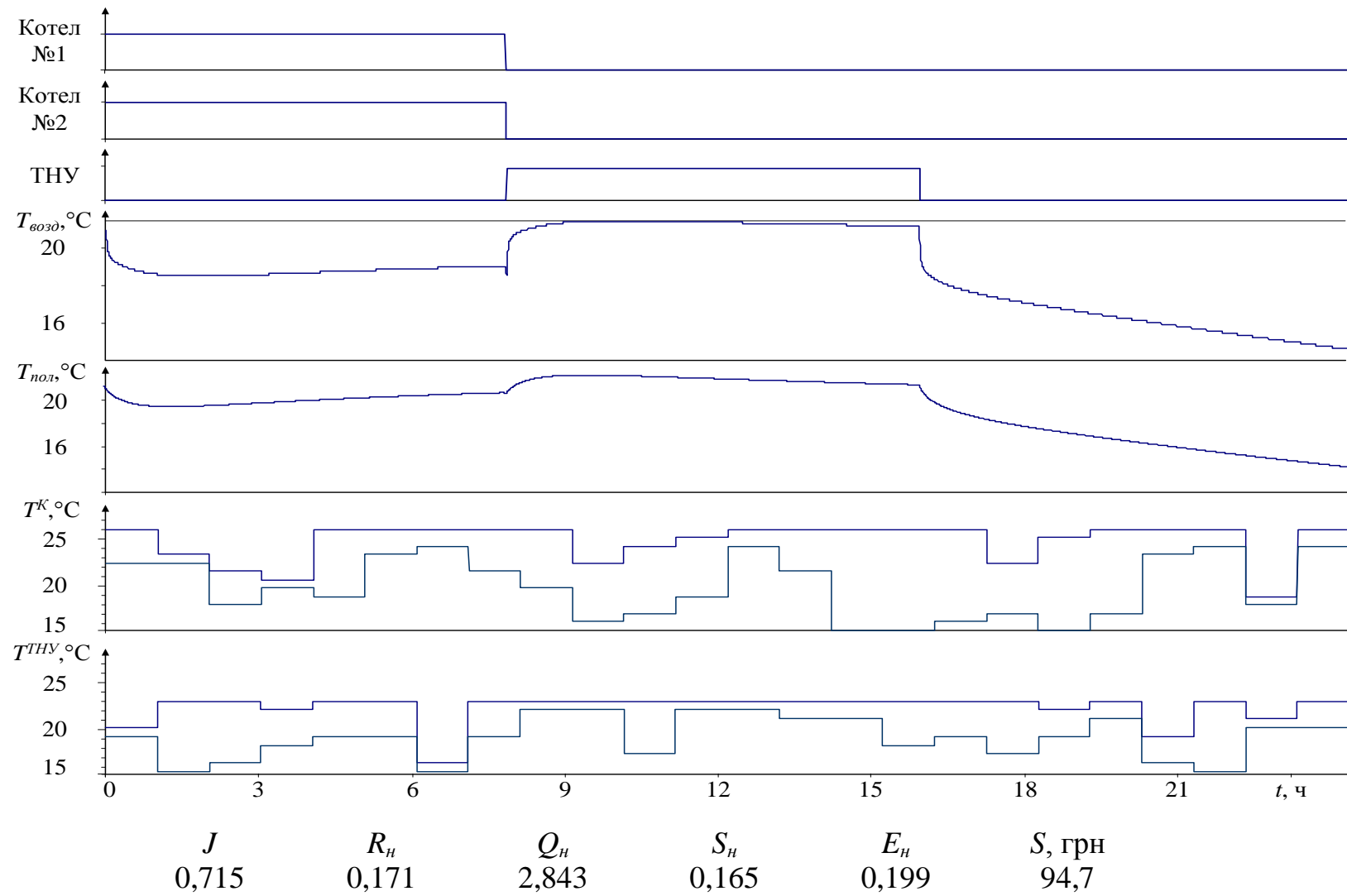


Рис. 4.22. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса котлов и ТНУ

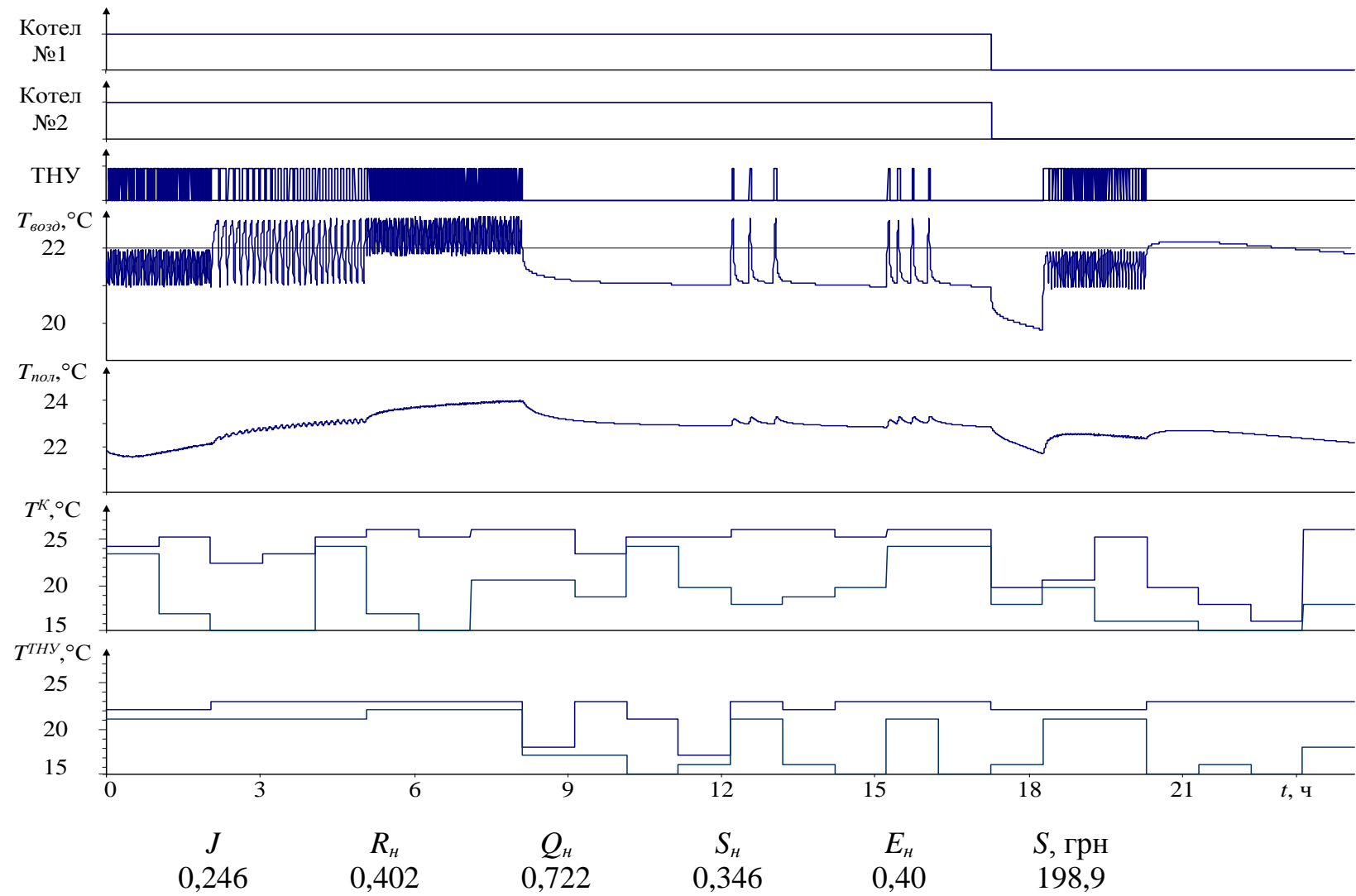


Рис. 4.23. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при