

М 165190

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

НЕФЕЛОВ С. В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ
РЕГУЛИРОВАНИЯ В УСТАНОВКАХ
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

(05.198 автоматизация производственных процессов)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте санитарной техники МПСМ СССР.

Научные руководители:

доктор технических наук Гоголин А. А.,
кандидат технических наук Плотников В. Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Участкин П. В.
кандидат технических наук Кузьмик П. К.

Ведущее предприятие НИИ Техноприбор

Автореферат

. 1972 г.

Защита
на заседании
Трудового
имени Н. Э
ская ул., д

1972 г.
ордена
училища
Бауман-

Ваши с
сылать по

сьба вы-

С диссе
лица.

ке учи-

Ученый

M165190

в Е. С.



1165190

Нефелов С. В. Исследование

Прогресс характеризуется непрерывным развитием автоматизации, которая приводит к обновлению, а зачастую, и к полному изменению технологии производства.

Для нормального ведения целого ряда сложных технологических процессов возникает необходимость поддержания в достаточно узких пределах параметров окружающего воздуха: температуры и давления, влажности и чистоты. Одной из новых отраслей, способствующих общему развитию технического прогресса, является техника кондиционирования воздуха, как средство автоматического поддержания в помещениях оптимальных параметров воздушной среды. Без применения установок кондиционирования воздуха невозможно вести большинство современных технологических процессов в приборостроительной и радиоэлектронной промышленности, химической, текстильной, пищевой и в целом ряде других отраслей народного хозяйства.

При разработке систем автоматического регулирования установок кондиционирования воздуха до последнего времени наиболее слабым местом было отсутствие удовлетворительных данных о динамических свойствах отдельных используемых агрегатов. Однако практика эксплуатации и проектирования автоматизированных установок кондиционирования воздуха показала необходимость исследования и учета динамических характеристик всех звеньев системы. Критическое изучение с этих позиций схем регулирования на стадии проектирования уменьшает экономические расходы на аппаратуру контроля и регулирования, стоимость которой составляет довольно высокий процент от стоимости технологических агрегатов.

Одним из наиболее сложных вопросов техники кондиционирования воздуха является поддержание заданной температуры с высокой точностью. Эта точность обуславливается допустимыми температурными изменениями размеров приборов, изделий, измерительного инструмента, станков, эталонов, а также условиями технологических процессов. При заданных изменениях размеров изделий и оборудования имеющие место отклонения температуры определяются как по своей величине, так и по времени. Поэтому для возможного расширения диапазона отклонения температуры целесообразно предусматривать регулирование не только по температуре, но и по длительности ее отклонения от заданного значения. Это достигается быстроедействием процесса регулирования.

Стремление повысить быстроедействие системы и в то же время довести до максимума эффективность использования технологического оборудования установок кондиционирования воздуха, т.е. обеспе-

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

И. И. З. Баумана
БИБЛИОТЕКА

M165190

печить при всех равных условиях максимальную экономию тепло- и холодоэнергии, заставляет искать новые принципы управления, создавать новые типы САР.

Существующие системы автоматического регулирования установок кондиционирования воздуха не отвечают перечисленным требованиям. Данная работа, посвященная исследованию и разработке оптимальной системы регулирования, позволит создать автоматизированную установку кондиционирования воздуха, обеспечивающую при минимальном расходе энергии высокое быстродействие и точность поддержания требуемых параметров.

Содержание диссертационной работы изложено в четырех главах.

В г л а в е I анализируется состояние изученности нестационарных процессов в установках кондиционирования воздуха, рассматривается ряд серийных промышленных регуляторов, используемых в этих установках и на основе критического анализа систем автоматического регулирования установок кондиционирования воздуха определяются основные задачи диссертационной работы.

Вопросы автоматического регулирования процессов кондиционирования воздуха исследуются в целом ряде работ как отечественных, так и зарубежных авторов.

Технические средства и методы контроля и регулирования температуры и влажности воздуха описаны в работах М.Б.Халамейзера. Во главе решения проблемы автоматизации установок кондиционирования воздуха автор ставит изучение динамических свойств объектов регулирования. Рассматривая различные алгоритмы управления М.Б.Халамейзер дает описание способов их аппаратной реализации.

Наиболее фундаментальными работами в области исследования нестационарных процессов в системах кондиционирования воздуха являются работы И.В.Участкина. В этих работах проводится исследование как статических, так и динамических характеристик всех звеньев, которые входят в различные технологические схемы установок кондиционирования воздуха.

