

05.13.06

A496

КОНТРОЛЬНЫЕ
ЭКЗЕМПЛЯРЫ

На правах рукописи

Алёшин Евгений Анатольевич

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ
В ЗАКРЫТЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ ЗДАНИЙ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

**Специальность 05.13.06 – "Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(промышленность)"**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Челябинск
2003**

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Глухов В.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Панферов В.И.,
доктор технических наук,
профессор Юсупов Р.Х.

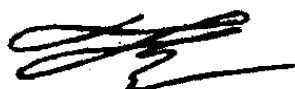
Ведущая организация – ЗАО "Научно-производственный центр гидроавтомати-
ки", г. Челябинск.

Защита состоится 1 октября 2003 года, в 16 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, конференц-зал ЮУрГУ (ауд. 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доц.



Коровин А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема управления тепловыми режимами зданий при минимальных затратах тепловой энергии является одной из важных проблем в системах теплоснабжения у потребителей тепловой энергии. В условиях рыночной экономики и значительного повышения цен на энергоресурсы особую важность приобретает задача эффективного использования тепловой энергии в системах теплоснабжения и отопления.

Снижение энергоемкости в системах отопления зданий можно добиться в том числе и за счет автоматизации управления процессом теплопотребления, что позволяет сократить расход тепловой энергии. Дальнейшее снижение энергоемкости процесса теплопотребления за счет совершенствования систем и алгоритмов управления может быть достигнуто на пути создания энергосберегающих систем автоматизированного и автоматического управления, оптимизирующих тепловые режимы зданий, что является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования систем управления. Оптимизация систем управления позволяет найти самый эффективный способ ведения тепловых режимов в системах отопления. Здесь важен выбор оценки эффективности управления процессом (критерий оптимальности), поскольку критерий оптимальности практически полностью определяет энергозатраты при функционировании системы автоматического регулирования.

Большинство существующих систем отопления зданий работают в неуправляемом режиме, нагревательные приборы в течение длительного времени имеют завышенную мощность, что ведет к массовому перегреву воздуха в помещениях, перерасходу тепловой энергии и снижению теплового комфорта. Поэтому одним из направлений автоматизации систем теплопотребления зданий является разработка на базе современных средств вычислительной техники энергосберегающих автоматизированных систем управления, представляющих собой интерактивные системы управления тепловыми режимами по критерию эффективности управления.

Задача регулирования отпуска теплоты на отопление является весьма сложной, поскольку регулируемый параметр (температура отапливаемых помещений) зависит от большого числа как внешних, так и внутренних факторов. Реальные параметры системы теплопотребления под действием различных дестабилизирующих факторов "внешней среды" и скрытых возмущений в системе теплопотребления отклоняются от расчетных значений в широких пределах, что позволяет рассматривать систему теплопотребления как стохастическую. Существующие методы и системы автоматического регулирования расхода теплоты на абонентских тепловых пунктах предложены и нашли наиболее полное отражение в работах С.А. Чистовича, Н.М. Зингера, Л.А. Мелентьева, А.П. Сафонова, Е.Я. Соколова, В.П. Туркина, Л.Д. Богуславского, В.Т. Благих, Ю.А. Табунщикова, В.И. Ливчака, В.П. Витальева и других. В работах С.А. Чистовича, В.К. Аверьянова, Ю.Я. Темпеля, С.И. Быкова рассматривается применение математических моделей для точечного прогноза внутренней температуры в здании. Однако в этих работах не рассматривались задачи оптимизации управ-

ления режимными параметрами в системах теплоснабжения зданий в условиях неопределенности.

Поэтому актуальной является задача не только разработки энергосберегающих систем автоматизированного управления тепловыми режимами зданий, но и синтеза методов определения и коррекции режимных параметров в системе отопления в условиях неопределенности, оптимизирующих тепловые режимы с целью поддержания показателя качества в области энергосбережения при действии неизвестных возмущений и фиксированных параметрах внешней среды в текущих ситуациях в системе теплопотребления.

Задачи параметрической коррекции рассматриваются в работах О.В. Абрамова, Ф.И. Бернацкого, В.В. Здора, А.А. Супони, которые применительно к оптимизации и автоматизации технологических процессов и процессов потребления тепловой энергии в зданиях в условиях неопределенности получили дальнейшее развитие в трудах В.Н. Глухова.

Объектом исследования являются системы и методы энергосберегающего автоматизированного регулирования расхода теплоты на абонентских тепловых пунктах.

Целью работы является определение принципов построения и синтез энергосберегающих автоматизированных систем управления тепловыми режимами зданий с наиболее рациональными настроечными параметрами, обеспечивающими минимум расхода тепловой энергии в системах отопления зданий в условиях неопределенности.

Задачи работы. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1) анализ существующих методов и систем автоматизированного управления и автоматического регулирования расхода теплоты на абонентских тепловых пунктах;

2) разработка математической модели, отражающей взаимосвязь параметров внешней среды и системы теплопотребления с показателем качества теплового режима в виде эффективности управления;

3) построение областей качества, являющихся областями энергосберегающего управления в системах отопления зданий в условиях неопределенности;

4) разработка алгоритмической структуры функционирования энергосберегающей системы управления тепловыми режимами здания в условиях неопределенности, обеспечивающей реализацию режимных параметров, минимизирующих расход тепловой энергии;

5) анализ динамических свойств группы индивидуальных тепловых пунктов, объединенных коллектором со стороны источника питания или со стороны нагрузки, как объекта управления;

6) практическая реализация полученных результатов на объектах, являющихся потребителями тепловой энергии.

Связь диссертации с федеральными и региональными программами. Диссертационное исследование проводилось в рамках целевой Программы "Энергосбережение" Минобразования РФ и научно-исследовательской работы

по гранту 103 Гр-98 "Создание методов оптимального управления и энергосберегающих систем автоматического регулирования тепловых режимов в закрытых тепловых сетях зданий", № гос. регистрации 01.980006958.

Методы исследования. Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются методы теории параметрической коррекции, теории автоматического управления, теории вероятностей, математической статистики, регрессионного анализа и аппарата теории игр. Оценка параметров моделей, построение областей качества и поиск гарантированной эффективности управления проводилась на ЭВМ с помощью соответствующих прикладных программ.

Научная новизна диссертационной работы. В ходе исследования были получены следующие научные результаты:

1) создана многофакторная математическая модель, отражающая взаимосвязь параметров подсистем "внешней среды" и "теплопотребления" с показателем качества теплового режима в виде эффективности управления;

2) разработан метод энергосберегающего управления тепловыми режимами здания, позволяющий осуществлять коррекцию уставок режимных параметров регуляторов, обеспечивающих минимизацию энергопотребления;

3) разработана алгоритмическая структура функционирования энергосберегающей системы управления теплопотреблением здания в условиях неопределенности, обеспечивающая реализацию режимных параметров, минимизирующих расход тепловой энергии;

4) получено решение задачи оптимизации настроечных параметров и автоматизированного управления процессом потребления тепловой энергии в условиях неопределенности в виде совокупностей стратегий подсистем внешней среды и теплопотребления, являющихся седловой точкой средней эффективности управления и оценки управления, представляющей значение этой функции в седловой точке;

5) разработаны матричные структурные схемы системы отопления здания, состоящей из нескольких индивидуальных тепловых пунктов, на основе матричных уравнений, описывающих динамику системы отопления при действии возмущений как со стороны источника теплоснабжения, так и со стороны нагрузки, которые упрощают анализ динамических свойств системы отопления как объекта автоматического регулирования.

Практическая значимость результатов работы:

1) разработана методика синтеза энергосберегающей автоматизированной системы управления тепловыми режимами в закрытых тепловых сетях зданий в условиях неопределенности, предусматривающая учет взаимосвязи между подсистемами – "внешняя среда" – "теплопотребление" – "система коммерческого учета тепловой энергии" – ЛПР – САР;

2) разработана методика назначения тепловых режимов в зданиях на базе теории игр, обеспечивающих существенную экономию тепловой энергии на стадии отделочных работ внутри здания при отсутствии САР при наличии теплосчетчика;

3) разработаны и внедрены на объектах г. Челябинска энергосберегающие системы автоматического регулирования тепловой энергией, позволяющие получать до 30 % ее экономии.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ (г. Челябинск, 1998–2000 гг.), на специализированной выставке "Приборостроение-2002" (г. Екатеринбург).