наличии лимита электроэнергии

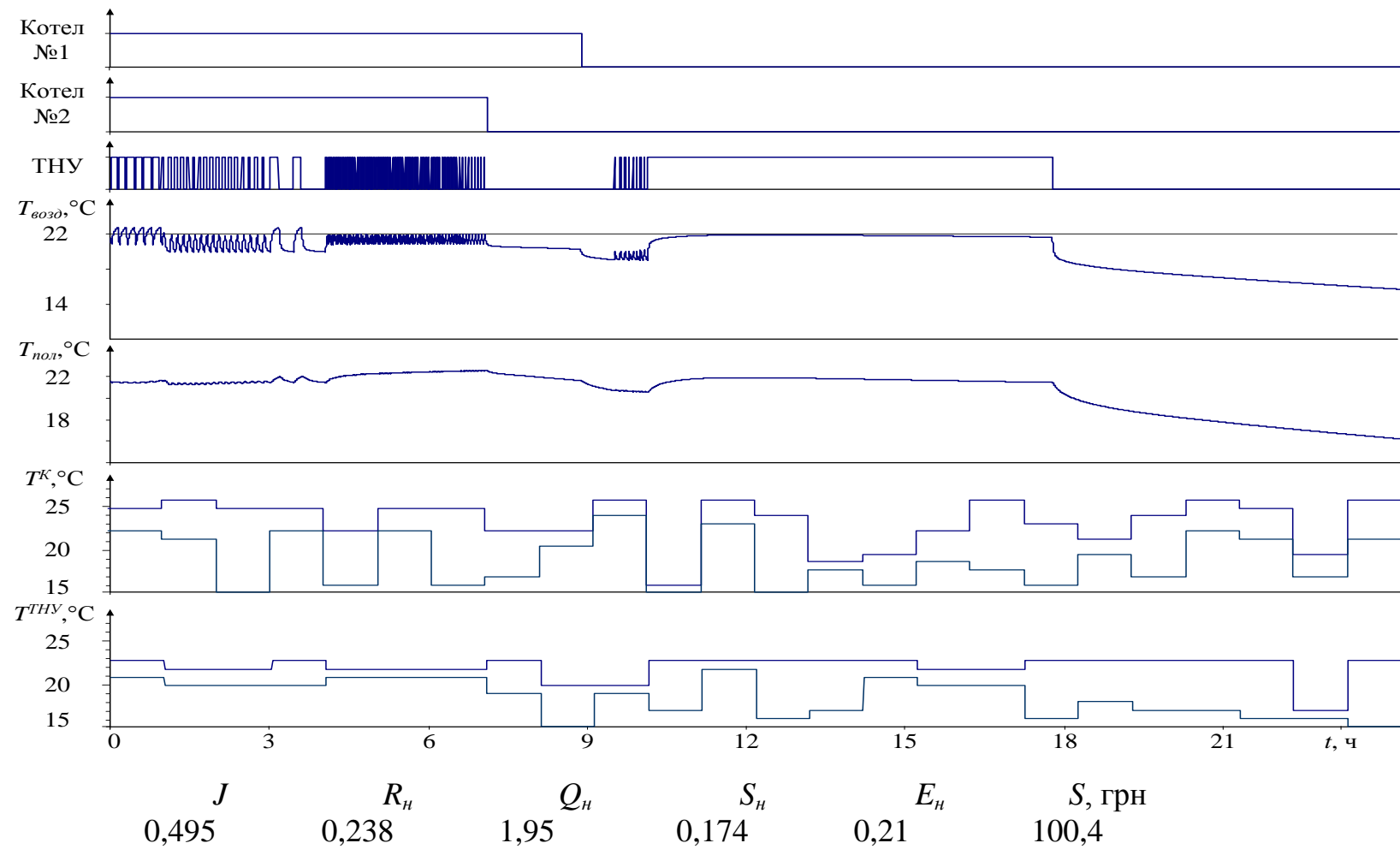


Рис. 4.24. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при ограничении ресурса ТНУ и наличии лимита газа

