

На правах рукописи



Панферов Сергей Владимирович

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ
ОТАПЛИВАЕМЫХ ЗДАНИЙ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

Работа выполнена на кафедре систем управления и математического моделирования Миасского филиала ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук, профессор Телегин А.И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Казаринов Л.С.

доктор технических наук, доцент Ячиков И.М.

Ведущая организация – ОАО Проектный институт гражданского строительства, планировки и застройки городов и посёлков «Магнитогорскгражданпроект»

Защита диссертации состоится «17» марта 2011 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.03 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76, аудитория 1001.

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

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 265-62-05.

Автореферат разослан «7» февраля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

 А.Г. Щипицын

Актуальность темы. Энергосбережение в жилищно-коммунальной сфере – это одна из первоочередных проблем настоящего времени, требующих незамедлительного решения. При этом следует заметить, что даже относительно небольшой успех в этом направлении в силу масштабности энергозатрат приводит к ощутимым эффектам в абсолютном выражении. Данную проблему пытаются решить различными методами, например, часто утверждается, что существенный эффект можно получить за счет установки теплосчетчиков. Однако при этом необходимо учитывать следующее обстоятельство. Прежде всего, нужно очень отчетливо понимать, что установка теплосчетчиков это неэнергосберегающее мероприятие, а то, что способствует энергосбережению, но само по себе по своей сути таковым не является. Финансовый выигрыш здесь получается из-за того, что нормы потребления завышены, фактическое энергопотребление ниже расчетного, поэтому оплата за энергоснабжение снижается. Настоящее энергосбережение начинается только тогда, когда начинают заниматься тепловым режимом отапливаемых зданий, исследованием и выявлением его особенностей, разработкой и внедрением систем автоматизации отопления и теплоснабжения в целом. Объясняется это тем, что автоматическое управление позволяет экономить теплоту за счет учета (как правило, опосредованного) тех факторов, оценка влияния которых проектно-расчетными методами либо невозможна, либо достаточно проблематична:

1. Влияние солнечной радиации;
2. Тепловыделений от оборудования и людей;
3. Избыточной мощности системы отопления при данной температуре наружного воздуха;
4. Оперативного учета колебаний температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра и других возмущений со стороны наружной среды;
5. Хаотичности режима работы систем вентиляции и др.

Поэтому разработка вопросов, связанных с автоматизацией систем отопления и их совершенствованием, является вполне актуальной проблемой.

Целью работы является структурно-параметрический синтез адаптивной системы управления тепловым режимом отапливаемых зданий. Поставленная цель предопределила аппарат исследования: математическое моделирование температурных режимов отапливаемых зданий, численные методы решения дифференциальных уравнений, теория идентификации и управления, теория алгоритмов и экспериментальные исследования объекта.

Научная новизна. Предложены уточнённые структуры алгоритмов количественно-качественного регулирования процессов теплоснабжения по отопительной нагрузке и по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения, позволяющие вычислять требуемые значения температуры теплоносителя при любом значении показателя степенной зависимости коэффициента теплопередачи установленных в здании отопительных приборов от температурного напора.

Для выбранного алгоритма компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха – разработаны и апробированы различные варианты процедуры настройки (адаптации) на проблемные теплотехнические параметры зданий и их систем отопления по эксплуатационным данным.

Разработаны два варианта структуры адаптивной системы управления температурным режимом зданий, реализующие комбинированный принцип.

Для типовых передаточных функций отдельных каналов процесса теплоснабжения определены структура и параметры настройки автоматических регуляторов, численно-аналитическими методами детально исследована робастность устойчивости и качества переходных процессов сконструированных систем как по параметрам настройки регуляторов, так и по параметрам регулируемых каналов. Найдены условия устойчивости локальных систем. Установлено, что данный метод структурно-параметрического синтеза позволяет конструировать достаточно робастные САР.

Практическая значимость заключается в уточнении алгоритмов количественно-качественного регулирования процесса теплоснабжения, реализуемых на крупных источниках теплоты, в разработке алгоритмического обеспечения и структуры адаптивной системы управления температурным режимом отдельных отапливаемых зданий. Практическое использование разработок позволит экономить расход теплоты (от 4,5 до 16%) при одновременном обеспечении удовлетворительной температурной обстановки внутри отапливаемых зданий.

На защиту выносятся:

1) обоснование алгоритмов количественно-качественного регулирования процессов теплоснабжения по отопительной нагрузке и по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения, а также результаты анализа практики их применения;

2) алгоритм компенсации основного возмущения для температурного режима зданий – температуры наружного воздуха и процедуры оценки его проблемных параметров по эксплуатационным данным;

3) структура адаптивной системы управления температурным режимом зданий, реализующей комбинированный принцип;

4) результаты решения задачи структурно-параметрического синтеза локальных контуров регулирования отдельных переменных процесса теплоснабжения и анализа их робастности относительно вариаций как параметров настройки регуляторов, так и параметров объекта управления.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 11 конференциях: 6-й, 8-й, 10-й и 11-й Всероссийских научно-технических конференциях «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России» (г. Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова 2005, 2007, 2009, 2010 гг.); Международной научно-практической конференции «Коммунальное хозяйство, энергосбережение, градостроительство и экология на рубеже третьего тысячелетия» (г. Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 2006 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы теплоэнерге-

тики» (г. Челябинск, ЮУрГУ 2008г.); 1-й и 2-й конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (г. Челябинск, ЮУрГУ 2009, 2010 гг.); 3-й Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (г. Москва, МГСУ, 2009 г.); Международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И. Китаева» (г. Екатеринбург, УГТУ-УПИ 2009 г.); VII-ой Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, СибГИУ 2009 г.); ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (2008 – 2010 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 6 публикаций в журналах, включённых в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 138 наименований. Объем работы составляет 131 страницу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы.

В первой главе проведен анализ состояния изучаемой проблемы (работы Гершковича В.Ф., Глухова В.Н., Зингера Н.М., Казаринова Л.С., Калмакова А.А., Кувшинова Ю.Я., Ливчака В.И., Сафонова А.П., Ротача В.Я., Соколова Е.Я., Табунщикова Ю.А., Туркина В.П., Чистовича С.Ф. и др.) и установлены следующие направления исследований, необходимые для построения адаптивной системы управления теплоснабжением зданий:

1. Выяснить, какие положения и соотношения положены в основу известных в литературе алгоритмов погодного регулирования процесса теплоснабжения и установить, как и каким образом должна осуществляться их «привязка» к изменяющимся характеристикам конкретных зданий и их систем отопления;

2. Разработать процедуры оценки по эксплуатационным данным теплотехнических параметров зданий и их систем отопления, входящих в указанные алгоритмы и позволяющих осуществлять их настройку на конкретные условия (настройку на «реальный процесс»);

3. Разработать структуру адаптивной системы управления теплоснабжением зданий;

4. Для автоматического регулирования отдельных переменных процесса теплоснабжения обосновать и разработать достаточно отчетливую и однозначную процедуру выбора и настройки регуляторов.

