

Экономия
топлива
и электроэнергии

С.В. Нефелов, Ю.С. Давыдов

ТЕХНИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

П 4202411

Издание 2-е, переработанное и дополненное

МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1984

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ББК 38.762
Н 58
УДК 697.95—52

Печатается по решению секции литературы по инженерному оборудованию редакционного совета Стройиздата.

Рецензенты — кандидаты техн. наук С. А. Щелкунов и Ю. Я. Кувшинов (МИСИ им. В. В. Куйбышева); Киевский институт автоматики им. XXV съезда КПСС.

Нефелов С. В.

Н 58 Техника автоматического регулирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1984. — 328 с., ил. — (Экономия топлива и электроэнергии).

Изложены теоретические и инженерные основы техники автоматического управления системами вентиляции и кондиционирования воздуха. Приведены результаты новых исследований по созданию систем с переменной структурой и взаимосвязанным регулированием и схем каскадного регулирования. Даны рекомендации по проектированию и применению новых технических средств автоматизированных систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Авторы 1-го изд. Ю. С. Давыдов, С. В. Нефелов.

Авторы 1-го изд. Ю. С. Давыдов, С. В. Нефелов.

Для инженерно-технических и научных работников проектных, строительных и научно-исследовательских организаций, а также служб эксплуатации.

Н $\frac{3206000000-240}{047(01)-84}$ 27—84

ББК 38.762
6С9.4

СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ НЕФЕЛОВ, ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ ДАВЫДОВ

ТЕХНИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Редакция литературы по инженерному оборудованию
Зав. редакцией И. В. Соболева
Редактор С. И. Погудина
Младший редактор А. А. Минаева
Технические редакторы В. Д. Павлова, Ю. Л. Циханкова
Корректор Н. А. Беляева
НБ № 3070

Сдано в набор 19.09.83. Подписано в печать 21.04.84. Т-08285
Формат 84×108 1/32 Бумага тип. № 2 Гарнитура «Литературная»
Печать высокая Усл. печ. л. 17,22 Усл. кр.-отт. 17,43
Уч.-изд. л. 18,11 Тираж 13 800 Изд. № AVI-9510 Зак. 393 Цена 90 к.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а
Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли, 142110. г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

© Стройиздат, 1977
© Стройиздат, 1984, с изменениями

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

c — теплоемкость;
d — влагосодержание воздуха (1 г влаги на 1 кг сухой части влажного воздуха), г/кг;
f — возмущающее воздействие;
G — объемный или массовый расход среды;
I — энтальпия (теплосодержание) влажного воздуха, кДж/кг (ккал/кг);
Q — количество тепла, Вт (ккал/ч);
r — регулирующее воздействие;
t — температура среды;
T — постоянная времени;
U — управляющее воздействие (управление);
x — переменная состояния;
X — совокупность переменных состояний в одной точке системы;
ε — направление луча процесса изменения тепловлажностного состояния воздуха в пространстве координат I — d-диаграммы;
τ — время;
φ — относительная влажность воздуха, %.

Индексы

б — байпас;
в — воздух;
з — заданное значение;
н — наружный;
о — начальные условия;
п — приточный;
р.з — рабочая зона;
рц — рециркуляционный;
т — теплообменник;
у — уходящий;
w — вода.

Условные сокращения

АСУ ТП — автоматизированная система управления технологическим процессом;
В — вентилятор;
ВН — воздухонагреватель;
ВО — воздухоохладитель;
ИзУ — измерительное устройство;
ИМ — исполнительный механизм;
ИУ — исполнительное устройство;
КО — камера орошения;
КС — камера смешения;
НВ — наружный воздух;
О — объект (управления, регулирования);
ОП — обслуживаемое помещение;
Р — регулятор;
РО — регулирующий орган;
САР — система автоматического регулирования;
САУ — система автоматического управления;
СВ — система вентиляции;
СКВ — система кондиционирования воздуха;
СКМ — система кондиционирования микроклимата;
УВК — управляющий вычислительный комплекс;
УКВ — установка кондиционирования воздуха;
УУ — управляющее устройство;
ЭВМ — электронная вычислительная машина.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с решениями XXVI съезда КПСС и последующих пленумов ЦК КПСС в одиннадцатой пятилетке предусмотрено осуществление широкой программы модернизации технологии производства в основных отраслях народного хозяйства, а также программы экономии материальных и энергетических ресурсов.

При решении каждой из этих проблем существенное место отводится вопросам исследования, разработки и создания систем кондиционирования воздуха. Действительно, модернизация технологии производства в большинстве отраслей народного хозяйства в той или иной мере связана с ужесточением требований к поддержанию заданных параметров воздуха в рабочей зоне производственных помещений. Поэтому становится понятным количественный и качественный рост систем кондиционирования воздуха.

Системы вентиляции и кондиционирования воздуха по своей структуре являются сложными технологическими системами. Их реализация с учетом высоких требований к качеству стабилизации параметров микроклимата, а также их функционирования при минимальном расходе энергии невозможна без исследований вопросов автоматического управления такими системами. Неавтоматизированные системы кондиционирования воздуха в одних случаях нереализуемы, в других потребляют энергии на 30—50% больше, чем автоматизированные. Поэтому вопросы их автоматизации приобретают особо важное значение.

За пять с лишним лет, прошедших с момента первого издания книги произошло существенное изменение в теоретических основах понимания и построения автоматизированных систем кондиционирования воздуха. Появились новые фундаментальные теоретические и инженерные положения техники автоматического управления системами вентиляции и кондиционирования воздуха. Введение и обоснование иерархической структуры задач управления, разработ-

ка основ создания систем с переменной структурой в пространстве базисных координат позволили предложить ряд конкретных технических решений по созданию программно-параметрических систем автоматического управления кондиционированием воздуха.

Исследования ряда вопросов по технике автоматизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, задуманные авторами к совместной проработке, к сожалению, были выполнены без участия Ю. С. Давыдова. Содержание второго издания книги значительно обновлено. При работе над ним С. В. Нефелов использовал материалы собственных теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в 1978—1982 гг., а также результаты работ, выполненных как под его руководством в лаборатории автоматизации систем микроклимата ЦНИИпромзданий и других организациях, так и при его участии.

Большую помощь в работе над вторым изданием книги оказали сотрудники лаборатории автоматизации систем микроклимата ЦНИИпромзданий Госстроя СССР и в первую очередь А. Г. Андрианова, И. Н. Камаева и Е. К. Жуйкова.

Автор выражает глубокую признательность докторам техн. наук профессорам П. В. Участкину, В. Н. Богословскому, А. А. Рымкевичу и О. Я. Кокорину за ценные советы и помощь, оказанные при работе над книгой. Автор искренне благодарен рецензентам кандидатам техн. наук доцентам Ю. Я. Кувшинову и С. А. Щелкунову, а также Киевскому институту автоматики за ценные замечания, сделанные ими при рецензировании рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

В развитии народного хозяйства страны важное место принадлежит мероприятиям по технике безопасности и производственной санитарии. Одной из форм развития и совершенствования этих мероприятий является создание комфортных тепловых условий и благоприятной воздушной среды в помещениях жилых, административных, общественных и промышленных зданий и сооружений. Кроме того, создание специального тепловлажностного и воздушного режима в рабочей зоне становится неотъемлемой частью и обязательным условием реализации ряда современных технологических процессов в текстильной, пищевой, химической и других отраслях промышленности.

Наиболее развитыми и совершенными средствами создания требуемых параметров воздуха в помещениях являются системы кондиционирования воздуха (СКВ). Характерными особенностями СКВ являются управляемое функционирование в условиях постоянно изменяющихся параметров наружного климата, нестационарных источников и стоков тепла и влаги в обслуживаемых помещениях, а также возможная совокупность противоположно направленных в теплотехническом отношении технологических процессов обработки воздуха.

Согласно общей теории построения систем кондиционирования микроклимата [1], в основе исследования их работы лежит расчет естественного (пассивного) режима сохранения требуемых или допустимых параметров воздуха в помещении. При этом выявляется достаточность использования архитектурно-строительных и конструктивно-планировочных решений и общеобменной вентиляции для поддержания внутренних условий. В случаях, когда требуемые параметры микроклимата в помеще-

нии не могут быть сохранены при использовании перечисленных средств, необходимо переходить к специальной системе управляемого кондиционирования микроклимата с применением искусственных средств нагрева, охлаждения и вентиляции — специальных машин и агрегатов, потребляющих значительное количество электрической и тепловой энергии.

Количество потребляемой этими машинами и агретатами электрической и тепловой энергии определяет энергоемкость систем кондиционирования воздуха. Суммарная энергоемкость СКВ в годовом цикле рассматривается как одно из ее основных качеств. В современных условиях показатель энергоемкости, являющийся социально-экономическим фактором долговременного действия, становится доминирующим фактором развития СКВ и имеет устойчивую тенденцию к увеличению. Снижение энергоемкости систем кондиционирования воздуха достигается интенсификацией отдельных технологических процессов тепломассообмена и перемещения обменивающихся сред, а также совершенствованием технологии кондиционирования микроклимата. При этом характерно стремление к реализации рациональных в отношении энергозатрат алгоритмов функционирования и использованию дополнительных источников энергии.

Очевидно, что экономное комплексное использование энергии в нескольких технологических процессах или на различных стадиях одного процесса кондиционирования микроклимата, а также максимально возможное использование низкопотенциальных источников энергии требует применения более совершенных и сложных оборудования, методов и средств автоматического управления.

Оборудование СКВ наряду с такими достоинствами, как низкая материалоемкость, высокие теплотехнические, аэродинамические и гидравлические характеристики, надежность и т. д., должно быть приспособлено к выполнению сложных алгоритмов функционирования системы и обладать свойством многовариантной и эффективной управляемости. При этом возникает необходимость совершенствования управления работой этого оборудования, процессами тепловлажностной обработки, перемещения и распределения воздуха, а также процессами ассимиляции и диссимиляции кондиционированным приточным воздухом тепла и влаги.

Целью автоматического управления СКВ является

обеспечение возможности их успешного функционирования для создания заданных параметров микроклимата в обслуживаемом помещении. Задача управления в значительной мере усложняется вследствие непрерывного действия внешних и внутренних возмущений. Для подавляющего большинства СКВ наряду с основным назначением — поддержание заданных параметров воздуха в обслуживаемых помещениях — предусматривается решение задачи экономии потребляемых системой в процессе эксплуатации тепла, холода и электроэнергии.

В настоящее время в области автоматизации технологических процессов наблюдается пересмотр практически всех аспектов контроля и управления. Это касается прежде всего алгоритмов функционирования и управления, структур и составов технических средств, объемов и распределения функций контроля, регулирования и управления, объемов и способов представления информации, роли математических моделей и моделирования. Технические системы современного уровня создаются на основе широкого использования вычислительной техники и в первую очередь мини- и микроЭВМ. Эта наметившаяся в автоматизации тенденция обусловлена научно-технической революцией и развитием общей теории автоматического управления. Как известно, современная теория управления перешла от исследования простых объектов и локальных систем автоматического регулирования к изучению вопросов управляемости, наблюдаемости и устойчивости сложных технических систем. Рассматриваемые системы состоят из многозвенной совокупности управляемых объектов и характеризуются многомерностью и взаимосвязанностью протекающих физических процессов [2].

Сложность решения проблемы автоматизации технологических процессов усугубляется тем, что в настоящее время наметилась тенденция к созданию и использованию агрегатированных комплексов технических средств, вследствие чего значительно увеличиваются капитальные затраты по сравнению с затратами на старые агрегаты и системы, автоматизируемые на основе использования разрозненных приборов и устройств. Современное направление развития автоматизации характеризуется устойчивой тенденцией к созданию специальных управляющих вычислительных комплексов на основе использования миниЭВМ. В то же время все более утверждается и

развивается направление автоматизации по пути интегрирования технологического оборудования и средств автоматического управления. Такое направление в создании автоматизированных агрегатов на этапе заводского изготовления позволяет использовать микроэлектронику, новейшие средства современной элементной базы приборов и устройств автоматики и вычислительной техники. При таком направлении автоматизации появляются так называемые встроенные системы автоматического управления, составляющие единое целое с автоматизируемым оборудованием. При создании агрегатов с встроенной автоматикой качественно изменяются их характеристики, повышается надежность и создаются условия максимальной заводской готовности оборудования к работе. Внедрение и развитие встроенных систем характеризуется устойчивой тенденцией к использованию микроЭВМ.

Проблемы автоматического регулирования работы установок кондиционирования воздуха комплексно исследовались Г. В. Архиповым, Ф. Вебером, Ю. С. Давыдовым, Б. Юнкерсом. Исследованию отдельных задач управления СКВ посвящены работы Р. Н. Давыдова, Э. Э. Дзелзитиса, А. А. Духина, И. И. Зингермана, Л. Ф. Куклика, Г. Ленца, А. М. Литвинова, В. М. Рубчинского, А. В. Степанова, С. И. Фролова, Ю. В. Фролова, Х. Д. Таутиева, Б. М. Четверухина, В. П. Шкроботова, Б. Г. Шпиза, С. А. Щелкунова и др. Фундаментальными работами в области динамики регулирования являются работы П. В. Участкина и М. Б. Халамейзера. Основы синтеза статики управления СКВ заложены в работах А. А. Рымкевича и А. Я. Креслиня, а основы исследования СКВ как объектов управления — в работах В. Н. Богословского, А. А. Гоголина, М. И. Гримитлина, Е. Е. Карписа, О. Я. Кокорина, Е. В. Стефанова, В. М. Эльтермана и др.

В настоящей книге рассматриваются методы и средства автоматического управления системами кондиционирования воздуха, системами приточной и вытяжной вентиляции, решаемые на основе анализа свойств и особенностей этих систем как управляемых, т. е. как систем регулируемого кондиционирования микроклимата [3] и комплексного исследования всех факторов нестационарного управляемого режима работы систем, существенно влияющих на ее эффективность.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

1.1. ПРОЦЕССЫ, ПЕРЕМЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ И СТРУКТУРА СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Совокупность физических параметров воздушной среды — температуры, влажности, давления, скорости движения, чистоты, газового и ионного состава воздуха и т. д. — представляет собой понятие микроклимат (МК) [1]. Перечисленные качества или параметры воздуха составляют понятие **кондиции** воздушной среды.

В тех случаях, когда те или иные кондиции воздуха в помещении не могут быть обеспечены пассивными (без потребления энергии) конструктивно-планировочными мерами тепловой защиты и естественной вентиляцией, применяют активные (с использованием тепловой и электрической энергии) средства создания микроклимата помещений, объединяемые понятием **система кондиционирования микроклимата** (СКМ) [3, 4]. Активными системами кондиционирования микроклимата обслуживаемых помещений являются подсистемы по отношению к СКМ, которые принято называть **системы отопления** (СО), **системы вентиляции** (СВ) и **системы кондиционирования воздуха** (СКВ). Наиболее развитыми, совершенными функционально и наиболее технологически сложными среди подсистем СКМ являются системы кондиционирования воздуха [5—8].

Система кондиционирования воздуха представляет собой совокупность технических средств, объединенных единством цели создания требуемых параметров микроклимата путем приготовления кондиционированного воздуха, его перемещения и распределения в обслуживаемом помещении. Процесс приготовления кондиционированного воздуха с целью придания ему требуемых или заданных кондиций составляет совокупность технологических операций, представляющих **технологический процесс кондиционирования воздуха** (ТП КВ).

Системы приточной и вытяжной вентиляции, системы кондиционирования воздуха и, наконец, системы кондиционирования микроклимата представляют собой целостный комплекс взаимосвязанных элементов: машин, агрегатов и устройств, а также архитектурно-строительных сооружений, объединенных единством цели создания и функционирования. Этот комплекс обладает определенной структурой и закономерностями взаимодействия ее элементов как между собой, так и с некоторой внешней средой. Каждая из СВ, СКВ и СКМ в той или иной мере является множеством связанных сложными связями и взаимодействующих элементов, представляющих собой не простое суммирование, а особое соединение, которое в целом придает каждой системе новые качества, отсутствующие у каждой из них в отдельности.

Все сказанное позволяет считать СВ, СКВ и СКМ технической или технологической системой, представляющей некоторую совокупность элементов, выполняющих определенные функции и связанных единством цели функционирования.

Под целью функционирования СКВ, определяемой из основного назначения системы, в рассматриваемом случае понимается создание и поддержание в определенных пределах условий теплового, воздушного и влажностного режимов обслуживаемых помещений. При этом в основе достижения целей их функционирования лежит обязательное последовательное решение трех основных задач [1, 3, 4].

Первая. Исследование естественного (пассивного) режима сохранения требуемых или допустимых параметров микроклимата в помещении. Результатом решения этой задачи является выявление достаточности использования архитектурно-строительных и конструктивно-планировочных решений и общеобменной вентиляции для сохранения внутренних условий.

Вторая. Выявление необходимости перехода к специальной системе управляемого кондиционирования микроклимата. Это является результатом решения первой задачи в условиях, когда требуемые параметры микроклимата в помещении не могут быть сохранены путем использования более простых или дешевых средств.

Третья. Расчет принудительного (активного) режима поддержания требуемых параметров микроклимата с использованием искусственных специальных средств

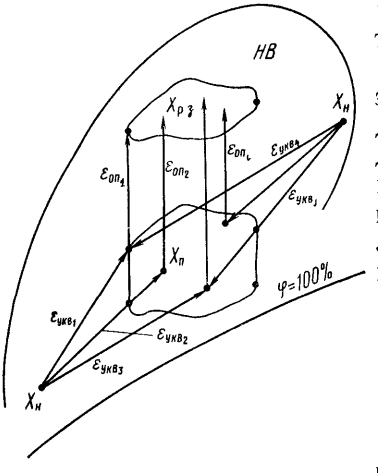


Рис. 1.1 Процессы кондиционирования воздуха

нагрева, охлаждения и вентиляции.

Результатом решения этой задачи является определение требуемой производительности и установочной мощности машин, аппаратов и устройств, а также определение управляемых режимов их работы.

Поскольку исследуются управляемые режимы работы машин, аппаратов и устройств, входящих в СКВ, а также управляемые режимы функционирования системы в целом, некоторые базовые положения теории автоматического управления следует рассматривать применительно к общей теории и практике создания СКВ. При этом отметим, что в основе изучения процессов в СКВ остаются известные теоретические положения строительной физики, аэродинамики, гидравлики, тепло- и массообмена, теплопередачи и термодинамики. Однако в данном случае отправным моментом рассмотрения процессов в СКВ является исследование их свойств и особенностей как управляемых. Под управляемостью понимается возможность приведения показателей процессов с помощью управляющих воздействий в требуемый диапазон значений.

Технологические процессы в системе кондиционирования воздуха (в данном случае рассматриваются только процессы передачи тепла и массы $\varepsilon_{УКВ_j}$, $\varepsilon_{ОП_i}$), их последовательность и направленность (движение системы), их показатели (переменные состояния) и области допустимых состояний переменных представлены на фрагменте I—d-диаграммы (рис. 1.1). Совокупность параметров обрабатываемого в системе наружного воздуха (переменные состояния: температура $t_н$, влажность $\varphi_н$, теплосодержание $I_н$, расход $G_{в\,н}$ и т. д.) обозначена многомерной функцией $X_н = X_н(\tau)$; совокупность параметров приточного кондиционированного воздуха (переменные состояния $t_{в\,п}$, $\varphi_п$, $G_{в\,п}$ и т. д.) — многомерной функцией

$X_{\text{н}}=X_{\text{п}}(\tau)$; совокупность параметров воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения, в нерабочей зоне, в зоне отбора уходящего и рециркуляционного воздуха — соответственно многомерными функциями $X_{\text{р.з}}=X_{\text{р з}}(\tau)$; $X_{\text{н.з}}=X_{\text{н.з}}(\tau)$; $X_{\text{р.ц}}=X_{\text{р.ц}}(\tau)$. Технологические процессы подготовки кондиционированного приточного воздуха и процессы ассимиляции и диссимиляции тепла и влаги в обслуживаемом помещении, т. е. движение системы из состояния $X_{\text{н}}$ в состояние $X_{\text{п}}$ и далее в $X_{\text{р з}}$, характеризуются соответственно группами процессов $\varepsilon_{\text{УКВ}_j}$ и $\varepsilon_{\text{ОП}_i}$.

Отметим, что под переменными состояния системы X (τ) понимаются обобщенные координаты системы или показатели технологического процесса кондиционирования воздуха в различных точках («н», «п», «р.з» и т. д.) системы в различные моменты времени τ. При этом набор переменных, например t, φ, G и т. д., характеризующих технологический процесс КВ в той или иной точке СКВ, определяет изображаемую точку процесса в n-мерном пространстве координат системы.

Как видно из рис. 1.1, для фиксированного состояния $X_{\text{н}}$ существует некоторое множество допустимых состояний $X_{\text{п}}$ и $X_{\text{р.з}}$, в которых может находиться точка $X_{\text{п}}$ или $X_{\text{р.з}_i}$, и некоторое множество возможных реализаций процессов $\varepsilon_{\text{УКВ}_j}$ и $\varepsilon_{\text{ОП}_i}$. Количество и направление процессов $\varepsilon_{\text{УКВ}}$ значительно увеличится и изменится при движении точки $X_{\text{н}}$ (τ) в области пространства параметров наружного воздуха (НВ), ограниченной на I—d-диаграмме (см. рис. 1.1) линией $\varphi=100\%$ и кривой, известной под названием граница климата рассматриваемой географической точки.

Любая система кондиционирования воздуха работает в условиях непрерывного отклонения внешних и внутренних переменных состояния от некоторых фиксированных (расчетных) значений. Фиксированные значения параметров наружного воздуха $X_{\text{н}}$ (τ) и соответствующие им значения других входных переменных состояния, например температуры горячей воды на входе в СКВ t_{w_1}, будем считать начальными условиями. В таком случае неорганизованные неуправляемые отклонения внешних и внутренних переменных состояния, т. е. отклонения, которые могут появляться и исчезать в произвольные моменты времени и изменяться по произволь-

ному закону отклонения, существенно влияющие на показатели процессов $\varepsilon_{УКВ}$ и $\varepsilon_{ОП}$, являются возмущающими воздействиями f_{is}.

В системах кондиционирования воздуха имеют место две главные группы возмущающих воздействий $f(\tau)$: внешние и внутренние. Внешние возмущающие воздействия $f_{н}(\tau)$, определяемые изменениями параметров наружного воздуха, приводят к отклонениям в работе тепломассообменных аппаратов и устройств, а также к отклонению тепловыделений и теплопотерь в обслуживаемых системой помещениях. Внутренние возмущающие воздействия $f_{вн}(\tau)$ наблюдаются в обслуживаемых помещениях при наличии технологических и бытовых выделений и потерь тепла и влаги.

В общем виде возмущающие воздействия на обслуживаемое помещение могут быть представлены следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} f_{н}(\tau) &= f_{н}[\Delta Q_{огр}(\tau);\ \Delta Q_{р}(\tau);\ \Delta G_{в.ф}(\tau)]; \\ f_{ВН}(\tau) &= f_{ВН}[\Delta Q_{техн}(\tau);\ \Delta W_{техн}(\tau)], \end{aligned}\right\} \quad (1.1)$$

где $\Delta Q_{огр}(\tau)$ — поступления или потери тепла через наружные ограждения; $\Delta Q_{р}(\tau)$ — теплопоступления за счет непосредственно проникающей в помещение солнечной радиации; $\Delta G_{в\ ф}$ — расход воздуха, проходящего через ограждения (фильтрация); $\Delta Q_{техн}(\tau)$ — технологические и бытовые выделения или стоки тепла; $\Delta W_{техн}(\tau)$ — технологические и бытовые выделения или потери влаги.