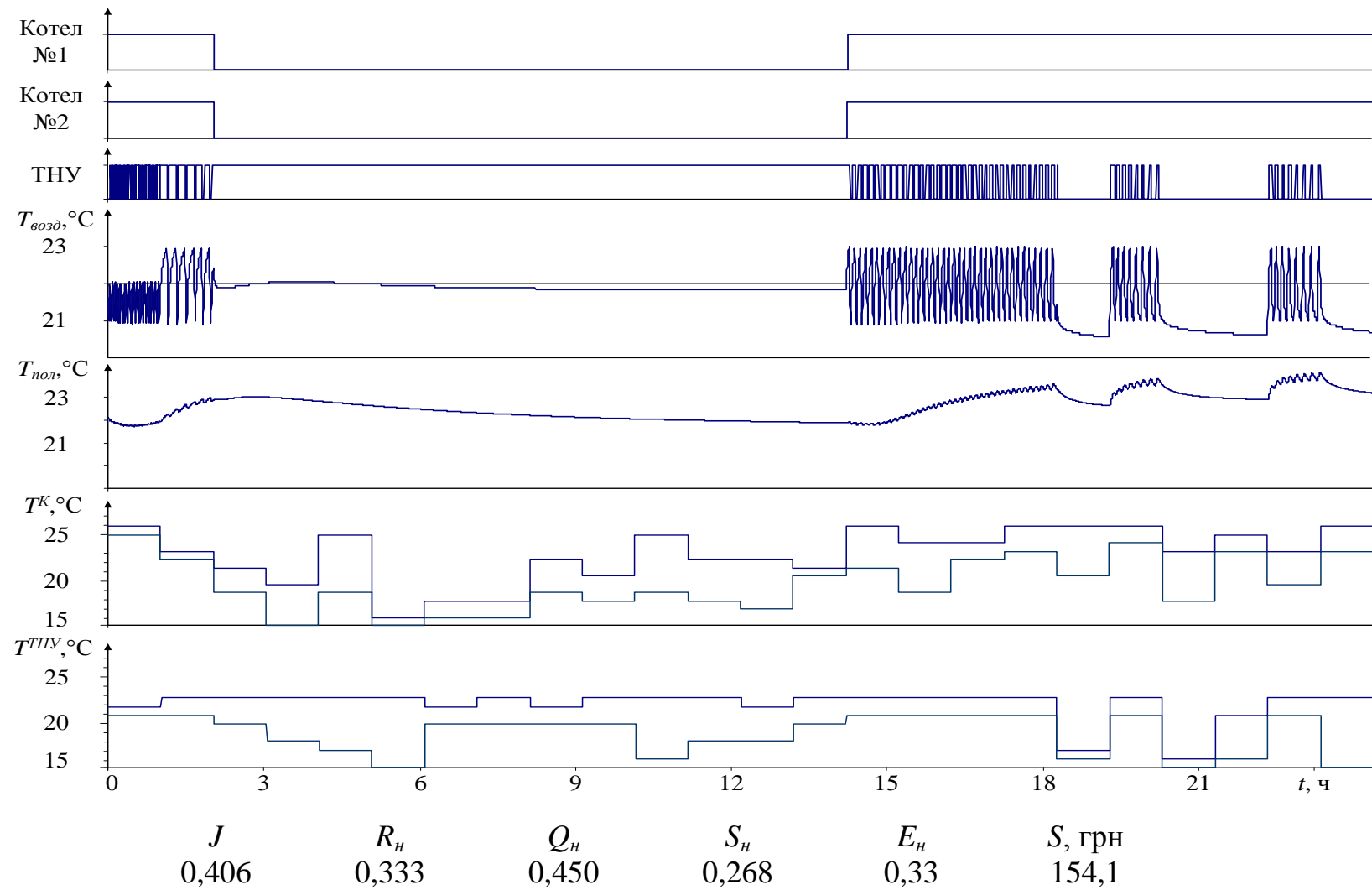


Рис. 4.25. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_q=0,9$

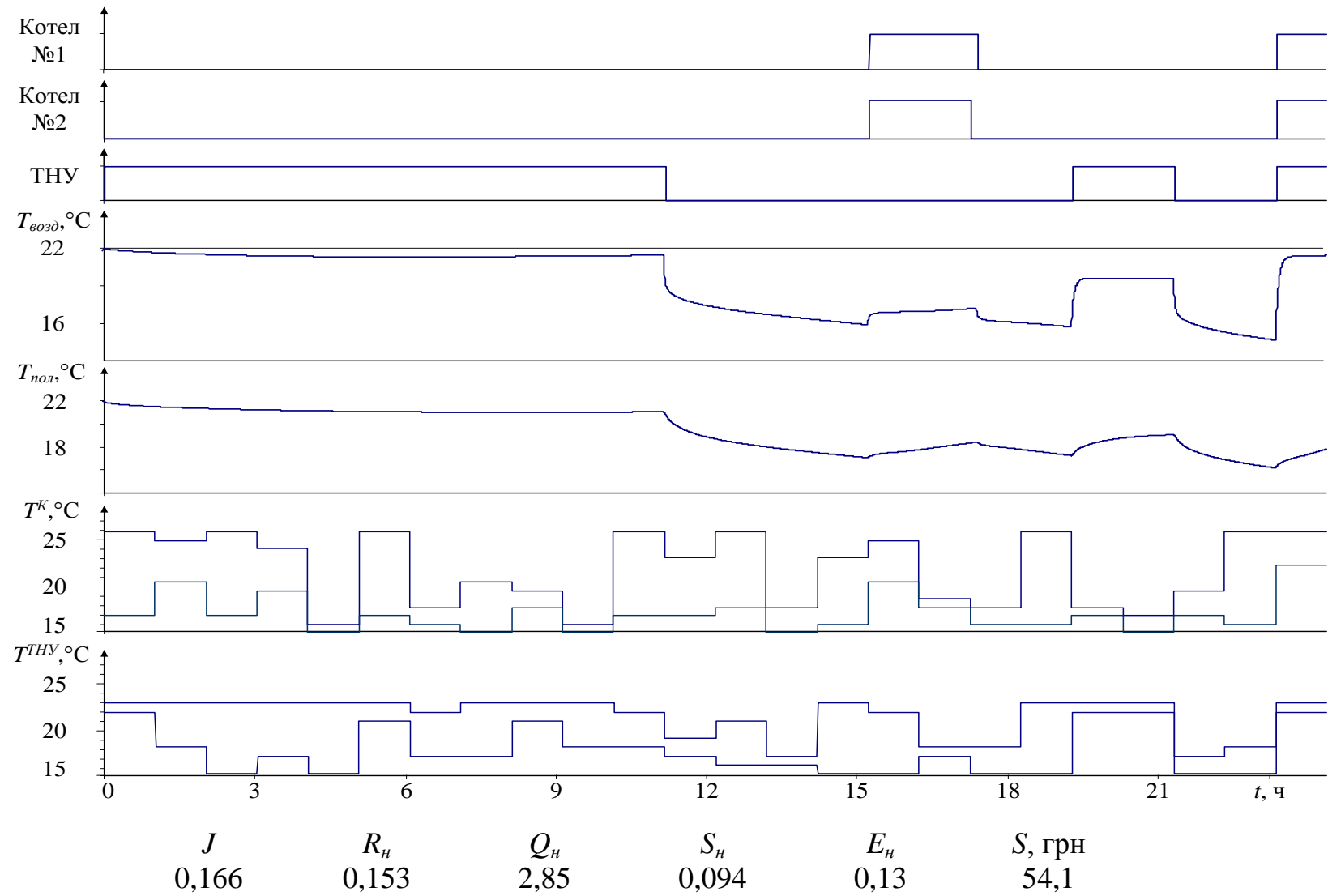


Рис. 4.26. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при $w_q=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$