Из зарубежных работ наибольшее внимание с точки зрения разработки аналитических методов определения динамических характеристик уделяется в работах Я.Такахаси и Г.Ленца. Однако Я.Такахаси описывает нестационарные процессы в теплообменниках линейными дифференциальными уравнениями в частных производных, предполагая постоянство всех теплофизических параметров объекта, что в значительной мере снижает полезность полученных результатов.

Анализ работ, посвященных данной проблеме, показал, что по-

вышенные требования, предъявляемые к установкам кондиционирования воздуха, выдвигают на передний план проблемы, связанные с исследованием и формулировкой критериев оптимальности их работы, и далее проблемы исследования и разработки средств регулирования, обеспечивающих выполнение выбранных критериев оптимальности.

В главе II проводятся исследования системы автоматического регулирования установки кондиционирования воздуха, с целью синтеза ее математической модели, вывода и решения описывающих дифференциальных уравнений.

Процесс динамики теплообмена характеризуется распределенностью параметров. Решение дифференциальных уравнений в частных производных приводит к получению трансцендентных передаточных функций, использование которых в инженерной практике автоматического регулирования не представляется возможным. Поставленная задача может быть решена с большой точностью с помощью численного интегрирования на цифровых вычислительных машинах. Однако это связано с затратой больших средств и времени. Поэтому при расчетах процессов в системе регулирования целесообразно в первом приближении воспользоваться упрощенной математической моделью объекта регулирования. Приближенные методы определения динамических характеристик теплообменных аппаратов, рассматриваемых как звенья системы автоматического регулирования с сосредоточенными параметрами, позволяют получить решения с точностью, достаточной для практических задач. При этом правомочность применения сосредоточенной модели вместо распределенной подтверждается экспериментом.

При составлении уравнения динамики теплообменного аппарата совместно решаются уравнения теплового баланса для стационарного и нестационарного режима. Полученное уравнение с помощью формулы Тейлора линеаризуется, допустимость линеаризации подтверждается отсутствием неоднозначных или разрывных характеристик в выбранном интервале изменения параметров и в течение интервала времени регулирования.

Зависимость температуры теплоносителя и температуры воздуха на выходе из теплообменника находится в вариационной форме при совместном решении уравнения установившегося процесса и уравнения динамики теплопередачи:

$$\Delta t_{w2} = \left(\frac{2C_s}{K_1 F} + 1 \right) \cdot \Delta t_{s2} + 2C_s \frac{K_1 - K_2}{K_1 \cdot K_2 \cdot F} (t_{s2} - t_{s1}), \quad (I)$$

где C_a - теплоемкость часового расхода воздуха; F - поверхность нагрева теплообменника; K_1 , K_2 - коэффициенты теплопередачи при различных расходах теплоносителя.

Используя эмпирическую зависимость коэффициента теплопередачи K в функции расхода через теплообменник воздуха и теплоносителя, путем разложения в биномиальный ряд, определяется зависимость коэффициента K в функции переменного расхода теплоносителя:

$$K = K_n \left(1 + n \frac{\Delta G_w}{G_w} \right), \quad (2)$$

где K_n - коэффициент теплопередачи при номинальном расходе теплоносителя; G_w - номинальный расход теплоносителя; n - показатель степени при величине скорости прохождения теплоносителя в выражении для коэффициента теплопередачи.

Учитывая изложенное и приведя полученные выражения к стандартной форме, уравнение, характеризующее калорифер как динамическое звено системы автоматического регулирования установки кондиционирования воздуха, запишется в следующей форме:

$$\frac{C_m + C_{wt}}{G_w C_w + \frac{G_a C_a}{K F} + 1} \cdot \frac{d \Delta t_{b1}}{d \tau} + \Delta t_{b1} = \frac{2(t_w - t_a) \left(n \frac{2G_a C_a}{K F} + \frac{G_a C_a}{G_w C_w} \right)}{G_w \left(\frac{2G_a C_a}{K F} + \frac{G_a C_a}{G_w C_w} + 1 \right)^2} \left[\frac{C_m + C_{wt}}{G_w C_w + \frac{1}{2n} K F} \cdot \frac{d \Delta G_w}{d \tau} + \Delta G_w \right] +$$

$$+ \frac{\frac{2G_a C_a}{K F} + \frac{G_a C_a}{G_w C_w} - 1}{\frac{2G_a C_a}{K F} + \frac{G_a C_a}{G_w C_w} + 1} \left[\frac{C_m + C_{wt}}{G_w C_w + \frac{2G_a C_a}{K F} - 1} \cdot \frac{d \Delta t_{b1}}{d \tau} + \Delta t_{b1} \right] + \frac{2}{\frac{2G_a C_a}{K F} + \frac{G_a C_a}{G_w C_w} + 1} \cdot \Delta t_{w1}, \quad (3)$$