Достижение системой кондиционирования воздуха цели функционирования, а также обеспечение некоторых показателей эффективности в условиях непрерывного действия возмущений $f_{is}(\tau)$ становится возможным только при организации управления процессами $\varepsilon_{УКВ}$ и $\varepsilon_{ОП}$. В СКВ под управлением U (рис. 1.2, 1.3) подразумевается переработка некоторой воспринятой информации в сигналы, направляющие работу машин, аппаратов и устройств системы на изменение параметров обменива-

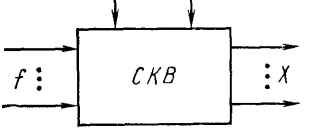


Рис 1 2. Переменные состояния системы

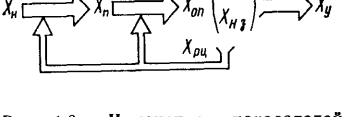


Рис. 1 3. Изменение показателей процессов $\varepsilon_{УКВ}$ и $\varepsilon_{ОП}$ в пространстве и времени

ющихся сред путем изменения расхода или разделения потока движения той или иной среды. В общем виде многомерная векторная функция $U_{is}(\tau)$ может быть представлена как

$$U_{is}(\tau) = U[\Delta Q_{т}(\tau);\ \Delta Q_{х}(\tau);\ \Delta G_{в}(\tau);\ \Delta G_{w}(\tau);\ \Delta N(\tau)], \quad (1.2)$$

т. е. как управляемые изменяющиеся во времени отклонения от фиксированных начальных расчетных значений расхода системой тепла $Q_{т}(\tau)$, холода $Q_{х}(\tau)$, воздуха $G_{в}(\tau)$, воды $G_{w}(\tau)$ и электроэнергии $N(\tau)$ или как

$$U_{is}(\tau) = U[\gamma_{т}(\tau);\ \gamma_{х}(\tau);\ \alpha(\tau);\ \mu(\tau);\ \ldots;\ r(\tau)], \quad (1.3)$$

где γ, α, μ, ..., r — безразмерные показатели сигналов управления.

Отсюда вытекает обязательное условие работы системы кондиционирования воздуха — управляемость, т. е. свойство или способность системы приходить в некоторое заданное состояние под воздействием управляющих сигналов.

Отсюда же вытекает и определение: система кондиционирования воздуха является автоматической (или, как принято среди специалистов по СКВ, автоматизированной), если основные функции управления, необходимые в процессе работы для достижения цели функционирования, осуществляются без непосредственного участия человека.

Процесс разработки автоматизированной СКВ представляет собой взаимосвязанную совокупность операций, объединенных понятиями «анализ» и «синтез» системы. Под анализом автоматизированной системы кондиционирования воздуха понимается исследование системы, которая еще не существует (во всяком случае в той модификации, которая рассматривается), при этом делается попытка оценить эффективность автоматизированной СКВ, ее стоимость, а также влияние на эти величины изменений отдельных параметров и переменных состояний. Под **синтезом** автоматизированной системы кондиционирования воздуха понимается процесс построения структуры системы, разработка алгоритмов функционирования и управления, а также разработка и выбор комплекса технических средств их реализации.

При этом **структура** системы кондиционирования воздуха определяет основные функциональные части, их назначение и взаимосвязь.

Под алгоритмом функционирования СКВ понимается программа выполнения и последовательность смены ре-

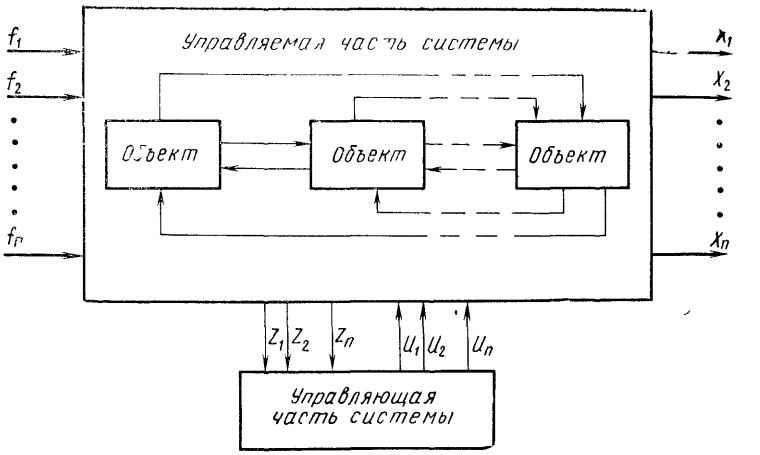


Рис. 1.4. Управляемая и управляющая части СКВ

альных технологических процессов тепловлажностной обработки воздуха, его подачи в обслуживаемое помещение и ассимиляции или диссимиляции тепла и влаги в нем.

Под алгоритмом управления понимается описание процедуры обработки информации о наблюдаемых переменных состояния с целью определения управляющих воздействий, реализуемых для получения требуемых показателей управляемого процесса как в установившемся, так и в переходном режиме.

Исходя из представления о том, что система кондиционирования воздуха (см. рис. 1.2) постоянно находится под воздействием возмущений $f_{is}(\tau)$ и управлений $U_{is}(\tau)$ и ее функционирование при этом характеризуется определенной группой переменных состояния $X_{is}(\tau)$, зависимость перечисленных показателей, определяемую характером протекающих в системе процессов, можно представить в виде функции

$$F(X_{is};\ U_{is};\ f_{is};\ \tau) = 0. \qquad (1.4)$$

Основой анализа взаимосвязи входящих в выражение (1.4) переменных является разделение системы кондиционирования воздуха на две части (рис. 1.4): управляемую и управляющую. Под первой понимается совокупность технических средств приготовления, перемещения и распределения кондиционированного воздуха, а также

средств конструктивно-планировочной тепловой защиты процессов кондиционирования микроклимата в обслуживаемом помещении, под второй — совокупность средств, предназначенных обеспечить выполнение управляемой частью системы задачи поддержания заданных значений параметров микроклимата.

Анализ процесса разработки систем кондиционирования воздуха позволяет представить весь комплекс работ в виде параллельно-последовательной схемы получения решений, которая дает возможность определить основные принципы построения управляемой части системы на первом этапе и управляющей — на втором. Очевидно, что результаты выполнения первого этапа явно предопределяют состав второго, а в свою очередь результаты выполнения второго в определенной мере влияют на выполнение первого. Это объясняется тем, что управляемая и управляющая части имеют единую цель функционирования и характеризуются некоторым общим для каждой из них показателем эффективности. Пространства состояний той и другой частей системы пересекаются, причем область пересечения определяет пространство состояний системы в целом и в определенном смысле характеризует качество достижения цели функционирования.

Одну из групп общих для управляемой и управляющей частей системы переменных составляют наблюдаемые переменные $z_{is}(\tau) \in X_{is}(\tau)$ — показатели технологических процессов, сигналы об изменении которых поступают в управляющую часть системы. Отсюда вытекает другое обязательное условие работы системы — наблюдаемость, т е возможность определения некоторых переменных состояния по результатам измерения физических переменных. Другую группу общих переменных составляют управляемые переменные состояния $y_{is}(\tau) \in x_{is}(\tau)$ — промежуточные или выходные показатели технологических процессов в системе, приводимые в требуемое состояние с помощью управляющих воздействий $U_{is}(\tau)$.

В системе кондиционирования воздуха управляемая часть состоит из нескольких управляемых объектов, объединенных единством цели функционирования, каждый из которых представляет техническое устройство или подсистему, требуемый режим работы которой или требуемый характер протекания того или иного техно-

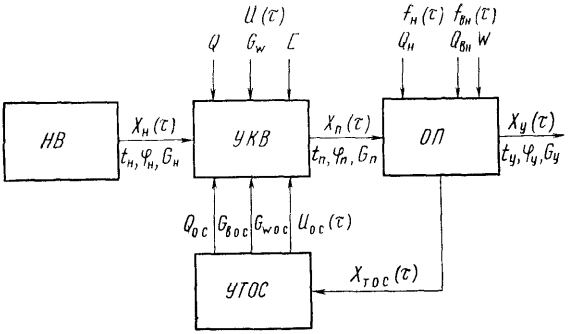


Рис 1.5. Обобщенная структура СКВ

логического процесса в которой должен поддерживаться с помощью управляющих воздействий.

Наиболее наглядное первичное представление о составе СКВ можно получить путем анализа и синтеза структурной схемы, представляющей собой графическое изображение структуры системы или ее части. При этом под структурой СКВ понимается совокупность частей, на которые система разделяется по тем или иным признакам, и связей, изображающих каналы, по которым передаются воздействия от одной части к другой. В теории управления структурные схемы бывают функциональными, алгоритмическими и конструктивными [2], в данной работе будут рассматриваться в большинстве случаев первые и в незначительной мере вторые.

Функциональными частями системы кондиционирования воздуха (рис. 1.5), являются: НВ — наружный воздух, являющийся исходным обрабатываемым материалом (веществом) в процессе создания кондиционированного воздуха; УКВ — установка кондиционирования воздуха, машины, аппараты и устройства которой осуществляют нагрев и охлаждение, очистку, смешение и перемещение наружного и рециркуляционного (когда он имеется) воздуха с целью придания ему требуемых кондиций и подачи в обслуживаемое помещение; ОП — обслуживаемое помещение, в котором требуется поддерживать в тех или иных пределах параметры воздушного микроклимата; УТОС — устройства термодинамической обратной связи, с помощью аппаратов и устройств которой утилизируется энергия или используется уходящий из обслуживаемого помещения воздух.

Представление системы кондиционирования воздуха как совокупности функциональных элементов НВ, УКВ, ОП и УТОС позволяет определить один из основных функциональных классификационных признаков — наличие или отсутствие термодинамической обратной связи. Физическая сущность понятия последней заключается в целенаправленном использовании теплофизических результатов функционирования системы для улучшения энергетических показателей процессов в той или иной точке технологического тракта системы.

Выделение в функциональной структуре системы кондиционирования воздуха звена НВ обусловлено тем, что состояние атмосферы, температура и влажность воздуха, давление, поле ветров, солнечная радиация и т. д. являются существенными факторами в работе СКВ. Так как пространственные и временные изменения состояния атмосферы и параметры наружного воздуха являются случайными величинами, которые не могут быть каким-либо образом принудительно изменены в процессе управления системой, т. е не подвержены управлению, функциональное звено НВ, естественно, не рассматривается в совокупности звеньев системы, составляющих ее управляемую часть. В то же время окружающая атмосфера воздействует на СКВ по меньшей мере по двум каналам: состояние наружного воздуха (в качестве параметров исходного обрабатываемого материала в процессе создания кондиционирования воздуха) и влияние состояния атмосферы на тепловой, воздушный и влажностный режим строительного сооружения и, в частности, обслуживаемого системой помещения.

Вследствие представленной физической взаимосвязи наружного и внутреннего климата («внешняя, краевая и внутренняя задачи» [1]) температура и влажность (теплосодержание) наружного воздуха могут быть базисными координатами состояния СКВ. Поэтому характеристики состояния атмосферы и параметров наружного воздуха, представленные, например, в виде вероятностной модели НВ, должны обязательно учитываться при разработке системы кондиционирования воздуха.

Выделение в составе системы кондиционирования воздуха функциональных звеньев УКВ, ОП и УТОС позволяет создать на первом этапе исследования агрегированную эквивалентную модель системы с меньшим чис-

лом переменных состояния и ограничений. Кроме того подобное агрегирование элементов СКВ имеет принципиальное значение для принятия последующих решений по аппаратному оформлению или конструктивному интегрированию установок кондиционирования воздуха и средств автоматического регулирования и управления с целью достижения максимальной заводской готовности выпускаемого оборудования.

На последующих этапах исследования СКВ очевидна целесообразность и необходимость декомпозиции звеньев УКВ, ОП и УТОС, вследствие чего создается иерархия структурных моделей системы. На ее верхнем уровне правомерно решение укрупненных технико-экономических задач реализации СКВ. В то же время каждый последующий уровень структуры системы, представляя собой наиболее тесно связанные элементы исходной системы, по своим размерам доступен для более детального исследования. На этих уровнях исследуются реализуемость и управляемость отдельных частей технологического тракта процессов кондиционирования микроклимата (т. е. реализуемость и управляемость подсистем СКВ).

В настоящее время сложность автоматизированных систем кондиционирования воздуха значительно возросла. Не так давно состав автоматизированных СКВ ограничивался отдельными системами автоматического регулирования, взаимная координация действия которых осуществлялась оператором. Если раньше создавались системы в виде установок, выполняющих простые функции, связанные с измерением, анализом, контролем и отработкой решений, принятых оператором, то теперь возникла необходимость в создании сложных взаимосвязанных систем автоматического управления.

Управляемая часть системы кондиционирования воздуха представляет собой совокупность ряда управляемых объектов. При этом под **объектом управления** понимается аппарат, машина или техническое устройство, в котором требуемый режим работы или требуемый характер протекания того или иного технологического процесса должен поддерживаться с помощью управляющих воздействий. В соответствии с данным определением в любой **системе кондиционирования воздуха объектом управления следует считать обслуживаемое помещение**

(ОП) Понимая под объектом управления в данном случае статику и динамику процесса $\varepsilon_{СП}$, т. е. ассимиляцию или диссимиляцию тепла и влаги, а также процессы, характеризующие воздушный режим ОП **Объектами управления в системах кондиционирования воздуха** следует также считать вентилятор (В), воздухонагреватель (ВН), воздухоохладитель (ВО), камеру орошения (КО), пароувлажнитель (ПУ), вращающейся барабанный аппарат (БА), камеру смешения (КС) и т. д Каждое из этих устройств в совокупности с соответствующими техническими средствами автоматики может представлять собой **локальную систему** автоматического управления или регулирования

Принцип действия всякой системы автоматического регулирования заключается в том, чтобы обнаружить отклонение регулируемой переменной, характеризующей работу машины или протекание процесса, от требуемого значения и произвести воздействие на машину или процесс так, чтобы устранить это отклонение. На этом объем функций, выполняемых системой регулирования, исчерпывается В таком случае задачу регулирования можно рассматривать как часть задачи управления [9]

Сложные системы автоматического управления состоят из ряда ступеней, образующих иерархические уровни При этом на высших уровнях автоматизируются системы и процессы, имеющие достаточно сложный и общий характер, а на низших исследуются и автоматизируются сравнительно простые локальные системы

Анализ и синтез локальных систем автоматического управления и регулирования, входящих в общую структуру системы, является обязательной составной частью общего процесса разработки автоматизированной СКВ При этом метод разработки автоматизированной системы кондиционирования микроклимата заключается в том, что единая система разделяется на отдельные части по функциональному признаку, устанавливаются возможные варианты реализаций этих частей, связей между ними и из некоторого множества вариантов выбирается структура системы в целом

Разделение систем кондиционирования воздуха на функциональные части (подсистемы) и исследование связей между ними производятся с целью использова-

ния принципа субоптимизации частных (локальных) критериев эффективности между собой и с общим (глобальным) критерием. При этом принимается, что для оптимизации СКВ в целом необязательна оптимизация работы каждой из подсистем, например воздухонагревателя или камеры орошения, вентилятора или устройства воздухораспределения и т. д.

1 2. ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Систему кондиционирования воздуха следует рассматривать как единое целое, состоящее из трех подсистем первого уровня: УКВ, ОП и УТОС. Подсистемами второго уровня являются отдельные тепломассообменные аппараты, а также устройства перемещения и распределения обменивающихся сред. Другими словами, в иерархической структуре СКВ низший уровень образуют процессы тепловлажностной обработки, перемещения и распределения воздуха. Каждый из этих процессов следует рассматривать как подсистему низшего уровня, имеющую вход и выход.

Задача управления подсистемами низшего уровня в СКВ заключается в стабилизации технологических параметров процессов обработки (кондиционирования) воздуха и защите этих процессов от возникновения аварийных ситуаций.

Кондиционирование воздуха осуществляется путем использования различных тепло- и массообменных аппаратов и устройств. Как известно, для реализации процессов переноса тепла и массы обменивающиеся среды должны иметь различные потенциалы. В аппаратах и устройствах СКВ в качестве потенциалов при переносе тепла рассматривается разность температур, а при переносе массы (водяного пара) — разность парциальных давлений водяных паров [6].

Температура и парциальные давления изменяются различно как в пространстве, так и во времени. Рассматривая тепломассообменные аппараты как устройства с сосредоточенными параметрами, следует отметить нестационарность процессов переноса тепла и массы, т. е. изменение их показателей во времени.

При нормальной работе СКВ показатели процессов тепловлажностной обработки воздуха (выходные пере-

менные состояния) не могут изменяться произвольно и должны удовлетворять определенным зависимостям. Это означает, что выходные переменные являются функциями входных переменных и времени. В таком случае в первую очередь становится главным выполнение условия управляемости процессами переноса тепла и массы, а далее — выбор и оценка эффективности способов управления в тех или иных формах их аппаратной реализации.

Работа системы кондиционирования, воздуха, а следовательно, и отдельных ее подсистем, т. е. отдельных тепломассообменных аппаратов, характеризуется наличием внутренних и внешних возмущающих воздействий, непрерывно изменяющихся во времени. Подобный характер возмущений (а таковыми для тепломассообменных аппаратов могут быть, например, изменения расходов или температур обменивающихся сред на входе в аппарат) приводит к нежелательным изменениям показателей работы отдельных аппаратов, а также к невыполнению целей создания СКВ в целом.

Для достижения целей и выполнения требуемого качества функционирования СКВ и ее подсистем на нижнем уровне иерархии автоматического управления создаются и используются системы автоматического регулирования (САР), а точнее системы автоматической стабилизации переменных состояния в тепломассообменных аппаратах или устройствах. Этим объясняется появление в таких аппаратах, как воздухонагреватели, камеры орошения и т. д., регулирующих органов (РО) — клапанов и заслонок на потоках воздуха, тепло- и холодоносителя, а также появление дополнительных насосов и вентиляторов. При этом отметим, что применение регулирующих органов не требуется для обеспечения стационарных неуправляемых процессов переноса тепла и массы.

Автоматическая стабилизация выходных переменных состояния в условиях нестационарности тепломассообмена осуществляется изменением в аппаратах потоков движения или параметров обменивающихся сред путем использования специальных локальных систем автоматического регулирования.

Локальные (автономные) системы автоматического регулирования — это такие системы, область действия которых ограничивается одним или двумя контурами автоматической стабилизации выходных переменных со-

стояния подсистем, включающих одно- или двухзвенные объекты регулирования. Локальные системы автоматического регулирования обладают свойством независимости движения каждой из регулируемых переменных от изменения координат совместно работающих подсистем.

В простейшем идеализированном случае каждая из выходных переменных определяется свойством своего канала и видом воздействия своего регулирующего органа. Например, процесс изовлажностного нагрева воздуха в поверхностном воздухонагревателе [где $\Delta t_{в_2} = f(\Delta G_w)$, т. е. изменение температуры воздуха на выходе] есть функция изменения расхода теплоносителя или процесс изотермического увлажнения с помощью пароувлажнителя [где $\Delta\varphi_2 = f(\Delta G_п; \Delta E)$, т. е. изменение относительной влажности воздуха на выходе из аппарата] есть функция изменения расхода пара, который, в свою очередь, является функцией изменения расхода электроэнергии на парообразование. Как в том, так и в другом случае температура или влажность воздуха определяется характеристиками только одного канала регулирования и видом одного управляющего воздействия (ΔG_w, ΔE).

В общем случае между каналами температуры и влажности имеются перекрестные связи, приводящие к взаимному влиянию каналов. В таких аппаратах, как поверхностный воздухонагреватель или пароувлажнитель, перекрестные связи проявляются только через взаимосвязь наблюдаемых переменных состояния воздуха на выходе из аппарата.

Однако при определенных требованиях к взаимозависимому изменению параметров воздуха на выходе того или иного аппарата в таких аппаратах, как форсуночная камера или вращающийся барабанный аппарат для увлажнения и нагрева воздуха, перекрестные связи могут существенно влиять на качество работы системы автоматического регулирования. В этих случаях следует иметь в виду, что, если при управлении объектом, в котором необходимо стабилизировать несколько взаимосвязанных переменных, не принимать во внимание наличие связей между отдельными контурами регулирования и пытаться обеспечить требуемый процесс стабилизации каждого из них независимо, то может значительно

ухудшиться функционирование подсистемы и даже появиться неустойчивость.

Под **устойчивостью** системы автоматического управления (регулирования) в теории автоматического управления понимают способность системы достаточно длительное время и с достаточной точностью сохранять некоторый заранее известный вид (форму) своего состояния или функционирования [2]. Устойчивость локальных систем автоматического регулирования характеризуется равенством нулю переходной составляющей стабилизируемой переменной состояния [10], в рассматриваемых выше случаях это условие $\Delta t_{\text{пер}}=0$, $\Delta\varphi_{\text{пер}}=0$.

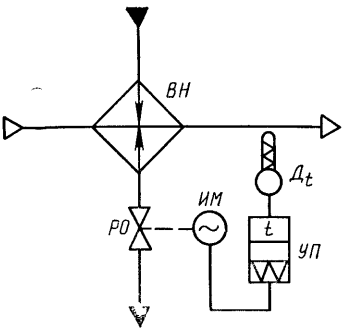


Рис. 1 6 Система автоматического регулирования температуры воздуха на выходе из теплообменника

Принцип действия локальной системы автоматического регулирования состоит в том, чтобы определить отклонение Δ регулируемой переменной ($t_{в_2}$, φ_2 и т. д.) являющейся выходной управляемой переменной состояния процессов в автоматизируемом аппарате, от требуемого заранее заданного значения ($t_{в_3}$, φ_3 и т. д.) и осуществить при наличии отклонения регулирующее воздействие $r(\tau)$, направленное на его устранение.

Примером локальной системы автоматического регулирования температуры воздуха на выходе из поверхностного теплообменника вода — воздух (рис. 1.6.) является система, которая состоит из объекта регулирования — воздухонагревателя (ВН), датчика температуры воздуха $Д_t$ на выходе из ВН, соединенного с входом усилителя-преобразователя (УП), выход которого соединен с входом исполнительного механизма (ИМ), снабженного выходным штоком, который кинематически связан с входным штоком регулирующего органа (РО) — регулирующего клапана, установленного на трубопроводе подачи теплоносителя.