Во второй главе рассмотрены вопросы управления процессами теплоснабжения, в частности, алгоритмы количественно-качественного регулирования, предложенные в свое время Е.Я. Соколовым. Данные алгоритмы широко используются на практике и в учебном процессе. Предлагались различные способы коррекции и упрощения этих алгоритмов, в частности, неоднократно предлагалось заменить нелинейные зависимости прямыми, ут-

верждалось, что так называемые расчетные температуры можно оптимизировать и т.п. При этом заметим, что примечательным свойством алгоритмов Е.Я. Соколова является то, что никакие конкретные характеристики конкретных зданий и их систем отопления в них не присутствуют. По нашему мнению, это обусловлено тем, что алгоритмы предназначены для централизованного теплоснабжения, для применения на источнике теплоты города или крупного микрорайона, где потребители теплоты могут существенно различаться по своим характеристикам. Именно поэтому все сделано так, что ничего конкретного в алгоритмах нет, да и не должно быть, раз они предназначены для применения на источнике, поставляющем теплоту большому числу, как правило, разнотипных потребителей. Однако при этом вполне естественно возникает вопрос: как и каким образом все-таки осуществляется и должна осуществляться «привязка» характеристик отапливаемых зданий и их систем отопления к такому, образно говоря, обезличенному процессу централизованного теплоснабжения? Кроме того, также представляет интерес и вопрос о том, как и каким образом Е.Я. Соколовым были выведены эти алгоритмы, какие соображения и представления при этом были использованы? Важно также найти тот этап формализации, на котором используемые соотношения еще содержат конкретные характеристики конкретных зданий и их систем отопления. В литературе, насколько нам это известно, нет достаточно подробных и отчетливых данных на этот счет. Вместе с тем, это достаточно интересно в целях определения направлений совершенствования алгоритмов. В связи с этим во второй главе диссертации предложено обоснование алгоритмов регулирования процесса теплоснабжения как по отопительной нагрузке, так и по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения. Показано, что полученные уточненные структуры алгоритмов позволяют вычислять требуемые значения температуры теплоносителя при любом значении так называемого показателя n отопительных приборов.

Установлено, что «привязка» регулирующего воздействия со стороны системы централизованного теплоснабжения к конкретным характеристикам зданий и их систем отопления должна осуществляться за счет расхода теплоносителя, вычисленного с учетом упомянутых характеристик при допущении об одинаковости для всех абонентов расчетных значений температуры теплоносителя и внутреннего воздуха помещений. Данная задача первоначально решается при проектировании системы отопления конкретного здания.

Поскольку характеристики зданий и их систем отопления меняются по ряду известных причин, то проектная настройка регулирующего воздействия, как бы она не была точна, объективно не может быть удовлетворительной в последующем, требуется разработка алгоритмов оценки теплотехнических параметров зданий и их систем отопления по их эксплуатационным данным.

В третьей главе предложена общая структура адаптивной системы управления и обоснован вид алгоритма компенсации основного возмущения температурного режима зданий – температуры наружного воздуха при допу-

щении о том, что система отопления здания представляется эквивалентным отопительным прибором. Этот алгоритм имеет следующий вид:

$$t_{co} = t_B \cdot \{1 + q_v V \cdot [0,5 / (cG_{co}) + 1 / (kF)_{co}] \} - q_v \cdot V [0,5 / (cG_{co}) + 1 / (kF)_{co}] \cdot t_H, \quad (1)$$

где t_{co} и G_{co} – соответственно температура и массовый расход воды на входе системы отопления, $(kF)_{co}$ – параметр, подлежащий определению при идентификации модели системы отопления и представляющий собой произведение коэффициента теплопередачи k на площадь поверхности теплообмена F для всей системы отопления, c – удельная теплоемкость теплоносителя, q_v – удельная тепловая характеристика здания, V – его объем, t_B и t_H соответственно температура внутреннего и наружного воздуха.

Выбор t_{co} в качестве управляемой переменной обусловлен тем, что алгоритм компенсации, представленный в таком виде, может быть применен как при наличии автономной системы теплоснабжения здания, так и при централизованном теплоснабжении. В последнем случае на индивидуальном тепловом пункте (ИТП) здания должен быть установлен регулируемый узел смешения, позволяющий добиваться требуемого значения t_{co} , либо должна быть применена независимая схема подключения к тепловым сетям с соответствующей системой управления. Поскольку у каждого отапливаемого здания проблемные параметры q_v и $(kF)_{co}$ имеют свои собственные значения и меняются они тоже только индивидуальным образом, то алгоритм может и должен быть реализован только на ИТП объекта управления, причем для его настройки на «реальный процесс» необходима разработка процедур оценки q_v и $(kF)_{co}$ по экспериментальным данным.

Разработан адаптивный алгоритм оценки удельной тепловой характеристики зданий q_v , базирующийся на динамической математической модели теплового режима. При этом для оценки производных сигналов температуры внутреннего и наружного воздуха применен алгоритм помехоустойчивого дифференцирования и предложено его обоснование. Для повышения помехоустойчивости всей процедуры оценки решалась задача фильтрации сигналов, которая предварительно сводилась к задаче оптимизации. Выполнена апробация алгоритма оценки удельной тепловой характеристики зданий по экспериментальным данным как без, так и с включением алгоритма фильтрации.

Разработаны адаптивный и неадаптивный алгоритмы оценки параметра $(kF)_{co}$. Адаптивный алгоритм представляется следующими соотношениями:

$$(kF)_{co(i+1)} = (kF)_{co i} + 2h \cdot [\cdot] \cdot \left(\frac{t_{co(i+1)} + t_{обп(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)} \right), \quad (2)$$

$$[\cdot] = \left[W_{co(i+1)} - (kF)_{co i} \cdot \left(\frac{t_{co(i+1)} + t_{обп(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)} \right) \right], \quad (3)$$

$$h = \frac{1}{2\mu \left(\frac{t_{CO(i+1)} + t_{OEP(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)} \right)^2}. \quad (4)$$

Здесь t_{OEP} – температура обратной воды, $W_{CO(i+1)} = cG_{CO(i+1)} \cdot (t_{CO(i+1)} - t_{OEP(i+1)})$ – мощность системы отопления, $\mu \geq 1$ – некоторый параметр, численное значение которого подбирается, исходя из конкретной статистической обстановки, в которой протекает исследуемый процесс. Выполнена апробация алгоритмов по экспериментальным данным.