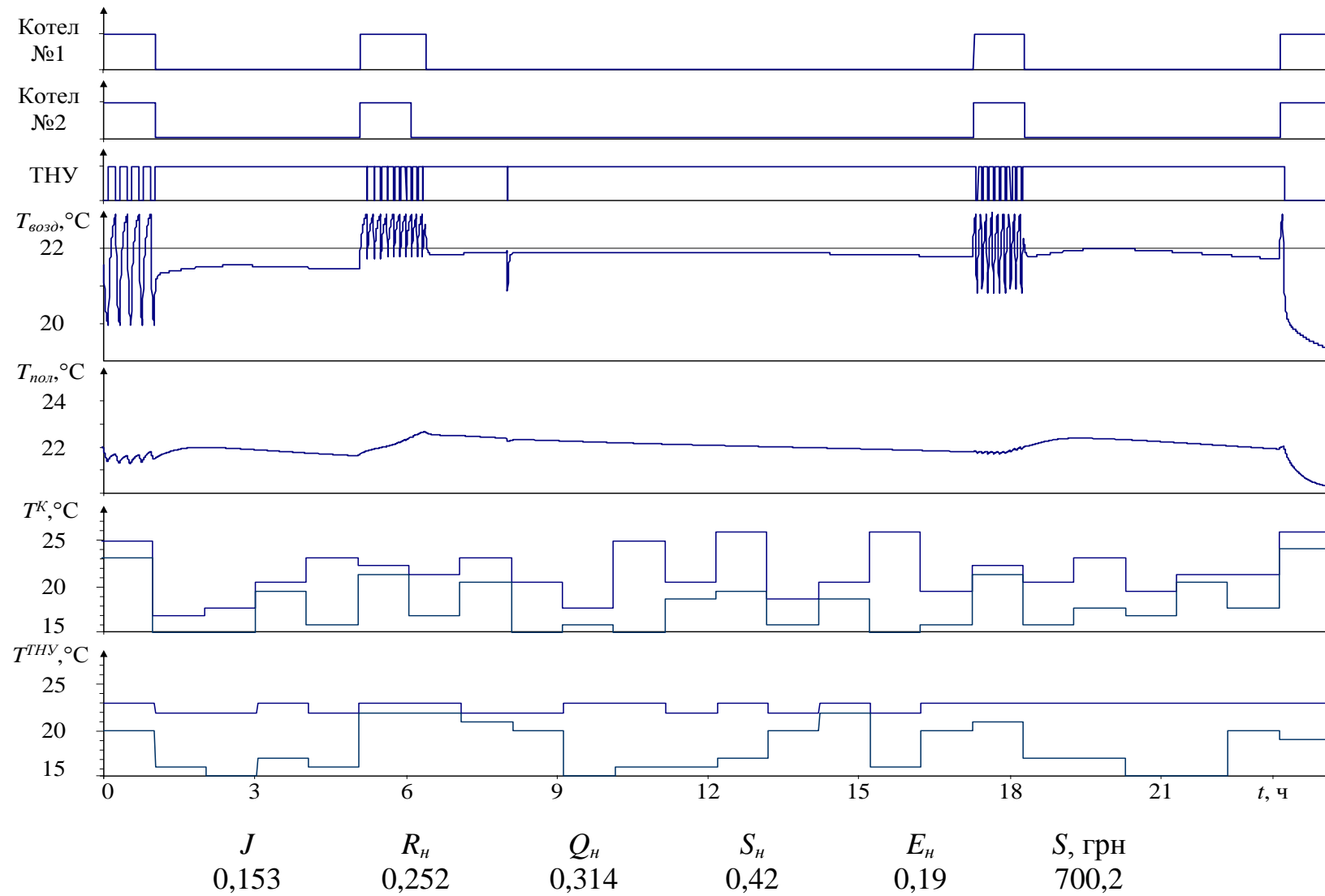


Рис. 4.27. Результат моделирования работы системы теплоснабжения при соотношении цен э/э и газа, равном 20:1

В эксперименте рис. 4.21 считалось, что наработка ТНУ в момент времени 18 ч не должна превышать 1 ч.