где C_w - теплоемкость часового расхода теплоносителя через калорифер; C_m - теплоемкость металла трубок и оребрения калорифера; C_{wt} - теплоемкость воды в трубках, калорифера; C_w - удельная теплоемкость воды; C_a - удельная теплоемкость воздуха; G_a - расход воздуха; G_w - расход теплоносителя.

При разработке и описании математической модели калорифера были сделаны определенные допущения и идеализация. С целью подтверждения правомочности полученных результатов проведены экспериментальные исследования динамических характеристик калорифера на лабораторной установке кондиционера КНП-5. Экспериментальная установка состоит из контуров скоростных водоподогревателей, с помощью которых создаются требуемые начальные параметры темпера-

туры теплоносителя. В установке предусмотрена смесительная воздушная камера, снабженная многостворчатыми клапанами наружного и рециркуляционного воздуха, в которой создаются требуемые параметры воздуха, поступающего в калорифер. На трубопроводе подачи теплоносителя установлены вентиль плавной регулировки и пробковый кран, с помощью которых осуществляется изменение расхода теплоносителя. Разработанная методика проведения эксперимента и оборудование установки позволили получить возмущения, практически приближающиеся к скачку.

В основу обработки экспериментальных значений контролируемых параметров взято предположение о том, что случайные ошибки проводимых опытов подчиняются нормальному закону распределения. Расчеты показали, что вероятная ошибка проведенных в процессе эксперимента замеров не превышает $0,1^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальные и расчетные кривые переходных процессов довольно близко совпадают друг с другом, что подтверждается значениями параметров исследуемого объекта, приведенными в таблице.

Исслед. параметр.	Эксперимент. значение	Расчетное значение	Отклонение эксперимент. значений от расчетных
K_0 град. час/кг	0,01	0,0108	7%
$K_{\text{те}}$ град. час/кг	0,656	0,695	7%
$K_{\text{тев}}$	0,3	0,306	2%
T сек	207, 210, 205	198	8%, 11%, 6%

В результате экспериментального исследования установлено, что по своим динамическим свойствам реальный объект может быть аппроксимирован математической моделью с сосредоточенными параметрами. Вывод согласуется с данными работ, посвященных теоретическому исследованию влияния размытой распределенности параметров.

Полученная сосредоточенная модель теплообменного аппарата пригодна к практическому использованию при решении задач по анализу и синтезу систем автоматического регулирования установок кондиционирования воздуха (при регулировании теплопроизводительности водовоздушного калорифера).

В главе III проводится анализ и синтез оптимальной системы автоматического регулирования.

В практике автоматизации установок кондиционирования воздуха наиболее широкое применение получили позиционные и статические

регуляторы. Следствием применения позиционных регуляторов является возникновение в системе устойчивых колебательных режимов. При анализе системы автоматического регулирования с использованием статического регулятора за первичные динамические показатели качества принимаем время переходного процесса и статическую ошибку системы. Как показали исследования увеличение коэффициента усиления разомкнутой системы в пределах апериодического переходного процесса оказывается полезным с точки зрения уменьшения времени регулирования. Однако при дальнейшем увеличении коэффициента усиления, т.е. в области колебательного переходного процесса, влияние его изменения на длительность переходного процесса становится минимальным. Исследуемая линейная система имеет в установившемся состоянии постоянное по величине отклонение регулируемого параметра от его заданного значения, определяющее статическую ошибку системы. Уменьшение статической ошибки путем увеличения коэффициента усиления невозможно, так как при больших значениях коэффициента усиления процесс регулирования становится колебательным.

Проведенные исследования показали, что динамические свойства линейной системы автоматического регулирования производительности теплообменного аппарата не отвечают предъявляемым к ней требованиям. Длительность процесса регулирования определяется параметрами объекта и не уменьшается с увеличением коэффициента усиления, в то же время ограниченный коэффициент усиления не позволяет существенно повысить точность регулирования.