Разработан и апробирован по экспериментальным данным адаптивный алгоритм идентификации параметров модели системы отопления, учитывающей, что коэффициент теплопередачи эквивалентного отопительного прибора $(k)_{CO} = (m)_{CO} \times (\Delta t_{CO})^n$ зависит от температурного напора Δt_{CO} . Показано, что из-за большой инерционности объекта управления нет большой необходимости в определении отдельных показателей $(mF)_{CO}$ и n , достаточно отслеживать в целом параметр $(kF)_{CO}$.

Разработан и апробирован по экспериментальным данным алгоритм совместной оценки параметров $(mF)_{CO}$, n и q_v , а также алгоритм совместной оценки $(kF)_{CO}$ и q_v , при этом при разработке последнего алгоритма уравнение (1) представлялось в виде общеизвестного линейного соотношения $y = a + bx$, в котором использовались следующие обозначения (новые переменные):

$$y = \frac{t_{CO} - t_B}{t_B - t_H}; \quad x = \frac{1}{G_{CO}}; \quad a = q_v V \frac{1}{(kF)_{CO}}; \quad b = q_v V \frac{0,5}{c}.$$

Адаптивный и неадаптивный алгоритмы идентификации параметров такой зависимости достаточно хорошо известны специалистам и их реализации не вызывает каких-либо затруднений. Настроенное по экспериментальным данным указанным способом конкретное выражение алгоритма (1) для одного из пятиэтажных домов серии 1-464Д-105 (г. Челябинск) имеет вид:

$$t_{CO} = t_B + 22536 \times \left(\frac{0,5}{cG_{CO}} + \frac{1}{22686} \right) \times (t_B - t_H).$$

В данное выражение расход теплоносителя следует подставлять в $m / ч$. При этом средняя квадратическая погрешность аппроксимации экспериментальных данных для y равнялась 0,0225 отн. ед., а коэффициент корреляции R_{yx} , оценивающий тесноту линейной связи между y и x , составил $R_{yx} = 0,727$. Качество аппроксимации экспериментальных данных для y и x зависимостью $y = a + bx$ иллюстрируется рис. 1.

Как видно из рис. 1, экспериментальные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью.

В данном случае теплотехнические свойства ограждающих конструкций и системы отопления оценены для здания с автоматизированным ИТП. Здесь

температура воздуха внутри контрольных помещений поддерживалась с приемлемой точностью на уровне 21°C , «потенциал» экономии теплоты был практически выбран системой автоматического регулирования (САР). Поэтому для определения возможного сокращения расхода теплоты на отопление за счет применения разработанного алгоритма компенсации по экспериментальным данным для другого здания без системы автоматизации

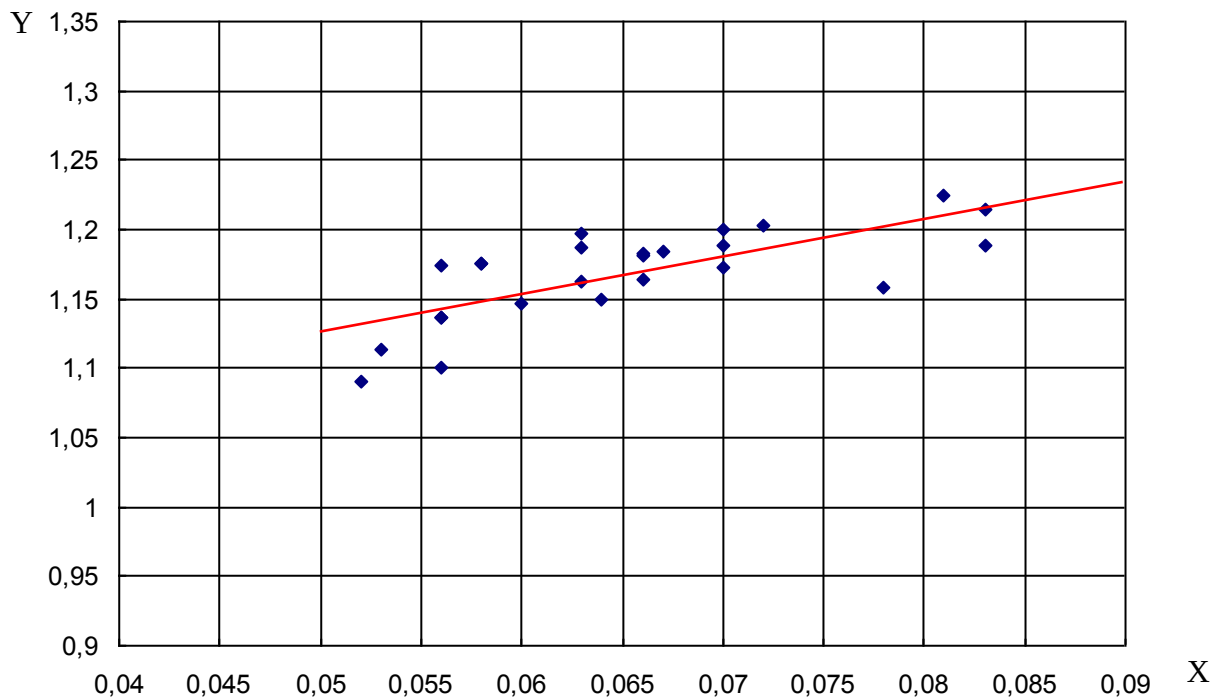


Рис. 1. Аппроксимация экспериментальных данных

нашли численные значения проблемных параметров $(kF)_{co}$ и q_v , и установили, что конкретный вид алгоритма компенсации будет следующим:

$$t_{co} = t_B + 50413 \times \left(\frac{0,5}{cG_{co}} + \frac{1}{63381} \right) \times (t_B - t_H). \text{ Коэффициент корреляции } R_{yx} \text{ со-}$$

ставил в данном случае $R_{yx} = 0,962$, что указывает на высокую степень соответствия используемых теоретических представлений экспериментальным данным. С помощью данного выражения вычислили, какой должна быть температура теплоносителя на входе системы отопления для того, чтобы температура воздуха внутри контрольных помещений при имевшем место в реальных условиях расходе G_{co} равнялась 21°C . Графики рассчитанной кривой и той кривой, какая имела место в реальных условиях, приведены на рис. 2.