Публикации. Основные положения и результаты работы отражены в 8 печатных работах и научно-техническом отчете.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из предисловия, введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 102 наименования, 3 приложений. Работа изложена на 162 страницах печатного текста, содержит 37 рисунков, 9 таблиц.

На защиту выносятся:

1) математическая модель, отражающая взаимосвязь параметров подсистем "внешняя среда" и "теплопотребление" с показателем качества в виде эффективности управления;

2) методика определения номинальных оптимальных параметров системы теплоснабжения здания в условиях неопределенности, позволяющая минимизировать расход тепловой энергии на отопление;

3) алгоритмическая структура функционирования энергосберегающей автоматизированной системы управления теплопотреблением здания в условиях неопределенности;

4) способ оптимизации, основанный на аппарате теории игр, настроечных параметров систем отопления, не оснащенных средствами автоматизации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Совершенствование методов и систем управления тепловыми режимами зданий

В настоящее время управление тепловыми режимами зданий при минимальных затратах тепловой энергии является одной из важных задач в области систем теплопотребления. Снижение энергоемкости в системах отопления зданий можно добиться за счет автоматизации управления процессом теплопотребления. Дальнейшее повышение эффективности процесса теплопотребления может быть достигнуто на основе создания энергосберегающих систем автоматизированного и автоматического управления, оптимизирующих тепловые режимы зданий, что является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования систем управления тепловыми режимами зданий.

Разнотипность применяемых САР для управления тепловыми режимами зданий объясняется тем, что разработка САР производилась без достаточно обоснованной теории и данных о векторе «внешней среды». Именно поэтому существующие САР имеют избыточную структуру и не обеспечивают минимизацию расхода тепловой энергии в системах отопления зданий в условиях неопределенности. В существующих САР режимные параметры (уставки) уста-

навливаются по статистическим данным без достаточного научного обоснования. Синтез структуры энергосберегающей автоматизированной системы управления тепловыми режимами с учетом условий физической реализуемости управляющих воздействий, ограничений, влияния случайных возмущений и непредвиденных изменений динамики в системе отопления, требований устойчивости и грубости синтезируемой АСУ тепловыми режимами зданий представляет сложную задачу.

Для решения сложных задач оптимизации управления технологическими процессами получены фундаментальные и плодотворные результаты, связанные с теорией номиналов и допусков, выдвинутых в работах О.В. Абрамова, Ф.И. Бернацкого, В.В. Здора, А.А. Супони и др., решен ряд задач синтеза оптимальных систем с ограниченным управляющим воздействием представленных в работах Я.З. Цыпкина, Н.Н. Красовского, М.Д. Потапова и др.

Поэтому, в общем случае решение задач синтеза оптимальных АСУ ТП очень трудно и техническая реализация их затруднительна, первоочередную роль приобретает синтез АСУ тепловыми режимами, достаточно простых по структуре, но вместе с тем близким к наилучшим по обеспечению минимума расхода тепловой энергии в системе отопления зданий в условиях неопределенности.

Имея ввиду важность указанной проблемы и учитывая, что имеющиеся разработки не удовлетворяют требованиям экономии энергоресурсов, была поставлена задача изучить технологические особенности систем теплоснабжения как объекта регулирования, на базе которых дать принципы построения энергосберегающей АСУ теплоснабжением зданий, определить ее минимальную структуру и разработать метод расчета оптимальных номинальных настроечных параметров в системе отопления зданий в условиях неопределенности.

Динамические свойства систем отопления как объектов автоматического регулирования

Одним из наиболее универсальных способов описания динамических характеристик САУ является описание их с помощью дифференциальных уравнений. При составлении таких уравнений исходим из закона сохранения энергии, который при нестационарном режиме работы можно сформулировать следующим образом: производная по времени от энергии, заключенной в объеме здания, равна разности между потоком энергии, поступающей в этот объем (расход теплоносителя, тепловыделения в здании и т.п.) и потоком энергии, выходящем из этого объема (инфильтрация воздуха через ограждающие конструкции, тепловые потери, связанные с проветриванием помещений и т.п.).

При физико-математическом анализе рассматриваемой системы отопления представляет интерес структура математической модели, содержащей меньшее возможное число параметров. Опыт учит, что при проведении экспериментов на системе и при преимущественном использовании информации о «внешней среде», полученной путем измерения на объекте управления, всегда желательно иметь приближенные результаты физико-математического анализа и производить оценку решения. Из литературы известно, что никакая матема-

тическая модель не может точно отражать действительную систему во всех ее взаимосвязях и проявлениях. Поэтому, исходя из практических соображений, выбираем упрощающие предположения о стационарности процессов в системе отопления.

В силу специфических особенностей системы отопления как стохастического объекта управления проведены исследования с целью синтеза структуры энергосберегающей АСУ теплоснабжением здания и алгоритма ее функционирования в условиях неопределенности.

Основываясь на теоретических положениях, выдвинутых в работах О.С. Соболева, А.А. Красовского и др., систему отопления здания, состоящую из нескольких индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), можно рассматривать как совокупность нескольких одинаковых параллельных подсистем с перекрестными связями между ними, которые объединены общим коллектором как со стороны источника теплоснабжения так и со стороны нагрузки для совместного функционирования с целью обеспечения требуемого теплового режима здания. Перекрестные связи между системами автоматического регулирования одинаковых параллельных систем отопления действуют через общий источник энергии, они объединены общим коллектором на стороне регулирующих органов (рис. 1), или общим коллектором со стороны нагрузки.

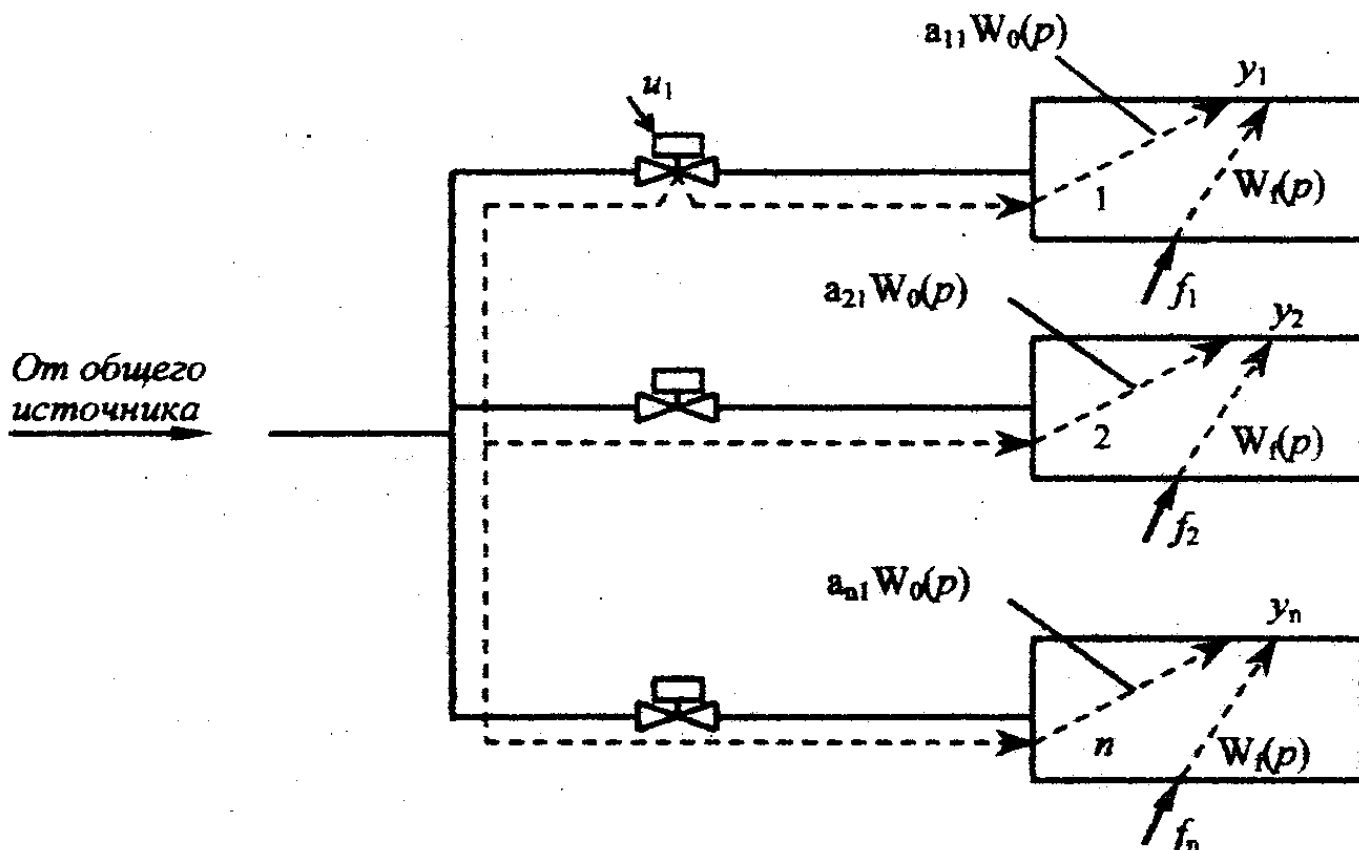


Рис. 1. Параллельные системы отопления, объединенные общим коллектором со стороны источника теплоснабжения