Улучшение динамических характеристик исследуемой системы достигается путем поиска и синтеза новых структур, построение которых основано на использовании методов нелинейной оптимизации системы. Решается задача построения системы, в которой при конечных коэффициентах воздействия по различным её координатам удастся обеспечить воспроизводимость регулируемой величиной задающего воздействия без использования информации о возмущениях и изменяющихся в широком диапазоне параметрах системы. В то же время при больших ошибках значения коэффициентов воздействия ограничены конструктивными условиями построения системы и технологическими условиями ее работы. Решение определяется нахождением допустимых управлений, удовлетворяющих наложенным ограничениям. Виды таких управлений являются оптимальными для исследуемой системы.

Нахождение оптимального управления при учете имеющихся ог-

раничений является задачей вариационного исчисления. Однако классическое вариационное исчисление наиболее приспособлено к нахождению оптимальных управлений в случае, когда множество допустимых управлений является открытым, т.е. когда сигналы в системе не могут принимать "жестких" граничных значений. В случае, когда множество допустимых отклонений является замкнутым, применение классического вариационного исчисления становится затруднительным.

Задача нахождения оптимального управления, относящаяся в случае замкнутого множества допустимых управлений к вариационным задачам Гамильтона, решается с помощью сформулированного Л.С.Понтрягиным принципа максимума для непрерывных детерминированных систем с конечным числом переменных.

Согласно общей постановке задачи производится синтез системы, оптимальной по быстродействию и расходу энергии. Предъявленные к системе требования тесно связаны между собой и являются противоречивыми: чем быстрее должен быть осуществлен перевод объекта из одного состояния в другое, тем больше энергии необходимо затратить на этот процесс. Для рассматриваемой системы соотношение расхода энергии E и времени перехода T_p выражается зависимостью, согласно которой $T_p = \infty$ соответствует абсолютному минимуму E . Это означает, что при $T_p = \infty$ имеем сигнал управления $U(\tau) = 0$ для всех τ , в то же время нулевое управление никогда не переведет исходное состояние системы в требуемое — конечное. С физической точки зрения управления $U(\tau)$, оптимальные по расходу энергии, экономят ее на тех временных участках или интервалах, где никакого управления не прикладывается. Однако, чем больше число таких интервалов и чем больше их длительность, тем длительнее весь процесс управления. Из сказанного следует, что для исследуемой системы задача о минимуме энергии с заданным временем перехода не имеет оптимального решения, так как предельные решения не удовлетворяют граничным условиям. В то же время возможно отыскание оптимального решения для задачи с заданным сколь угодно большим (но конечным) временем перехода при сколь угодно малой, но не равной нулю, величине E . В связи с этим возникает вопрос о нахождении E — оптимального решения.

Преобразуем структуру исследуемой системы к схеме, состоящей из двух частей: линейной части — $W_{\text{лн}}(S)$ и нелинейной части — управляющего релейного звена, и находим уравнения движения системы в её фазовых координатах $X, (\tau) = t(\tau) - t_s$

и $x_2(\tau) = \dot{t}(\tau)$. Уравнения исследуемой системы принимают вид:

$$\dot{x}_1(\tau) = x_2(\tau); \quad \dot{x}_2(\tau) = -a \cdot x_2(\tau) + u(\tau), \quad (4)$$

где $u(\tau)$ - вещественный управляющий параметр.

Для решения задачи оптимизации связь между временем регулирования и расходом энергии определим функционалом "стоимости", представляющим собой взвешенную линейную комбинацию времени перехода и расходуемой энергии:

$$J = \int_0^{\tau_p} [|u(\tau)| + \lambda] d\tau, \quad (5)$$

где λ - коэффициент веса времени.

Исследование функционала (5) приводит к решению системы, инвариантной во времени, что весьма желательно с практической точки зрения.

Задачей оптимального управления для системы (4) при предположении, что допустимое управление u переводит x_0 в множество конечных состояний S , и для функционала (x_0, τ_0, u) , определяемого областью допустимых управлений u и состояния x_0 в начальный момент времени τ_0 , является отыскание управления u из $\hat{u}$, минимизирующего функционал преобразования (5).