В эксперименте рис. 4.22 считалось, что ресурс ТНУ и котлов составляет 8 ч.

В эксперименте рис. 4.23 считалось, что ресурс электроэнергии ограничен 19,4 кВт*ч, что составляло примерно 1/3 от необходимого количества.

В эксперименте рис. 4.24 считалось, что ресурс электроэнергии ограничен 19,4 кВт*ч, а ресурс газа 4 кг, что также составляло примерно 1/3 от необходимого количества.

В эксперименте рис. 4.25 было принято, что весовые коэффициенты равны $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_q=0,9$.

В эксперименте рис. 4.26 было принято, что весовые коэффициенты равны $w_q=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$.

В эксперименте рис. 4.27 было принято соотношение цен э/э и газа, равное 20:1.

Обобщенные результаты имитационного моделирования работы системы теплоснабжения с использованием рассматриваемого варианта управляющего алгоритма приведены в табл. 4.3.

Следует отметить, что значение целевой функции таблиц второй и третьей серии экспериментов можно сопоставлять между собой, так как математическое обеспечение одинаково. При сравнении абсолютных стоимостных затрат необходимо учитывать разные длительности интервалов моделирования. Во второй группе экспериментов — 15000 с, а в третьей — 86400 с. Сравнение значений целевой функции второй и третьей серий экспериментов показали, что значение $J(x;t)$ существенно уменьшилось, а это значит, что последний рассматриваемый алгоритм управления, основанный на одновременном изменении структуры и заданий регуляторов, показал свои однозначные преимущества во всем диапазоне экспериментов .

Результаты имитационного моделирования третьей серии
экспериментов

№	Описание характера эксперимента управления	J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
1.	традиционным способом	0,279	0,434	0,743	0,477	0,53	268,6
2.	без ограничений на ресурсы	0,106	0,213	0,316	0,097	0,15	56,2
3.	при ограничении ресурса ТНУ	0,456	0,325	1,705	0,373	0,43	214,9
4.	при ограничении ресурса котлов и ТНУ	0,715	0,171	2,843	0,165	0,199	94,7
5.	при наличии лимита электроэнергии	0,246	0,402	0,722	0,346	0,40	198,9
6.	при ограничении ресурса ТНУ и наличии лимита газа	0,495	0,238	1,95	0,174	0,21	100,4
7.	при $w_r=w_s=w_e=0,033$, $w_g=0,9$	0,166	0,153	2,85	0,094	0,13	54,1
8.	при $w_g=w_s=w_e=0,033$, $w_r=0,9$	0,153	0,252	0,314	0,42	0,19	700,2
9.	при соотношении цен электроэнергии и газа равном 20:1	0,406	0,333	0,450	0,268	0,33	154,1

Полученные результаты демонстрируют чувствительность системы к изменению как ограничений на ресурсы, так и значений весовых коэффициентов. Анализ полученных результатов показал, что модифицированный алгоритм управления полностью удовлетворяет требованиям инженерной практики. В отличие от предыдущего варианта управления интервал моделирования составил 24 ч.

В результате проведенных исследований доказана возможность достижения оптимальных параметров технологического процесса в условиях ограничений на ресурсы и изменение их стоимости, что позволяет реализовать высокую живучесть технической системы за счет снижения качества выходных параметров системы при условии дефицита ресурсов для нормального режима работы.

4.4. Выводы

1. Показана возможность достижения оптимальных параметров при теплоснабжении в условиях ограничений на ресурсы и изменяющейся их стоимости, что позволяет реализовать высокую живучесть технической системы даже при условии нехватки ресурсов для номинального режима работы, за счет снижения требований к качеству продукта.

2. Разработанный алгоритм поиска решения позволяет получить оптимальный аналитический план воздействия на объект управления до переключения технологического оборудования, который не всегда технически возможно реализовать из-за высокой частоты переключения режимов работы оборудования, что связано с отсутствием ограничений на ресурс надежности.

3. Показано, что разработанное информационное и математическое обеспечение позволяет автоматизированной системе управления адаптироваться и тем самым изменить стратегию управления при введении ограничения на ресурсы и на весовые коэффициенты критерия управления.

4. Решение задачи математического вычисления ограничения на ресурс надежности не представляется возможным без решения задачи стратегического планирования распределения ресурсов.

5. Разработан модифицированный вариант управляющего алгоритма, который гарантированно технически реализуем и чувствителен к ограничению на ресурсы и на весовые коэффициенты.

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа содержит полученные автором новые научно обоснованные результаты, состоящие в усовершенствованном информационном и математическом обеспечении, что позволило повысить эффективность КИСУ теплоснабжением за счет изменения текущей структуры объекта управления с использованием для этого оптимизационной задачи, целевая функция которой учитывает технико-экономические показатели системы каждого плана переключения оборудования.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Проведенный анализ направлений разработок в области автоматизации управления показал, что под оптимальным управлением понимается управление структурой регулятора и оптимизация его текущих настроек. Анализ литературно-патентных источников показал, что задача управления изменением структуры технических средств известна и классифицирована, однако не обнаружено никаких вариантов алгоритмов управления структурой объекта.

2. Для проведения ООА специализированных технологических систем было предложено модифицировать процесс анализа заменой модели потока действий данных на технологические алгоритмы оборудования, под которыми понимается комплекс моделей, математического и информационного обеспечения, определяющих порядок проведения различных технологических регламентов, а также формализующий действия, выполняемые в том или ином состоянии.