Перемещение регулирующего органа (с координатой u_1) приводит к изменению давления в коллекторе и к изменению расходов g_1, g_2, \dots, g_n сетевой воды на все ИТП. Значение каждого из расходов определяется положением не

только своего, но и соседних регулирующих органов. Поскольку процессы в гидравлической сети практически безынерционны, то перераспределение расходов происходит мгновенно вслед за изменением положения регулирующего органа. В линейном приближении зависимость расходов от положения регулирующих органов описывается алгебраическим уравнением

$$g_k = \sum_{j=1}^n a_{kj} u_j, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где a_{kj} – коэффициент передачи от j -го регулирующего органа к расходу через k -й агрегат.

Изменение каждой из регулируемых переменных y_k (температуры теплоносителя в обратном трубопроводе, которая является интегральной температурой) происходит под действием изменения расхода на объект g_k и описывается уравнением

$$y_k = W_0(p)g_k + W_f(p)f_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где f_k – возмущение; $W_0(p)$, $W_f(p)$ – передаточные функции объекта по каналам управляющего расхода и возмущения.

Исключив из уравнений (1) и (2) переменные g_k , запишем уравнение для совокупности отопительных систем (абонентов) как объекта управления:

$$y_k = \sum_{j=1}^n a_{kj} W_0(p) u_j + W_f(p) f_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Вследствие безынерционности процессов перераспределения расходов передаточные функции объекта по каналам от каждого из регулирующих органов по всем регулируемым переменным различаются только коэффициентами передачи a_{kj} .

У каждого из абонентов или в каждом ИТП установлены идентичные, одинаково настроенные регуляторы с передаточной функцией $W_p(p)$, так что уравнение j -го регулятора имеет вид (x_i – задание):

$$u_j = W_p(p)(x_i - y_i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Идентичность отдельных каналов передачи воздействий вместо громоздкой полной структурной схемы системы позволяет ограничиться изображением звеньев и связей, соответствующих только одной отдельной системе (рис. 2). Такое представление структурной схемы соответствует ее уравнениям (3), (4), относящейся к одной отдельной системе, при использовании бегущего индекса для распространения уравнений на все n отдельные системы. Для представления уравнений системы в матричной форме вводим векторы переменных (y – вектор регулируемых переменных, x – вектор заданий, u – вектор управлений, f – вектор возмущений), передаточные матрицы объекта A (совокупности абонентов) по основным каналам передачи воздействий, по каналам возмущений и передаточную матрицу регуляторов.

Каждая из передаточных матриц описывает всю совокупность связей между переменными, входящими в состав соответствующей пары векторов; пере-

даточные функции каналов, связывающих между собой компоненты векторов (отдельные переменные системы), играют роль элементов матриц и занимают в них вполне определенные места. Уравнения (3) и (4) в матричной форме

$$y = W_0(p)Au + W_f(p)Ef, \quad (5)$$

$$u = W_p(p)E(x - y). \quad (6)$$

Матричным уравнениям системы (5, 6) соответствует матричная структурная схема (рис. 3).

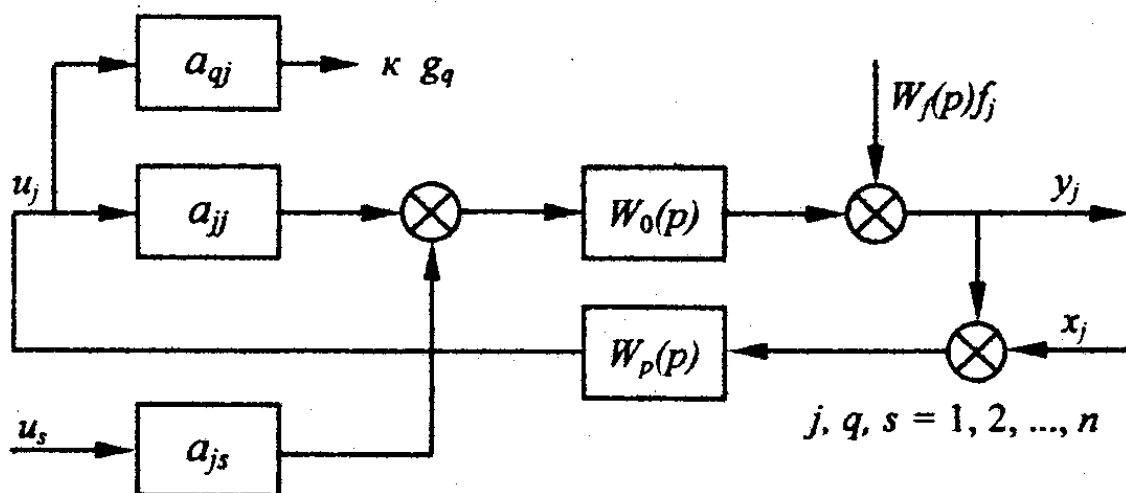


Рис. 2. Сепаратная система

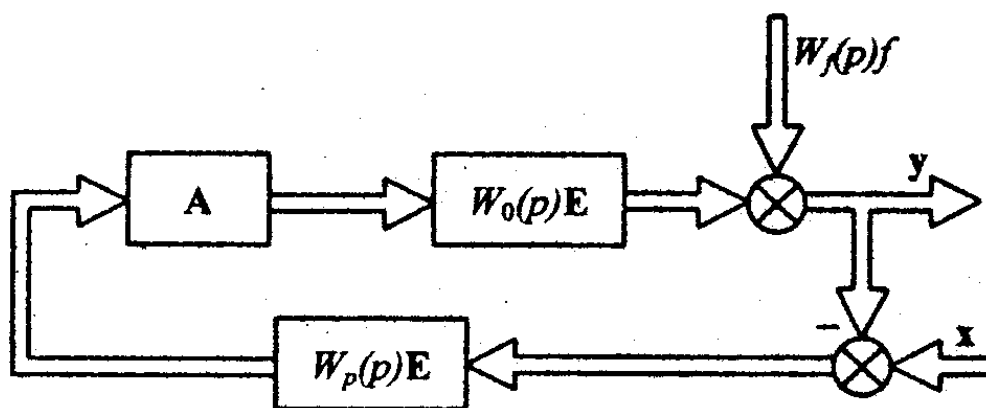


Рис. 3. Матричная структурная схема

Разработанные матричные структурные схемы системы отопления здания, состоящей из нескольких индивидуальных тепловых пунктов, связанных общим коллектором как со стороны источника теплоснабжения, так и со стороны нагрузки упрощают анализ динамических свойств системы отопления как объекта автоматического регулирования

Построение областей качества теплового режима здания в плоскости режимных параметров системы теплопотребления

Реальные параметры системы теплопотребления под действием различных дестабилизирующих факторов "внешней среды" и скрытых возмущений в системе теплопотребления отклоняются от расчетных значений в широких пре-

делах. Статистическая зависимость между параметрами “внешней среды” и номинальными режимными параметрами системы теплопотребления с показателем качества управления позволяет оптимизировать систему теплопотребления в условиях неопределенности. Корректировка параметров регулирования теплового режима для принятой схемы автоматизации системы отопления заключается в том, чтобы показатель качества системы теплопотребления находился в зоне оптимума для каждого вектора контролируемых возмущений, или совокупности таких векторов, образующих подмножества, в пределах которых регулируемые параметры системы теплопотребления к изменению вектора контролируемых возмущений нечувствительны.