Решение находится с помощью принципа максимума, согласно основной теореме которого допустимое управление $u(\tau)$, $\tau_0 \leq \tau \leq \tau_1$, переводящее фазовую точку из положения x_0 в положение x_1 , а $x(\tau)$ - соответствующая траектория, так что $x(\tau_0) = x_0$, $x(\tau_1) = x_1$. Для оптимальности управления $u(\tau)$ и траектории $x(\tau)$ необходимо существование такой нулевой непрерывной - вектор функции $\psi(\tau)$, соответствующей функции $u(\tau)$ и $x(\tau)$, что для всех τ , функция Гамильтона, полученная из (4) и (5), $H(\psi, x, u) = x_2(\tau) \cdot \psi_1(\tau) - a \cdot x_2(\tau) \cdot \psi_2(\tau) + u(\tau) \cdot \psi_2(\tau) + \lambda + |u(\tau)|$, переменного $u \in \hat{u}$ достигает в точке $u = u(\tau)$ максимума, т.е. $H(\psi(\tau); x(\tau); u(\tau)) = M(\psi(\tau), x(\tau), u)$.

Последнее выражение достигает максимума при следующих условиях управления:

$$\begin{aligned} u &= \hat{u} \cdot \{ \text{sign} \psi_2 \}, & \text{если } |\psi_2| > \hat{u}, \\ u &= 0, & \text{если } |\psi_2| < \hat{u}, \\ 0 \leq u \leq \hat{u}, & & \text{если } \psi_2 = \hat{u}, \\ -\hat{u} \leq u \leq 0, & & \text{если } \psi_2 = -\hat{u}. \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно основной теореме функция $\psi_2(\tau)$ есть сумма постоянной и возрастающей (по абсолютной величине) экспоненты, которая может менять знак лишь один раз (вырожденных уравнений для данной задачи не существует). Из уравнений (6) следует, что оптимальное управление представляет собой кусочно-постоянную функцию со значениями $(+\dot{U})$; $(-\dot{U})$; $(0; +\dot{U})$; $(0; -\dot{U})$; $(+\dot{U}, 0, -\dot{U})$; $(-\dot{U}, 0, +\dot{U})$.

Так как $\psi(\tau)$ является функцией времени, то для формирования управления пользоваться выражениями (6) неудобно. Поэтому оптимальное управление целесообразно искать в функции текущих фазовых координат.

Из решения системы (4) для управлений $U(\tau) = 0$ и $U(\tau) = \pm 1$ определяются уравнения траекторий движения изображающей точки. Решение проводилось методом Рунге-Кутты на ЭЦВМ БЭСМ-4.

Анализ решений позволяет сделать заключение, что наиболее общими оптимальными последовательностями управлений являются последовательности $(+1, 0, -1)$ и $(-1, 0, +1)$.

Из рассмотрения множества состояний, для которых оптимальна каждая из управляющих последовательностей, при использовании обратного движения изображающих точек системы, т.е. отрицательного времени $\theta = -\tau$, получены уравнения линий переключения:

$$\begin{aligned} f_1(x_2) &= -\frac{x_2}{a} + \{\text{sign } x_2\} \frac{1}{a^2} \ln(1 + a/|x_2|), \\ f_2(x_2) &= -\frac{x_2}{a} + \{\text{sign } x_2\} \frac{1}{a^2} \ln\left(1 + \frac{\lambda \cdot a/|x_2|}{\lambda + 2a/|x_2|}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Линии переключения АОВ и СОД делят фазовую плоскость системы на четыре области, границы которых определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{I} &= \{(x_1, x_2); \quad x_1 > f_1(x_2); \quad x_1 > f_2(x_2)\}, \\ \text{II} &= \{(x_1, x_2); \quad x_1 < f_1(x_2); \quad x_1 > f_2(x_2)\}, \\ \text{III} &= \{(x_1, x_2); \quad x_1 < f_1(x_2); \quad x_1 < f_2(x_2)\}, \\ \text{IV} &= \{(x_1, x_2); \quad x_1 > f_1(x_2); \quad x_1 < f_2(x_2)\} \end{aligned} \quad (8)$$

Оптимальное управление как функции состояния (x_1, x_2) записывается в виде

$$\begin{aligned} U &= -1 \text{ для всех } (x_1, x_2) \in \text{I}, \\ U &= +1 \text{ для всех } (x_1, x_2) \in \text{III}, \\ U &= 0 \text{ для всех } (x_1, x_2) \in \text{II} \cup \text{IV} \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ зависимостей (7), (8), (9), лежащих в основе предложенного оптимального управления, позволяет выделить ограниченное число функциональных устройств, необходимых для построения регулятора: датчики регулируемого параметра и скорости его изменения, сумматоры алгебраических значений непрерывных и дискретных сигналов, устройства вычисления коэффициента λ , функции одного переменного $f_1(x_2)$ и функции двух переменных $f_2(x_2, \lambda)$. Реализация полученной структуры требует использования сложных вычислительных устройств.