Процесс передачи тепла в воздухонагревателе регулируется изменением расхода теплоносителя G_w через теплообменник в зависимости от температуры воздуха на его выходе $t_{в_2}$. Если текущее значение температуры воздуха $t_{в_2}$ отличается от заданного значения $t_{в_3}$, то в

усилителе-преобразователе вырабатывается сигнал отклонения Δt, который усиливается и функционально преобразуется в командный сигнал. В соответствии с видом командного сигнала, подаваемого на исполнительный механизм, последний находится в состоянии покоя или движения для перемещения в ту или иную сторону плунжера регулирующего клапана. Перемещение плунжера клапана приводит к изменению расхода теплоносителя G_w, вследствие чего изменяются количество передаваемого от воды к воздуху тепла $Q_{\text{ВН}}$ и температура воздуха $t_{\text{в}_2}$, так как

$$Q_{\text{ВН}} = G_{\text{в}}\, c_{\text{в}}\, (t_{\text{в}_2} - t_{\text{в}_1}), \qquad (1.5)$$

где $G_{\text{в}}$ — количество нагреваемого воздуха; $c_{\text{в}}$ — теплоемкость воздуха; $t_{\text{в}_1}$ — температура воздуха на входе в воздухонагреватель.

Система регулирования работает так, что сигнал отклонения

$$\Delta t = t_{\text{в}_2 i} - t_{\text{в.з}} \qquad (1.6)$$

уменьшается и текущая температура воздуха на выходе из воздухонагревателя приближается к заданному значению, а Δt стремится к нулю.

Представленная система автоматического регулирования температуры воздуха является динамической системой, описываемой уравнением

$$d t_{\text{в}_2}/d\tau = F\,[t_{\text{в}_2}(\tau);\ Q_{\text{ВН}}(\tau);\ t_{\text{в}_1}(\tau);\ t_{w_1}(\tau)]. \qquad (1.7)$$

Подобная система создается для того, чтобы сохранить в допустимых пределах ошибку Δt путем сравнения $t_{\text{в}2i}$ и $t_{\text{в.з}}$ по уравнению (1.6) и использования получившихся при этом сигналов $r(\tau) = f(\Delta t)$ для управления количеством поступающей в воздухонагреватель тепловой энергии

$$Q_{\text{ВН}} = G_w\, c_w\, (t_{w_1} - t_{w_2}), \qquad (1.8)$$

где c_w — теплоемкость воды; t_{w_1} и t_{w_2} — температура воды соответственно на входе и выходе из воздухонагревателя.

Изменения стабилизируемой переменной $t_{\text{в}_2}$ вызываются не только регулирующими, но и главным образом возмущающими воздействиями $f(\tau)$, которыми в рассматриваемом случае в первую очередь являются изменения температуры воздуха и теплоносителя на входе в воздухонагреватель, а затем конструктивные изменения параметров теплообменника (площади поверхности

нагрева, живого сечения по воздуху или воде и т. д.), а также регулятора (усилителя-преобразователя, исполнительного механизма, регулирующего клапана).

В идеальной системе автоматического регулирования ошибка равна нулю. Однако на практике осуществление идеальных систем регулирования невозможно. Это обусловлено самим принципом работы САР, основанном на измерении ошибок регулирования. Очевидно, что при постоянной нулевой разности требуемого и текущего значений стабилизируемой переменной система автоматического регулирования бездействует и, следовательно, отпадает необходимость в ее разработке и реализации.

При создании системы автоматического регулирования оценка ее качества производится по меньшей мере по трем показателям: запас устойчивости, ошибка в установившемся состоянии, характер переходного процесса [10].

Любая замкнутая система автоматического регулирования, согласно принципу ее работы, по которому часть энергии с ее выхода поступает с определенным коэффициентом усиления на ее вход, склонна к колебаниям, т. е. к возможности потери устойчивости. Проиллюстрируем это свойство системы на примере САР, представленной на рис. 1.6.

Полагаем, что в начальный момент времени (начальные условия работы системы) температура воздуха на выходе из воздухонагревателя равна заданной, при этом система автоматического регулирования находится в покое, обеспечивая постоянный (расчетный для начальных условий) расход теплоносителя. В момент времени, отличный от начального, из-за изменения температуры воздуха на входе в воздухонагреватель, например в сторону увеличения, расход теплоносителя для нагрева того же количества воздуха для того же заданного значения температуры станет завышенным. Вследствие этого температура воздуха на выходе из воздухонагревателя увеличится, при этом датчик температуры и усилитель-преобразователь выработают сигнал рассогласования и сформируют сигнал управления. По этому сигналу вследствие изменения положения плунжера клапана на трубопроводе теплоносителя вырабатывается регулирующее воздействие, направленное на уменьшение расхода теплоносителя.

В результате уменьшения количества проходящей через теплообменник воды уменьшится количество тепла, отдаваемого от воды к воздуху, вследствие чего его температура на выходе из воздухонагревателя начнет уменьшаться. Через некоторое время текущее значение температуры воздуха достигнет ее заданного значения. Однако из-за того, что теплообменник является инерционным теплопередающим аппаратом и обладает некоторым запасом тепловой энергии, уменьшение расхода теплоносителя, а следовательно, и уменьшение температуры воздуха на выходе будет продолжаться. В таком случае температура воздуха на выходе из воздухонагревателя начнет отклоняться от заданного значения в направлении, противоположном предшествующему отклонению. Такое изменение температуры приведет к тому, что датчик температуры и усилитель-преобразователь сформируют сигнал управления, противоположный предшествующему.

Согласно новому сигналу управления, в системе вырабатывается новое регулирующее воздействие, направленное на увеличение расхода теплоносителя. Очевидно, что температура воздуха на выходе из воздухонагревателя начнет увеличиваться. При этом характер ее изменения, т. е. характер переходного процесса, будет очень близок к предыдущему, имевшему место в начальный полупериод. Так как, помимо инерционности теплообменника, на характер переходного процесса существенно влияет инерционность регулятора, увеличение, а затем в следующий полупериод уменьшение температуры воздуха на выходе из воздухонагревателя не будут прекращаться в момент равенства текущего и заданного значения температур. Это приведет к тому, что в системе в течение некоторого времени будут последовательно вырабатываться противоположные сигналы управления и, следовательно, на выходе из воздухонагревателя будут наблюдаться последовательные колебания текущих значений температуры воздуха около ее заданного значения.

При определенном неблагоприятном сочетании параметров системы, например уровня мощности регулирующего воздействия (расход теплоносителя через клапан) и передаточного коэффициента по каналу расход — температура, определяемого конструктивными и теплотехническими характеристиками теплообменника, возможно

возникновение колебательного процесса, при котором амплитуда изменений температуры воздуха на выходе из воздухонагревателя будет возрастать или сохраняться постоянной, но не уменьшаться. При этом регулирующий клапан будет находиться в постоянном движении. Такой режим работы системы автоматического регулирования температуры называется автоколебательным, или неустойчивым.

Таким образом, принцип обратной связи из средства уменьшения ошибки регулирования превращается в средство генерации колебаний и увеличения ошибки.

Способность системы автоматического регулирования обеспечивать уменьшение отклонения регулируемой переменной от заданного значения за некоторое время переходного процесса определяет ее устойчивость. Требование устойчивости является необходимым условием нормальной работы САР. Количественно оно характеризуется некоторым запасом, предусматривающим возможные изменения параметров системы во время ее настройки и эксплуатации.

Недопустимость неустойчивой работы системы или работы в режиме устойчивых автоколебаний при наличии ограничений по уровню мощности регулирующих воздействий определяется прежде всего большой ошибкой регулирования, а также нежелательным режимом работы оборудования (особенно его механических узлов: исполнительного механизма и регулирующего органа), характеризуемым быстрым износом.

Свойство устойчивости является лишь необходимым, но далеко недостаточным условием качества системы автоматического регулирования. Для того чтобы охарактеризовать другие свойства системы, необходимо рассмотреть ее работу в реальных условиях при наличии внешних воздействий. С этой целью из всего многообразия прилагаемых к системе воздействий, представляющих собой непрерывно изменяющиеся функции времени, выбирают наиболее типичные или неблагоприятные. К таким воздействиям, получившим название типовых, относится прежде всего ступенчатое воздействие или единичный скачок.

Любое из типовых воздействий вызовет в системе отклик в форме определенного переходного процесса. После окончания или затухания переходного процесса система приходит в установившееся состояние (вслед-

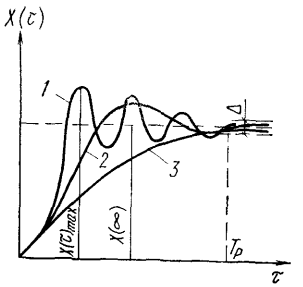
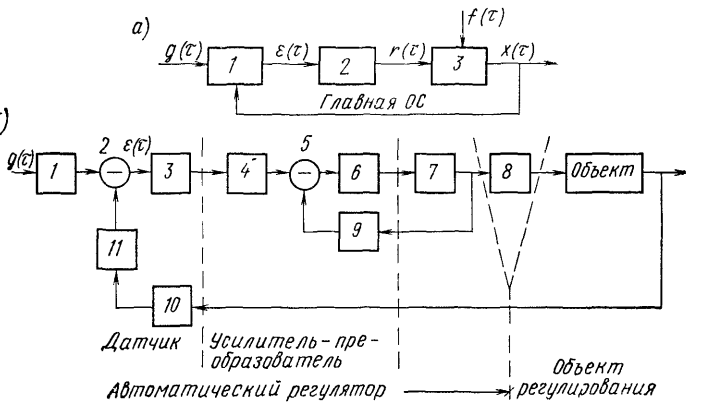


Рис 1.7 Вид переходного процесса *1* — колебательный, *2* — малоколебательный, *3* — монотонный

Рис 1.8. Структурная схема локальной (автономной) системы автоматического регулирования



ствие выполнения условия устойчивости). Исходя из того что система после приложения типового воздействия претерпевает два качественно различных состояния — переходный процесс и установившееся состояние, ее динамические свойства определяются степенью выполнения требований к каждому из этих состояний [11].

Требование к установившемуся состоянию системы определяется так называемой статической точностью САР, понимая под статической точностью отклонение регулируемой переменной от заданного значения или значение ошибки через достаточно большой промежуток времени после приложения воздействия.

По виду переходного процесса (рис. 1.7), возникающего в системе при единичном воздействии, можно определить следующие показатели качества системы автоматического регулирования: 1) статическое отклонение $x(\infty)$; 2) максимальное отклонение регулируемой переменной $x(\tau)_{max}$, выраженное в единицах измерения ре-

гулируемой переменной или в процентном отношении разности максимального $x(\tau)_{max}$ и статического отклонения $x(\infty)$ к статическому отклонению, 3) время переходного процесса, или время регулирования $T_р$, определяемое отрезком времени от момента приложения к системе типового воздействия до момента достижения регулируемой переменной значения, отличного от значения статического отклонения на некоторую заданную малую величину Δ.

Одним из начальных этапов создания любой системы автоматического управления кондиционированием воздуха является разработка локальных систем автоматического регулирования, включающая составление структурной и функциональной схем.

На функциональной схеме (в технике автоматизации СКВ иногда используется термин «технологическая схема» [12]) изображаются элементы, устройства и группы технологического оборудования, входящие в состав системы кондиционирования воздуха или ее подсистемы, при этом в отдельных случаях вместо условных связей указываются конкретные конструктивные соединения между элементами и устройствами.

Система автоматического регулирования обычно состоит из большого числа разнообразных по функциональному назначению и конструктивному оформлению устройств, которые можно группировать в типовые узлы, обладающие некоторыми общими свойствами [9]. Наличие того или иного типового узла в конкретно рассматриваемой системе автоматического регулирования не является обязательным. Однако во всякой САР обязательно присутствие объекта регулирования и автоматического регулятора.

Обобщенная структурная схема САР (рис. 1.8,*а*) включает в себя сравнивающее устройство, устройство, реализующее алгоритмы (закон) регулирования, и объект регулирования.

Управляющее воздействие $g(\tau)$, приложенное к сравнивающему устройству, является входным сигналом. Выходом системы является регулируемая переменная $x(\tau)$, а условным местом выхода — объект регулирования или место установки чувствительного элемента, измеряющего выходную переменную (отсюда термин «представительная точка»). Сигнал, пропорциональный измеренному текущему значению регулируемой переменной, посту-

пающий с выхода системы на ее вход, является сигналом главной обратной связи. В результате сравнения сигнала главной обратной связи и сигнала задания получается сигнал рассогласования или ошибки $\varepsilon(\tau)$, по которому в системе формируется регулирующее воздействие $r(\tau)$. Возмущение $f(\tau)$ приложено к объекту регулирования (см. рис. 1.8,*а*), хотя, как уже указывалось, местом его воздействия может быть любое из функциональных звеньев системы.

Структура системы автоматического регулирования одной переменной состоит из двух частей: объекта регулирования и автоматического регулятора (рис. 1.8,*б*). Автоматический регулятор может быть представлен в виде соединения нескольких типовых узлов, выделенных по функциональному признаку.

В состав регулятора входит задающее устройство, предназначенное для преобразования управляющего воздействия в сигнал, пригодный для сравнения с сигналом главной обратной связи. В качестве задающего устройства могут быть использованы калиброванные сопротивления, потенциометры, пружины, грузы и т. д.

Формирование первичного сигнала рассогласования, или сигнала ошибки, производится устройством сравнения, которым могут быть электрические четырехполюсники, пружины, сильфоны, мембраны и т. д.

Первичный сигнал ошибки подается на преобразующее устройство, превращающее этот сигнал в физическую величину, удобную для последующего усиления и функционального преобразования, осуществляемых последовательным корректирующим устройством.

Для придания системе требуемых динамических качеств может использоваться местная обратная связь с параллельным корректирующим устройством и вспомогательное сравнивающее устройство, сопоставляющее сигнал в промежуточной точке прямого главного канала с сигналом местной обратной связи.

Суммарный сигнал, полученный во вспомогательном сравнивающем устройстве, подается на вход конечного усилителя мощности, где формируется командный сигнал на исполнительный механизм *7*.

В представленном примере (см. рис. 1.8,*б*) местная обратная связь охватывает исполнительный механизм в регуляторах температуры типа ПТР-П. В другом случае местная обратная связь может охватывать только звенья

усилителя-преобразователя в широко распространенных общепромышленных регуляторах типа РП-4, Р-25 и т. д.

Стабилизируемую или выходную переменную измеряет чувствительный элемент, сигнал с которого поступает на устройство главной обратной связи.

Часть регулятора, в которую входят устройства *1—3*, *10*, *11*, формирующая сигнал ошибки $\varepsilon(\tau)$, конструктивно образует датчик регулятора. Другая часть регулятора, в которую входят устройства *4—6* и *9*, осуществляющая усиление и функциональное преобразование сигнала ошибки, образует усилитель-преобразователь.

Датчик регулятора, усилитель-преобразователь и исполнительный механизм *7* в совокупности образуют автоматический регулятор. Регулирующий орган *8* при рассмотрении различных систем относят или к объекту регулирования, или к регулятору.

Необходимо отметить, что разработка структурной и функциональной схемы системы автоматического регулирования является обязательным этапом ее проектирования и предшествует выбору и расчету элементов на основе требований к статическим и динамическим свойствам системы.

Очень важен структурный анализ при создании сложных систем автоматического регулирования. Структурная схема дает представление о динамических звеньях системы, осуществляющих функциональную или операторную связь между их входными и выходными переменными, о имеющихся элементах сравнения, в которых происходит вычитание или сложение сигналов, об устройствах, осуществляющих те или иные логические операции. Структурная схема отражает пути распространения сигналов системы, точки их разветвления и приложения, а также позволяет определить точки приложения и направления всех внешних воздействий на систему.

Линии связи между звеньями структурной схемы системы автоматического регулирования позволяют выделить главную обратную связь, служащую для сравнения действительного и требуемого значений регулируемой переменной. Однако помимо обязательной главной обратной связи в системе автоматической стабилизации могут быть вспомогательные или местные обратные связи.

Системы с одной главной обратной связью принято называть одноконтурными. Системы автоматического

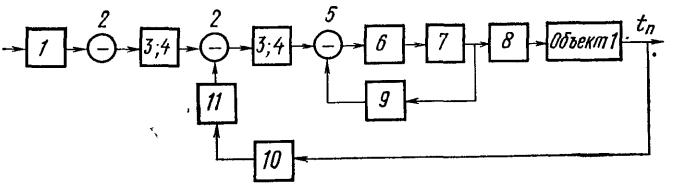


Рис. 1.9. Схема САР температуры воздуха на выходе из воздухонагревателя (условные обозначения см. на рис. 1.8)

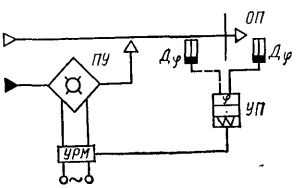


Рис. 1.10. Система автоматического регулирования влажности
$Д_ф$ — датчик относительной влажности (влагосодержания); *УП* — усилитель-преобразователь; *УРМ* — устройство регулирования мощности; *ПУ* — пароувлажнитель; *ОП* — обслуживаемое помещение

регулирования, имеющие помимо главной обратной связи еще одну или несколько местных связей, называются многоконтурными.

На рис. 1.9 показана двухконтурная система автоматического регулирования с одной регулируемой переменной, в которой помимо главной обратной связи, осуществляемой с помощью термосопротивления с измерительного моста, имеется еще местная обратная связь, включающая потенциометр исполнительного механизма и мост обратной связи.

Дополнительные обратные связи вводят в систему по различным причинам: коррекция динамических свойств, линеаризация и т. д. В рассмотренной системе автоматической стабилизации температуры воздуха на выходе из воздухонагревателя (см. рис. 1.9) дополнительная обратная связь по положению исполнительного механизма применена для линеаризации закона регулирования.

В технике кондиционирования используются различные аппараты и устройства для тепловлажностной обработки воздуха. В большинстве из этих аппаратов требуемые режимы работы осуществляются с помощью локальных систем автоматического регулирования.

Для поддержания заданной влажности воздуха при низком начальном влагосодержании применяются пароувлажнители. В подобных аппаратах реализуется процесс изотермического увлажнения воздуха острым паром, который получается путем электронагрева воды. При

изменении относительной влажности φ_2 (или влагосодержания d_2) воздуха за аппаратом в воздуховоде или в обслуживаемом помещении на величину $\pm\Delta\varphi$ ($\pm\Delta d$) от заданного значения регулятор влажности вырабатывает управляющее воздействие на уменьшение или увеличение мощности электронагрева (рис. 1.10). Таким образом, автоматическая стабилизация работы пароувлажнителя осуществляется локальной САР влажности.

Для нагрева воздуха в технике кондиционирования используются поверхностные водовоздушные теплообменники — калориферы. В подобных аппаратах реализуется процесс изовлажностного нагрева или охлаждения воздуха. Температуру воздуха на выходе из калорифера поддерживают изменением теплопроизводительности аппарата, или, точнее, изменением характера протекания процесса передачи тепла от горячей воды к воздуху. Автоматическая стабилизация процесса теплопередачи производится локальной системой автоматического регулирования температуры. По сигналу отклонения от заданного значения температуры $\pm\Delta t$ на выходе из воздухонагревателя регулятор вырабатывает управляющее воздействие на изменение либо расхода горячей воды G_w через воздухонагреватель (рис. 1.11,*а*), либо ее температуры t_{w1} (рис. 1.11,*б*) или формирует управляющее воздействие на изменение соотношения расходов воздуха, проходящего через воздухонагреватель $G_{в.т}$ и по воздушному бассейну $G_{в.б}$ (рис. 1.11,*в*, *г*).

При использовании подобного теплообменника для охлаждения воздуха хладоноситель (вода, рассол) подается из аккумуляционного бака. В таком случае автоматическая стабилизация работы воздухоохладителя (ВО) осуществляется локальной САР температуры. Управление процессом теплопередачи от воздуха к хладоносителю производится путем реализации управляющих воздействий, аналогичных САР температуры на выходе из воздухонагревателя (см. рис. 1.11). Может быть реализована также система, в которой управляющее воздействие от регулятора температуры подается на устройство изменения частоты вращения электродвигателя насоса. При этом управление процессом теплопередачи производится путем изменения расхода хладоносителя G_x через теплообменник (рис. 1.12).

В технологическом процессе кондиционирования воздуха широко используется смешение двух потоков воз-

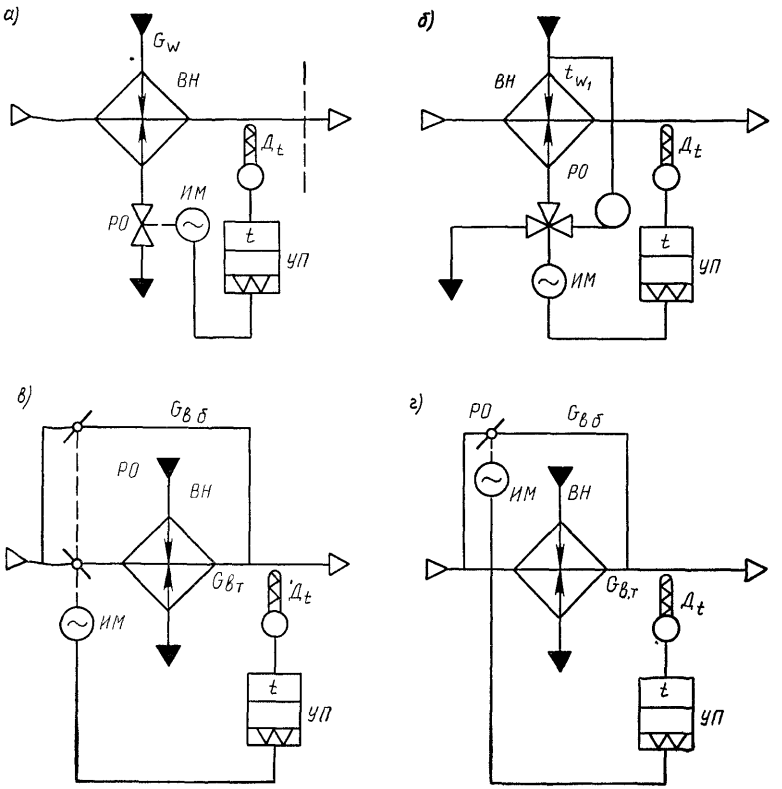


Рис. 1.11. Схемы регулирования теплопроизводительности калорифера

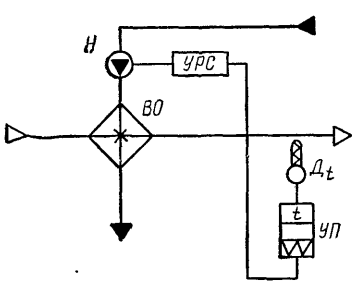


Рис. 1.12. Локальная САР температуры
ВО — воздухоохладитель; *Н* — насос; *УРС* — устройство регулирования скорости; *УП* — усилитель-преобразователь

духа с различными параметрами. В большинстве случаев это применяется для получения требуемого значения энтальпии воздушной смеси, например наружного и рециркуляционного воздуха. Подобная задача решается с помощью локальной системы автоматического регули-

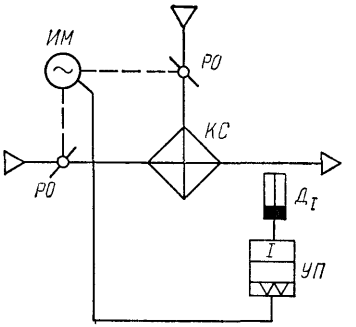


Рис 1.13. Функциональная схема локальной САР теплосодержания воздуха

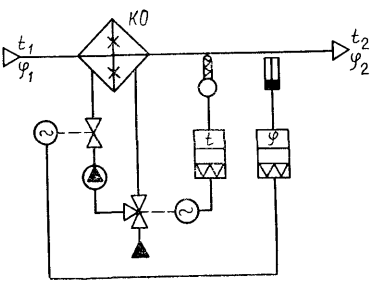


Рис. 1.14 Функциональная схема локальных автономных САР температуры и влажности

рования теплосодержания воздуха. Система реализуется на основе использования камеры смешения (КС), снабженной регулирующими воздушными заслонками на входе наружного и рециркуляционного воздуха. По сигналу рассогласования $\pm\Delta I$ (или по какому-либо другому, например Δt или Δd) регулятор вырабатывает управляющее воздействие на изменение соотношения расходов воздуха на входах в смесительную камеру (рис. 1.13).