Модель, отражающая взаимосвязь параметров внешней среды и системы теплопотребления

На основе массива экспериментальных данных построена квадратичная регрессионная модель, отражающая взаимосвязь параметров внешней среды (температура наружного воздуха t_n , скорость ветра V , солнечная радиация R , температура теплоносителя в прямом трубопроводе $t_{пр}$) и системы теплопотребления (расход теплоносителя Q и его температура в обратном трубопроводе $t_{обр}$) с температурой внутреннего воздуха t_b :

$$\begin{aligned}
 t_b(n) = & 24,961 + 0,424t_n(n-1) + 4,685Q(n-1) + 5,603 \cdot 10^{-2}t_{пр}(n-1) + \\
 & + 7,732 \cdot 10^{-2}t_{обр}(n-1) + 4,303 \cdot 10^{-2}R(n-1) - 1,151 \cdot 10^{-2}V(n-1) + \\
 & + 1,035 \cdot 10^{-2}t_n(n-1) \cdot Q(n-1) + 6,111 \cdot 10^{-3}t_n(n-1) \cdot t_{обр}(n-1) + \\
 & + 1,130 \cdot 10^{-3}t_n(n-1) \cdot R(n-1) - 7,151 \cdot 10^{-3}t_n(n-1) \cdot V(n-1) - \\
 & - 2,904 \cdot 10^{-2}Q(n-1) \cdot t_{пр}(n-1) + 7,125 \cdot 10^{-2}Q(n-1) \cdot t_{обр}(n-1) - \\
 & - 1,447 \cdot 10^{-3}Q(n-1) \cdot R(n-1) - 1,819 \cdot 10^{-2}Q(n-1) \cdot V(n-1) - \\
 & - 8,042 \cdot 10^{-4}t_{пр}(n-1) \cdot R(n-1) - 1,752 \cdot 10^{-3}t_{пр}(n-1) \cdot V(n-1) + \\
 & + 7,829 \cdot 10^{-5}t_{обр}(n-1) \cdot R(n-1) + 1,198 \cdot 10^{-3}t_{обр}(n-1) \cdot V(n-1) + \\
 & + 9,902 \cdot 10^{-4}t_{пр} \cdot t_{обр}(n-1)(n-1) + 8,425 \cdot 10^{-3}t_{пр} \cdot t_n(n-1)(n-1) + \\
 & + 1,913 \cdot 10^{-3}R(n-1) \cdot V(n-1) - 2,561 \cdot 10^{-4}t_n^2(n-1) - 0,233Q^2(n-1) - \\
 & - 9,990 \cdot 10^{-4}t_{обр}^2(n-1) - 6,237 \cdot 10^{-6}R^2(n-1) - 3,226 \cdot 10^{-2}V^2(n-1)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Адекватность полученной модели подтверждается по критерию Фишера.

Модель, отражающая взаимосвязь параметров внешней среды и системы теплопотребления с показателем качества теплового режима в виде эффективности управления

Эффективность управления тепловым режимом здания предложено рассчитывать на основе функции желательности (8):

$$D = \begin{cases} e^{-e^{-y'}} & , \text{если } t_g \leq 22^\circ\text{C} \\ 0 & , \text{если } t_g > 22^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

Для перехода от фактических значений внутренней температуры t_B к безразмерной шкале y' , получено уравнение $y' = -13,4418 + 0,747087 \cdot t_B$. По значениям функции желательности (8), рассчитанным в каждой экспериментальной точке, найдена модель (9) (для $t_g \leq 22^\circ\text{C}$), отражающая взаимосвязь параметров внешней среды и системы теплотребления с показателем качества теплового режима в виде эффективности управления в диапазоне от 0 до 1.

$$\begin{aligned} D = & 8,318 \cdot 10^{-2} - 5,835 \cdot 10^{-2} t_H(n-1) - 2,564 \cdot 10^{-2} Q(n-1) + \\ & + 9,083 \cdot 10^{-3} t_{mp}(n-1) - 7,251 \cdot 10^{-4} t_{обp}(n-1) + 4,498 \cdot 10^{-3} R(n-1) + \\ & + 0,123 V(n-1) - 3,233 \cdot 10^{-3} t_H(n-1) \cdot Q(n-1) + 1,170 \cdot 10^{-3} t_H(n-1) \cdot t_{обp}(n-1) - \\ & - 2,295 \cdot 10^{-5} t_H(n-1) \cdot R(n-1) - 2,061 \cdot 10^{-3} t_H(n-1) \cdot V(n-1) + \\ & + 1,324 \cdot 10^{-5} Q(n-1) \cdot t_{mp}(n-1) - 1,675 \cdot 10^{-3} Q(n-1) \cdot t_{обp}(n-1) + \\ & + 2,490 \cdot 10^{-4} Q(n-1) \cdot R(n-1) + 1,253 \cdot 10^{-3} Q(n-1) \cdot V(n-1) - \\ & - 5,505 \cdot 10^{-5} t_{mp}(n-1) \cdot R(n-1) - 1,273 \cdot 10^{-3} t_{mp}(n-1) \cdot V(n-1) - \\ & - 4,055 \cdot 10^{-6} t_{обp}(n-1) \cdot R(n-1) - 2,192 \cdot 10^{-3} t_{обp}(n-1) \cdot V(n-1) - \\ & - 2,100 \cdot 10^{-4} R(n-1) \cdot V(n-1) + 3,878 \cdot 10^{-4} t_H^2(n-1) - 1,076 \cdot 10^{-3} Q^2(n-1) + \\ & + 2,813 \cdot 10^{-4} t_{обp}^2(n-1) - 4,969 \cdot 10^{-6} R^2(n-1) - 3,895 \cdot 10^{-3} V^2(n-1) \end{aligned} \quad (9)$$

Адекватность полученной модели подтверждается по критерию Фишера. Полученная модель используется для синтеза областей энергосберегающего управления тепловыми режимами зданий, а также для расчета гарантированной эффективности управления процессом теплотребления и оптимизации настроечных параметров системы отопления.

Области энергосберегающего управления тепловыми режимами здания

Путем совмещения линий равного значения целевой функции (9) $D = f(\bar{X}, \bar{U})$ (где \bar{X} – вектор контролируемых параметров внешней среды, \bar{U} – вектор управления), полученных для различных соотношений параметров внешней среды X , учитывая ограничения на факторы $t_{обp}$ и Q , строятся области качества теплового режима здания. Анализ областей качества показывает, что они смещаются относительно друг друга в пространстве параметров. Аппроксимируя области качества вписанными прямоугольниками, определяем расположенные в области взаимопоглощения номиналы режимных параметров U_1^n и U_2^n (расход воды Q и температура воды в обратном трубопроводе t_2), ко-