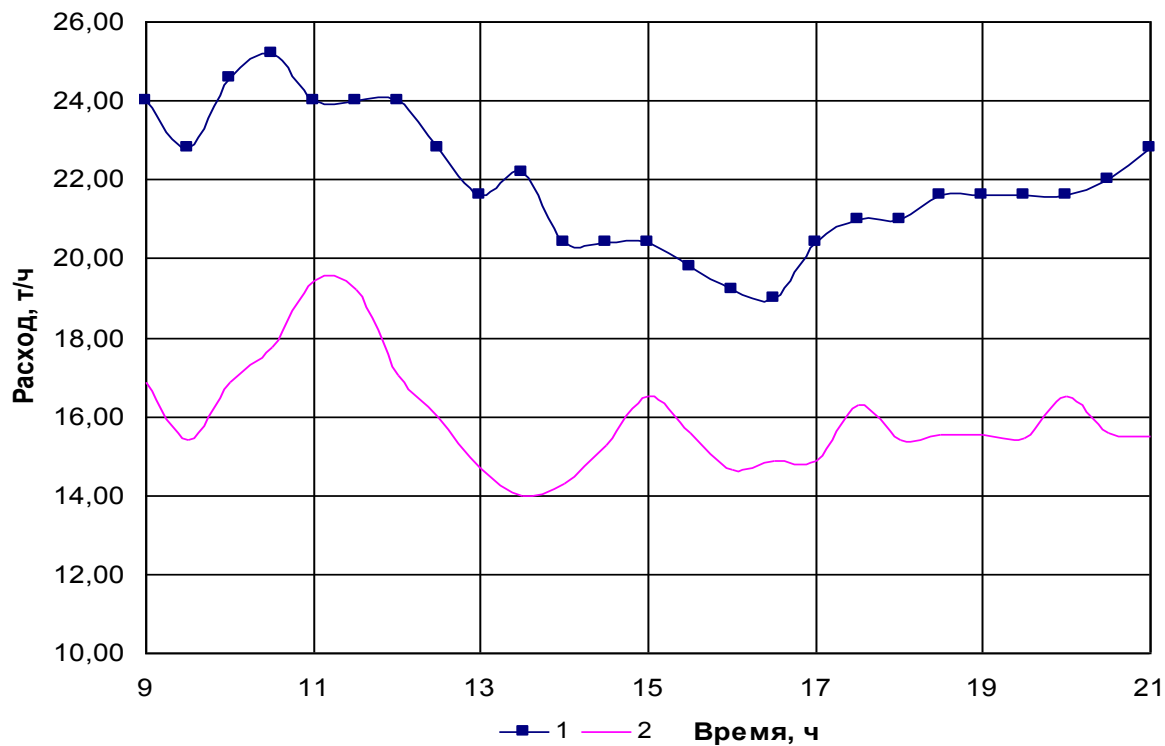


Рис. 2. Температура теплоносителя на входе системы отопления:
1 – действительная, 2 – достаточная для $t_B = 21^{\circ}\text{C}$

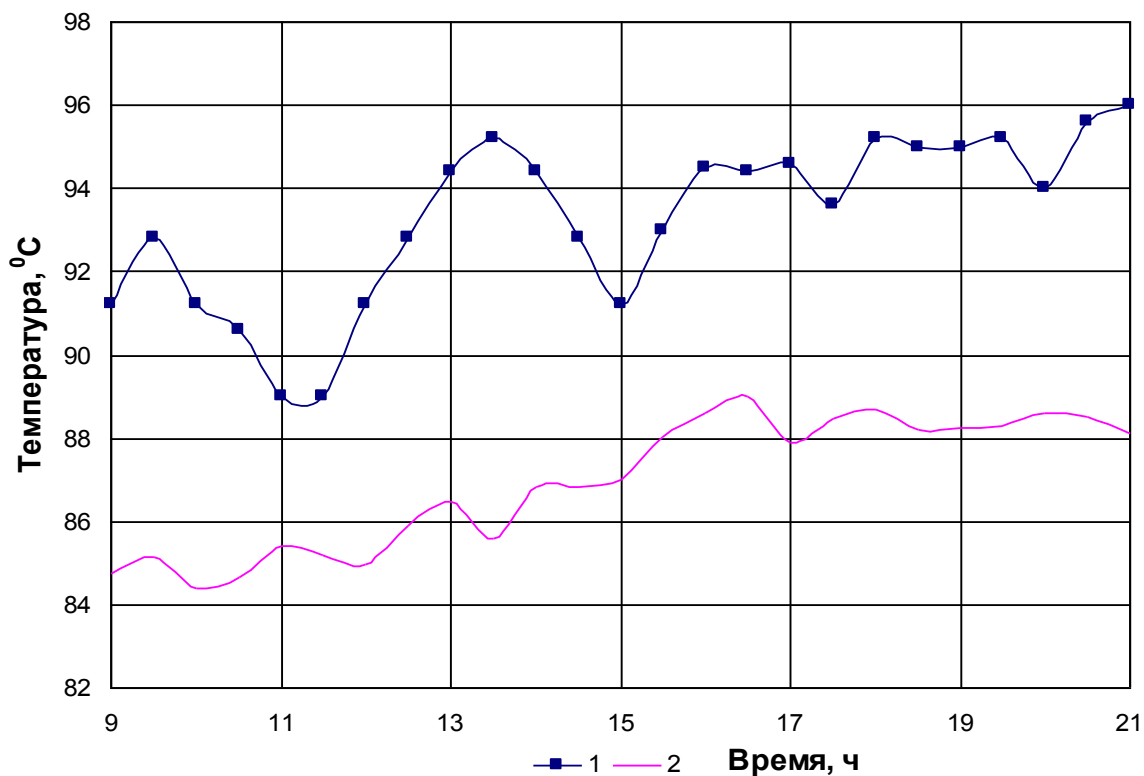


Рис. 3. Расход теплоносителя на систему отопления:
1 – действительный, 2 – достаточный для $t_B = 21^{\circ}\text{C}$

Из рис. 2 видно, что требуемая по условию $t_B = 21^\circ\text{C}$ температура t_{co} заметно ниже фактической. На рис. 3 приведены график фактического расхода воды на систему отопления G_{co} и кривая такого расхода теплоносителя, при котором при фактическом значении t_{co} обеспечивается температура $t_B = 21^\circ\text{C}$.

Как видно из рис. 3, требуемый по условию $t_B = 21^\circ\text{C}$ расход воды G_{co} также заметно ниже фактического, следовательно, применение данного способа управления ТРЗ позволит существенно сократить расход теплоты на отопление.

Разработано несколько вариантов структурной схемы адаптивной системы управления тепловым режимом зданий, базирующихся либо на раздельной, либо на совместной оценке проблемных параметров здания и его системы отопления. В частности, структурная схема системы управления для вышеуказанного случая приведена на рис. 4.

На рис. 4 использованы следующие обозначения: ТРЗ – тепловой режим здания, БИ – блок идентификации, в этом блоке определяются настраиваемые параметры, БК – блок компенсации, в этом блоке формируется сигнал компенсации в соответствии с формулой (1).