Помимо представленных одномерных систем автоматического регулирования, в технике кондиционирования воздуха часто встречаются системы с несколькими регулируемыми переменными. Такие системы автоматического регулирования называются многомерными.

Многомерные системы реализуются на основе несвязанного автономного регулирования двух и более переменных. Это означает, что используемые регуляторы различных переменных не связаны друг с другом и их взаимодействие проявляется лишь через общий объект регулирования. В таком случае работают два или более независимых канала регулирования. В то же время известно, что между отдельными каналами регулирования (например, каналами регулирования температуры и влажности воздуха) имеются перекрестные связи, приводящие к взаимному влиянию каналов. При определенных условиях эти связи существенно влияют на качество работы многомерной системы автоматического регулирования.

Примером автономности работы двух автоматических

контуров стабилизации может быть система автоматического регулирования температуры и относительной влажности воздуха на выходе из форсуночной камеры орошения (КО). В качестве объекта управления в такой системе следует рассматривать адиабатные или политропные процессы обработки воздуха. Выходными переменными состояния являются температура t_2 и влажность φ_2 воздуха на выходе из камеры орошения. При определенных начальных условиях по сигналу $\pm\Delta t$ регулятор температуры путем изменения температуры распыливаемой форсунками воды уменьшает или увеличивает температуру воздуха t_2; одновременно регулятор относительной влажности по сигналу $\pm\Delta\varphi$ путем изменения расхода распыливаемой воды уменьшает или увеличивает относительную влажность φ_2 воздуха на выходе из камеры орошения (рис. 1.14).

Все представленные локальные системы автоматического регулирования включают в качестве объекта простые аппараты или устройства, реализующие однохарактерные процессы. Такие САР считаются однозвенными. Однако в технике кондиционирования воздуха наиболее часто встречаются системы, включающие двух- или трехзвенные объекты регулирования.

Примером такой системы является САР температуры точки росы при последовательной реализации процессов изовлажностного нагрева и адиабатного увлажнения. Реализация подобных процессов производится в установке кондиционирования воздуха, включающей воздухонагреватель — калорифер первого подогрева ВН1 и камеру орошения. Другим наиболее характерным примером такой системы является САР температуры воздуха в обслуживаемом помещении (рис. 1.15).

Воздухонагреватель, камера орошения и обслуживаемое помещение являются инерционными динамическими звеньями объекта регулирования, обладающими тем или иным порядком астатизма. Как известно, повышение порядка астатизма системы автоматического регулирования является нежелательным, так как при определенных условиях может привести к ухудшению качества регулирования или более того к потере системой устойчивости [9, 11].

Понижение порядка астатизма системы автоматического регулирования достигается путем уменьшения числа звеньев объекта регулирования, охваченных глав-

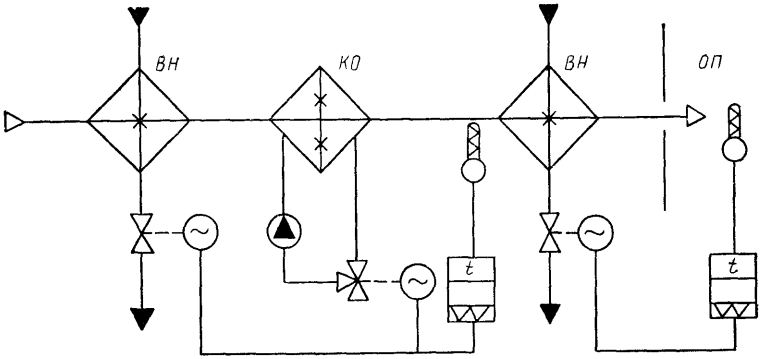


Рис. 1 15. Функциональная схема локальной САР параметров воздуха в обслуживаемом помещении

ной обратной связью Это является не чем иным, как локализацией САР. При этом цель функционирования системы в режимах стабилизации выходных переменных достигается использованием каскадного способа регулирования.

Причиной потери системой автоматического регулирования устойчивости также может быть неучтенная взаимная связь между отдельными контурами регулирования (например, между автономными САР температуры и влажности воздуха в обслуживаемом помещении).

Одним из возможных подходов к решению задачи сохранения устойчивости и качества автоматического регулирования в многозвенных и многомерных объектах, встречающихся в технике кондиционирования воздуха, является применение методов, позволяющих достаточно полно реализовать связи между управляемыми переменными.

Описание связей между основными переменными процесса, а также между основными параметрами машины или аппарата, предназначенных к автоматическому управлению или регулированию, является не чем иным, как разработкой его математической модели. Математической моделью процесса, а также машины или аппарата, в которых этот процесс протекает, является система уравнений, где отдельные факторы с помощью известных законов физики представлены во взаимозависимой форме.

Как было показано, задачу управления подсистемами в СКВ сводят к локальной стабилизации технологических параметров тепловлажностных процессов обработки воздуха путем реализации систем автоматического регулирования. Всякая локальная САР создается с учетом статических и динамических свойств регулятора и объекта регулирования, которые при необходимости могут быть изменены для лучшего приспособления объекта к условиям автоматизации.

1.3. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Применяемые в технике автоматизации кондиционирования воздуха системы автоматического регулирования в большинстве случаев являются системами автоматической стабилизации, так как в них регулируемые переменные представляют собой заданные постоянные величины.

В СКВ любая система автоматической стабилизации, например температуры или влажности воздуха, представляет собой замкнутую активную динамическую систему направленного действия. Основное назначение подобных систем состоит в сохранении в допустимых пределах измеренного отклонения стабилизируемой переменной от ее заданного значения.

Заданное значение регулируемой (стабилизируемой) переменной может быть постоянным или изменяемым по програ́мме. Характер программы зависит от показателей работы системы или значений переменных состояния.

В технике автоматизации систем кондиционирования воздуха заданные значения регулируемых переменных до настоящего времени в большинстве случаев являются постоянными, например $t_{\text{р.з.з}}=\text{const}$ или $\varphi_{\text{р з з}}=\text{const}$. В то же время по условиям оптимизации систем заданные значения регулируемых переменных могут быть изменяемыми во времени дискретно или в виде линейных функций переменных состояния. В первом случае реализуемые системы автоматического регулирования называются программно-временны́ми, или просто программными, во втором — программно-параметрическими, или логическими.

Примером программной САР может служить система автоматического поддержания температуры нагреваемого в калориферной установке воздуха (см. рис. 1.6), в ко-

тором значение $t_{в.з}$ изменяется в зависимости от времени суток или дня недели. Очевидно, что в течение суток или недели могут наблюдаться такие промежутки времени, когда заданное значение нагреваемого воздуха уменьшается. Выбираемая априорно программа изменения $t_{в.з}$ подается на специальный вход регулятора в форме командного сигнала.

Простейшим примером программно-параметрической САР является система автоматического поддержания температуры воздуха в обслуживаемом помещении, в которой значение $t_{р.з.з}$ изменяется в зависимости от температуры наружного воздуха. Очевидно, что установка кондиционирования воздуха при повышении $t_{н.в}$ может подавать в помещение воздух более высокой температуры, при этом соблюдаются санитарно-гигиенические условия и в то же время выполняются технико-экономические требования.

В технике кондиционирования воздуха как для программных, так и для программно-параметрических САР мгновенные значения регулируемых переменных являются постоянными. Под мгновенными в данном случае понимаются заданные значения регулируемых переменных, постоянные в течение момента времени, соизмеримого со временем переходного процесса по каналу регулирования.

Системы, для которых отклонения регулируемых переменных равны нулю во все моменты времени, являются идеальными [9]. На практике существование идеальных систем стабилизации невозможно, так как принцип их действия основан на измерении реальных отклонений.

Идеальная система автоматической стабилизации может быть реализована лишь с большей или меньшей степенью приближения. При этом чем выше степень приближения, т. е. чем меньше отклонения стабилизируемых переменных и, следовательно, чем выше качество, тем сложнее система. В связи с этим задача исследования САР сводится к нахождению разумного компромисса между стремлением получить возможно более высокое качество работы автоматической системы и стремлением достигнуть решения этой задачи возможно более простыми техническими средствами

Исследование системы автоматического регулирования заключается в выборе ее структуры и элементов, а

также в определении параметров регулятора. Подобное исследование может быть произведено известными из теории автоматического регулирования аналитическими методами [9—11], методами моделирования [12, 13] и экспериментально [14, 15]. Результатом исследования любым из этих методов должно быть определение параметров разрабатываемой системы. Параметры систем автоматической стабилизации в основном определяются путем исследования запаса устойчивости и качества регулирования.

Исследование запаса устойчивости и качества регулирования производится аналитически путем решения системы уравнений процесса регулирования. Уравнения, описывающие процесс регулирования, состоят из уравнений объекта, уравнений регулятора и уравнения ошибки. Уравнения статики процесса регулирования обычно являются алгебраическими, уравнения динамики — дифференциальными или интегродифференциальными. Решение последних определяет вид переходного процесса или поведение системы автоматической стабилизации в переходном процессе.

В технике кондиционирования воздуха наиболее распространенными являются системы автоматической стабилизации температуры и влажности воздуха. Помимо температуры и влажности имеется еще одна выходная переменная состояния СКВ — расход воздуха. Однако в большинстве случаев расход воздуха не является наблюдаемой переменной. Расход воздуха обычно ограничивается по минимальному и максимальному значениям, определяемым по условиям воздушного режима обслуживаемого помещения, а также удаления вредных выделений из помещения. Управляемое изменение расхода воздуха в пределах заданных ограничений производится по тем или иным причинам с целью стабилизации наблюдаемых переменных состояния — температуры или влажности воздуха. Следовательно, изменение расхода воздуха является лишь одним из видов управляющих воздействий в системах автоматической стабилизации температуры и влажности воздуха.

Локальные системы автоматического регулирования в СКВ являются одно- или двухмерными. В общем случае имеет место двухмерная связанная зависимая система автоматической стабилизации температуры и влажности воздуха. Структура такой системы автома-

тического регулирования представлена на рис. 1.16. Примером подобной системы может быть система автоматической стабилизации температуры и влажности воздуха на выходе из форсуночной камеры орошения или на выходе из помещения.

В таких системах связанность процесса регулирования определяется тем, что регулирующее воздействие по одному из каналов формируется на основании наблюдения за двумя выходными переменными объекта. Это означает, что регулятор имеет по меньшей мере два входа и вырабатывает регулирующее воздействие, являющееся функцией двух переменных.

Функции, определяющие входные воздействия на регулятор и зависящие от составляющих ошибки по наблюдаемым переменным, принято называть **законом регулирования.** Математически закон регулирования представляется в виде уравнений связи между входными и выходными переменными регулятора

В системах несвязанного регулирования уравнение регулятора упрощается. Оно отражает закон формирования регулирующего воздействия по сигналу отклонения одной наблюдаемой переменной. В двухмерной системе несвязанного зависимого регулирования закон регулирования представляется в виде двух независимых уравнений Каждое из этих уравнений описывает один из двух каналов регулирования или один из двух одномерных регуляторов. Структура подобной системы автоматического регулирования представлена на рис. 1.17. Примером подобной системы может быть та же система автоматической стабилизации температуры и влажности воздуха на выходе из форсуночной камеры орошения или на выходе из помещения. Реализация этой системы в отличие от предыдущей (см рис. 1 16) производится на базе двух одномерных регуляторов, каждый из которых имеет свой несвязанный канал формирования регулирующего воздействия

В рассматриваемых системах автоматической стабилизации температуры и влажности воздуха зависимость процесса регулирования определяется тем, что каждая из двух наблюдаемых выходных переменных объекта управления является функцией двух управляющих воздействий. Это означает, что математическая модель двухмерного объекта управления представляет собой систему из двух уравнений, каждое из которых опреде-

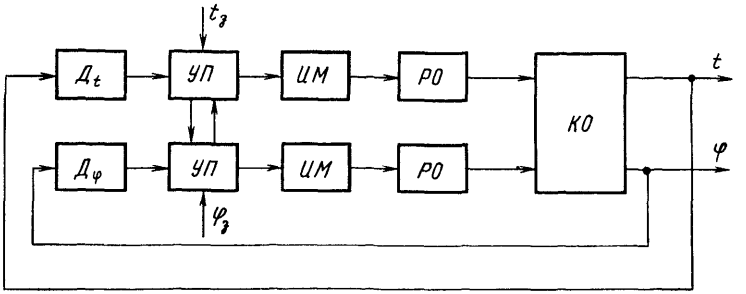


Рис. 1.16. Структурная схема двухмерной связанной зависимой САР температуры и влажности воздуха

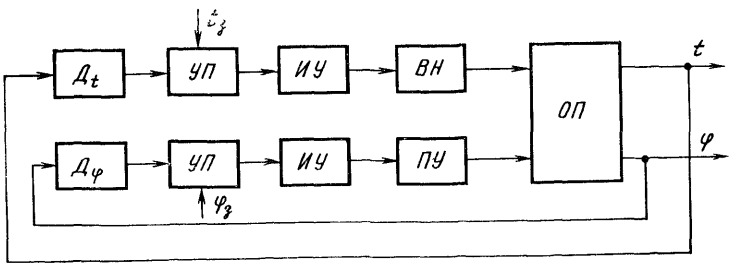


Рис 1 17 Структурная схема двухмерной несвязанной зависимой САР температуры и влажности воздуха

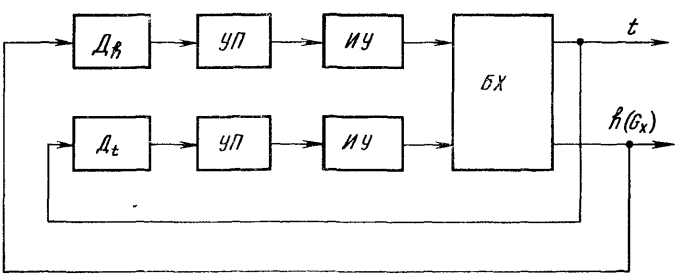


Рис. 1.18. Структурная схема двухмерной несвязанной независимой САР температуры и уровня в баке хладоносителя (*БХ*)

ляет связи одной выходной переменной по меньшей мере с двумя входными переменными. Таким объектом управления может быть обслуживаемое помещение или камера орошения (см. далее п. 1.4). Главной отличительной чертой подобных объектов управления является

политропность происходящих в них процессов тепло- и массообмена.

В технике кондиционирования воздуха встречаются также системы несвязанного и независимого регулирования. Системами подобного типа являются системы автоматической стабилизации температуры воздуха на выходе из поверхностного теплообменника или электрокалорифера, система автоматической стабилизации относительной влажности воздуха на выходе из пароувлажнителя. Главной отличительной чертой подобных систем является управление процессами, характеризуемыми изотермичностью или изовлажностью.

В случае несвязанных и независимых двухмерных систем автоматического регулирования математическая модель разделяется на две независимые системы уравнений. При этом двухмерная несвязанная и независимая система считается состоящей из двух одномерных систем, каждая из которых описывается своими уравнениями. Структура такой системы автоматического регулирования представлена на рис. 1.18. Одним из примеров подобной системы является система автоматической стабилизации температуры и уровня (количества) хладоносителя в аккумуляционном баке.

Рассмотрим систему линеаризованных дифференциальных уравнений, описывающих одномерную систему автоматического регулирования:

$$a_2 \frac{d^2 x}{d\tau^2} + a_1 \frac{dx}{d\tau} + a_0 x = b_2 \frac{d^2 r}{d\tau^2} + b_1 \frac{dr}{d\tau} + \\ + b_0 r + c_2 \frac{d^2 f}{d\tau^2} + c_1 \frac{df}{d\tau} + c_0 f; \qquad (1.9)$$

$$d_2 \frac{d^2 r}{d\tau^2} + d_1 \frac{dr}{d\tau} + d_0 r = l_2 \frac{d^2 x}{d\tau} + l_1 \frac{dx}{d\tau} + l_0 x. \qquad (1.10)$$

Входящие в уравнения (1.9) и (1.10) коэффициенты являются функциями параметров системы. Коэффициенты a, b и c, входящие в уравнение объекта управления, определяются конструктивными, технологическими и функциональными характеристиками объекта. Коэффициенты d и l, входящие в уравнение регулятора, определяются по результатам исследования запаса устойчивости и качества процесса регулирования и могут быть реализованы в том или ином виде при выборе или конструировании регулятора.

В совокупность звеньев регулятора, согласно представленной структуре (см. рис. 1.8,*б*), входят датчик, усилитель-преобразователь и исполнительный механизм.

Электронный датчик температуры или влажности воздуха состоит из чувствительного элемента, задающего и сравнивающего устройства, а также усилителя. Все звенья того и другого датчика, кроме чувствительного элемента, являются безынерционными.

В качестве чувствительных элементов электронных датчиков температуры используются термометры сопротивления. Чувствительные элементы датчиков влажности бывают различной конструкции и реализуют различные принципы действия (см. далее гл. 3). В отечественной практике автоматизации систем кондиционирования воздуха наиболее распространены неподогревные электролитические и подогревные хлористолитиевые чувствительные элементы.

В подобных датчиках температуры и влажности воздуха с достаточной степенью адекватности связи выходных переменных ($\Delta t_{изм}$, $\Delta\varphi_{изм}$) с изменением входных переменных (Δt, $\Delta\varphi$) могут быть аппроксимированы дифференциальными уравнениями вида:

$$T_t \frac{d\,\Delta\, t_{изм}}{d\,\tau} + \Delta\, t_{изм} = k_t\, \Delta\, t; \qquad (1.11)$$

$$T_\varphi \frac{d\,\Delta\,\varphi_{изм}}{d\,\tau} + \Delta\,\varphi_{изм} = k_\varphi\, \Delta\,\varphi, \qquad (1.12)$$

где T_t, T_φ — постоянные времени датчиков, зависящие от принципа действия и конструкции (определяются по паспортным данным); k_t, k_φ — передаточные коэффициенты датчиков, размерность которых может быть В/°С, В/%φ или *А*/°С, *А*/%φ в зависимости от вида выходного сигнала переменных $t_{изм}$ или $\varphi_{изм}$, измеренных по напряжению или силе тока.

В электронных регуляторах, применяемых в технике автоматизации систем кондиционирования воздуха, используются исполнительные механизмы типа МЭО. В качестве привода в этих механизмах применяется однофазный асинхронный конденсаторный электродвигатель постоянной частоты вращения.

Выходной вал электродвигателя через редуктор и соответствующую кинематическую передачу соединяется с регулирующим органом. Скорость перемещения регулирующего органа зависит от частоты вращения электродвигателя и от передаточного числа редуктора. Нагрузка регулирующего органа мало влияет на ско-

рость исполнительного механизма. Нагрузка на электродвигатель исполнительного механизма определяется в основном конструкцией редуктора и не зависит от направления вращения.

Значения электрических и электромеханических постоянных времени электродвигателя значительно меньше значения времени перемещения регулирующего органа, поэтому временем разгона и торможения исполнительного механизма можно пренебречь. В этом случае исполнительный механизм как динамическое звено системы автоматической стабилизации может быть представлен звеном с уравнением вида

$$d\alpha/d\tau = 1/T_{\text{им}}, \qquad (1.13)$$

где α — угол поворота выходного вала исполнительного механизма, $T_{\text{им}}$ — время хода исполнительного механизма при перемещении регулирующего органа из одного крайнего положения в другое

В тех случаях, когда применяется исполнительный механизм с прямоходовой приставкой, т. е. механизм типа МЭП, уравнение (1.13) будет иметь вид

$$dh/d\tau = 1/T_{\text{им}}, \qquad (1\ 14)$$

где h — перемещение выходного штока исполнительного механизма

Совокупность звеньев усилителя-преобразователя (см. звенья *4—6* и *9* на рис. 1.8, *б*) используется для осуществления связей, необходимых для формирования того или иного закона регулирования.

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

$$\varepsilon(\tau) = x(\tau) - x_з(\tau).$$

В системах автоматической стабилизации температуры и влажности воздуха (равно как и в других системах) используются регуляторы, реализующие разнообразные законы регулирования. Все регуляторы делятся на аналоговые, реализующие линейную непрерывную функцию $F[\varepsilon(\tau)]$, и дискретные или позиционные, осуществляющие дискретную выборку значений $F[\varepsilon(\tau)]$, по которым формируются дискретные регулирующие воздействия $r(\tau)$.

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

$$\left.\begin{aligned} r(\tau) &= k_{\text{р}}\,\varepsilon(\tau);\\ r(\tau) &= k_{\text{р}_1}\,\varepsilon(\tau) + k_{\text{р}_2}\int \varepsilon(\tau)\,d\tau;\\ r(\tau) &= k_{\text{р}_1}\,\varepsilon(\tau) + k_{\text{р}_2}\int \varepsilon(\tau)\,d\tau + k_{\text{р}_3}\,d\varepsilon(\tau)/d\tau. \end{aligned}\right\} \quad (1.15)$$

Как видно из выражений (1.15), законы регулирования представляют линейную зависимость регулирующего воздействия от сигнала рассогласования.

В отличие от аналоговых регуляторов позиционные $\text{Р}_{\text{п}}$-регуляторы формируют командный сигнал r, который может иметь только определенное число постоянных независимых от времени значений $\tau_i(\varepsilon)$, соответствующих заданному числу позиций отклонения $\varepsilon_i(\tau)$.

Наиболее простым регулятором этого типа является двухпозиционный. В этом регуляторе при переходе измеренной регулируемой переменной $x(\tau)$ через заданное значение $x_{\text{з}}$, т. е. при изменении знака $\varepsilon(\tau)$, изменяется регулирующее воздействие r. При этом происходит перевод регулирующего воздействия из одного крайнего положения r_1 в другое r_2, например «открыт — закрыт» или «включен — выключен» и т. д.