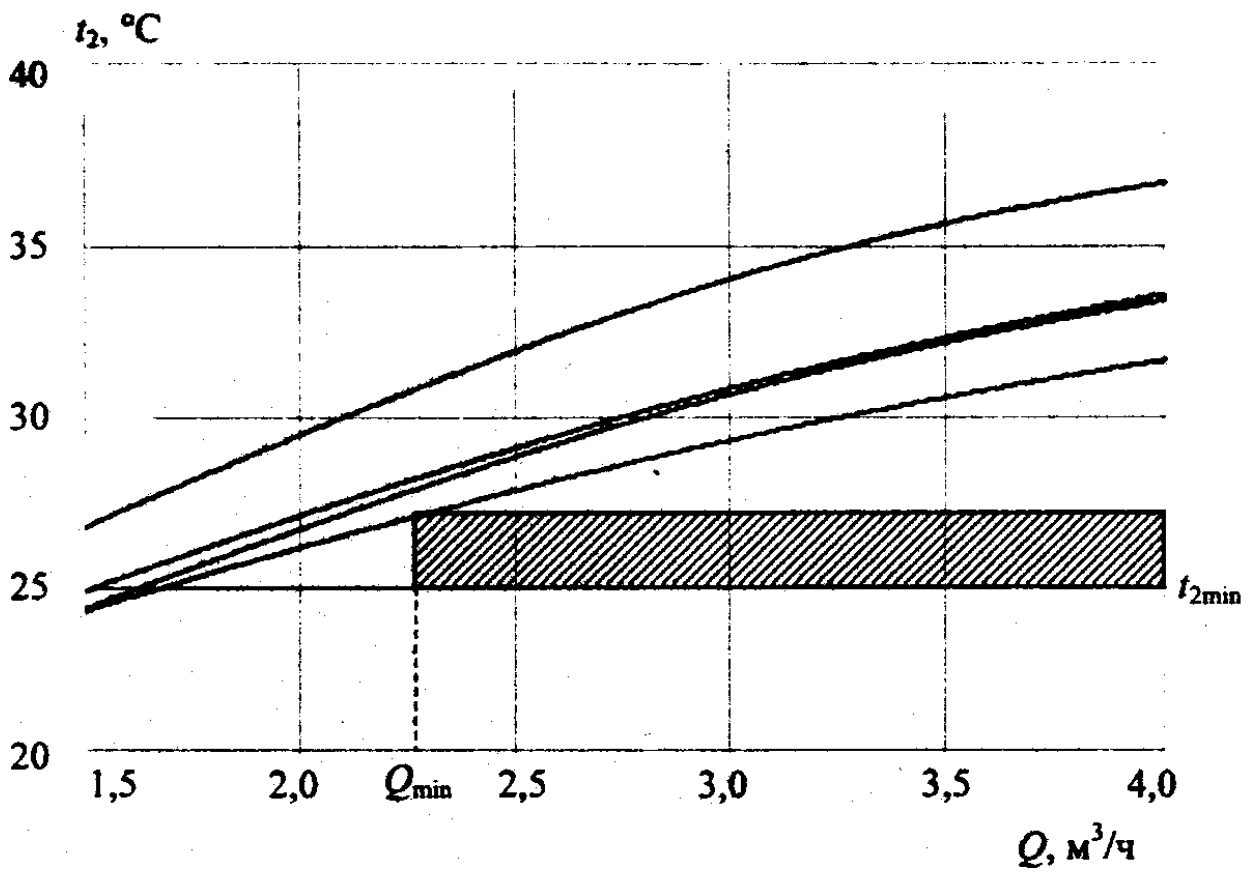


Рис. 4. Область качества теплового режима в плоскости режимных параметров в ситуациях D_1

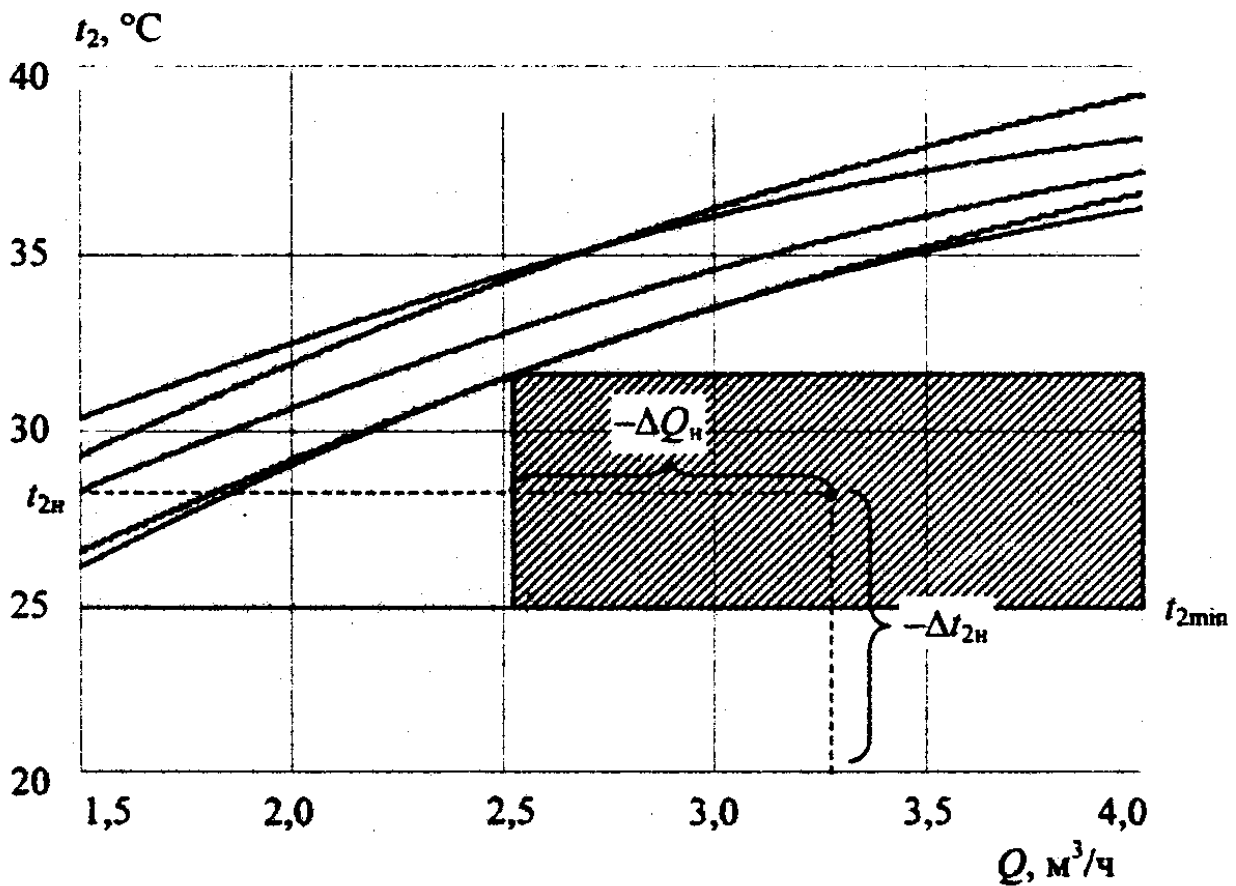


Рис. 5. Область качества теплового режима в плоскости режимных параметров в ситуациях D_2

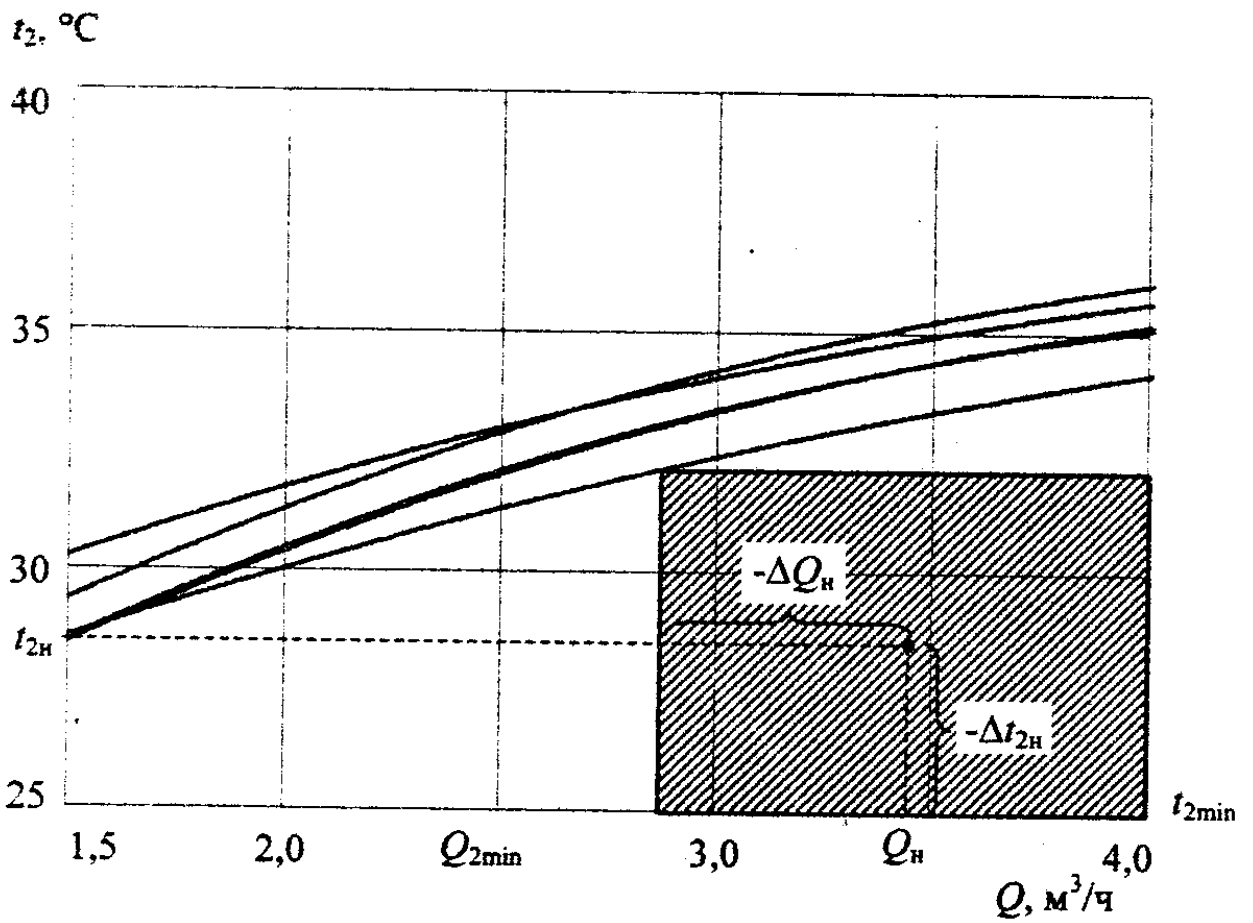


Рис. 6. Область качества теплового режима в плоскости режимных параметров в ситуациях D_3