Из (7) следует, что положение линии переключения АОВ не зависит от начальных условий и времени регулирования. Однако линия переключения СОД при λ стремящемся к бесконечности изменяет положение и сливается с АОВ. При этом закон управления из оптимального по расходу энергии и времени регулирования вырождается в закон управления оптимальный по быстродействию. При λ , стремящемся к нулю, линия переключения СОД вырождается в прямую

$$x_1 = -x_2/a.$$

Так как при малых λ функционал (5) оценивает ("взвешивает") в основном затраты энергии, то получается управление оптимальное по расходу энергии. Время перехода системы в начало координат бесконечно велико, но время, требующееся на то, чтобы достигнуть сколь угодно малой окрестности начала координат, конечно. Это соображение позволяет судить о существовании ε -оптимального управления. Используя только линию переключения АОВ и аппроксимируя СОД кривой, имеющей то же уравнение, что и АОВ, получаем субоптимальную систему управления.

Таким образом, анализ оптимального закона управления позволяет сделать заключение о целесообразности отказа от реализации линии переключения СОД в функции λ , и её аппроксимации уравнением линии АОВ с постоянным коэффициентом γ . При больших отклонениях регулируемого параметра субоптимальные качества системы сохраняются, в то же время при их малых значениях эти качества исчезают. Это означает, что при включении режима торможения изображающая точка оказывается на фазовой траектории, которая не проходит через начало координат, что приводит к повторению цикла управления. При этом движение системы осуществляется по ломанной траектории, спиралеобразно скручивающейся к точке начала координат. Процесс регулирования становится колебательным.

Одним из способов сохранения оптимальных или ε -оптимальных характеристик управления при выполнении ограничений со сто-

роны реализации закона управления является создание комбинированной структуры системы. Это означает, что при синтезе управляющего устройства в структуру вводятся функциональные звенья, которые изменяют его алгоритм.

При начальных условиях, характеризуемых большими возмущениями, наиболее эффективными являются нелинейные алгоритмы управления. В то же время при ограниченных по величине значениях регулируемого параметра задача управления достаточно эффективно решается применением линейных алгоритмов.

При линейном управлении ограниченность начальных условий значением регулируемого параметра $0,3 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ позволяет выбрать коэффициент усиления разомкнутой системы таким, что при сохранении апериодической формы переходного процесса обеспечивается минимальная статическая погрешность регулирования.

Для исследования рассматриваемой системы теплопроизводительности калорифера по ее уравнениям была составлена программа решения задачи на ЦВМ. Решение задачи на ЦВМ позволило: 1) Определить пороговое значение отклонения регулируемого параметра в момент переключения нелинейной и линейной структур регулятора; 2) Оценить качество аппроксимации линий переключения; 3) Определить диапазон настройки коэффициента усиления линеаризованного регулятора; 4) Оценить быстродействие системы при переменной структуре регулятора; 5) Провести сравнение переходных процессов, получаемых при управлении регулятором с переменной структурой и линеаризованным статическим регулятором.

Исследованы переходные процессы для различных начальных условий в диапазоне изменения параметров: $T = 40 \pm 100$ сек, $K = 0,05 \pm 0,1^{\circ}\text{C}/\text{сек}$, $T_p = 20 \pm 40$ сек, $T_{г.ск.} = 30 \pm 40$ сек.

Анализ системы показал, что изменение начальных условий в диапазоне Δt от одного градуса и более не влияет на характер переходного процесса. В начале переходного процесса система движется по траектории, близкий к оптимальной, при переходе к заданному значению регулируемого параметра процесс становится колебательным и его затухание длится сколь угодно большое время. Отключение управления вида $(1,0,-1)$ при уменьшении отклонения до величины $\Delta t_{г.р.}$ приводит к существенному снижению степени колебательности процесса и ограничивает его длительность. Чем больше значение $\Delta t_{г.р.}$, тем меньше число колебаний в переходном процессе, в то же время увеличение $\Delta t_{г.р.}$ нежелательно, так как приводит к увеличению ошибки регулирования. Анализа переходных процес-

сов при различных начальных условиях позволил сделать заключение, что переключать структуры управления следует при величине отклонения регулируемой температуры равной $0,3 \pm 0,5$ градуса.