Характеристика идеального двухпозиционного регулятора является релейной однозначной (рис.1.19, *а*) и может быть записана в следующей форме:

$$r_i(\varepsilon) = \begin{cases} r_{\max} \text{ при } \varepsilon(\tau) > 0;\\ r_{\min} \text{ при } \varepsilon(\tau) < 0. \end{cases} \quad (1.16)$$

Несколько более сложным является другой дискретный регулятор — трехпозиционный. В этом регуляторе, кроме крайних значений регулирующего воздействия, имеется промежуточное как бы среднее значение r. Характеристика идеального трехпозиционного регулятора, являющаяся релейной однозначной с зоной нечувствительности (рис. 1.19, *б*), может быть записана в следующей форме:

$$r_i(\varepsilon) = \begin{cases} r_{\max} & \text{при } \varepsilon(\tau) > \Delta\varepsilon;\\ r_0 & \text{при } \varepsilon(\tau) < |\Delta\varepsilon|;\\ r_{\min} & \text{при } \varepsilon(\tau) < -\Delta\varepsilon. \end{cases} \quad (1.17)$$

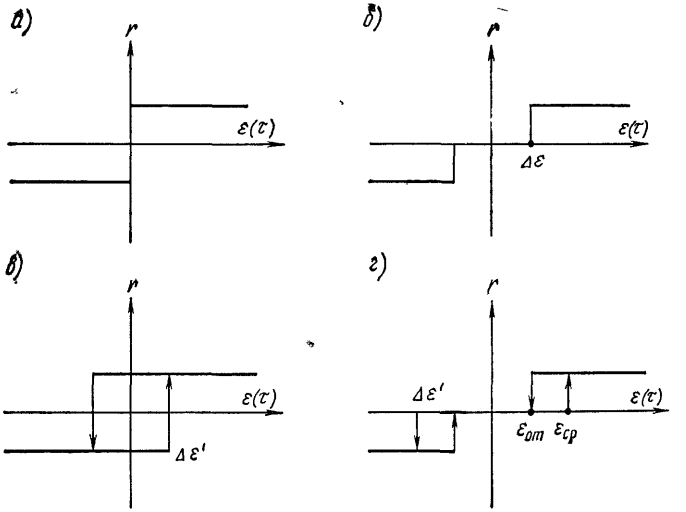


Рис. 1 19. Характеристики позиционных регуляторов

Из приведенных выражений (1.16) и (1.17.) видно, что введение (вынужденное или специальное) зоны нечувствительности $\Delta\varepsilon$ существенно меняет характеристику регулятора. Подобное изменение особенно важно, а зачастую просто необходимо при использовании регулятора в контуре стабилизации, обладающем возможностью реализации двух противоположно направленных управляющих воздействий, например нагрев и охлаждение. Для того чтобы избежать автоколебательности процесса регулирования, необходимо иметь область изменения $\varepsilon(\tau)$, внутри которой формируется команда «Норма». Такая область получается в результате введения зоны нечувствительности $\Delta\varepsilon$.

Выражения (1.16) и (1.17) представляют собой характеристики идеального двух- и трехпозиционного регуляторов. Однако в реальных регуляторах наблюдается несоответствие статических характеристик срабатывания и отпускания идеальным. Это объясняется тем, что в отдельных элементах регуляторов имеются зазоры, сухое трение, гистерезис и т. д. Подобные факторы приводят к изменению характеристики позиционных регуляторов, к появлению в них так называемых зон неоднозначности $\Delta\varepsilon'$, регулирующего воздействия (см. рис. 1.19, *в*, *г*).

В таком случае уравнение реального двухпозиционного регулятора имеет вид:

$$r_t(\varepsilon) = \left\{ \begin{array}{l} r_{\max} \text{ при } \varepsilon(\tau) > \Delta\varepsilon'; \\ r_{\max} \text{ при } \varepsilon(\tau) < |\Delta\varepsilon'| \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau < 0; \\ r_{\min} \text{ при } \varepsilon(\tau) < -\Delta\varepsilon'; \\ r_{\min} \text{ при } \varepsilon(\tau) < |\Delta\varepsilon'| \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau > 0, \end{array} \right\} \quad (1.18)$$

а реального трехпозиционного регулятора —

$$r_t(\varepsilon) = \left\{ \begin{array}{l} r_{\max} \text{ при } \varepsilon(\tau) \geqslant \varepsilon_{ср} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau > 0; \\ \qquad \varepsilon(\tau) > \varepsilon_{от} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau < 0; \\ \qquad \varepsilon(\tau) > \varepsilon_{от} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau \geqslant 0, \\ \qquad \text{если } r(\varepsilon_0) = r_{\max}; \\ r_0 \text{ при } -\varepsilon_{от} < \varepsilon(\tau) < \varepsilon_{ср} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau > 0; \\ \qquad -\varepsilon_{ср} < \varepsilon(\tau) < \varepsilon_{от} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau < 0; \\ \qquad |\varepsilon(\tau)| < \varepsilon_{ср} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau \geqslant 0, \\ \qquad \text{если } r(\varepsilon_0) = r_0; \\ r_{\min} \text{ при } \varepsilon(\tau) \leqslant -\varepsilon_{ср} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau < 0; \\ \qquad \varepsilon(\tau) < -\varepsilon_{от} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau > 0; \\ \qquad \varepsilon(\tau) < -\varepsilon_{от} \text{ и } d\varepsilon(\tau)/d\tau \geqslant 0, \\ \qquad \text{если } r(\varepsilon_0) = r_{\min}. \end{array} \right\} \quad (1.19)$$

В технике автоматизации систем кондиционирования воздуха двух- и трехпозиционные регуляторы формирования управляющего воздействия $r(\tau)$ используются при измерении температуры влажного воздуха, температуры точки росы, относительной влажности, его влаго- и теплосодержания, а также давления (перепада давлений) и расхода воздуха или теплоносителя. Подобные устройства применяются не только в системах автоматической стабилизации, но и при реализации схем автоматической защиты от аварийных режимов и в схемах автоматического переключения режимов работы оборудования. Во всех этих случаях устройства формирования позиционного управляющего воздействия выполняют роль датчиков-реле наблюдаемых переменных состояния. В таких случаях они по существу перестают быть регуляторами, так как отсутствуют непрерывно действующие контуры регулирования, и становятся сигнализаторами выполнения тех или иных режимов работы.

В системах автоматической стабилизации температуры или влажности воздуха позиционные регуляторы используются в совокупности с корректирующими устрой-

ствами. Это объясняется тем, что существенная нелинейность характеристик регуляторов является причиной возникновения в контуре регулирования автоколебательных режимов. Использование в качестве корректирующих устройств жесткой обратной связи или импульсных прерывателей позволяет получить с некоторыми допущениями линейные законы регулирования.

Параметрами настройки позиционных регуляторов являются: зона нечувствительности $\Delta\varepsilon$, а также значения $\varepsilon_{ср}$ и $\varepsilon_{отп}$. Выбираемым параметром (в зависимости от типа исполнительного механизма) является время полного хода исполнительного механизма $T_{им}$. Возможность выбора $T_{им}$ ограничена конструктивным рядом исполнительных механизмов, и, например, для механизмов типа МЭО имеется всего лишь три варианта $T_{им}$: 10, 25 и 63с.

Для получения требуемого качества переходного процесса время перемещения регулирующего органа должно быть соизмеримо с постоянными времени объекта регулирования. В противном случае, когда время перемещения регулирующего органа значительно меньше постоянных времени объекта, регулятор начинает работать в ярко выраженном позиционном режиме. Для того чтобы избежать автоколебательности процесса, присущей позиционному закону регулирования, при автоматизации систем кондиционирования воздуха практикуется увеличение $T_{им}$ путем использования различного рода прерывателей. С помощью прерывателя периодически размыкается контур автоматического регулирования, при этом снимается напряжение питания и останавливается исполнительный механизм. Время хода регулирующего органа от одного крайнего положения до другого увеличивается в $T_и/\tau_и$ раз и становится

$$T_с = T_{им}\, T_и/\tau_и, \qquad (1\ 20)$$

где $T_и$ — период работы импульсного прерывателя, $\tau_и$ — длительность импульса на включение контура

Использование трехпозиционного регулятора в совокупности с исполнительным механизмом постоянной скорости приводит к образованию регулятора нового типа, получившего название Рс-регулятора. Импульсный прерыватель в комплекте с Рс-регулятором применяется с целью получения требуемого качества переходного процесса. Подобный регулятор получил название релейно-импульсного или импульсного Рс-регулятора.

В технике автоматизации систем кондиционирования воздуха, помимо импульсных P_c-регуляторов, не меньшее распространение получили пропорциональные регуляторы с использованием трехпозиционного релейного регулятора и исполнительного механизма постоянной скорости. Подобные регуляторы являются следящей системой с постоянной скоростью.

Требуемая статическая характеристика пропорционального регулятора достигается при использовании отрицательной жесткой обратной связи по положению выходного вала исполнительного механизма. Звенья прямого канала — релейный усилитель и исполнительный механизм — обладают бесконечно большим коэффициентом усиления. Именно эти звенья охвачены звеном обратной связи, обладающим коэффициентом усиления $K_{о.с}$ с конечным значением. Сущность данного технического решения заключается в том, что статическая характеристика звеньев, охваченных обратной связью, равна обратной статической характеристике зерна обратной связи [9], т. е.

$$X_{вых} = \frac{1}{K_{о.с}} X_{вх} \qquad (1.21)$$

или

$$X_{вых} = K_р X_{вх}, \qquad (1.22)$$

где $K_р = 1/K_{о.с}$ — коэффициент пропорциональности регулятора.

В подобной системе автоматической стабилизации изменение положения регулирующего органа пропорционально отклонению стабилизируемой переменной от ее заданного значения с точностью до величины зоны нечувствительности используемого в регуляторе трехпозиционного электронного усилителя. Эта пропорциональность наблюдается, пока выходной вал исполнительного механизма не достигнет своих крайних положений.

На основе трехпозиционного электронного усилителя и исполнительного механизма с постоянной скоростью с использованием различных параллельно-последовательных корректирующих устройств и устройств широтно-импульсной модуляции строятся регуляторы, позволяющие реализовать аналоговые законы регулирования [уравнение (1.15)].

Достоинством использования аналоговых регуляторов является высокое качество процессов регулирования. Однако в технике автоматизации систем кондициониро-

вания воздуха, особенно локальных систем автоматизации работы технологического оборудования, большее распространение получили нелинейные дискретные регуляторы. Это объясняется тем, что к элементам автоматики, осуществляющим чисто релейные и релейные линеаризованные законы регулирования, не предъявляются требования высокой точности и стабильности характеристик. Поэтому релейные регуляторы имеют конструкцию, более простую, чем аналоговые. В то же время при выборе того или иного регулятора осуществляется исследование системы автоматического регулирования в целом. Соответствующий выбор регулятора и его параметров позволяет создать систему автоматического регулирования, удовлетворяющую предъявляемым требованиям.

Естественно, чем выше требования к системе автоматического регулирования, тем сложнее регулятор. Поэтому не следует предъявлять слишком жесткие требования, а ограничиваться теми, которые необходимы для нормального протекания процесса стабилизации технологической переменной состояния. Немаловажное значение приобретают требования, предъявляемые к системе автоматической стабилизации из условий оптимизации управления системой в целом.

При аналитическом исследовании устойчивости и качества переходных процессов, протекающих в системе автоматического регулирования, ее устройства группируют по динамическим свойствам, на основе которых осуществляется взаимодействие функциональных частей системы Обычно эту функциональную связь математически представляют в форме дифференциальных уравнений связи выходных и входных переменных состояния. В то же время в теории автоматического регулирования наряду с таким классическим способом математического описания широкое применение получили другие способы. Эти способы основаны на введении понятий переходной функции, частотных характеристик и передаточной функции [9, 11].

Одно из представлений передаточной функции строится на следующих рассуждениях [2]. Пусть для какого-либо звена системы автоматического регулирования имеет место обыкновенное линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами

$$N\left(d/d\tau\right) x\left(\tau\right) = M\left(d/d\tau\right) r\left(\tau\right), \qquad (1.23)$$

где N и M — полиномы степеней n и m ($m \leqslant n$); $r(\tau)$ — входная переменная звена (в данном случае объекта регулирования); $x(\tau)$ — выходная переменная.

Заменив в уравнении (1.23) символ дифференцирования $d/d(\tau)$ на комплексное p, получим функцию

$$W(p) = M(p)/N(p), \qquad (1.24)$$

которая называется передаточной функцией рассматриваемого звена системы автоматического регулирования.

Таким образом, по выведенным дифференциальным уравнениям звеньев системы автоматического регулирования может быть определена передаточная функция каждого из них.

Параметры передаточных функций звеньев системы, относимых к объекту, определяются конструкцией этих звеньев и их физическими свойствами. В процессе исследования системы автоматического регулирования большинство параметров этих звеньев принимается в качестве априорно известных.

Требуемые устойчивость и качество системы достигаются соответствующим выбором параметров регулятора. Полагая, что вход регулятора отсоединен от объекта, рассматривают разомкнутую систему.

Регулирующие воздействия определяются выражением

$$R(p) = W_{\text{р}}(p)\ \varepsilon(p), \qquad (1.25)$$

где ε — входной сигнал регулятора.

Регулируемая величина

$$X(p) = W_0(p)\ R(p) - W_f(p)\ F_{\text{в}}(p), \qquad (1.26)$$

где $W_0(p)$ и $W_f(p)$ — передаточные функции объекта соответственно по каналу регулирующего воздействия $r(\tau)$ и каналу возмущения $f(\tau)$.

Подставляя выражение (1.25) в равенство (1.26), получаем

$$X(p) = W(p)\ \varepsilon(p) - W_f(p)\ F(p), \qquad (1.27)$$

где $W(p) = W_0(p)\ W_{\text{р}}(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы.

Уравнение связи регулируемой переменной $x(\tau)$ с ошибкой $\varepsilon(\tau)$ в разомкнутой системе имеет вид

$$X(p) = W_{\text{в}}(p)\ \varepsilon(p). \qquad (1.28)$$

Полагая, что вход регулятора присоединен к объекту, используя уравнение замыкания

$$\varepsilon(\tau) = g(\tau) - x(\tau) \qquad (1.29)$$

и решая совместно уравнения (1.27) и (1.29), получаем:

для регулируемой переменной

$$X(p) = \frac{W(p)}{1+W(p)} G(p) - \frac{W_f(p)}{1+W(p)} F(p); \quad (1\ 30)$$

для ошибки

$$\varepsilon(p) = \frac{G(p)}{1+W(p)} + \frac{W_f(p)}{1+W(p)}. \quad (1\ 31)$$

Выражение $W(p)/[1+W(p)]$ является передаточной функцией замкнутой системы, которая определяет связь между регулируемой переменной и управляющим воздействием при равенстве возмущающих воздействий нулю.

Выражения (1.30) и (1.31) показывают, что в замкнутом контуре системы автоматического регулирования отклонение регулируемой переменной при наличии возмущающих воздействий уменьшается в $[1+W(p)]$ раз по сравнению с отклонением в разомкнутой системе [см. выражение (1.26)].

Всякая одномерная независимая система автоматической стабилизации создает на выходе исполнительного устройства регулирующее воздействие, определяемое величиной ошибки и прикладываемое к объекту управления.

При использовании пропорционального закона регулирования, когда $r(\tau) = K_p \varepsilon(\tau)$, передаточная функция разомкнутой системы имеет вид $W(p) = W_p(p)\ W_0(p) = K_p W_0(p)$. Для установившегося состояния систем можно считать, что передаточная функция стремится к значению

$$\lim W(p) = K_p K_0 = K, \quad (1\ 32)$$

где K — общий коэффициент усиления разомкнутой системы

Коэффициент усиления разомкнутой системы представляет собой отношение установившегося значения регулируемой переменной к постоянному значению ошибки $\varepsilon = \varepsilon_0$, т. е.

$$K = X_{уст}/\varepsilon_0. \quad (1.33)$$

Для установившегося состояния замкнутой системы при постоянном управляющем воздействии $X_з$ из выражения (1.31) может быть получено

$$\varepsilon_{уст} = X_з/(1+k) - \varepsilon_f/(1+k), \quad (1\ 34)$$

где $\varepsilon_{уст}$ — статическая ошибка системы, ε_f — установившееся значение ошибки от возмущающих воздействий в объекте

Как видно из выражения (1.34), введение пропорционального закона регулирования позволяет уменьшить установившееся значение ошибки в $(1+k)$ раз. Регулирование в этом случае будет статическим, т. е. при любом конечном значении коэффициента усиления цепи установившаяся ошибка будет отличаться от нуля.

При использовании интегрального закона регулирования устанавливается пропорциональная зависимость между скоростью изменения регулирующего воздействия и ошибкой, т. е. $dr/d\tau = K_{\text{р}}\varepsilon$. При этом регулирующее воздействие пропорционально интегралу от ошибки по времени, т. е. $r(\tau) = K_{\text{р}} \int \varepsilon d\tau$, или в операторной форме

$$R(p) = W_{\text{р}}(p)\ X(p) = K_{\text{р}}/p\ X(p).$$

Передаточная функция разомкнутой системы регулирования $W(p) = W_{\text{р}}(p)\ W_0(p) = K_{\text{р}}/p\ W_0(p)$. Для установившегося состояния системы $(p=0)$ можно считать, что передаточная функция стремится к бесконечности. Поэтому при $f = f_0 = \text{const}$ должен быть найден предел выражения

$$\varepsilon(p) = \lim_{p \to 0} \frac{W_f(p)\ F_0}{1 + W(p)}, \qquad (1.35)$$

который может быть как равным нулю, так и отличным от него.

При введении интегрального закона регулирования получается система, астатическая по отношению к управляющему воздействию.

Теоретически регулирование может осуществляться по второму, третьему и высшим интегралам от ошибки по времени. В этом случае $r(\tau) = K_{\text{р}}/p^{\nu}\varepsilon(\tau)$, где ν — порядок астатизма. При пропорциональном регулировании $\nu = 0$, при интегральном $\nu = 1$. При повышении порядка астатизма увеличивается установившаяся точность, но одновременно замедляется процесс регулирования, а также ухудшается устойчивость. Для сравнения пропорционального и интегрального законов регулирования можно привести следующие рассуждения. Полагаем, что ошибка в системе регулирования в какой-либо момент времени (в дальнейшем принимаемый за начальный, т. е. τ_0) начинает возрастать по линейному закону $\varepsilon = a\tau$. В таком случае в системе пропорционального регулирования по такому же закону начнет формироваться регулирующее воздействие $r = K_{\text{р}_1}\varepsilon = K_{\text{р}_1} a\tau$. В системе

интегрального регулирования регулирующее воздействие будет формироваться по закону $r=K_{p_2}\int\varepsilon d\tau=K_{p_2}\, a\tau^2/2$. В начальный момент времени при $\tau=0$ в системе интегрального регулирования равно нулю не только регулирующее воздействие, но и его первая производная. Это обусловливает весьма медленный рост r в первые моменты времени до момента накопления $\int\varepsilon(\tau)\, d\tau$. В системе пропорционального регулирования рост r в первые моменты времени происходит более интенсивно, так как наличие ошибки сразу же приводит к появлению регулирующего воздействия.

При использовании пропорционально-интегрального закона регулирования регулирующее воздействие формируется согласно уравнению $r=K_{p_1}\varepsilon+K_{p_2}\int\varepsilon d\tau$. Этот вид регулирования сочетает в себе высокую точность интегрального регулирования с большим быстродействием пропорционального регулирования. В первые моменты при появлении ошибки система работает как система пропорционального регулирования, а в дальнейшем начинает работать как система интегрального регулирования.

Помимо регулирования по интегралу ошибки возможно регулирование по ее производной. Однако этот способ регулирования не имеет самостоятельного значения, так как в установившемся состоянии производная от ошибки равна нулю и регулирование прекращается. В то же время регулирование по производной может играть большую роль в переходных процессах в качестве вспомогательного средства. Это позволяет учитывать при регулировании не только наличие ошибки, но и тенденцию к ее росту или уменьшению [16].

1.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ И ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Для исследования СКВ с целью их оптимизации по тем или иным критериям, а также для аналитического исследования устойчивости и качества реализуемых в системах процессов автоматической стабилизации необходимо иметь математическое описание управляемой части или объектов управления.

Основу представления об управляемой части СКВ составляют результаты изучения управляемых процессов переноса тепла и массы, формы и виды реализацией этих процессов в различных аппаратах и устройствах систем.

Управляемые процессы переноса тепла и массы, реализуемые в различных аппаратах и устройствах систем кондиционирования воздуха, характеризуются большой сложностью. Эта сложность проявляется в многообразии различных параметров, характеризующих оборудование, и переменных состояния, определяющих течение происходящих процессов. Сложность процессов обусловлена большим числом внутренних связей между параметрами и переменными, их взаимным влиянием. Сложность процессов переноса тепла и массы усугубляется тем, что в исследуемых аппаратах и устройствах изменение одной переменной процесса на входе в большинстве случаев вызывает нелинейное изменение нескольких переменных на выходе.

Из-за большого числа видов и типов оборудования весьма сложно установить количественные и качественные закономерности, свойственные технологическим аппаратам СКВ.

Современная теория создания сложных технических систем базируется на исследовании процессов путем идентификации и моделирования [17, 18]. Исследование того или иного процесса на модели — это создание эквивалентной упрощенной системы, отражающей отдельные главные (согласно поставленной цели исследования) и ограниченные в нужном направлении условия процесса. В исследованиях такого рода модель становится некоторой самостоятельной совокупностью знаний, позволяющей получить при ее рассмотрении определенные новые сведения об объекте-оригинале. Это означает, что модель создается для получения такой информации об оригинале, которую затруднительно или невозможно получить путем непосредственного исследования реальной системы.

Следует отметить некоторую противоречивость при создании модели, заключающуюся в стремлении достичь максимальной достоверности модели оригиналу при ее минимальной усложненности. Только при рациональном соотношении количественно-качественных показателей можно добиться успешного создания модели.

Исследование системы путем использования ее модели называется моделированием. Моделирование системы принято рассматривать как особую разновидность экспериментальных методов исследования. Но моделирование не следует противопоставлять аналитическому ис-

следованию. Любой вид моделирования невозможен без некоторого объема аналитических исследований, так как требует обобщения большого числа частных решений.

В технике кондиционирования воздуха наибольшее распространение получили методы так называемого физического моделирования [19]. Метод физического моделирования основан на изучении того или иного процесса, воспроизводимого в разных масштабах. Получаемые опытные данные представляются в форме зависимостей безразмерных комплексов. Таковыми являются, например, критерий Архимеда Ar, критерий Рейнольдса Re и т. д. Принятая безразмерная форма позволяет распространить найденные зависимости на подобные процессы. Обязательным условием при этом является сохранение постоянства безразмерных комплексов и выполнение критериев подобия. Воспроизведение исследуемого процесса в модели осуществляется при переходе от одних масштабов его реализации к другим путем варьирования определяющих линейных размеров (принцип подобия).

К основным достоинствам метода физического моделирования можно отнести его наглядность и достоверность. Недостатками этого метода являются ограниченная возможность деформации модели, натуральный масштаб времени течения исследуемых процессов, ограниченная возможность функционального варьирования и, наконец, высокая стоимость.

В настоящее время достаточно широкое распространение получили методы математического моделирования [20—22]. Все большее внимание уделяется этому методу исследования в технике кондиционирования воздуха [23—25].

В отличие от физического моделирования математическое моделирование позволяет изучать только параметры или переменные устройства или процесса, которые имеют математическое описание и связаны математическими соотношениями в уравнениях, относящихся как к модели, так и к объекту. В этом случае моделирование основывается на способности одних и тех же уравнений описывать различные по своей природе процессы и выявлять различные функциональные связи отдельных сторон поведения объекта без полного описания всего его поведения.

В технике кондиционирования воздуха установление

этих связей достигается совместным решением тепловых, гидравлических и аэродинамических зависимостей. Поэтому под математической моделью реального объекта будем понимать систему уравнений, описывающих рассматриваемые факторы изучаемого явления с помощью известных законов физики.