В четвертой главе обоснован вид эталонной передаточной функции замкнутой САР (на основе анализа литературных данных, а также и из условия достижения минимума интегрального квадратичного критерия качества переходного процесса). По эталонной передаточной функции замкнутой

САР $W_{sc}(p) = \frac{1}{\theta p + 1} \exp(-\tau_{об} p)$ определены структуры и параметры настройки

автоматических регуляторов для типовых передаточных функций локальных каналов объекта управления

$$\frac{1}{T_{об} p} \exp(-\tau_{об} p), \quad \frac{k_{об}}{T_{об} p + 1} \exp(-\tau_{об} p), \quad \frac{k_{об}}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \exp(-\tau_{об} p),$$

где $k_{об}, T_{об}, \tau_{об}$ – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания объекта, a_1, a_2 – коэффициенты дифференциального уравнения объекта, θ – достаточно малая постоянная времени, p – комплексная переменная. Показано, что все найденные структуры относятся к семейству пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-семейству): для объекта первого, второго и третьего типа квазиоптимальным является соответственно П-, ПИ- и ПИД-регулятор, следовательно, рассмотренный метод можно рассматривать как некое формальное обоснование целесообразности применения ПИД-регуляторов. Как известно, вопрос о необходимости такого обоснования неоднократно отмечался в литературе В.Я. Ротачем, в частности, в его недавно изданной книге «Теория автоматического управления» указано, что П-, ПИ- и ПИД- «...алгоритмы были получены чисто эвристическим путем» и что «... достаточно

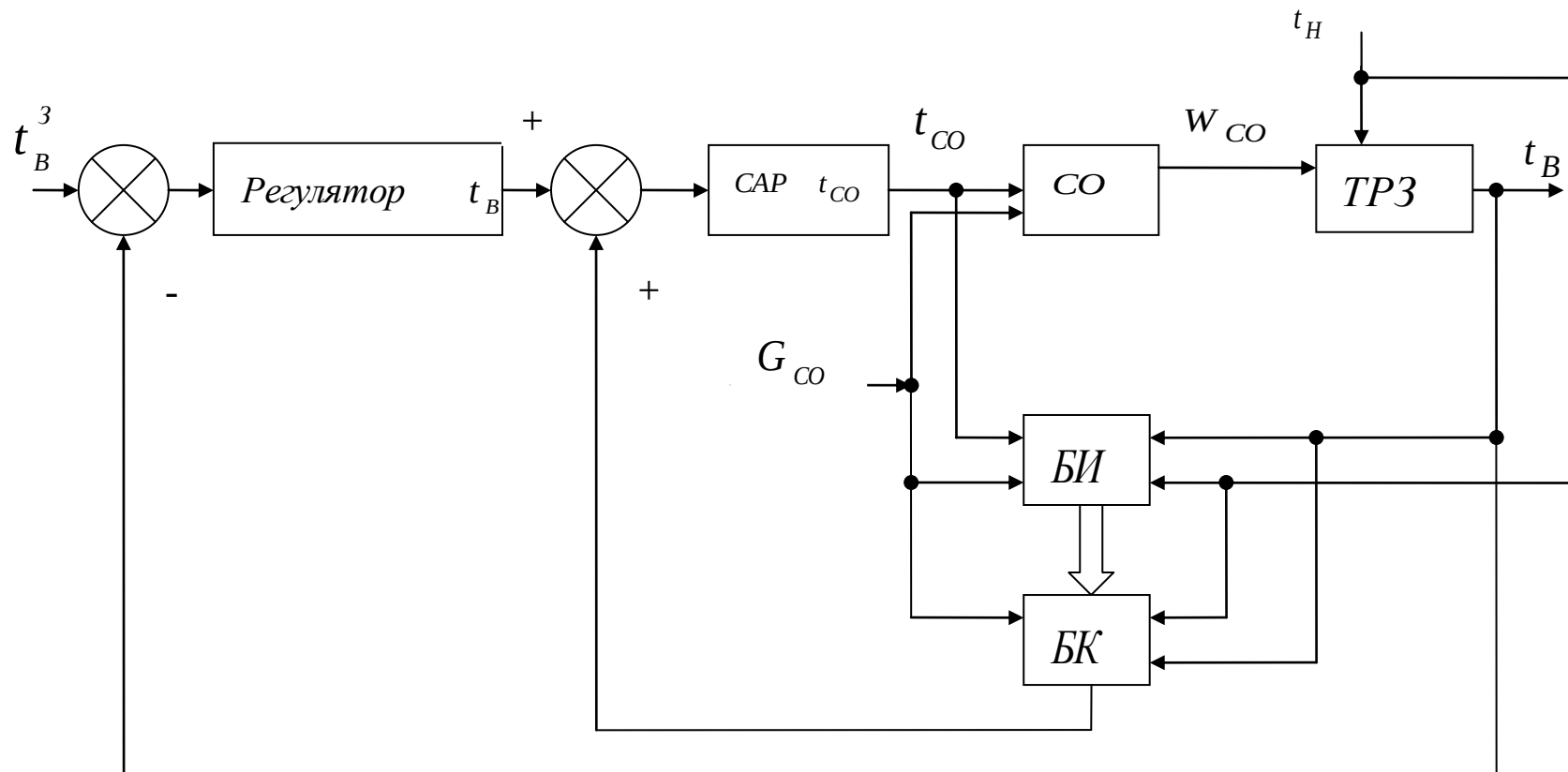


Рис.4. Структура адаптивной системы управления

убедительное формальное доказательство целесообразности их применения ... до сих пор получить не удалось».

Отмечено, что использованный подход к решению задачи синтеза (посредством предварительного выбора передаточной функции замкнутой системы) вообще-то известен уже давно, что многие методы синтеза САР, в частности, методы симметричного и модульного оптимума, по существу, основаны на предварительном выборе желаемой передаточной функции замкнутой системы. В известной мере этот подход используется даже при выборе желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутой системы. Обсуждаются и используются подобные подходы и в настоящее время. Однако напрямую (непосредственно) этот метод в литературе, как правило, не рассматривается. Вместе с тем, метод достаточно прост и отличается предельной ясностью. Очень важно, что метод приводит к явному формульному решению задачи, дает однозначный ответ на вопрос: какой регулятор следует применить на данном объекте и каковы должны быть его параметры настройки. Последнее замечание достаточно значимо, т.к. в литературе по существу нет достаточно формализованных процедур, позволяющих однозначно решать задачу синтеза регуляторов.