3. Для исследования теплоэнергетических объектов с изменяемой структурой нашло дальнейшее развитие информационное обеспечение, заключающееся в разработке комплекса моделей системы теплоснабжения, использующего технико-экономические показатели, что позволило провести оценку эффективности текущей структуры объекта управления при ограничениях на ресурсы. Для моделирования работы системы

теплоснабжения с изменяемой структурой нашло дальнейшее развитие математическое обеспечение, заключающееся в разработке технологических алгоритмов, что позволило смоделировать значения параметров для исследования.

4. Введенная целевая функция оптимизационной задачи объединяет влияние таких факторов, как качество процесса поддержания заданной температуры, эффективность используемого оборудования, его надежность и стоимость ресурсов, что позволяет комплексно оценивать процесс функционирования системы на основе технико-экономических показателей.

5. Предложено информационное и математическое обеспечение КИСУ, с помощью которого реализуется управление изменения структуры объекта. Генетический алгоритм обеспечивает нахождение решения, близкого к оптимальному из бесконечного множества вариантов за приемлемый временной интервал. Результат такого решения зависит от ограничений на ресурсы, которые задаются либо вычисляются системой управления на базе информации о планируемом количестве и времени поступления ресурсов.

6. Определено влияние весовых коэффициентов для достижения оптимальной структуры при теплоснабжении в условиях ограничений на ресурсы и их изменяющейся стоимости. Это позволяет реализовать высокую живучесть технической системы за счет снижения качества выходных параметров системы при условии нехватки ресурсов для нормального режима работы. Разработанное информационное и математическое обеспечение позволяет КИСУ адаптироваться к возмущениям и изменять стратегию управления при введении ограничения на ресурсы.

7. Разработанный алгоритм поиска решения позволяет получить оптимальный аналитический план переключения технологического оборудования путем изменения как структуры теплогенерирующих средств, так и настроек регуляторов теплопередающих технических средств, что обеспечивает решение задачи управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Теплоэнергетика — кладёшь финансовых ресурсов [Электронный ресурс] / А. Долинский, В. Носач // Зеркало недели. — 2000. — № 22. — Режим доступа : <http://zn.ua/articles/20788>.
2. Наукове та інженерне забезпечення розвитку енергетики [Электронный ресурс] / Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України. — Режим доступа : <http://www.ntseu.net.ua/ua/work/pr/169-2011-01-12>.
3. Проблемы энергетики и их решение [Электронный ресурс] // Энергосбережение в Украине. — Режим доступа : <http://max-energy-saving.info/index.php?pg=referat/120.html>.
4. Проблема современной коммунальной энергетики: котельные, расположенные в подвалах жилых и общественных зданий. Целесообразность, перспективы, технические решения [Электронный ресурс] // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» / В. В. Скороход // Эско. — 2011. — №2. — Режим доступа : http://esco-ecosys.narod.ru/2011_2/art079.htm.
5. Чернявский Г. И. Адаптивное управление техническим состоянием и безопасностью эксплуатации сложных технических систем в условиях ресурсных ограничений / Г. И. Чернявский // Энергобезопасность в документах и фактах. — 2006. — № 2. — С. 5 — 7.
6. Северцев Н. А. Надёжность сложных систем в эксплуатации и отработке / Н. А. Северцев. — М. : Высш. Шк., 1989. — 432 с.
7. Браун Д. Б. Анализ и разработка систем обеспечения техники безопасности: системный подход в технике безопасности / Б. Д. Браун: пер. с англ. А. Н. Жовинского. — М. : — Машиностроение, 1979. — 360 с.
8. Надёжность, живучесть, техногенная безопасность, эффективность [Электронный ресурс] / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова — Режим доступа : <http://www.ipu65.narod.ru/Nadezhnost.htm>.

9. Сотсков Б. С. Основы расчёта и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств / Б. С. Сотсков. — М.: Госэнергоиздат, 1953. — 544 с.
10. Сотсков Б. С. Электрические контакты / Б. С. Сотсков. — М. : Госэнергоиздат, 1956. — 544 с.
11. Шавыкин Н. А. Методика оценки безотказности технических средств / Н. А. Шавыкин, Б. П. Петрухин, Е. М. Жидомирова, М. : ИПУ РАН, 1998. — 80 с.
12. Труды ИФАК, Изд. АН СССР, 1961, т. 3
13. Райкин А. Л. Элементы теории надёжности для проектирования технических систем / А. Л. Райкин — М. : Сов. радио, 1967. — 264 с.
14. Доманицкий С. М. Построение надёжных логических устройств / С. М. Доманицкий. — М.: Энергия, 1971. — 278 с.
15. Шастова Г. А. Выбор и оптимизация структуры информационных систем / Г. А. Шастова, А. И. Коёкин. — М. : Энергия, 1972. — 256 с.
16. Лубков Н. В. О вычислении некоторых средних вероятностных характеристик систем управления / Н. В. Лубков // Автоматика и телемеханика. 1972. — №8.
17. Лубков Н. В. Логико-статистический метод надёжностного анализа сложных систем / Н. В. Лубков // Автоматика и телемеханика. 1976 — №4. — С. 10 — 13.
18. Волик Б. Г. Анализ влияния надёжности на экономическую эффективность АСУТП / Б. Г. Волик // Приборы и системы управления, 1976 — № 4. — С. 2 — 7//
19. Волик Б. Г. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Б. Г. Волик. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 295 с.
20. Теория управления: терминология / под ред. Б. Г. Волика // Сб. рекомендуемых терминов Комитета науч.-техн. терминологии АН.— М. : Наука, 1988. — Вып. 107: — 54 с.
21. Волкова А. Ф. Автоматический поиск неисправностей в ЦВМ

/ А. Ф. Волкова, В. А. Ведешенкова, В. Д. Зенкина. — М. : Сов. радио, 1968. — 150 с.

22. Основы технической диагностики: в 2-х книгах. / В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян, В. Ф. Халчев / под ред. П. П. Пархоменко // Энергия. — М. , 1976. — Кн.1: Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. — 464 с.

23. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабакова.— М. : Радио и связь, 1989. — 208 с.

24. Волик Б. Г. О концепциях техногенной безопасности / Б. Г. Волик // Автоматика и телемеханика. — 1998. — №2.— С. 165 — 170.

25. Волик Б. Г. Проблемы анализа техногенной безопасности // Автоматика и телемеханика. 1998. — №12. — С. 174 — 180.

26. Основные проблемы теплоэнергетики [Электронный ресурс] / ООО НПП «Испытатель». — Режим доступа: <http://gorprom.info/teplo.html>.

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

28. Майсян И. Г. Объектно-ориентированный анализ привода СУМП-100 МВ / И. Г. Майсян , М. В. Максимов // Автоматика. Автоматизация. —Электротехн. комплексы и системы. – 1998. – № 1. – С. 158 – 164.

29. Юревич С. П. Теория автоматического управления / С. П. Юревич. — СПб. : БХВ-Петербург, 2007. — 560 с.

30. Майсян И. Г. Построение программного обеспечения автоматизированных систем управления / И. Г. Майсян // Тр. ОНПУ. – 2001. – Вып. 4 (16). – С. 108 – 114.

31. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И. В. Максимей. — М. : Радио и связь, 1988. — 232 с.

32. Шлеер С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях : пер. с англ. / С. Шлеер, С.Меллор – К. : Диалектика, 1993. – 240 с.

33. Максимова О. Б. Критерий управления самоорганизующейся адаптивной системой обеспечения комфортной температуры / О. Б. Максимова, В. О. Давыдов, В. М. Тонконогий // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития `2011 : материалы междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 2011г. — О. : Черноморье, — 2011. — Т. 3 : сб. науч. тр. SWorld : Техн. науки. — С.41 — 45.

34. Давыдов В. О. Объектно-ориентированная модель системы теплоснабжения с распределенной структурой теплотехнического оборудования / В. О. Давыдов, О. Б. Максимова. // Автоматика-2008 : тез. докл. XV міжнар. конф. з автомат. упр., 23-26 верес.. 2008 р. – О. : ОНМА, 2008. – Ч. 2. – С. 629 — 631.

35. Давыдов В. О. Анализ надежности ПО АСУТП / В. О. Давыдов, О. Б. Максимова, А. А. Шевчук // Холод. техніка і технологія. — О. 2011. — Вып. 6 (134). — С. 86 — 91.

36. Давыдов В. О. Имитационная модель объекта управления для системы управления надежностью / В. О. Давыдов, О. Б. Максимова // Тр. Одес. политехн. ун-та. — О., 2010. — Вып. 1 (33) — 2 (34). — С. 75 — 79.

37. Григорьев Б. А. Тепломассообмен: учеб. пособие / Б. А. Григорьев, Ф. Ф. Цветков. — М. : МЭИ, 2005. — 550 с.

38. Галин Н. М. Тепломассообмен (в ядерной энергетике) / Н. М. Галин, П. Л. Кириллов. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 375 с.

39. Моисеенко М. А. Моделирование температурных полей в деталях дискового тормоза / М. А. Моисеенко, В. И. Сакало // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. — 2009. — № 2 (22). — С. 57 — 64.

40. Контроль трубопроводов [Электронный ресурс] / HARFANGVEO. — Режим доступа : http://www.harfangveo.ru/static/trubo_control.

41. Бабушкин Ю. В. Методы расчета вольт-амперных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок / Ю. В. Бабушкин, В. П. Зимин // Изв. Томск. политехн. ун-та. — 2006. — № 2. — С. 135 — 139.
42. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. — М. : Наука, 1985. — 280 с.
43. Исаченко В. П. Теплопередача: учебник для вузов / Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. — 4-е изд. перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1981. — 416 с.
44. 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.
45. Максимова О. Б. Імітаційна модель енергетичного обладнання / О. Б. Максимова, К. В. Беглов, Т. А. Цисельская // Розвиток наук. досліджень 2011: тез. доп. VI міжнар. наук.-практ. конф., Полтава, 28-30 листоп. 2011 р.— Полтава, 2011. —С. 47 – 51.
46. Максименко И. Н. Анализ возмущающих воздействий для исследования автоматизированных систем управления теплоснабжением / И. Н. Максименко, В. О. Давыдов, О. Б. Максимова // Холод. техніка і технологія. — О., 2006. — № 1 (99). — С. 89 — 92.
47. Максименко И. Н. Моделирование автоматизированных систем управления теплоснабжением / И. Н. Максименко, В. О. Давыдов, О. Б. Максимова // Стратегія якості у промисловості і освіті : тез. доп. IV міжнар. конф., 30 трав. - 6 черв. 2008 р., - Дніпропетровськ-Варна. — Волант-ТУ-Варна, 2008. – Т. 1. – С. 429 — 431.
48. Большевцев А. Д. Локальные критерии качества систем контроля и управления непрерывным производством / Большевцев А. Д., Быстрицкая Л. Б., Любимова Н. А. // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы. – 1999. – № 2. – С. 85 – 90.
49. Шинский Ф. Управление процессами по критериям экономии энергии. — М. : Мир, 1981.— 373 с.

50. Максимова О. Б. Методика расчета критериев эффективности распознающих систем / О. Б. Максимова, В. А. Болтенков, В. О. Давыдов // Холод. техніка і технологія. — О., 2003. — № 1 (81). — С. 83 — 86.

51. Давыдов В. О. Критерий оценки эффективности управления системами с переменной структурой / В. О. Давыдов, И. Н. Максименко, О. Б. Максимова // Тр. Одес. политехн. ун-та. — О., 2007. — Вып. 2 (28). — С. 149 — 154.

52. Максимова О. Б. Методика расчета критерия управления структурой сложных технических систем / О. Б. Максимова, В. О. Давыдов, В. М. Тонконогий // Вісник Сумськ. держ. ун-ту. Сер. Техніч. науки. — Суми, 2011. — № 3. — С. 19 — 23.