При разработке математической модели реальное явление упрощается, схематизируется. Полученная в результате схема в зависимости от сложности происходящих процессов описывается с помощью того или иного математического аппарата.

Очевидно, что успех исследования и ценность полученных выводов в значительной мере зависят от удачного выбора модели, от того, насколько модель отражает характерные черты рассматриваемого процесса. В модели должны быть учтены все наиболее существенные факторы, влияющие на процесс. Вместе с тем модель не должна содержать множество мелких, второстепенных факторов, учет которых только усложнит дальнейший анализ и сделать исследования черезвычайно трудоемкими.

Тем не менее следует стремиться к тому, чтобы модель достаточно верно представляла качественно и количественно свойства реального объекта. Это означает, что модель должна быть адекватна моделируемому объекту. Степень адекватности математической модели реальному объекту устанавливается сравнением результатов измерений в ходе реальных процессов в объекте с результатами моделирования тех же процессов в идентичных условиях. При отсутствии достаточной информации об исследуемых объектах их изучение начинается с построения простейших моделей, но без искажения специфики основного процесса исследуемого объекта.

Методы математического моделирования, реализованные на ЭВМ, получили название машинного моделирования. Машинное моделирование позволяет с высокой точностью быстро исследовать различные варианты протекания того или иного процесса. С помощью машинного моделирования изучаются возможности аппаратного оформления процессов и особенности их управляемости.

Не следует противопоставлять машинное моделирование физическому. Машинное моделирование призвано дополнять физическое моделирование имеющимся арсеналом средств математического описания и числен-

ного анализа. Методы физического моделирования так же, как и машинного, основаны на тождественности математического описания процессов в исследуемом объекте и его физической модели. Однако они не учитывают конкретные свойства математического описания, а ограничиваются лишь суждениями о тождественности объектов на основании сравнения некоторых определяющих комплексов в общих математических уравнениях. В связи с этим можно использовать физическое моделирование для нахождения границ изменения тех или иных коэффициентов, например теплопередачи или гидродинамики, входящих в уравнения математической модели.

Машинное моделирование позволяет быстро (в нереальном масштабе времени) получать сведения о различных вариантах протекания изучаемого процесса. Машинное моделирование гораздо дешевле физического.

В системах кондиционирования воздуха существует ряд задач, для которых нельзя или очень трудно создать физическую модель. Кроме того, в настоящее время накоплен достаточно большой фактический материал, подтверждающий целесообразность отказа от практики использования сведений о тепломассообменных аппаратах, вентиляторах, насосах, вентиляционных и гидравлических сетях и т. д., выраженных большим числом неуниверсальных эмпирических, графических и табличных зависимостей. При проектировании вентиляции должны быть исключены решения, базирующиеся на эмпирических, научно не обоснованных данных. От изолированного рассмотрения и расчета устройств только по одному отдельному параметру необходимо перейти к методам, позволяющим учитывать большинство факторов, влияющих на вентиляционные процессы, а также их взаимозависимость [23].

Таким образом, методы машинного проектирования можно рассматривать как развитие методов ручного обсчета и физического моделирования систем, как совершенствование общей техники исследования и создания систем кондиционирования воздуха.

Решение задачи анализа и выбора наилучшей структуры системы кондиционирования воздуха, оптимальных алгоритмов функционирования и управления, функциональных технологических и конструктивных параметров, наиболее полно удовлетворяющих некоторому критерию эффективности управления системой, базируется на

использовании метода машинного моделирования, который сводится к установлению вида математической зависимости между выходными и входными переменными состояния $Y=F(X; U; f)$.

Реализация соответствующих математических моделей СКВ и отдельных функциональных звеньев системы дает возможность для анализа и поиска наиболее обоснованных простых решений. В частности, использование метода математического моделирования позволяет:

1. Исследовать характер взаимосвязей параметров системы и дать анализ их влияния на теплотехнические, аэродинамические, стоимостные и другие показатели системы.

2. Исследовать влияние внешних, краевых и внутренних условий системы кондиционирования воздуха на соотношение ее параметров, а также на теплотехнические и технико-экономические показатели.

3. Численно оценить дополнительные вложения в случае отказа от оптимальных значений параметров из-за каких-либо технических ограничений.

4. Исследовать управляемость, наблюдаемость и устойчивость замкнутой системы, состоящей из управляемой и управляющей частей.

5. Осуществить совместную оптимизацию всех параметров управляемой СКВ.

Система кондиционирования воздуха представляет собой взаимосвязанную совокупность отдельных типовых технологических процессов в аппаратах, характеризующуюся большим числом и многообразием переменных состояния. Из-за того, что процессы кондиционирования воздуха отличаются значительной сложностью, целесообразно математические модели составлять по отдельным функциональным частям.

В зависимости от конкретных условий протекания процессов переноса вещества, тепло- и массообмена в исследуемых аппаратах и устройствах технологического оборудования СКВ используются различные виды математических моделей.

Известно, что основные переменные исследуемых процессов изменяются как во времени, так и в пространстве. Тем не менее главные условия управляемости процессов в реальных объектах в большинстве случаев позволяют пренебречь переменными составляющими по производным пространственных координат. В таком

случае правомерно применение модели объекта с сосредоточенными параметрами.

В тех же случаях, когда подобные условия невыполнимы, например управление процессом теплопередачи в условиях, допускающих замерзание теплоносителя воды в трубках воздухонагревателя, возникает необходимость разработки математической модели с распределенными параметрами.

Система кондиционирования воздуха представляет собой динамическую систему, поэтому описание связей между основными переменными должно отражать как установившиеся во времени процессы (статика), так и неустановившиеся процессы перехода во времени от одного состояния к другому (динамика). По этому признаку математические модели можно подразделить на статические и динамические.

Статическая модель объекта с сосредоточенными параметрами представляет собой систему алгебраических уравнений, описывающих термодинамическую сущность происходящих в объекте процессов без учета изменения переменных состояния во времени. Статическая модель объекта составляется в координатах вход — выход (связь между входными и выходными переменными состояния протекающего в объекте процесса) с учетом граничных условий протекания процессов. Статическая модель разрабатывается с учетом всех возможных реализаций технологических режимов работы аппарата или устройства. В данном случае процесс моделирования сводится к установлению вида математической зависимости между наблюдаемыми выходными и управляющими или возмущающими входными переменными состояния процесса в системе (или подсистеме), т. е. зависимости вида $Y=F(X, U, f)$.

Существенным условием адекватности статической модели системы является описание взаимосвязей переменных состояния не только для номинального (расчетного) режима работы СКВ, но и для всех стационарных технологических режимов работы системы, возможных в диапазоне расчетных состояний зима — лето.

Динамическая модель объекта представляет собой систему дифференциальных уравнений вида $Y=F(X, \dot{X}, \ldots, U, \dot{U}, \ldots, f, \dot{f}, \ldots)$. Составление динамической модели сводится к описанию динамических характеристик протекающего в объекте процесса,

т. е. к установлению связей между его основными переменными при их изменении во времени.

Таким образом, статическая математическая модель включает описание связей между основными переменными состояния в установившихся режимах, а динамическая математическая модель — связей во времени при переходе от одного режима к другому.

Помимо перечисленных видов математических моделей следует различать жесткую и вероятностную математические модели. Математические модели отдельных технологических аппаратов и устройств системы кондиционирования воздуха являются жесткими. Эти модели обычно описывают детерминированные процессы без применения статистически вероятностных распределений. Но из этого необязательно следует, что лежащие в основе этих объектов явления не имеют статистического характера. Просто в данном случае оперируют со средними значениями, а не с распределениями величин.

Вероятностной математической моделью является математическая модель наружного климата, т. е. модель функционального звена НВ (см. рис. 1.5). Процессы изменения и формирования переменных состояния наружного воздуха описываются с помощью статистически вероятностных методов. Модель наружного воздуха описывает стохастические процессы [26, 27].

Наличие математической модели системы кондиционирования воздуха позволяет применить машинные методы моделирования. В свою очередь, машинное моделирование СКВ позволяет избежать традиционных методов проектирования системы автоматического управления кондиционированием воздуха. Известно, что традиционными методами удается рассчитать лишь ограниченное число вариантов [23].

Из-за значительной структурной и функциональной сложности систем кондиционирования воздуха математическое моделирование целесообразно осуществлять поэтапно и по отдельным участкам. Кроме того, поэтапное моделирование обосновано разделением на две последовательные части общей задачи разработки САУ КВ. В объеме решения этой задачи производится сначала синтез программы управления СКВ в годовом цикле квазистационарных режимов работы, затем синтез законов управления в суточном цикле нестационарных режимов работы системы [28].

В связи с этим на первом этапе разрабатывается статическая модель, описывающая связи между основными переменными процессов в установившихся режимах, на втором этапе — динамическая модель, определяющая зависимости переменных состояния во времени при переходе от одного режима к другому.

Статическая модель системы кондиционирования воздуха представляет собой совокупность уравнений вида:

$$\left.\begin{aligned} f_{\text{т}}\,(Q_{\text{т}};\ Q_{\text{х}};\ t_{\text{н}};\ t_{\text{п}};\ t;\ t_{\text{у}};\ d_{\text{н}};\ d_{\text{п}};\ d;\ d_{\text{у}};\ G_{\text{н}};\ G_{\text{р.ц}};\ \gamma_{\text{т}};\ \gamma_{\text{х}};\ Q_{\text{оп}}) = 0;\\ f_{w}\,(G_{w};\ t_{\text{н}};\ t_{\text{п}};\ t;\ t_{\text{у}};\ d_{\text{н}};\ d_{\text{п}};\ d;\ d_{\text{у}};\ G_{\text{н}};\ G_{\text{р.ц}};\ \mu;\ W_{\text{оп}}) = 0;\\ f_{\text{в.с}}\,(N_{\text{в}};\ G_{\text{н}};\ G_{\text{р.ц}_{\text{I}}};\ G_{\text{р.ц}_{\text{II}}};\ \alpha_{\text{КВ}_{\text{н}}};\ \alpha_{\text{КВ}_{\text{I}}};\ \alpha_{\text{КВ}_{\text{II}}};\ r_{\text{в}}) = 0;\\ f_{\text{г.с}}\,(N_{\text{н}j};\ G_{w};\ \gamma_{\text{т}};\ \gamma_{\text{х}};\ r_{\text{н}j}) = 0, \end{aligned}\right\} \quad (1.36)$$

где $f_{\text{т}}$ — совокупность уравнении по балансу тепла и теплопередаче, f_{w} — то же, влаги и массообмену; $f_{\text{в.с}}$ — то же, вентиляционной сети; $f_{\text{г.с}}$ — то же, гидравлической сети.

Размерность системы уравнений (1.36) определяется структурой системы кондиционирования воздуха, обязательными элементами которой являются обслуживаемое помещение ОП и установка кондиционирования воздуха, в состав которой входят тепломассообменные аппараты ТМА (рис. 1.20). Вентилятор В и смесительные камеры потоков первой СК1 и второй СК2 рециркуляции определяют аэродинамическую сеть системы. Тепломассообменные аппараты представляют собой совокупность воздухонагревателей или воздухоохладителей, камеры орошения и т. д.

Таким образом, система кондиционирования воздуха может быть представлена в виде последовательности агрегированных функциональных узлов. Агрегированные структуры и их математические модели разрабатывают так, чтобы выходы одной были входами другой и чтобы в них были представлены параметры и переменные состояния, подлежащие исследованию на основе использования принципа субоптимизации.

Обслуживаемое помещение. Основным объектом управления в системе кондиционирования воздуха является вентиляционный процесс в обслуживаемом помещении. В этом процессе постоянно совершается переход из одного состояния в другое [1].

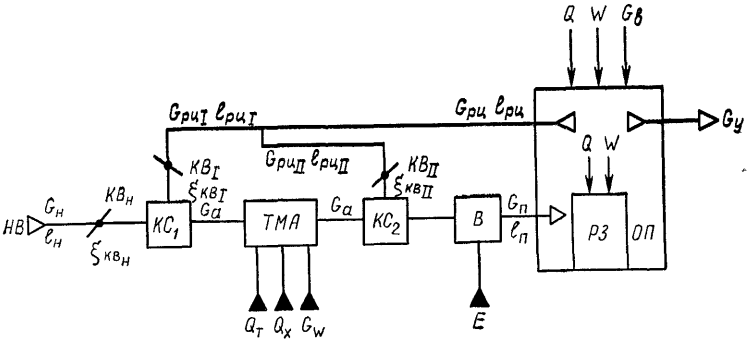


Рис 1 20. Структурная модель СКВ
КВ — клапан воздуха

Для поддержания заданных параметров микроклимата в обслуживаемое помещение подается приточный воздух, который имеет параметры, отличные от параметров воздуха в обслуживаемом помещении. Благодаря этому приточный воздух, перемешиваясь с воздухом помещения и вытесняя его, ассимилирует избыточное тепло и влагу или подогревает и увлажняет воздух помещения.

Управление вентиляционным процессом заключается в поддержании заданных параметров микроклимата в обслуживаемом помещении путем подачи в него требуемого по условиям вентиляционного процесса количества приточного воздуха с соответствующей температурой и влажностью*.

Вентиляционный процесс математически описывается для обслуживаемого помещения, рассматриваемого как звено с сосредоточенными параметрами. При этом избытки явного $Q_я$ и скрытого $Q_{скр}$ тепла, а также влаговыделения в обслуживаемом помещении рассматриваются как сосредоточенные, имеющие место в ограниченной зоне обслуживаемого помещения, именуемой рабочей зоной, и обозначаются $Q_{р.з}$ и $W_{р.з}$. Значения $Q_{р.з}$ и $W_{р.з}$ являются эквивалентными суммарными тепло- и влаговыделениями в обслуживаемом помещении, изменением которых в пространстве всего помещения в данном случае допустимо пренебречь. В то же время

* В данном случае рассматривается наиболее распространенный тип СКВ без использования местных аппаратов, т. е без находящихся в ОП увлажнителей, нагревателей, побудителей движения и т. д Таким образом, рассматриваются системы с ограниченным управлением вентиляционным процессом.

очевидно, что $Q_{р.з}$ и $W_{р.з}$ включают характерные локальные составляющие для данной зоны или части помещения.

Подобный подход оправдан стремлением привести математическую модель рассматриваемого звена системы автоматического управления, а таковым является обслуживаемое помещение, к виду, пригодному для дальнейших исследований системы в целом.

Кроме того, следует иметь в виду, что математическая модель обслуживаемого помещения разрабатывается для проведения анализа системы автоматического регулирования, а не для исследования, например, воздушного режима помещения. Анализ системы регулирования в первую очередь включает исследование устойчивости и качества процесса автоматической стабилизации выходных переменных — температуры и влажности воздуха. Стабилизация температуры и влажности воздуха в большинстве случаев ведется по отклонению их текущих значений от требуемых в одной конкретной точке помещения. Такой точкой является представительная точка помещения, в которой устанавливаются датчики температуры и влажности воздуха. Это означает, что разработка сосредоточенной модели звена — обслуживаемое помещение — обусловлена также тем, что по характеру реализации выходные переменные наблюдаются в одной представительной точке.

Уравнение баланса тепла в рабочей зоне помещения имеет вид

$$Q_{п} + Q_{р.з} - Q_{у} = 0. \tag{1.37}$$

Считая параметры воздуха, уходящего из рассматриваемой сосредоточенной области, равными параметрам воздуха в рабочей зоне при выполнении условия баланса по количеству вентилируемого воздуха, т. е. $G_{п} = G_{у} = G_{в}$, уравнение (1.37) приводим к виду

$$G_{в} I_{п} + Q_{р.з} - G_{в} I = 0. \tag{1.38}$$

Выразив значения энтальпий приточного воздуха в рабочей зоне через известную зависимость [1]:

$$I = c_{св} t + (l + c_{п} t)\ d$$

и проведя в уравнении (1.38) ряд несложных преобразований, запишем выражение для $Q_{р.з}$:

$$Q_{р.з} = G_{в} I - G_{в} I_{п} = G_{в} [c_{с.в} (t - t_{п}) + l (d - d_{п}) + c_{п} (t d - t_{п} d_{п})]. \tag{1.39}$$

Пренебрегая третьим слагаемым выражения (1.39), получаем

$$Q_{\text{р з}} = c_{\text{с в}} G_{\text{в}} (t - t_{\text{п}}) + l G_{\text{в}} (d - d_{\text{п}}). \qquad (1.40)$$

С учетом того, что $G_{\text{в}}(d - d_{\text{п}}) = W_{\text{р з}}$, запишем

$$t - t_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{р з}}}{c_{\text{с в}} G_{\text{в}}} - \frac{l W_{\text{р з}}}{c_{\text{с в}} G_{\text{в}}}.$$

Обозначив $1/c_{\text{с в}} = k_1$ и $l/c_{\text{с в}} = k_2$, получим уравнение температуры воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения:

$$t = t_{\text{п}} + k_1 \frac{Q_{\text{р з}}}{G_{\text{в}}} - k_2 \frac{W_{\text{р з}}}{G_{\text{в}}}. \qquad (1.41)$$

Аналогично из уравнения баланса влаги в рабочей зоне помещения

$$W_{\text{р з}} + G_{\text{в}} d_{\text{п}} - G_{\text{в}} d_{\text{у}} = 0$$

получаем уравнение связи влагосодержания воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения с входными переменными

$$d = d_{\text{п}} + W_{\text{р з}}/G_{\text{в}}. \qquad (1.42)$$

Полученные выражения (1.41) и (1.42) являются уравнениями связи номинальных значений входных и выходных переменных в установившемся режиме. В то же время исследование процессов управления целесообразно вести с использованием выражений связи, приведенных к уравнениям в приращениях или вариациях переменных состояний. Для этого производится линеаризация уравнений (1.41) и (1.42)

Линеаризацию произведем с помощью формулы Тейлора, которая позволяет разложить нелинейную функцию нескольких переменных по степеням малых приращений этих переменных. При линеаризации ограничиваются лишь членами первого порядка малости, пренебрегая последующими членами разложения.

Для номинального режима уравнение (1.41) имеет вид

$$t_0 = t_{\text{п}_0} + k_1 \frac{1}{G_{\text{в}_0}} Q_{\text{р.з}_0} - k_2 \frac{1}{G_{\text{в}_0}} W_{\text{р.з}_0}. \qquad (1.43)$$

В процессе регулирования имеют место изменения переменных:

$$\Delta t = t - t_0, \text{ или } t = t_0 + \Delta t;$$

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{п}} - t_{\text{п}_0}, \quad \text{или} \quad t_{\text{п}} = t_{\text{п}_0} + \Delta t_{\text{п}};$$

$$\Delta Q_{\text{р.з}} = Q_{\text{р.з}} - Q_{\text{р.з}_0};$$

$$\Delta W_{\text{р з}} = W_{\text{р.з}} - W_{\text{р.з}_0};$$

$$\Delta G_{\text{в}} = G_{\text{в}} - G_{\text{в}_0}.$$

Подставим новые значения t и $t_{\text{п}}$ в уравнение (1.43). Второе и третье слагаемые как функции двух переменных разложим по формуле Тейлора. После несложных преобразований получаем

$$t_0 + \Delta t = t_{\text{п}_0} + \Delta t_{\text{п}} + k_1 \left(\frac{Q_{\text{р.з}_0}}{G_{\text{в}_0}} + \frac{1}{G_{\text{в}_0}} \Delta Q_{\text{р.з}} - \right.$$

$$\left. - \frac{Q_{\text{р.з}_0}}{G^2_{\text{в}_0}} \Delta G_{\text{в}} \right) - k_2 \left(\frac{W_{\text{р.з}_0}}{G_{\text{в}_0}} + \frac{1}{G_{\text{в}_0}} \Delta W_{\text{р.з}} - \frac{W_{\text{р.з}_0}}{G^2_{\text{в}_0}} \Delta G_{\text{в}} \right). \quad (1.44)$$

Вычитая из уравнения (1.44) уравнение (1.43), получим линеаризованное уравнение для отклонения температуры воздуха в рабочей зоне помещения, выраженной через отклонения входных переменных:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{п}} + k_1 \frac{1}{G_{\text{в}_0}} \Delta Q_{\text{р.з}} - k_2 \frac{1}{G_{\text{в}_0}} \Delta W_{\text{р.з}} -$$

$$- \frac{k_1 Q_{\text{р.з}_0} - k_2 W_{\text{р з}_0}}{G^2_{\text{в}_0}} \Delta G_{\text{в}}. \quad (1.45)$$

Аналогично линеаризуется уравнение связи влагосодержания воздуха в рабочей зоне помещения с влагосодержанием и расходом приточного воздуха, а также избытками или стоками влаги в рабочей зоне:

$$\Delta d = \Delta d_{\text{п}} + \frac{1}{G_{\text{в}_0}} \Delta W_{\text{р.з}} - \frac{W_{\text{р з}_0}}{G^2_{\text{в}_0}} \Delta G_{\text{в}}. \quad (1.46)$$

Уравнения (1.45) и (1.46) являются уравнениями статики связей выходных и входных переменных состояния в одном из звеньев системы кондиционирования воздуха — обслуживаемом помещении.

Для получения уравнений, отражающих динамику этих связей, вернемся к исходному уравнению баланса тепла (1.37). При $\Delta t_{\text{п}} = \text{var}$, $\Delta d_{\text{п}} = \text{const}$ и $\Delta G_{\text{п}} = \text{const}$ с учетом выражений (1.37) и (1.45) можно записать

$$\Delta Q_{\text{р.з}} = c G_{\text{в}} \Delta t - c G_{\text{в}} \Delta t_{\text{п}}. \quad (1.47)$$

В таком случае уравнение баланса тепла в обслуживаемом помещении имеет вид

$$\Delta Q_{\text{р.з}} = \Delta Q_{\text{в.п}} + \Delta Q_{\text{огр}}, \qquad (1.48)$$

где $\Delta Q_{\text{в п}} = -cV_{\text{в п}}(d\Delta t/d\tau)$ — изменение теплоемкости воздуха в объеме обслуживаемого помещения (здесь $V_{\text{в п}}$ — объем воздуха в помещении); $\Delta Q_{\text{огр}}$ — изменение теплоемкости ограждающих конструкций и оборудования

Величина $\Delta Q_{\text{огр}}$ находится из выражения

$$\Delta Q_{\text{огр}} = \sum_{i=1}^{i} \alpha_{\text{огр}_i} F_{\text{огр}_i} (\Delta t_{\text{огр}} - \Delta t) =$$

$$= -\sum_{i=1}^{i} c_{\text{огр}_i} M_{\text{огр}_i} \frac{d \Delta t_{\text{огр}_i}}{d \tau},$$

где $\alpha_{\text{огр}_i}$ — коэффициент теплоотдачи от воздуха рабочей зоны к i-й поверхности $F_{\text{огр}_i}$ ограждения или оборудования; $\Delta t_{\text{огр}_i}$ — температура поверхности; M — масса i го предмета

Уравнение баланса тепла (1.48) принимает вид

$$c G_{\text{в}} \Delta t - c G_{\text{в}} \Delta t_{\text{п}} + c V_{\text{в п}} \frac{d \Delta t}{d \tau} -$$

$$- \sum_{i=1}^{i} \alpha_{\text{огр}_i} F_{\text{огр}_i} (\Delta t_{\text{огр}_i} - \Delta t) = 0. \qquad (1.49)$$

Введя понятие эквивалентной ограждающей конструкции, можно записать уравнение связи изменения температуры эквивалентной поверхности с изменением температуры воздуха в рабочей зоне помещения:

$$\frac{c_{\text{огр}} M_{\text{огр}}}{\alpha_{\text{огр}} F_{\text{огр}}} \frac{d \Delta t_{\text{огр}}}{d \tau} + \Delta t_{\text{огр}} = \Delta t. \qquad (1.50)$$

Обозначив

$$\frac{c_{\text{огр}} M_{\text{огр}}}{\alpha_{\text{огр}} F_{\text{огр}}} = T_{\text{огр}}$$

и перейдя к операторной форме, уравнение (1.50) запишем в виде

$$(T_{\text{огр}} p + 1) \Delta t_{\text{огр}} = \Delta t.$$

Тогда уравнение (1.49) может быть приведено к виду

$$c G_{\text{в}} \Delta t - c G_{\text{в}} \Delta t_{\text{п}} + c V_{\text{в п}} p \Delta t = \alpha_{\text{огр}} F_{\text{огр}} \frac{T_{\text{огр}} p}{T_{\text{огр}} p + 1} \Delta t. \qquad (1.51)$$

Обозначим: $T_в = (c\,V_{в\,п})/(c\,G_в)$ — постоянная времени переходного процесса нагрева или охлаждения воздуха в объеме помещения; $k_{огр} = (\alpha_{огр} F_{огр})/(c\,G_в)$ — коэффициент, учитывающий влияние эквивалентных показателей ограждающих конструкций и оборудования на температуру воздуха в рабочей зоне помещения.