Линии переключения видов управлений нелинейной структуры аппроксимированы ломанными линиями, которые описываются уравнением

$$\dot{t} = -\alpha \cdot \{\text{sign } \Delta t\} - \beta \cdot \Delta t,$$

где α и β - постоянные коэффициенты, определяемые параметрами системы.

Анализ переходных процессов при значениях постоянной времени объекта регулирования $T_i = 40 \pm 100$ сек. показал, что изменение коэффициента " β " не меняет характера процесса. Более существенное влияние оказывает на характер переходного процесса изменение коэффициента " α ". Увеличение " α " приводит к увеличению динамической ошибки регулирования, в то же время уменьшение " α " увеличивает длительность переходного процесса. Сравнение переходных процессов при $T_i = 40-200$ сек., позволяет сделать заключение о том, что наилучшее значение $\alpha = 0,02^\circ\text{C}/\text{сек.}$

В линейной системе независимо от значения начальных условий при коэффициенте усиления K_p большем $K_{p,гр.}$ переходный процесс становится колебательным. Ограничение на максимальное значение останется в силе и для переменной структуры регулятора, однако, область допустимых значений K_p расширяется и может достигать величины $10 \cdot K_{p,гр.}$.

Исследуемая система является быстродействующей по принципу её построения. Это качество снижается при обеспечении условий экономности по расходу энергии. Сравнение переходных процессов при включении полной структуры системы и при работе только линейного канала позволяет сделать заключение, что система с переменной структурой остаётся более быстродействующей. Время переходного процесса в системе с переменной структурой составляет примерно $(0,75 \pm 0,8)$ времени регулирования линейной системы.

В г л а в е IV рассматривается реализация предложенного вида управления, дается описание конструкции макетных образцов регулятора, приводятся результаты их эксплуатационных испытаний.

Аппаратной реализации подлежит регулятор температуры, выполняющий алгоритмы управления:

$$\begin{aligned} \dot{t} &= K_p \cdot \Delta t \quad \text{при } |\Delta t| < \Delta t_{гр}; \\ \dot{t} &= K_u \quad \text{при } |\Delta t| > \Delta t_{гр}, |t - t_p| > \Delta t_{зн}, t - t_p < 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= -K_u \text{ при } |\Delta t| > \Delta t_{\varphi}, |\dot{t} - \dot{t}_p| > \Delta t_{3H}, \dot{t} - \dot{t}_p > 0; \\ \dot{\alpha} &= 0 \text{ при } |\Delta t| > \Delta t_{\varphi}, |\dot{t} - \dot{t}_p| < \Delta t_{3H}. \end{aligned}$$

где α - угол поворота выходного вала исполнительного механизма регулятора, K_p - коэффициент усиления линейной структуры, K_u - коэффициент усиления нелинейной структуры.

Структурная схема регулятора синтезируется из двух каналов - канала нелинейного регулирования, осуществляющего формирование команд управления по отклонению и скорости изменения регулируемого параметра, и канала линейного регулирования, формирующего сигнал управления пропорциональный отклонению регулируемого параметра.

Схема регулятора разработана на основе максимального использования функциональных блоков серийных полупроводниковых терморегуляторов типа ПТР. В качестве исполнительного механизма предусмотрен наиболее распространенный механизм постоянной скорости, имеющий потенциометрический датчик положения выходного вала. Чувствительными элементами регулятора являются полупроводниковые термосопротивления. В качестве датчика скорости изменения регулируемой температуры используется четырехполюсник включенный по форсирующей схеме. Получение сигнала скорости основано на вычитании сигналов двух апериодических звеньев с разными постоянными времени, на вход которых подается один и тот же сигнал, подлежащий дифференцированию.

С целью проверки правильности реализации заданного алгоритма управления и выявления эксплуатационных качеств регулятора были проведены его испытания в системе автоматического регулирования калорифером КФБ-3 лаборатории теплотехники Физико-энергетического института АН ДСР.

Сравнение кривых переходных процессов в САР при управлении линейным и нелинейным регулятором с переменной структурой, полученных при моделировании и натурных испытаниях, позволяет сделать заключение о правильности аналитических предпосылок. Статистическая погрешность при управлении нелинейным регулятором не превышает $0,1 \pm 0,2^\circ\text{C}$, время регулирования уменьшается на 25-30%, величина динамического перерегулирования не превышает 10-15% от величины вносимого возмущения.

Анализ результатов испытаний подтверждает правильность аппаратной реализации выбранного алгоритма регулирования.