Найдена передаточная функция (и дифференциальное уравнение) замкнутой системы, сконструированной по рассматриваемому методу, ее отличие от эталонной передаточной функции обусловлено приближенностью метода синтеза. Проанализированы численно-аналитическими методами устойчивость и качество переходных процессов в САР. Показано, что чем больше запаздывание объекта управления $\tau_{об}$, тем хуже переходный процесс в системе, сконструированной по рассматриваемому методу. Вместе с тем удалось установить, что небольшое положительное значение параметра θ эталонной передаточной функции заметно улучшает свойства САР.

Установлено, что по каналу «задание – рассогласование» все квазиоптимальные САР астатические, по каналу «возмущению со стороны регулирующего органа – рассогласование» квазиоптимальные системы с объектами второго и третьего типов также будут астатическими, однако система с объектом первого типа будет только статической.

Показано, что рассматриваемый способ синтеза заметно проще по содержанию, чем известный в литературе способ В.Я. Ротача и не требует, в частности, определения характера возмущающих воздействий.

Отмечено, что рассматриваемый способ синтеза также проще метода, используемого, в частности, В.А. Лукасом и др. и основанного на применении практически нереализуемых регулятора Ресвика и предиктора Смита.

Исследовано, как точность определения времени запаздывания объекта сказывается на свойствах системы. Выполненные расчеты показали, что если параметры объекта определены точно, то при $\theta = 0$ с перерегулирование $\sigma = 49 \%$. Если же параметры объекта определены неточно, причем если время запаздывания модели $\tau_{мод}$ меньше времени запаздывания, имеющего ме-

сто на реальном объекте, $\tau_{об}$ то перерегулирование возрастает, в этой ситуации САР может и потерять устойчивость. В самом деле, если структура математической модели объекта и все ее параметры, кроме времени запаздывания, определены достаточно точно, то САР будет устойчива лишь при удовлетворении следующего неравенства: $\tau_{об} / (\theta + \tau_{мод}) < \pi / 2$.

Влияние $\tau_{мод} > \tau_{об}$ аналогично увеличению параметра θ , т.е. демпфированность и устойчивость САР возрастают.

Исследованы устойчивость и качество переходных процессов в САР с объектом первого типа при вариациях коэффициента передачи П-регулятора в окрестности базовой (т.е. рассчитанной по рассматриваемому методу) настройки при возмущении по заданию. Установлено, что при эталонном (базовом) значении коэффициента передачи П-регулятора перерегулирование в САР при различных значениях $T_{об}, \tau_{об}$ получается практически одинаковым и равным $\approx 47 \div 49\%$. Время регулирования при прочих равных условиях растет прямо пропорционально росту $(T_{об} + \tau_{об})$ и обратно пропорционально величине коэффициента передачи регулятора. Базовая настройка П-регулятора

$k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ является достаточно грубой (робастной), поскольку существует за-

метная окрестность точки $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$, в которой сохраняются приемлемое ка-

чество и запас устойчивости системы. Установлено также, что настройки П-регулятора, оптимальные по интегральному модульному I_1 и квадратичному I_2 критериям, не совпадают как между собой, так и каждая с базовой настройкой. Настройки, найденные из условия минимума интегрального квадратичного критерия заметно ближе к базовой настройке.

Установлено также, что величина перерегулирования σ при одинаковых настройках регулятора остается практически одной и той же, как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа, несмотря на то, что σ в этих случаях вычисляется вообще-то по-разному. Кроме того, координаты точек минимума интегрального модульного и квадратичного критериев, вычисленных для случая возмущения по нагрузке, также удивительным образом совпадают с аналогичными координатами в случае возмущения по заданию. По-видимому, данные обстоятельства подтверждают известное высказывание о том, что если САР оптимизирована для отработки возмущений по заданию, то одновременно достигается оптимум и при отработке возмущений по нагрузке. Время регулирования t_p при прочих равных условиях при возмущении со стороны регулирующего органа меньше, чем в случае возмущения по заданию, что, вообще-то, достаточно объяснимо.

Исследовано влияние вариаций параметров объекта управления $W_{об}(p) = \frac{1}{T_{об} p} \exp(-\tau_{об} p)$ на устойчивость и качество переходных процессов.

Установлено, что если постоянная времени и время запаздывания объекта изменятся соответственно на $\Delta T_{об}$ и на $\Delta \tau_{об}$, а П-регулятор будет иметь настройку, найденную по предыдущим значениям его параметров $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$,

то условие устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования имеет вид: $(\tau_{об} + \Delta \tau_{об}) / [(\theta + \tau_{об}) \cdot (1 + \Delta T_{об} / T_{об})] < \pi / 2$. Из этого условия следует, что с увеличением параметра θ область устойчивости замкнутой САР расширяется. При $\theta = 0$ область устойчивости будет иметь наименьший размер. Из решения дифференциального уравнения САР

$$(\theta + \tau_{об}) \cdot (1 + \Delta T_{об} / T_{об}) \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}) = x^3(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}),$$

полученного для данного случая, следует, что при $\Delta T_{об} > 0$ влияние этого параметра на устойчивость (робастность устойчивости) и качество (робастность качества) САР аналогично влиянию параметра θ , т.е. колебательность переходной функции уменьшается с ростом $\Delta T_{об}$, переходный процесс все в большей степени приобретает апериодический характер.

Аналогичные результаты получаются и при $\Delta \tau_{об} < 0$, т.е. с увеличением $|\Delta \tau_{об}|$ демпфированность системы растет. Если же $\Delta \tau_{об} > 0$, то с увеличением $\Delta \tau_{об}$ перерегулирование возрастает, ухудшаются как качество переходного процесса, так и запас устойчивости системы.

Исследованы устойчивость и качество переходных процессов в САР со статическим объектом управления первого порядка с запаздыванием в окрестности базовых настроек ПИ-регулятора, найденных с помощью рассматриваемого метода синтеза. При этом создавались как возмущения по заданию, так и со стороны регулирующего органа. Показано, что практически значимая вариация параметров настройки ПИ-регулятора не приводит к существенному ухудшению поведения сконструированной системы, поэтому можно сделать заключение, что рассматриваемая система является достаточно робастной по отношению к настройкам регулятора.

Сравнивая качество переходных процессов при возмущении по заданию и при возмущении по нагрузке при одинаковых настройках регулятора, можно отметить, что в целом, по нашим оценкам, рассматриваемая САР лучше обрабатывает возмущение по заданию, показатели качества переходных процессов принимают более желательные значения. По-видимому, все это является следствием применяемого подхода к решению задачи синтеза САР: наилучшим образом обработать возмущение именно по каналу задания.

Настройки ПИ-регулятора, оптимальные по критериям I_1 и I_2 , могут не совпадать как между собой, так и с базовыми настройками, но в целом их различие достаточно небольшое.