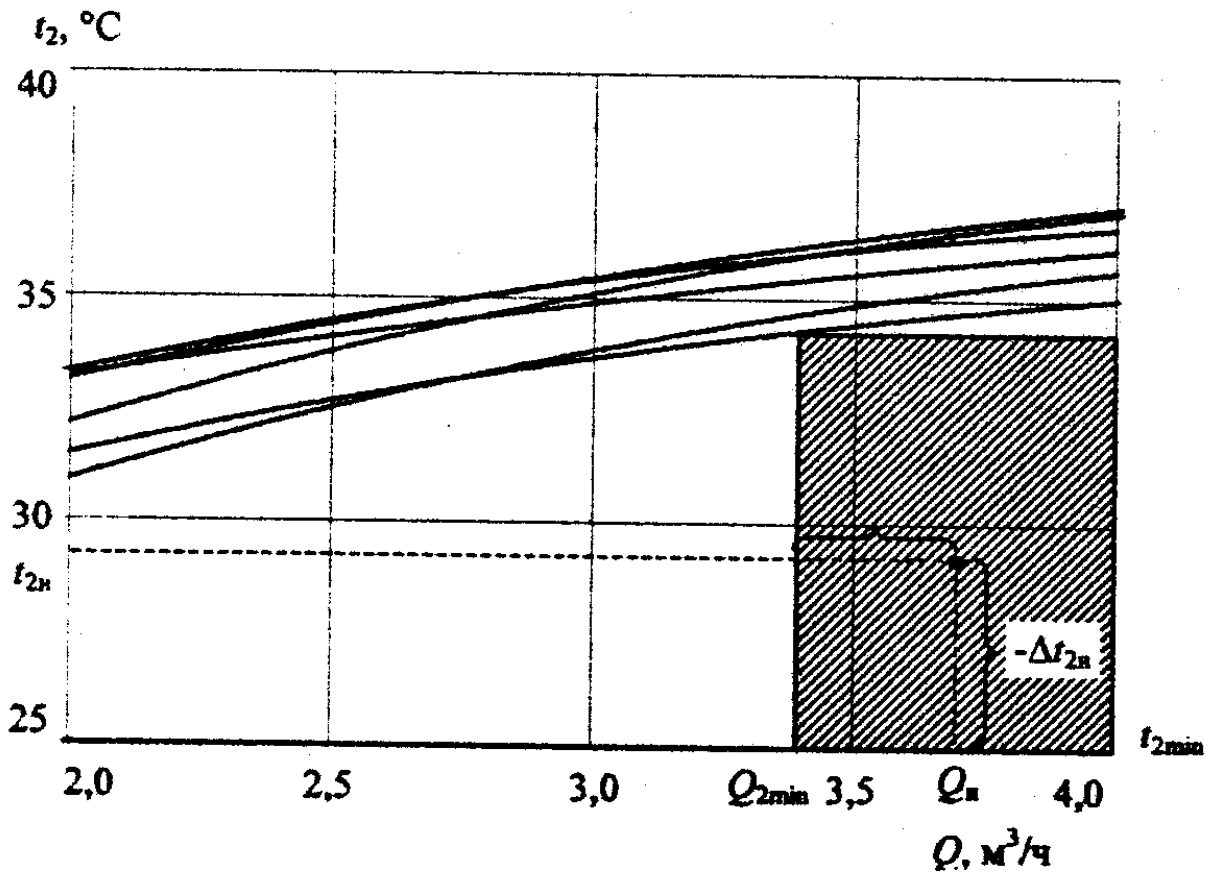


Рис. 7. Область качества теплового режима в плоскости режимных параметров в ситуациях D_4

торые в пределах этой области удовлетворяют требуемому качеству теплового режима здания, но не обеспечивают минимизацию расхода теплоты на отопление, и допуска на режимные параметры $U_1^H \pm \Delta U_1^H$ и $U_2^H \pm \Delta U_2^H$ для различных значений показателя эффективности управления D (рис. 4 – 7). Области D_i являются областями энергосберегающего управления, в пределах которых режимные параметры системы теплотребления U_1^H и U_2^H с учетом их допуска $\pm \Delta U_i^H$ являются оптимальными номинальными параметрами и обеспечивают минимум затрат тепловой энергии на отопление здания. Аппроксимация областей качества прямоугольниками со сторонами параллельными координатным осям, согласно методам параметрической коррекции, позволяет назначать допуска на режимные параметры системы теплотребления независимо друг от друга с учетом проведения энергосберегающей стратегии.

Алгоритмическая структура функционирования энергосберегающей автоматизированной системы управления теплотреблением здания в условиях неопределенности

На базе методов теории игр разработаны структурная схема функционирования энергосберегающей автоматизированной системы и алгоритм энергосберегающего управления тепловым режимом здания в условиях неопределенности.

Эффективность управления системой теплотребления в условиях неопределенности

Эффективность управления системой теплотребления в условиях неопределенности определяется по критерию:

$$J_{ij}^* = \max_{\bar{u} \in U} M \{ J_{ij}(\mu(\bar{u}_i), \bar{x}_j) \}, \quad (10)$$

где U – множество допустимых значений управляемых параметров системы теплотребления при фиксированном векторе параметров внешней среды \bar{x}_j . У подсистем “внешняя среда – теплотребление” в каждой текущей ситуации имеется возможность принять одно из многих конечных состояний S_X и S_T соответственно. Благодаря этому каждую текущую ситуацию задаем $n \times m$ матрицей A , где n – число стратегий (состояний) подсистемы “внешней среды” S_X , m – число стратегий подсистемы параметров S_T . В матрице A существует элемент ω , являющийся седловым при использовании стратегий S_X^i и S_T^i . Смешанную стратегию “внешней среды” S_X описываем n -мерным вектором $S_X = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$, где γ_j – вероятность использования чистой стратегии S_X^j . Смешанную стратегию подсистемы S_T^i задаем m -мерным вектором $S_T = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)$, где η_i – вероятность использования чистой стратегии S_T^i (использование при текущем векторе “внешней среды” \bar{x} i -ой модели теплового режима здания).

Матрица оценок $\|J_{ij}\|$ оптимальных эффективностей управления СТП (системой теплоснабжения) при использовании моделей μ_i и j -ого вектора "внешней среды" \bar{x}_j в текущих ситуациях СТП формируется при условии, что

$$\exists U_i : J_{ij} \{ \mu_i(\bar{u}_i), \bar{x}_j \} \in D_j, \quad (11)$$

где D_j – область качества управления СТП при использовании модели μ_i .