Рассмотрение структуры регулятора и схемного решения его

функциональных узлов позволяет сделать заключение о их возможном упрощении и о усовершенствовании алгоритма управления. Вместо используемого исполнительного механизма с постоянной скоростью можно применить исполнительный механизм с управляемым двигателем. Такая замена позволяет исключить из схемы регулятора линейный канал управления и устройство переключения режимов работы. В нелинейном режиме регулятор выполняет прежний алгоритм управления. В линейном режиме реализуется изодромный закон регулирования. Объем структурной схемы регулятора уменьшается на 30-40%.

В ы во д ы

1. В результате проведенных исследований с использованием методов нелинейной оптимизации, основанных на принципе максимума Понтрягина, разработана субоптимальная по быстродействию и расходу энергии система автоматического регулирования теплопроизводительности калорифера, являющегося основным технологическим агрегатом установки кондиционирования воздуха. Повышение эффективности работы автоматизированной калориферной установки достигается путем синтеза переменной структуры регулятора. Система автоматического регулирования с переменной структурой при отклонении регулируемого параметра, большем по модулю заданного граничного значения, работает в нелинейном режиме при уменьшении отклонения регулируемого параметра до граничного значения происходит переключение структуры управления и регулятор реализует линейный закон управления.

2. Тепловые процессы, протекающие в калорифере, характеризуются распределенностью параметров и их динамика описывается в общем случае нелинейной системой дифференциальных уравнений в частных производных. Решение такой системы уравнений сложно и громоздко, поэтому применяются приближенные методы математического описания, которые позволяют получить решение с точностью, достаточной для практических задач. Достаточность принятой математической модели подтверждается результатами эксперимента.

3. Анализ динамических свойств линейной системы автоматического регулирования производительности калорифера показывает, что улучшение характеристик системы следует добиваться путем синтеза нелинейной структуры управления, так как в линейной системе длительность процесса регулирования, определяемая параметрами объекта, незначительно уменьшается с увеличением коэффициента усиления системы, в то же время ограниченное условием апе-

риодического процесса регулирования увеличение коэффициента усиления линейной САР не позволяет существенно уменьшить ошибку регулирования.

4. Разработанный нелинейный регулятор температуры с переменной структурой, состоящий из двух каналов управления и устройства переключения их работы, формирует линейное управление, пропорциональное отклонению регулируемого параметра, и нелинейное управление в функции отклонения и скорости изменения регулируемой температуры. Правильность аппаратной реализации алгоритма управления подтверждается результатами испытаний макета регулятора в системе автоматического регулирования теплопроизводительности промышленной калориферной установки. Анализ результатов испытаний показывает, что разработанный регулятор обеспечивает быстрое действие и точность регулирования более высокие, чем регулятор, реализующий статический закон управления.

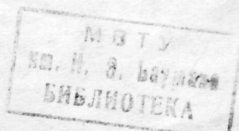
5. Разработанный нелинейный полупроводниковый регулятор температуры может быть рекомендован к выпуску опытной партии для проведения промышленных испытаний и представления на межведомственную приемную комиссию.

Основные положения диссертации докладывались:

1. На конференции "Промышленная вентиляция". Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф.Э.Дзержинского. Москва, 1967г.
2. На IV Всесоюзном научно-техническом совещании по кондиционированию воздуха. г.Тбилиси, май 1968г.
3. На V Всесоюзном научно-техническом совещании по кондиционированию воздуха. г.Баку, ноябрь 1970 г.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Нефелов С.В. - Об автоматизации систем кондиционирования воздуха промышленных предприятий. Научно-технический сборник "Кондиционеры, калориферы, вентиляторы" № 1, 1969.
2. Нефелов С.В. - Регулирование установок кондиционирования воздуха нелинейным регулятором с переменной структурой. Научно-технический сборник "Кондиционеры, калориферы, вентиляторы" № 2, 1969.
3. Нефелов С.В. - Вывод дифференциальных уравнений одного контура системы автоматического регули-



рования установки кондиционирования воздуха. Сборник докладов. Стройиздат, Москва, 1970.

4. Нефелов С.В. - Методика моделирования САР производительности калорифера на аналоговой машине МН-7. Сборник трудов НИИСТ № 34, 1970.

5. Материалы диссертационной работы вошли в монографию "Практическое применение электронной автоматики в санитарной технике", написанную совместно с Ю.С.Давыдовым и принятую в печать Стройиздатом в 1971 г.