Численно-аналитическими методами исследована робастность системы по отношению к изменениям параметров объекта управления, найдено условие устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования:

$\omega_{кр} \tau_{об} (1 + \Delta \tau_{об} / \tau_{об}) - \arctg (\omega_{кр} T_{об}) + \arctg [\omega_{кр} T_{об} (1 + \Delta T_{об} / T_{об})] < \pi / 2$, где критическая частота $\omega_{кр}$ вычисляется по следующему уравнению:

$$\omega_{об} = \sqrt{\frac{-[(\theta + \tau_{ia})^2 - T_{ia}^2 (1 + \Delta k_{ia} / k_{ia})^2]}{2(\theta + \tau_{ia})^2 T_{ia}^2 (1 + \Delta \dot{\theta}_{ia} / T_{ia})^2} + \frac{\sqrt{[(\theta + \tau_{ia})^2 - T_{ia}^2 (1 + \Delta k_{ia} / k_{ia})^2]^2 + 4(\theta + \tau_{ia})^2 T_{ia}^2 (1 + \Delta \dot{\theta}_{ia} / T_{ia})^2 (1 + \Delta k_{ia} / k_{ia})^2}}{2(\theta + \tau_{ia})^2 T_{ia}^2 (1 + \Delta \dot{\theta}_{ia} / T_{ia})^2}}$$

Исследования, выполненные, в том числе и с помощью среды программирования «Maple 10» показали, что система имеет значимый запас устойчивости относительно вариации параметров объекта управления $\Delta k_{об}$, $\Delta T_{об}$ и $\Delta \tau_{об}$, причем размеры области устойчивости САР увеличиваются при увеличении параметра θ (увеличиваются размеры допустимых вариаций всех параметров объекта управления).

Установили, что для данного случая дифференциальное уравнение замкнутой САР будет иметь вид:

$$(T_{об} + \Delta T_{об}) \cdot (\theta + \tau_{об}) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + (\theta + \tau_{об}) \frac{dx(t)}{dt} + T_{об} (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{dx(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об})}{dt} +$$

$$+ (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \cdot x(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}) = T_{об} (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \frac{dx^3(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об})}{dt} +$$

$$+ (1 + \Delta k_{об} / k_{об}) \cdot x^3(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об})$$

Решая, как непосредственно данное дифференциальное уравнение, так и используя программу расчета переходных процессов в САР, в которой математические описания элементов системы регулирования представлены по отдельности, установили, что при возмущении как по заданию, так и по нагрузке в окрестности точки (0,0,0) существует довольно заметная область вариации параметров $\Delta k_{об}$, $\Delta T_{об}$ и $\Delta \tau_{об}$, для которой сохраняются приемлемые значения показателей качества переходных процессов.

Численными методами исследованы свойства САР с объектом управления третьего типа в окрестности базовых настроек ПИД-регулятора. Установлено, что в значимой по размерам окрестности точки с базовыми настройками регулятора сохраняются устойчивость САР и приемлемое качество регулирования как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа, следовательно, большой точности установки численных значений параметров настройки регулятора не требуется.

Исследована робастность системы как грубость по отношению к изменениям параметров объекта управления третьего типа, при этом считалось, что по тем или иным причинам параметры объекта изменяются и принимают значения: $(k_{об} + \Delta k_{об})$; $(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})$; $(a_1 + \Delta a_1)$; $(a_2 + \Delta a_2)$. Установлено, что при наиболее вероятных в практических ситуациях величинах вариаций параметров объекта управления также сохраняются устойчивость САР и приемлемое качество регулирования как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа. Следовательно, данный ме-

тод структурно-параметрического синтеза позволяет конструировать достаточно робастные САР.

В пятой главе описаны техническая и функциональная структуры разработанной системы контроля теплового режима здания химического факультета ЮУрГУ. Функциональная схема системы приведена на рис. 5. Отмечены особенности реализуемой на базе контроллеров «Xenta» системы управления тепловым режимом здания. Указано, что погодный график регулирования, рекомендуемый Челябинскими тепловыми сетями (ЧТС), одинаков для любых зданий г. Челябинска.

На основе экспериментальных данных, полученных с помощью разработанной системы контроля, проанализированы особенности теплового режима здания химического факультета. Показано, что качество поддержания требуемого температурного режима часто нельзя признать удовлетворительным: наблюдаются довольно значительные отклонения температуры внутреннего воздуха от приемлемых значений. Объясняется это и плохим качеством работы системы управления (нередко по разным причинам имеет место ручной режим работы) и тем, что установленная мощность системы отопления не достаточна для покрытия тепловых потерь здания при любой температуре наружного воздуха. Последнее обстоятельство является следствием того, что действительное значение удельной тепловой характеристики здания, как это найдено по экспериментальным данным, более чем в два раза оказалось выше своего расчетного значения.

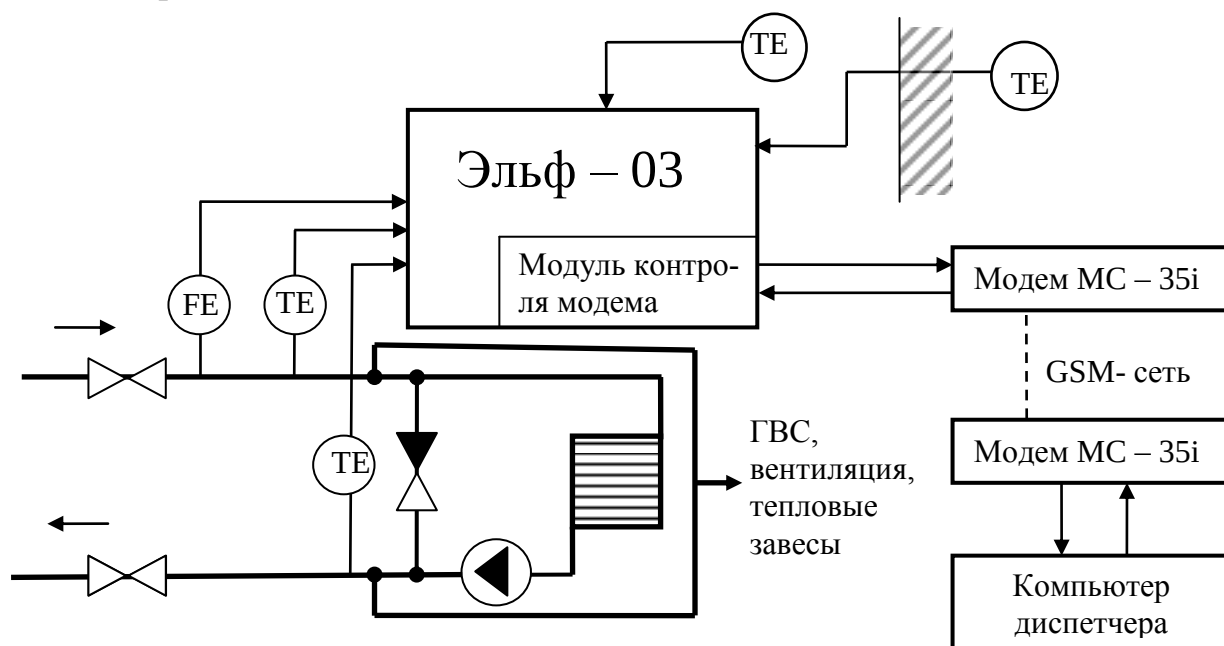


Рис. 5. Функциональная схема системы контроля теплового режима

С помощью полученных экспериментальных данных произведена настройка алгоритма компенсации на реальные теплозащитные свойства здания и реальные характеристики его системы отопления. При этом следует иметь в виду, что все преимущества адаптированного погодного графика регули-

рования будут в действительности проявлены только после реконструкции системы отопления здания с целью увеличения ее установленной мощности.