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

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

55. Базовский И. Надежность, теория и практика: пер. с англ. / И. Базовский. — М. : Мир, 1965. — 373 с.

56. Левин В. И. Логическая теория надежности сложных систем / В. И. Левин. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 129 с.

57. Задачи распределения ресурсов и составления рациона питания. Постановка задач [Электронный ресурс]. — Режим доступа : pppmetod1.narod.ru/postanovka_resurs_razion.doc.

58. Гасс С. Линейное программирование / С. Гасс. — М. , Физматгиз, 1961. — 303 с.

59. Gill P. E., Murray, W., Wright, M. H. Practical Optimization/ — London; N. Y. : Academic Press, 1981. (Рус. пер.: Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практ. оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М Райт —М. : Мир, 1985. — 509 с.)

60. Финкельштейн Ю. Ю. Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования / Ю. Ю. Финкельштейн. — М. : Наука, 1976. — 265 с.
61. Максименко И. Н. Разработка принципов круглогодичного управления установкой теплоснабжения на основе методов объектно-ориентированного анализа / И. Н. Максименко, Ю. К. Тодорцев // Вісник Одес. держ. акад. буд-ва та архіт. — Вип. 17. — 2005. — С. 251 — 253.
62. Производственные системы с искусственным интеллектом/ Р. А. Алиев, Н. М. Абдикеев, М. М. Шахназаров — М. : Радио и связь, 1990. — 264 с.
63. Нейроинформатика / А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Кирдин [и др.]. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние РАН, 1998. — 296 с.
64. Ежов А. А., Шумский С. А. Нейрокомпьютинг и его приложения в экономике и бизнесе / А. А. Ежов, С. А. Шумский. — М. : МИФИ, 1998. — 224 с.
65. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем : учеб. пособие по спец. ЭВМ и АСУ / Ю. М. Смирнов, Г. Н. Воробьев, Е.С. Потапов, В.В. Сюезев под ред. Смирнова Ю.М. — М. : Высш. шк., 1984. — 359 с.
66. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М. : Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
67. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; Пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М. : Горячая линия Телеком, 2006. — 452 с.
68. 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.
69. Максимова О. Б. Синтез усовершенствованного алгоритма

управления технологическим оборудованием / О. Б. Максимова, В. О. Давыдов // Информационные технологии и автоматизация — 2012: тез. докл. Всеукр. науч.-практ. конф., Одесса, 10-11 октября 2012 г./ ОНАПТ. — О., 2012.— С.70–71.

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

71. Фролов, В. Я. Квалиметрические методы оценки качества мехатронных систем / В. Я. Фролов, С. А. Драченко // Открытые информ. и компьютерн. интегрирован. технологии. — Х., 2009. — № 44. — С. 168 — 173.

72. Гребеников А. Г. Качество и сертификация промышленной продукции / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. Я. Фролов [и др.]. — Х. : ХАИ, 1998. — 396 с.

73. ДСТУ 2850 — 94.

74. Минин Б. А. Уровень качества / Б. А. Минин.— М. : Изд-во стандартов, 1989. — 184 с.

75. Острейковский В. А. Теория систем / В. А. Острейковский. — М. : Высш. шк., 1997. — 240 с.

76. Антонов А. В. Системный анализ / А. В. Антонов. — М. : Высш. шк., 2004. — 454 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Документы о внедрении



МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНА
АТОМНА
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА
КОМПАНІЯ**

№ 1285/26 від 29.01. 2013 р.

Україна, 01032, Київ, вул. Вєтрова, 3
Тел.: +38 044 206 97 57, факс: 277 78 83

На № _____ від _____ 201__ р.

Розрахунковий рахунок 26002100019275
у ПАТ «Укрєксімбанк» м. Київ,
МФО 322313, код ЗКПО 24584661

**Ректору ОНПУ
проф. Оборському Г.О.**

ДОВІДКА

про впровадження в тематиці ДП НАЕК «Енергоатом»
результатів дисертаційної роботи Максимової Оксани Борисівни
**“Удосконалення інформаційного та математичного забезпечення
для автоматизованого керування системою теплопостачання
зі змінною структурою”**

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Державне підприємство Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», впровадила наступні результати дисертаційної роботи Максимової Оксани Борисівни:

— методи та моделі оптимізації структури системи теплопостачання від енергоблоків з реактором ВВЕР-1000 для підвищення економічної ефективності, при удосконаленні інформаційного та математичного забезпечення систем автоматизованого керування;

— математичне та інформаційне забезпечення системи теплопостачання для моделювання мережових бойлерів для вдосконалення підігріву теплоносія типових теплових пунктів при теплопостачанні від АЕС.

Генеральний інспектор —
директор з безпеки, канд. техн. наук.



Д.В. Білей

003648

№ 2.2.3-46/4902 Дата 18.08.10
На № _____ от _____Ректору
ОДЕССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
проф. Оборскому Г. А.О внедрении результатов
диссертационного исследования

Уважаемый Геннадий Александрович!

Настоящим сообщаем, что в соответствии с исполнением рекомендаций энергетического аудита на энергетических установках завода, который был проведен в период второго квартала 2010 года сотрудниками ОНПУ, результаты диссертационного исследования Максимовой О.Б. «Совершенствование информационного и математического обеспечения для автоматизированного управления системой теплоснабжения с изменяемой структурой» внедрены в части:

— оптимизации структуры системы теплоснабжения от промышленной котельной для повышения экономической эффективности, при совершенствовании информационного и математического обеспечения систем автоматизированного управления;

— обеспечения автоматизированных систем теплоснабжения математическими и информационными моделями для имитации сетевых теплообменников для пуско-наладочных операций оборудования подогрева теплоносителя при теплоснабжении от промышленной котельной.

Главный инженер



В.Н. Славин

Плотницкий
20-19