Действие неконтролируемых возмущений вызывает необходимость уточнения значений матрицы J_{ij} . Для этого определяются такие значения параметров \bar{U}_i^* , при которых выполняется условие

$$\hat{J}_{ij}^* \{ \mu_i(\bar{u}_i^*), \bar{x}_j \} = \max_{\bar{u}_i \in U, \bar{x}_j \in X} J_{ij} \{ \mu_i(\bar{u}_i), \bar{x}_j \}, \quad (12)$$

где \hat{J}_{ij}^* – уточненное значение элементов J_{ij}^* с учетом действия неконтролируемых возмущений. Векторы S_x^* и S_T^* являются оптимальными стратегиями при условиях:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \eta_i = 1, \quad \sum_{j=1}^n \gamma_j = 1, \\ \varphi(S_x^*, S_T) \geq \omega \geq \varphi(S_x, S_T^*) \\ S_T \geq 0, \quad S_x \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Совокупность $\{S_x^*, S_T^*, \omega\}$ является решением задачи оптимизации "внешняя среда – СТП" в условиях случайного изменения вектора "внешней среды" \bar{x}_j , точка $\varphi\{S_x^*, S_T^*\}$ подчиняется цепочке неравенств:

$$\varphi(S_x^*, S_T) \geq \varphi(S_x^*, S_T^*) \geq \varphi(S_x, S_T^*) \quad (14)$$

и является седловой точкой функции

$$\varphi(S_x, S_T) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n J_{ij} \eta_i \gamma_j, \quad (15)$$

при условии (13), а ω – значение этой функции в седловой точке.

Определяем смешанные (оптимальных) стратегий S_x и S_T , при которых гарантированное значение эффективности управления СТП

$$\omega^* = \sup_{\gamma} \inf_{\eta} \varphi(S_x, S_T) = \inf_{\eta} \sup_{\gamma} \varphi(S_x, S_T). \quad (16)$$

В текущих ситуациях СТП смешанная стратегия подсистемы "внешняя среда" известна, а подсистема "режим СТП" минимизирует средние потери и реализует чистую стратегию $S_T = U$.

Алгоритмическая структура функционирования энергосберегающей АСУ ТП здания в условиях неопределенности (рис. 8) предусматривает взаимосвязь между подсистемами – "внешняя среда", – "СТП" – "система коммерческого

учета” – “АСУ - ТП” (автоматизированная система управления теплотреблением) – ЛПР (лицо, принимающее решение) и представляет интерактивную систему управления.

Оптимизация управления тепловым режимом здания

Гарантированное значение эффективности управления процессом теплотребления определяется на основе применения аппарата теории игр. В подсистеме теплотребления наряду с управляемыми входными параметрами (расход теплоносителя, интегрированная температура помещений, температура теплоносителя в обратном трубопроводе) присутствуют неуправляемые параметры (внутренние тепловыделения, потери тепла через ограждающие конструкции, теплота, затраченная на подогрев вентиляционного воздуха и многие другие).

Управление тепловым режимом здания в таких условиях является сложной задачей. Возможность оперативно получать информацию о неуправляемых параметрах и вносить коррективы в процесс управления представляется далеко не всегда. Лучшее, что можно сделать в такой сложной ситуации, это разработать некоторую оптимальную стратегию управления, пригодную для всех случаев. Задача отыскания такой оптимальной стратегии формализована и решается с применением аппарата теории игр

В терминах теории игр задача формулируется следующим образом: в игре участвуют две подсистемы — подсистема “внешняя среда” (партнер С) и подсистема теплотребления (партнер К). В подсистеме теплотребления может быть выбран любой (в пределах ограничений на эффективность управления тепловым режимом) режим управления (стратегии К); в подсистеме “внешняя среда” — любое (из возможных) сочетание метеопараметров (партнер С). Каждой комбинации стратегий К и С отвечает определенное значение выходного параметра процесса управления y_{ij} , который выступает в роли параметра оптимизации. Ограничим число возможных вариантов К и С в пределах плана эксперимента, которые могут принимать подсистемы внешней среды и теплового режима здания, конечными числами n и m соответственно. В случае, когда n и m достаточно большие числа, такое квантование вполне соответствует реальным условиям управления тепловым режимом.

В результате приходим к парной игре $n \times m$. Так как y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$) известны для любого сочетания K_i и C_j , то игра определена и условия ее можно записать следующим образом в виде матрицы игры:

$$\begin{array}{cccccc}
 & C_1 & \dots & C_j & \dots & C_n \\
 K_1 & y_{11} & \dots & y_{1j} & \dots & y_{1n} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 K_j & y_{j1} & \dots & y_{jj} & \dots & y_{jn} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 K_m & y_{m1} & \dots & y_{mj} & \dots & y_{mn}
 \end{array} \tag{17}$$

Решением (за подсистему K) является смешанная стратегия

$$S_K^* = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 & \dots & K_m \\ P_1 & P_2 & \dots & P_m \end{pmatrix}, \quad (18)$$

которая при многократном повторении обеспечивает наилучшее среднее значение параметра оптимизации. В выражении (18) p_i — частоты, с которыми чередуются случайным образом стратегии K_i .

Описанный подход использован для оптимизации управления тепловым режимом здания. Параметром оптимизации служила обобщенная функция желательности (9). В качестве стратегий K рассмотрены 4 режима регулирования расхода воды (от 2 до 3,5 м³/ч), в качестве стратегий C — 84 вариантов возможных сочетаний параметров внешней среды X . Таким образом, матрица игры имела размер 4 × 84.

Оптимальная стратегия находилась методом итераций. Решением данной игры является активная стратегия $K_4=3,5$ м³/ч. При этом цена игры равна $D^*=0,617$. Таким образом, при любых сочетаниях параметров внешней среды (в пределах экспериментальных значений), эффективность управления тепловым режимом здания будет не ниже 0,617, что соответствует хорошему качеству теплового режима по шкале критерия оптимальности в виде функции желательности.

Данный метод применяется для абонентских тепловых пунктов зданий, оснащенных теплосчетчиками, но не оснащенных средствами автоматизации, и позволяет научно обоснованно устанавливать расход сетевой воды в системе отопления.

Реализация энергосберегающих автоматизированных систем управления тепловыми режимами зданий

В зависимости от финансовых возможностей потребителей разработаны два вида автоматизированных систем на базе отечественных и импортных средств автоматизации.

Системы автоматизации отопления и горячего водоснабжения, внедренные в здания АО "Нефтегазстрой", ЗАО "Востокметаллургомонтаж", ИМНС Курчатковского района г. Челябинска

Энергосберегающая автоматизированная система управления тепловым режимом оснащена регуляторами температуры в комплекте с датчиками температуры, программными устройствами, электрическими исполнительными механизмами и регулирующими органами, устанавливаемыми на обратном трубопроводе из системы отопления. Эта схема в дальнейшем берется за основу и подвергается различным модификациям в зависимости от конструктивных особенностей конкретного здания и требований заказчика.

Энергосберегающая автоматизированная система управления тепловым режимом здания автоматически ограничивает температуру обратного теплоносителя, возвращаемого в тепловую сеть, по сигналу от датчика температуры, который установлен на обратном трубопроводе системы отопления, независимо от соблюдения отопительного графика теплоснабжающей организацией. Огра-

нение на температуру обратного теплоносителя задается в виде уставок на регуляторе температуры.

Регулирование расхода сетевой воды, поступающей в систему отопления, происходит с помощью шарового регулирующего органа, который установлен на обратном трубопроводе и соединен с электрическим исполнительным механизмом. Команда на открытие или закрытие регулирующего органа поступает от регулятора температуры в зависимости от температуры теплоносителя в обратном трубопроводе. Преимущество регулирования по температуре обратного теплоносителя заключается в том, что она является интегратором влияния изменения расхода теплоносителя, так как изменение расхода при одной и той же начальной температуре приводит к изменению температуры обратной воды из системы отопления. К тому же, при данном способе регулирования обеспечивается нормируемое теплоснабжение.