Основные выводы и результаты

1. Предложены уточнённые структуры алгоритмов количественно-качественного регулирования процессов теплоснабжения по отопительной нагрузке и по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения, позволяющие вычислять требуемые значения температуры теплоносителя при любом значении показателя степенной зависимости коэффициента теплопередачи отопительных приборов от температурного напора.

2. Для выбранного алгоритма компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха, разработаны и апробированы различные варианты адаптивных и неадаптивных алгоритмов оценки проблемных теплотехнических параметров зданий и их систем отопления по эксплуатационным данным. Показана эффективность применения алгоритмов (адаптированных графиков погодного регулирования) для целей энергосбережения.

3. Разработаны два варианта структурной схемы адаптивной системы управления тепловым режимом зданий, базирующихся либо на отдельной, либо на совместной оценке проблемных параметров здания и его системы отопления.

4. Для типовых передаточных функций отдельных каналов процесса теплоснабжения определены структура и параметры настройки автоматических регуляторов, численно-аналитическими методами детально исследована робастность устойчивости и качества переходных процессов сконструированных систем как по параметрам настройки регуляторов, так и по параметрам регулируемых каналов. Найдены условия устойчивости локальных систем. Установлено, что данный метод структурно-параметрического синтеза позволяет конструировать достаточно робастные САР.

5. Разработаны техническая и функциональная структуры системы контроля теплового режима здания химического факультета ЮУрГУ. Отмечены особенности реализуемой на базе контроллеров «Xenta» системы управления тепловым режимом здания. С помощью полученных экспериментальных данных произведена настройка алгоритма компенсации на реальные теплозащитные свойства здания и реальные характеристики его системы отопления. При этом следует иметь в виду, что все преимущества адаптированного погодного графика регулирования будут в действительности проявлены только после реконструкции системы отопления здания с целью увеличения ее установленной мощности.

Научные публикации по теме диссертации в журналах ВАК РФ

1. Панфёров, С.В. К обоснованию метода структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов / С.В. Панфёров, А.И. Телегин, В.И. Панфёров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 9. – № 3 (136). – С. 29 – 36.
2. Панфёров, С.В. Оценка качества регулирования уровня жидкости в системах теплоснабжения / С.В. Панфёров, А.И. Телегин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11. – № 15 (148). – С. 39 – 44.
3. Панфёров, С.В. Анализ качества выбора и настройки автоматического регулятора уровня жидкости / С.В. Панфёров, А.И. Телегин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2009. – Вып. 8. – № 16 (149). – С. 49 – 53.
4. Панфёров, В.И. Автоматизированный контроль и анализ теплового режима здания химического факультета ЮУрГУ / В.И. Панфёров, С.В. Панфёров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – № 14 (190). – С. 29 – 35.
5. Панфёров, С.В. Некоторые проблемы энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий / С.В. Панфёров, А.И. Телегин, В.И. Панфёров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 12. – № 22 (198). – С. 79 – 86.
6. Панфёров, С.В. Энергосберегающая система управления температурным режимом отапливаемых зданий / С.В. Панфёров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2010. – Вып. 11. – № 33 (209). – С. 42 – 46.

Другие научные публикации по теме диссертации

7. Панфёров, С.В. Численное моделирование нагрева движущейся жидкости / С.В. Панфёров, Ю.С. Васильев // Материалы 6-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – С.29 – 30.
8. Панфёров, С.В. Алгоритм расчета нагрева движущейся жидкости / С.В. Панфёров, Ю.С. Васильев // Материалы Международной научно-практической конференции «Коммунальное хозяйство, энергосбережение, градостроительство и экология на рубеже третьего тысячелетия». – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С.46 – 48.
9. Панфёров, С.В. Адаптивный алгоритм оценки сопротивления участка гидравлической цепи / С.В. Панфёров, Ю.С. Васильев // Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – С.45 – 47.

10. Панфёров, С.В. Моделирование нестационарных процессов в газопроводах / С.В. Панфёров, В.И. Панфёров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – Вып. 4. – № 14 (86). – С. 44 – 47.
11. Панфёров, С.В. Исследование переходных процессов в газопроводах / С.В. Панфёров, В.И. Панфёров // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы теплоэнергетики». – Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – С. 56 – 62.
12. Панфёров, С.В. Анализ качества выбора и настройки автоматических регуляторов по передаточной функции замкнутой системы / С.В. Панфёров, А.И. Телегин, В.И. Панфёров // Труды Международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И. Китаева». – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. – С. 427 – 431.
13. Панфёров, С.В. Анализ алгоритмов регулирования систем теплоснабжения по Е.Я. Соколову / С.В. Панфёров, В.И. Панфёров // Материалы Третьей Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». – М.: МГСУ, 2009. – С. 276 – 280.
14. Панфёров, С.В. Об одном решении задачи коррекции динамической модели объекта / С.В. Панфёров // Научный поиск: материалы первой научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 93 – 97.
15. Панфёров, С.В. Адаптивный алгоритм в задаче идентификации параметров математической модели / С.В. Панфёров, А.И. Телегин // Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – С. 43 – 47.
16. Панфёров, С.В. Адаптивная система управления тепловым режимом зданий / С.В. Панфёров, А.И. Телегин, В.И. Панфёров // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 224 – 228.
17. Панфёров, С.В. Решение задачи управления тепловым режимом отапливаемых зданий / С.В. Панфёров, А.И. Телегин // Материалы 11-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – С. 44 – 46.
18. Панфёров, В.И. Автоматизированная система контроля теплового режима здания химического факультета ЮУрГУ / В.И. Панфёров, С.В. Панфёров // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 1. – С. 212 – 215.
19. Панфёров, С.В. Энергосберегающая система управления температурным режимом отапливаемых зданий / С.В. Панфёров // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 1. – С. 215 – 219.