После несложных преобразований с учетом принятых обозначений уравнение (1 51) принимает вид

$$(T_в p + 1)\,\Delta t = \Delta t_п - k_{огр}\,\frac{T_{огр}\,p}{T_{огр}\,p + 1}\,\Delta t. \qquad (1.52)$$

Полученное уравнение описывает обслуживаемое помещение как звено системы автоматического регулирования. Данное звено охвачено динамической обратной связью, характеризуемой параметрами $k_{огр}$ и $T_{огр}$. Обратной связью охвачено звено, аппроксимирующее теплоемкость воздуха в объеме обслуживаемого помещения. Это звено имеет передаточную функцию

$$W_{в\,п}(p) = \frac{1}{T_в\,p + 1}.$$

Звено обратной связи представляет собой реальное дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W_{огр}(p) = k_{огр}\,\frac{T_{огр}\,p}{T_{огр}\,p + 1}.$$

Параметры этого звена определяются конструктивными и теплофизическими характеристиками ограждающих конструкций и оборудования.

Адекватность подобной модели обслуживаемого помещения подтверждается теоретическими исследованиями проф. П. В. Участкина, канд. техн. наук М. Б. Халамейзера, а также экспериментальными исследованиями, выполненными канд. техн. наук С. И. Аксельрод [29, 30].

Предложенная модель обслуживаемого помещения имеет удовлетворительный физический смысл. Действительно, при изменении температуры приточного воздуха в том же направлении, но с инерционностью, равной $T_в$, изменяется температура воздуха в помещении. В то же время ограждающие конструкции и оборудование стремятся уменьшить величину этого изменения температуры воздуха рабочей зоны. Подобный процесс характеризуется передаточным коэффициентом $k_{огр}$ и инерционностью $T_{огр}$.

Изменения поступлений и стоков тепла через ограждающие конструкции носят гармонический характер с периодом, равным нескольким часам, а тепловая инерция стен и оборудования значительно больше тепловой инерции воздуха в объеме помещения, поэтому правомерна аппроксимация процессов, происходящих в помещении, более простым звеном. В данном случае уравнение обслуживаемого помещения как звена системы автоматической стабилизации температуры воздуха в рабочей зоне может быть представлено как

$$(T_{\text{оп}}\, p + 1)\ \Delta t = k_{\text{оп}}\, \Delta\, t_{\text{п}}, \qquad (1.53)$$

где

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{в}}/(1 + k_{\text{огр}});\quad k_{\text{оп}} = 1/(1 + k_{\text{огр}}).$$

Представленная модель помещения и ее параметры хорошо корреспондируются с инженерной методикой расчета теплоустойчивости, разработанной проф. В. Н. Богословским и канд. тех. наук С. А. Шелкуновым при исследовании режимов регулирования микроклимата [31, 32].

Калориферная установка. Наиболее распространенным из технологических агрегатов, используемых в технике вентиляции и кондиционирования воздуха, является калориферная установка. Технологическими процессами, осуществляемыми в калориферной установке и рассматриваемыми в качестве объектов управления, являются изовлажностный процесс нагрева воздуха, аэродинамический процесс смешения и перемещения воздуха через установку, а также гидравлический процесс смешения и перемещения теплоносителя через установку.

Известно, что важнейшей задачей разработки математической модели любого звена управляемой части системы является нахождение адекватного набора входных переменных, т. е. переменных, достаточно полно описывающих анализируемую совокупность процессов [33].

Обобщенная функциональная схема калориферной установки представлена на рис. 1.21, где кружками обведены входные регулирующие воздействия, ромбами — неуправляемые переменные, квадратами — выходные управляемые переменные. Согласно предложенной агрегированной модели установки, выделяются четыре входных переменных: α — изменение расхода воздуха, проходящего через теплообменник; $r_{\text{в}}$ — изменение

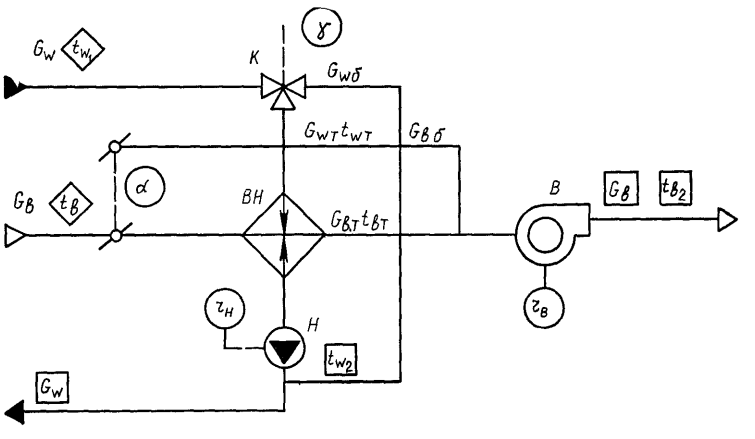


Рис. 1.21 Обобщенная функциональная схема калориферной установки

расхода воздуха, проходящего через установку; γ — изменение расхода или температуры и расхода теплоносителя, проходящего через теплообменник; $r_н$ — изменение скорости прохождения теплоносителя через теплообменник.

В реальных системах наличие всей совокупности управляющих воздействий α, $r_в$, γ и $r_н$ необязательно В таких случаях отдельные из них приобретают постоянные значения и рассматриваются в качестве параметров установки, выбранных по тем или иным соображениям.

Стационарные процессы в калориферной установке могут быть описаны следующей системой уравнений:

уравнение теплопередачи

$$c_в G_{в\,т}(t_{в\,т} - t_{в_1}) = k F_т \left(\frac{t_{w\,т} + t_{w_2}}{2} - \frac{t_{в_1} + t_{в\,т}}{2} \right), \quad (1\ 54)$$

где k — коэффициент теплоотдачи, $F_т$ — площадь поверхности нагрева теплообменника,

уравнение баланса тепла на переходе вода — воздух

$$c_в G_{в\,т}(t_{в\,т} - t_{в_1}) = c_w G_{w\,т}(t_{w\,т} - t_{w_2}); \quad (1\ 55)$$

уравнение баланса тепла при разделении потока воды

$$G_w t_{w_1} + G_{w\,б} t_{w_2} = G_{w\,т} t_{w\,т}; \quad (1\ 56)$$

уравнение баланса тепла при разделении потока воздуха

$$G_{в\,т} t_{в\,т_2} + G_{в\,б} t_{в_1} = G_в t_{в_2}; \quad (1.57)$$

уравнения разделения потоков воды и воздуха:

$$G_{w\,т} = G_w + G_{w\,б}; \quad G_в = G_{в.т} + G_{в.б}; \tag{1.58}$$

уравнения вентиляционной сети:

$$\left.\begin{aligned} p_в &= \sum_{i=1}^{i} \xi_{в_i} G_в^2 + (\xi_{КВ_т} + \xi_{в.т}) G_{в.т}^2; \\ p_в &= \sum_{i=1}^{i} \xi_{в_i} G_в^2 + \xi_{КВ_б} G_{в.б}^2, \end{aligned}\right\} \tag{1.59}$$

где $\xi_в$ — приведенный коэффициент местного сопротивления i-го участка по ходу движения воздуха;

уравнения гидравлической сети:

$$\left.\begin{aligned} p_{w_1} - p_{w_2} &= \sum_{j=1}^{j} \xi_{wj} G_w^{n_1} + \xi_{К_т} G_w^{n_2} + \xi_{w\,т} G_{w\,т}^{n_3} + \\ &\quad + \xi_{w\,тр} G_{w\,тр}^{n_4} - p_н; \\ p_н &= \sum_{j=1}^{j} \xi_{wj} G_w^{n_j} + \xi_{w\,т} G_{w\,т}^{n_3} + \xi_{w\,тр} G_{w\,тр}^{n_4} + \\ &\quad + \xi_{w\,б} G_{w\,б}^{n_5} + \xi_{К_б} G_{w\,б}^{n_6}, \end{aligned}\right\} \tag{1.60}$$

где ξ_w — коэффициент местного сопротивления j-го участка по ходу движения воды; n — показатель степени, определяемый по характеру потока воды (ламинарный или турбулентный);

уравнения управления:

$$\left.\begin{aligned} \xi_{КВ_т} &= \xi_{КВ_{т_0}} / (1-\alpha); \\ \xi_{КВ_б} &= \xi_{КВ_{б_0}} / \alpha; \\ \xi_{К_т} &= \xi_{К_{т_0}} / (1-\gamma); \\ \xi_{К_б} &= \xi_{К_{б_0}} / \gamma; \\ \omega_в &= r_в \omega_{в_0}; \\ \omega_н &= r_н \omega_{н_0}, \end{aligned}\right\} \tag{1.61}$$

где α, γ, $r_в$, $r_н$ — безразмерные показатели сигналов управления; $0 \leqslant \alpha \leqslant 1$; $0 \leqslant \gamma \leqslant 1$; $0 \leqslant r_н \leqslant 1$; $0 \leqslant r_в \leqslant 1$;

уравнения расхода тепла и энергии:

$$\left.\begin{aligned} Q_т &= c_w G_w (t_{w_1} - t_{w_2}); \\ N_в &= r_в^3 G_{в_0} p_{в_0}; \\ N_н &= r_н^3 G_{wт_0} p_{н_0}. \end{aligned}\right\} \tag{1.62}$$

Система уравнений (1.54)—(1.62) описывает связи входных и выходных переменных состояния калориферной установки в статике. При исследовании динамики процессов в установке допустимо пренебрежение транспортным запаздыванием обменивающихся сред, а также инерционностью процессов изменения их расходов. В таком случае инерционным звеном установки остается водовоздушный теплообменный аппарат.

Исходным уравнением статики теплообменного аппарата будет уравнение теплового баланса на переходе вода — воздух (1.55). Исходным уравнением динамики будет уравнение теплового баланса, записанное с учетом приращений переменных, взятых в области их значений, при установившемся состоянии:

$$c_w G_{w\,т} (t_{w\,т} - t_{w_2}) - c_в G_{в.т} (t_{в.т} - t_{в_1}) = \\ = C_м \frac{d \Delta t_м}{d \tau} + C_{т.т} \frac{d \Delta t_{т.т}}{d \tau}, \qquad (1.63)$$

где $C_м$, $C_{т.т}$ — теплоемкость металла трубок и теплоносителя в них, $\Delta t_м$, $\Delta t_{т\,т}$ — приращения средней температуры металла и теплоносителя в трубках теплообменника вследствие приращений по переменным $G_{в\,т}$, $G_{w\,т}$, $t_{w\,т}$ и $t_{в_1}$.

Совместное решение уравнений (1.55) и (1.63), составленных для каждого из случаев изменения входной переменной, с использованием уравнений теплопередачи, записанных для установившихся процессов до внесения воздействия и после него, приводит к получению искомых уравнений связи [16].

Уравнение теплообменного аппарата как объекта управления по каналу изменение расхода теплоносителя — изменение температуры воздуха имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} &T_1 \frac{d \Delta t_{в.т}}{d \tau} + \Delta t_{в.т} = k_{Gw} \left(T_2 \frac{d \Delta G_{w\,т}}{d \tau} + \Delta G_{w\,т} \right); \\ &T_1 = \frac{C_м + C_{т.т}}{c_w G_{w\,т} + \dfrac{c_в G_в}{(2 c_в G_в / K_0 F) + 1}}; \\ &T_2 = \frac{C_м + C_{т\,т}}{c_w G_{w\,т} + \dfrac{1}{2m} K_0 F}; \end{aligned}\right\} \qquad (1.64)$$

$$k_{Gw} = \frac{2 (t_{w\,т} - t_{в_1}) m \dfrac{2 c_в G_{в.т}}{k_0 F} + \dfrac{c_в G_{в\,т}}{c_w G_{w\,т}}}{G_{т_0} \left(\dfrac{2 c_в G_{в.т}}{K_0 F} + \dfrac{c_в G_{в.т}}{c_w G_{w\,т}} + 1 \right)^2}. \qquad (1.65)$$

Уравнение теплообменника по каналу изменение температуры теплоносителя на входе — изменение температуры воздуха на выходе

$$T_1 \frac{d\,\Delta\, t_{\text{в.т}}}{d\,\tau} + \Delta\, t_{\text{в.т}} = k_{tw}\,\Delta\, t_{w\,\text{т}}, \qquad (1.66)$$

где

$$k_{tw} = \frac{2}{\dfrac{2\,c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{K_0\,F} + \dfrac{c_{\text{в}}\,G_{\text{в}}}{c_w\,G_{w\,\text{т}}} + 1}. \qquad (1.67)$$

Уравнение теплообменника по каналу изменение расхода воздуха через теплообменник — изменение температуры воздуха на выходе

$$T_1 \frac{d\,\Delta\, t_{\text{в.т}}}{d\,\tau} + \Delta\, t_{\text{в.т}} = k_{G\,\text{в}} \left(T_3 \frac{d\,\Delta\, G_{\text{в.т}}}{d\,\tau} + \Delta\, G_{\text{в.т}} \right), \qquad (1.68)$$

де

$$\left.\begin{aligned} k_{G\text{в}} &= \frac{2_{\cdot}(t_{w\text{т}} - t_{\text{в}_1})}{G_{\text{в.т}_0}} \cdot \frac{(1-n)\,\dfrac{2\,c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{K_0\,F} + \dfrac{c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{c_w\,G_{w\text{т}}}}{\left(\dfrac{2\,c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{K_0\,F} + \dfrac{c_{\text{в}}\,G_{\text{в}}}{c_w\,G_{w\text{т}}} + 1\right)^2}; \\ T_3 &= \frac{C_{\text{м}} + C_{\text{т.т}}}{c_w\,G_w + \dfrac{K_0\,F}{1-n}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.69)$$

Уравнение теплообменника по каналу изменение температуры воздуха на входе — изменение температуры воздуха на выходе

$$T_1 \frac{d\,\Delta\, t_{\text{в.т}}}{d\,\tau} + \Delta\, t_{\text{в.т}} = k_{t\text{в}} \left(T_4 \frac{d\,\Delta\, t_{\text{в}_1}}{d\,\tau} + \Delta\, t_{\text{в}_1} \right), \qquad (1.70)$$

где

$$k_{t\text{в}} = \frac{\dfrac{2\,c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{K_0\,F} + \dfrac{c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{c_w\,G_{w\text{т}}} - 1}{\dfrac{2\,c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{K_0\,F} + \dfrac{c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{c_w\,G_{w\text{т}}} + 1};$$

$$T_4 = \frac{C_{\text{м}} + C_{\text{т.т}}}{c_w\,G_{w\text{т}} + \dfrac{c_{\text{в}}\,G_{\text{в.т}}}{\left(\dfrac{2\,c_{\text{в}}\,G_{w\text{т}}}{K_0\,F} - 1\right)}}. \qquad (1.71)$$

Изучение характера взаимосвязей (1.64)—(1.71) входных и выходных переменных в теплообменных аппаратах показывает наличие теплотехнических характеристик, связанных нестационарностью и нелинейностью по всей области пространства изменения входных переменных. В таком случае ту или иную зависимость целесообразно аппроксимировать простыми функциями в пределах отдельных последовательных подобластей пространства входных переменных. Другими словами, сложная функция может быть представлена как совокупность простых «кусков». Подобный метод получил название кусочной аппроксимации. К достоинствам метода следует отнести простоту реализации и относительно слабую зависимость качества аппроксимации от степени нелинейности объекта.

Необходимость использования метода кусочной аппроксимации при разработке математической модели калориферной установки возникает при описании процесса теплопередачи (касательно коэффициента теплопередачи K), а также вентиляционной и гидравлической сетей (касательно приведенных коэффициентов местных сопротивлений $\xi_в$ и ξ_w).

При использовании известной эмпирической зависимости для коэффициента теплопередачи k следует помнить, что значения A и показателей степени m и n, помимо зависимости от конструкции теплообменного аппарата, имеют ярко выраженную зависимость от начальных условий. Начальными условиями в данном случае будут скорости потоков обменивающихся сред. Их значения изменяются в широком диапазоне, так как в большинстве случаев являются функциями регулируемых переменных — расход теплоносителя или воздуха. Только использование линеаризованных уравнений при малых отклонениях регулируемых переменных от начальных условий G_{w_0} и $G_{в_0}$ позволяет пользоваться известными эмпирическими зависимостями для A, m, n, $\xi_в$ и ξ_w [1; 6; 35—38].

Представленные уравнения (1.64)—(1.71) являются математической моделью воздухонагревателя, который рассматривается в качестве объекта регулирования с сосредоточенными параметрами. Подобное представление воздухонагревателя допустимо для использования при решении задач устойчивости и качества стабилизации температуры воздуха на выходе из калориферной установки.

Для решения задачи выбора способа защиты трубок теплообменника от замерзания в них воды и выбора тепловой обвязки воздухонагревателя представленная модель непригодна к использованию. Известно, что возможность замерзания воды в трубках теплообменника определяется конструктивными параметрами и выбранным способом поддержания температуры воздуха. Для решения задачи защиты трубок теплообменника от замерзания следует пользоваться зависимостями, характеризующими теплообменник в качестве звена с распределенными параметрами [39, 40].

Камера орошения. К наиболее распространенным в технике кондиционирования воздуха контактным аппаратам обработки воздуха относится форсуночная камера орошения. Технологическими процессами, рассматриваемыми в данном случае в качестве объектов управления, являются процессы переноса тепла и массы между обменивающимися средами воздух — вода, аэродинамический процесс смешения и перемещения воздуха, а также гидравлический процесс смешения и перемещения воды. Процессы обработки воздуха в большинстве случаев являются политропными. В теплый период года воздух можно: 1) охлаждать и осушать; 2) охлаждать при неизменном влагосодержании и 3) охлаждать и увлажнять. В холодный период года применяется адиабатное увлажнение воздуха, а также его контактный нагрев.

При постановке задачи создания математической модели процессов тепло- и массообмена в камерах орошения встречаются значительные трудности. Из общей постановки задачи в системе воздух — вода следует, что для получения количественных характеристик нужны данные о проводимости и передаче тепла и влаги, а также данные о потенциале влажности влажного воздуха. Важной задачей является выявление соотношений интенсивностей тепло- и влагообмена с учетом совместного молярного и молекулярного переноса [1].

Перечисленные трудности обусловливают необходимость вводить в описание картины происходящих процессов упрощающие предпосылки, эмпирические зависимости и множество ограничений. Используемые экспериментальные характеристики получены для различных аппаратов, в которых взаимное направление потоков воды и воздуха и продолжительность контакта между

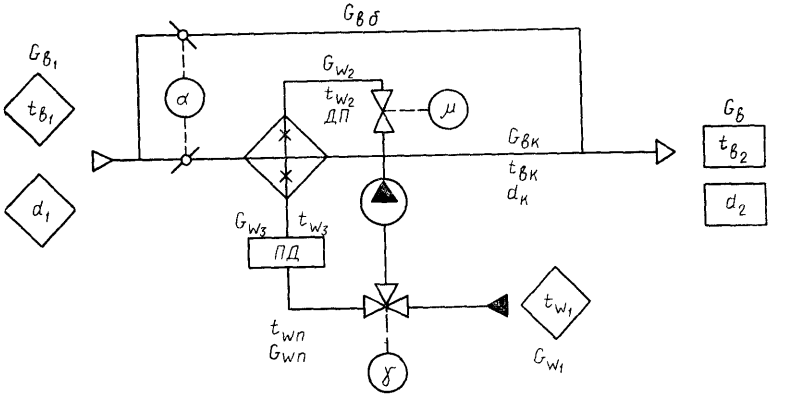


Рис 1 22. Обобщенная функциональная схема камеры орошения

ними являются различными [1] Поэтому они должны рассматриваться в качестве ограничительных условий.

Разработка математической модели камеры орошения основана на учете термодинамических потенциалов, а также параметров потоков тепла и массы, возникающих в системе воздух — вода. Используются уравнения связи между входными и выходными переменными состояния для воздуха и воды при различных их количественных соотношениях и различных параметрах установки. При этом делается попытка исключить некоторые промежуточные значения состояний воздуха и воды, наблюдаемые в процессе перехода от произвольного начального к управляемому конечному состоянию.

Следует отметить, что используемые аналитические зависимости ограничены пределами экспериментальных значений гидродинамических параметров. Численные значения коэффициентов и показателей степеней в уравнениях связей также устанавливаются экспериментальным путем [6, 41—44]. Тем не менее предлагаемая модель адекватна форсуночной камере орошения.

Обобщенная функциональная схема камеры орошения представлена на рис 1.22, где кружками обведены входные регулирующие воздействия, ромбами — неуправляемые переменные, прямоугольниками — выходные управляемые переменные. При разработке агрегированной модели камеры орошения выделяются три входных регулирующих переменных в дождевом пространстве (ДП): α — изменение расхода воздуха; μ — изменение

расхода воды; γ — изменение температуры воды. В реальной системе одновременное наличие управляющих воздействий α и μ необязательно. В таком случае одно из них приобретает постоянное значение и рассматривается в качестве параметра установки, выбираемого по тем или иным соображениям.