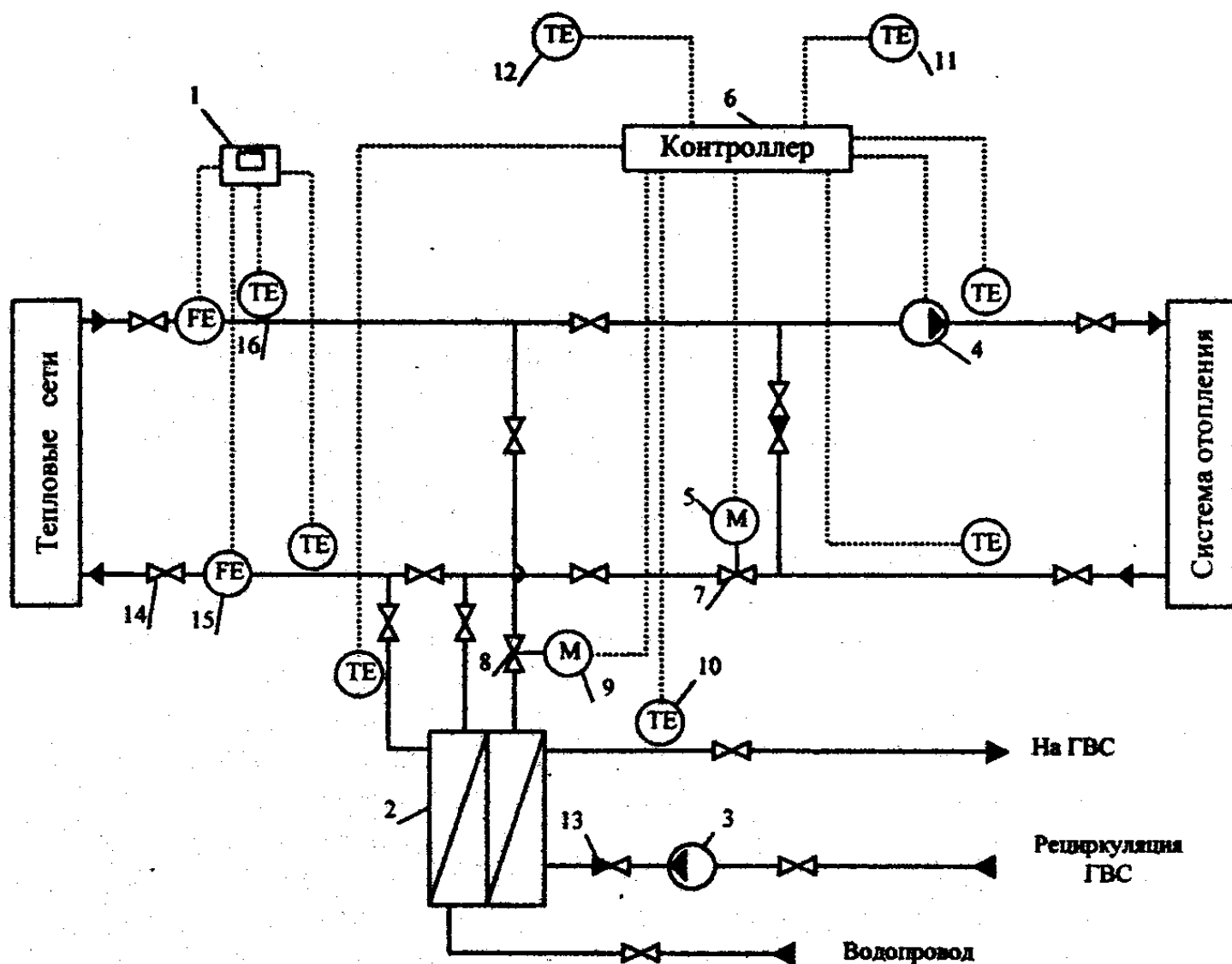
В автоматизированной системе управления реализуется прерывистое регулирование расхода сетевой воды. В системе осуществляется неполный отток тепловой энергии при закрытии регулирующего органа и неполный приток энергии при полностью открытом регулирующем органе. Регулятором расхода коммутируется только часть общей тепловой энергии, поступающей в систему отопления, что обеспечивает уменьшение амплитуды колебания температуры воды в обратном трубопроводе, внутреннего воздуха в отапливаемых помещениях и благоприятно сказывается на гидравлическом режиме системы отопления. В системе предусмотрено программное уменьшение расхода теплоносителя в нерабочее время, выходные и праздничные дни.

САР на базе контроллера ТА2222 для автоматизации теплового пункта здания УМНС России по Челябинской области

Схема локальной САР, входящей в алгоритмическую структуру функционирования энергосберегающей АСУ тепловыми режимами здания показана на рис. 9. Принятая схема автоматики обеспечивает:

- автоматическую работу теплового пункта без постоянного обслуживающего персонала;
- регулирование температуры подачи на отопление в зависимости от температуры наружного и внутреннего воздуха, времени суток и дня недели;
- поддержание на заданном уровне температуры горячей воды с возможностью понижения ее в нерабочее время;
- автоматическое включение/выключение насоса на отопление по температуре наружного воздуха;
- защиту насосов по перегреву и от работы всухую; выдачу аварийной сигнализации.

Разработанные энергосберегающие системы управления теплоснабжением зданий внедрены на различных объектах г. Челябинска и обеспечивают экономию до 30% тепловой энергии.



**Рис. 9. Схема САР на базе контроллера ТА2222
для автоматизации теплового пункта
здания УМНС России по Челябинской области**

- 1 – теплосчетчик с двумя расходомерами (15) и датчиками температуры (16);
- 2 – пластинчатый теплообменник;
- 3 – насос на рециркуляцию ГВС;
- 4 – насос на отопление;
- 5 – электропривод клапана отопления;
- 6 – контроллер на отопление и ГВС с функциями оптимизации ТА 2222;
- 7 – регулирующий клапан на отопление;
- 8 – регулирующий клапан на горячее водоснабжение;
- 9 – электропривод клапана горячего водоснабжения;
- 10 – датчик температуры теплоносителя;
- 11 – датчик температуры внутреннего воздуха;
- 12 – датчик температуры наружного воздуха;
- 13 – обратный клапан;
- 14 – задвижка.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель, отражающая взаимосвязь параметров внешней среды и системы теплоснабжения с показателем качества в виде эффективности управления.

2. Рассматривая систему отопления здания, состоящую из нескольких ИТП, как совокупность одинаковых параллельных подсистем с перекрестными связями между ними, которые объединены общим коллектором как со стороны источника теплоснабжения, так и со стороны нагрузки, показано, что вместо громоздкой полной структурной схемы системы можно ограничиться изображением звеньев и связей, соответствующих только одной сепаратной эквивалентной системе, что позволяет упростить анализ динамических свойств системы отопления как объекта автоматического регулирования.

3. Предложен метод энергосберегающего управления тепловым режимом здания в условиях неопределенности, позволяющий находить оптимальные номинальные значения режимных параметров системы теплоснабжения, обеспечивающих энергосберегающий режим ее работы.

4. Разработана структура энергосберегающей автоматизированной системы управления тепловыми режимами зданий в условиях неопределенности.

5. Решена задача оптимизации настроечных параметров и автоматизированного управления теплоснабжением в условиях неопределенности в виде чистой стратегии подсистемы теплоснабжения, позволяющей минимизировать расход тепловой энергии в системах отопления зданий, оснащенных теплосчетчиками, но не имеющих САР.

6. На базе отечественных и импортных средств автоматизации разработаны и внедрены на объектах г. Челябинска энергосберегающие системы автоматического регулирования тепловых режимов зданий, обеспечивающие до 30% экономии тепловой энергии.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Создание методов оптимального управления и энергосберегающих систем автоматического регулирования тепловых режимов в закрытых тепловых сетях зданий: Отчет по НИР / Глухов В.Н., Алёшин Е.А., Барыкин С.Г.; №ГР 01.980006958; Инв. № 02.990003096. – Челябинск, 1998.

2. Глухов В.Н., Алёшин Е.А. Энергосберегающая оптимальная система автоматического контроля и регулирования тепловой энергии в закрытых тепловых сетях с нестационарным режимом работы // Системы обработки информации и управления: Архитектура и программное обеспечение: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – С. 52–56.

3. Глухов В.Н., Алёшин Е.А. Энергосберегающая система автоматического регулирования теплового режима в зданиях // Системы управления и информационные технологии: Межвузовский сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 1999. – С. 190–197.

4. Глухов В.Н., Алёшин Е.А. Оптимизация управления тепловым режимом здания в условиях неопределенности // Информационно-измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 2000.– С.29–33.

5. Глухов В.Н., Алёшин Е.А. Регулирование одинаковых параллельных систем отопления // Системы автоматического управления: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 2000.– С. 30–35.

6. Алёшин Е.А. Математические модели тепловых режимов зданий с учетом взаимосвязи возмущающих воздействий // Вопросы автоматизации и управления в технических системах: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 2000.– С. 19–20.

7. Алёшин Е.А. Применение аппарата теории игр для оптимизации управления тепловым режимом здания // Информационные, измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 2002.– С. 15–19.

8. Глухов В.Н., Алёшин Е.А. Расчет параметров настройки процесса теплораспределения в зданиях // Приборостроение: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 2002.– С. 45–46.

**Издательство Южно-Уральского государственного
университета**

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 10.07.2003. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ 323/367.

УОП Издательства. 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.