Стационарные процессы в камере орошения могут быть описаны следующей системой уравнений:

уравнение баланса тепла при разделении потока воздуха

$$G_{\text{в.к}}\, t_{\text{в.к}} + G_{\text{в.б}}\, t_{\text{в}_1} = G_{\text{в}}\, t_{\text{в}_2}; \qquad (1.72)$$

уравнение баланса влаги при разделении потока воздуха

$$G_{\text{в.к}}\, d_k + G_{\text{в.б}}\, d_1 = G_{\text{в}}\, d_2; \qquad (1.73)$$

уравнение баланса тепла при смешении потоков воды

$$G_{w_1}\, t_{w_1} + G_{w\text{п}}\, t_{w\text{п}} = G_{w_2}\, t_{w_2}; \qquad (1.74)$$

уравнение разделения потоков воздуха

$$G_{\text{в}} = G_{\text{в.к}} + G_{\text{в.б}}; \qquad (1.75)$$

уравнение смешения потоков воды

$$G_{w_2} = G_{w_1} + G_{w\text{п}}. \qquad (1.76)$$

Помимо процессов, описываемых уравнениями (1.72)—(1.76), в камере орошения происходят процессы тепломассообмена в дождевом пространстве (ДП) и изменения температуры воды в поддоне (ПД). Входными регулируемыми переменными для этих звеньев являются расход воздуха $G_{\text{в к}}$ и воды G_{w_2}, а также температура воды t_{w_2}. Неуправляемыми возмущающими переменными являются температура $t_{\text{в}_1}$ и влагосодержание d_1 воздуха, обрабатываемого в дождевом пространстве.

Для поддона входными переменными являются количество G_{w_3} и температура t_{w_3} воды. Выходными переменными в дождевом пространстве являются количество $G_{\text{в к}}$, температура $t_{\text{в к}}$ и влагосодержание $d_{\text{к}}$ воздуха, проходящего обработку, а для поддона — количество $G_{w\text{п}}$ и температура $t_{w\text{п}}$ воды, подаваемой для смешения с потоком G_{w_1} и далее вновь в дождевое пространство. В таком случае структурная модель процессов в дождевом пространстве и поддоне может иметь вид, представленный на рис. 1.23.

В предлагаемой модели примем ограничения типа $G_{w_3} = G_{wп}$ и $t_{w_3} = t_{wп}$ в установившемся режиме. В таком случае правомерно использование следующих уравнений:

уравнение баланса массы воды

$$G_{w_2} - G_{w_3} = G_{в\,к}\,(d_1 - d_к); \qquad (1\ 77)$$

уравнение баланса тепла

$$c_w\,G_{w_2}\,(t_{w_2} - t_{w_3}) = G_{в.к}\,[c_в\,(t_{в_1} - t_{в\,к}) + l\,(d_1 - d_к)]. \qquad (1.78)$$

Уравнение (1.78) может быть преобразовано к виду

$$t_{w_2} = t_{w_1} + \frac{c_в\,G_{в.к}}{c_w\,G_{w_2}}\left[(t_{в_1} - t_{в\,к}) + \frac{l}{c_в}\,(d_1 - d_к)\right]. \qquad (1.79)$$

В качестве уравнений связи между входными и выходными переменными дождевого пространства принимаются уравнения, предложенные инж. Ю. В. Фроловым:

$$t_{в.к} = t_{в_1} - [A_t\,(t_{в_1} - t_w) + c_t\,(d_1 - d_ф)] \times \times \left(\frac{G_{w_2}}{G_{в.к}}\right)^{m_t} \left(\rho\,\frac{G_{в\,к}}{F_к}\right)^{n_t}; \qquad (1\ 80)$$

$$d_к = d_1 - [A_1^{"}(t_{в_1} - t_w) + c_d\,(d_1 - d_ф)] \times \times \left(\frac{G_{w_2}}{G_{в\,к}}\right)^{m_t} \left(\rho\,\frac{G_{в\,к}}{F_к}\right)^{n_t}. \qquad (1\ 81)$$

Уравнение связи между температурой воды на входе t_{w_3} и выходе $t_{wп}$ из поддона имеет вид

$$T_п\,\frac{d\,t_{wп}}{d\,\tau} + t_{wп} = t_{w_3}. \qquad (1.82)$$

Постоянная времени поддона по каналу температуры воды вход — выход $T_п = V_п$: G_{w3}, где $V_п$ — объем воды в поддоне.

Совокупность уравнений (1.72) — (1.82) является математической моделью форсуночной камеры орошения, которая рассматривается в качестве объекта управления с сосредоточенными параметрами. Представление камеры орошения как объек-

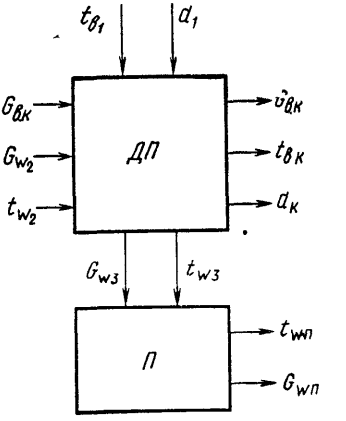


Рис 1.23. Структурная модель звеньев камеры орошения

та с сосредоточенными параметрами, так же как воздухонагревателя, правомерно при решении задач устойчивости и качества стабилизации температуры и влажности воздуха на выходе из камеры.

Помимо рассмотренных объектов управления (вентиляционный процесс в обслуживаемом помещении, поверхностный теплообменник вода — воздух, форсуночная камера орошения), в СКВ встречаются в качестве объектов управления и другие аппараты или процессы. К таким объектам можно отнести баки с хладоносителем, вращающиеся барабанные тепломассообменные аппараты, электрокалориферы, пароувлажнители, воздуховоды и т. д. Для каждого из этих объектов управления математическая модель разрабатывается аналогично рассмотренным на основании анализа материального и энергетического балансов.

1.5 УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Каждая система автоматического регулирования должна отвечать следующим требованиям: быть устойчивой при всех режимах работы, отклонения регулируемой переменной должны быть возможно меньшими, время переходного процесса должно быть минимальным.

Главным признаком рассматриваемых в технике кондиционирования воздуха объектов (аппаратов, устройств, процессов) является наличие связи их выводов (измерительные устройства) со входами (исполнительные устройства). Исполнительное устройство является средством некоторого воздействия на объект. Величина этого воздействия должна зависеть от того, насколько измеренная переменная отличается от ее заданного значения. Таким образом, возникает замкнутая автоматическая система или система автоматического регулирования по отклонению.

Полезность любой системы автоматического регулирования зависит от того, насколько хорошо она стабилизирует технологический процесс. Под технологическим процессом в рассматриваемом случае понимается, например, вентиляционный процесс в обслуживаемом помещении, процесс тепломассообмена в контактных аппаратах, процесс теплообмена в поверхностных аппаратах и т. д. Стабилизация этих процессов необходима при изменении рабочих режимов как в случаях изме-

нения заданного значения регулируемой переменной, так и в случаях изменений условий протекания процесса. Основное назначение системы автоматического регулирования состоит в том, чтобы свести к минимуму возникающие под действием возмущений отклонения процесса от заданного состояния.

Можно ли определить, что будет происходить в системе под действием возмущений? Будет ли отклонение регулируемой переменной от заданного значения длительным или кратковременным? Как будет изменяться регулируемая переменная в течение этого промежутка времени? Какова будет величина отклонения? Перечисленная совокупность вопросов требует ответа в процессе создания САР. Далее необходимо установить условия, влияющие на перечисленные показатели САР.

Какие изменения в системе в целом позволят уменьшить влияние возмущений? Какие параметры объекта или регулятора обеспечат наилучший процесс стабилизации регулируемой переменной? Какие изменения в измерительном, управляющем или исполнительном устройствах влияют на характер и показатели процесса стабилизации?

Во всех случаях для получения ответа на перечисленные вопросы необходим анализ рассматриваемой системы автоматического регулирования. Поскольку анализ САР выполняется при изменяющихся во времени условиях протекания процесса, его называют анализом динамических свойств системы.

На практике при анализе динамики САР часто бывает достаточным приблизительная оценка параметров или чисто качественное рассмотрение процессов. Необходимо отметить, что чисто расчетные методы не дают абсолютно точных значений параметров системы. Эти значения можно получить только при изучении реально действующей системы автоматического регулирования. Однако с помощью расчетных и некоторых графических методов можно получить приближенные результаты, достаточные для практического использования.

Используя ряд формул и графиков, можно найти приблизительные параметры регулятора перед его установкой на объекте; установить переходной процесс в конкретной системе автоматического регулирования при изменении заданного значения регулируемой переменной или при возмущениях, а также определить, как

влияет на работу системы в целом каждая часть оборудования.

Анализ динамики САР позволяет выбрать необходимую аппаратуру, не устанавливая ее на объекте, а также определить специальные устройства, которые будут улучшать характеристики системы.

Расчетный метод анализа динамики САР основан на нахождении дифференциального уравнения системы в целом. Основой для его получения является нахождение дифференциальных уравнений всех звеньев или элементов, входящих в систему. Уравнения звеньев САР образуют единую систему, которую путем исключения промежуточных переменных можно преобразовать к одному уравнению. Это уравнение будет уравнением системы в целом.

При выводе уравнения движения элементов системы регулирования все зависимости между параметрами, имеющие нелинейный характер, подвергаются линеаризации. Линеаризация уравнений осуществляется в соответствии с предположением о том, что отклонения переменных от их равновесного состояния достаточно малы.

Оценка устойчивости САР, полученная с помощью линейных дифференциальных уравнений, называется устойчивостью «в малом». При этом не рассматриваются границы отклонения переменных и, в частности, регулируемой переменной. Главное, что ставится условие достаточной малости этих отклонений от начального состояния.

Дифференциальное уравнение движения линеаризованной САР (1.9), записанное для регулируемой переменной $x(\tau)$ при наличии управляющего воздействия $r(\tau)$ и при равенстве нулю возмущающих воздействий $f(\tau)$, имеет вид

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0)\ x(\tau) =$$

$$= (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \ldots + b_1 p + b_0)\ r(\tau), \qquad (1.83)$$

где $a_0, \ldots, a_n$ и $b_0, \ldots, b_m$ — постоянные величины; оператор $p = d/d\tau$.

Дифференциальное уравнение движения системы можно записать и для возмущающего воздействия $f(\tau)$. В этом случае левая часть выражения (1.83) останется без изменения, а правая будет иметь иной вид. В общем виде дифференциальное уравнение, определяющее изменение регулируемой переменной, может быть

записано так, что в правой части будет находиться некоторая функция времени $f(\tau)$, т. е. оно будет аналогично выражению (1.9).

Характер переходных процессов в системе определяется видом левой части дифференциального уравнения (1.83), поэтому для определения количественной картины переходных процессов практически безразлично, записывается ли исходное уравнение для управляющего или возмущающего воздействия.

Процесс регулирования определяется решением дифференциального уравнения в виде суммы двух решений: первое — частное решение неоднородного уравнения (1.83) с правой частью; второе — общее решение уравнения (1.83) без правой части, т. е. с правой частью, равной нулю:

$$x(\tau) = x(\tau)_{\text{част}} + x(\tau)_{\text{общ}}. \qquad (1.84)$$

В случае $x(\tau)_{\text{част}} = \text{const}$ величину $x(\tau)_{\text{част}}$ называют установившимся значением, т. е. $x_{\text{у}}(\tau)$, а второе слагаемое — переходной составляющей, т. е. $x_{\text{п}}(\tau)$.

Система автоматического регулирования будет устойчивой, если с течением времени при $\tau \to \infty$ переходная составляющая будет стремиться к нулю, т. е. $x_{\text{п}}(\tau) \to 0$.

Для нахождения $x_{\text{п}}(\tau)$ уравнение (1.83) необходимо решить без правой части

$$a_n \frac{d^n x}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{d\tau^{n-1}} + \ldots + a_1 \frac{dx}{d\tau} + a_0 x = 0. \qquad (1.85)$$

Общее решение ищется в виде

$$x_{\text{п}}(\tau) = C e^{\lambda \tau}. \qquad (1.86)$$

Дифференцируя выражение (1.85) n раз и подставляя результаты в выражение (1.86), после сокращения на общий множитель $C e^{\lambda\tau}$ получаем

$$a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \ldots + a_1 \lambda + a_0 = 0. \qquad (1.87)$$

Полученное алгебраическое выражение называется **характеристическим.** Корни уравнения (1.87) $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ будут определять характер переходного процесса в системе. По своему виду левая часть выражения (1.87) полностью совпадает с левой частью выражения (1.83). В таком случае характеристическое уравнение получается приравниванием левой части уравнения (1.83) нулю:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0 = 0. \qquad (1.88)$$

Однако в уравнении (1.88) буква $p=\lambda$ означает не символ дифференцирования, а некоторое комплексное число, являющееся решением (корнем) характеристического уравнения. Так как в решении характеристического уравнения содержится n корней, то переходная составляющая может быть записана в виде

$$x_{\text{п}}(\tau) = C_1 e^{\lambda_1 \tau} + C_2 e^{\lambda_2 \tau} + \ldots + C_n e^{\lambda_n \tau}, \qquad (1.89)$$

где λ_1, ... λ_n — корни характеристического уравнения (1.87); C_1, ..., C_n — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий.

Корни характеристического уравнения определяются видом только левой части уравнения (1.83). Постоянные интегрирования определяются также и видом правой его части. Поэтому быстрота затухания и форма переходного процесса определяются как левой, так и правой частью исходного дифференциального уравнения. Однако поскольку в понятие устойчивости системы входит факт наличия или отсутствия затухания переходного процесса независимо от его времени и формы, то устойчивость линейной системы не зависит от вида правой части дифференциального уравнения (1.83) и определяется только характеристическим уравнением (1.88).

Для определения устойчивости системы автоматического регулирования необходимо решить характеристическое уравнение. Существует ряд приемов, с помощью которых по свойствам корней можно найти необходимые и достаточные условия устойчивости САР [9, 11].

Все приведенные рассуждения применимы только к системам автоматического регулирования, являющимся линейными. Линейной САР называется такая система, динамика всех звеньев которой вполне описывается линейными уравнениями (алгебраическими и дифференциальными или разностными). Для этого необходимо прежде всего, чтобы статические характеристики всех звеньев САР были линейными, т. е. имели вид прямой линии.

Нелинейной системой автоматического регулирования называется такая система, в которой хотя бы в одном звене нарушается линейность статической характеристики. К нелинейным системам относятся, в частности, все системы автоматического регулирования, в

звеньях которых имеются статические характеристики [уравнения (1.18) и (1.19)] или системы автоматического регулирования с использованием P_c-регулятора.

При исследовании, расчете и синтезе систем автоматического регулирования следует иметь в виду, что наиболее полно разработаны теория и различные прикладные методы для обыкновенных линейных систем. Поэтому для простоты расчета всегда желательно (там, где это возможно) сводить задачу к такой форме, чтобы максимально использовать методы исследования обыкновенных линейных систем.

Большинство объектов регулирования в технике кондиционирования воздуха с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть аппроксимировано типовыми звеньями, описываемыми дифференциальными уравнениями первого или второго порядка. В таком случае анализ динамики САР может быть ограничен графо-аналитическими исследованиями по выбору параметров используемого в системе регулятора Исходными данными являются: коэффициент усиления или передачи k_0, постоянные времени T_{01} и T_{02}, а также (при наличии времени запаздывания) τ_0 объекта регулирования. Для выбора типа регулятора и его параметров, удовлетворяющих заданным показателям качества переходного процесса, достаточно использование диаграмм ИАТ АН СССР. Известные величины k_0, T_0 и τ_0 наносят на координаты графиков и находят точки пересечения с выбираемыми значениями параметров регулятора. Указанные построения позволяют найти в пространстве значений параметров объекта и регулятора области, характеризующие САР в отношении устойчивости, а также определить некоторые показатели качества переходного процесса, детально разработанные в специальной литературе [10, 45, 46].

В то же время следует иметь в виду, что ни одна реальная САР в технике автоматизации СКВ не является строго линейной. Линейные характеристики звеньев и линейные дифференциальные уравнения получаются путем линеаризации реальных характеристик. При разложении в ряд Тейлора сохраняются линейные члены и отбрасываются члены высших порядков, которые для малых отклонений считаются пренебрежимо малыми.

Отказ от линеаризации характеристик приводит к нелинейным дифференциальным уравнениям, анализ ко-

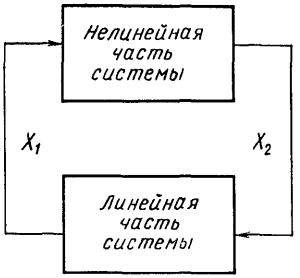


Рис. 1.24. Обобщенная структурная схема нелинейной САР

торых может дать сведения об устойчивости системы автоматического регулирования при больших отклонениях переменных от начальных условий.

Оценка устойчивости САР без ограничения величин отклонения переменных, как правило, получающаяся в результате исследования нелинейных систем, называется оценкой устойчивости «в большом».

Во многих случаях анализ устойчивости «в малом» дает практически верный ответ и об устойчивости «в большом». Это справедливо, например, когда процессы системы точно описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. В других случаях система, устойчивая «в малом», при определенных условиях может оказаться неустойчивой «в большом».

Анализ устойчивости нелинейных систем автоматического регулирования относится к специальным разделам теории автоматического регулирования [9, 11]. Общий метод составления уравнений для нелинейных систем состоит в следующем. Сначала производится линеаризация уравнений всех звеньев системы, для которых это допустимо, кроме существенно нелинейных звеньев. Затем составляются уравнения этих последних звеньев со всеми допустимыми упрощениями их характеристик.

Обобщенная структурная схема исследуемой системы автоматического регулирования представляется в виде двух частей: линейной и нелинейной (рис. 1.24). В подобной системе линейная часть может иметь структуру любой сложности. Нелинейную часть следует стремиться представить к виду с одним нелинейным звеном. При этом очень важно использовать возможность выделить нелинейность так, чтобы она описывалась непосредственно зависимостью между выходной и входной величинами $x_2=F(x_1)$. Подобная зависимость может иметь любую форму, например релейного типа [выражения (1.16)—(1.19)], кусочно-линейного или криволинейного,

например зависимость коэффициента теплопередачи в поверхностных воздухонагревателях от расхода обменивающихся сред [выражение (1.69)]. Встречаются и более сложные случаи, когда обе переменные (входная и выходная) оказываются под знаком нелинейной функции раздельно.

Процессы в нелинейных САР имеют ряд существенных особенностей, которые не встречаются в линейных системах. Кроме структуры системы и значений ее параметров для устойчивости того или иного установившегося режима в нелинейных САР в отличие от линейных большое значение имеют начальные условия. В нелинейных САР возможен новый вид установившегося процесса — автоколебания, т. е. устойчивые собственные колебания с постоянной амплитудой при отсутствии внешних колебательных воздействий.

Исследования нелинейных систем автоматического регулирования ведутся методами, основанными на построении фазовых траекторий, частотными методами или методами, основанными на гармонической линеаризации нелинейностей.

Особый класс нелинейных САР, весьма широко распространенных в технике автоматизации СКВ, составляют системы регулирования, включающие $Р_с$-регулятор с импульсным прерывателем. В подобных системах имеют место два существенно нелинейных звена: трехпозиционный регулятор и импульсный прерыватель. В качестве импульсного прерывателя используется устройство типа ключа, которое производит замыкание цепи контура регулирования короткими импульсами через равные промежутки времени.

Исследуемыми параметрами в релейно-импульсных системах автоматического регулирования являются: длительность замыкающего импульса $\tau_и$ и длительность цикла замыкания $T_и$. Для расчета этих параметров в качестве исходных данных следует иметь: передаточный коэффициент линейной части системы $k_л$, динамические параметры объекта регулирования T_1, T_2 и τ_0, уравнение трехпозиционного усилителя-преобразователя, время хода исполнительного механизма $T_с$ и угол поворота регулирующего органа. Целью исследований является определение области устойчивого установившегося режима работы в пространстве параметров и статической точности стабилизации регулируемой переменной.

Выбор параметров релейно-импульсной САР для объектов регулирования первого порядка с запаздыванием и для объектов второго порядка может производиться графо-аналитическим методом по номограммам, разработанным канд. техн. наук С. И. Аксельрод [47].

Проиллюстрируем изложенное выше исследованием устойчивости и качества САР, представленной на рис. 1.6. Запишем уравнения системы:

$$T_1 \frac{d\,\Delta\, t_{в.т}}{d\,\tau} + \Delta\, t_{в.т} = k_0 \left(T_2 \frac{d\,\Delta\, G_{wт}}{d\,\tau} + \Delta\, G_{wт} \right);$$

$$T_д \frac{d\,\Delta\, G_{wт}}{d\,\tau} + \Delta\, G_{wт} = k_р\, \Delta\, t_{в_2}$$

и передаточные функции:

$$W_0\,(p) = \frac{k_0\,(T_2\,p+1)}{T_1\,p+1}\;;\quad W_р\,(p) = \frac{k_р}{T_д\,p+1}\,.$$

Согласно выражению (1.27), передаточная функция разомкнутой системы

$$W\,(S) = \frac{k_0\,k_р\,(T_2\,S+1)}{(T_д\,S+1)\,(T_1\,S+1)}\,.$$

Характеристическое уравнение системы имеет вид

$$D\,(\lambda) = T_1\,T_д\,\lambda^2 + (T + T_д + k_0\,k_р\,T_2)\,\lambda + (1 + k_0\,k_р) = 0,$$

а его решение

$$\lambda_{1,2} = \frac{-(T_1+T_д+k_0k_рT_2) \pm \sqrt{(T_1+T_д+k_0\,k_р\,T_2)^2 - 4\,T_1\,T_д(1+k_0\,k_р)}}{2\,T_1\,T_д}\,.$$

Корни характеристического уравнения $\lambda_{1,2}$ имеют отрицательные вещественные части при любых значениях параметров систем.

В соответствии с первой теоремой Ляпунова об устойчивости линеаризованных систем [9, 11] данная система будет устойчива. За первичные динамические показатели качества такой системы [10] принимаются время переходного процесса, вызываемого единичным ступенчатым возмущающим воздействием, и статическая ошибка системы, характеризуемая отклонением регулируемой величины от номинального значения после окончания переходного процесса.

Характер переходного процесса определяется значениями корней характеристического уравнения. При вещественном их значении процесс является апериодичес

ней можно примерно судить о длительности переходким, а его уравнение имеет вид

$$\Delta t_{\text{п}} = C_1 e^{-\tau/T_a} + C_2 e^{-\tau/T_b},$$

где C_1 и C_2 — произвольные постоянные, определяемые из начальных условий; T_a и T_b — постоянные времени экспоненциальных составляющих апериодического переходного процесса·

$$C_1 = \frac{T_a}{T_a - T_b}\ (\Delta t_0 + T_b\, \Delta\, t_0);\quad C_2 = \frac{-T_b}{T_a - T_b}\ (\Delta\, t_0 + T_a\, \Delta\, t_0);$$

$$T_a = -1/\lambda_1;\quad T_b = -1/\lambda_2.$$

При комплексных значениях корней характеристического уравнения переходный процесс становится колебательным, его уравнение принимает вид

$$\Delta t_{\text{п}} = C_1 e^{-\tau/T_a} \sin(\omega\tau + C_2),$$

где

$$C_1 = \Delta\, t \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2}\left(\frac{\Delta\, t_0}{\Delta\, t_0} + \frac{1}{T_a}\right)^2};$$

$$C_2 = \arcsin\frac{\Delta\, t_0}{C_1};\quad T_a = \frac{2\,T_1\,T_{\text{д}}}{T_1 + T_{\text{д}} + k_0\,k_{\text{р}}\,T_2};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1 + k_0\,k_{\text{р}}}{T_1\,T_{\text{д}}} - \frac{(T_1 + T_{\text{д}} + k_0\,k_{\text{р}}\,T_2)^2}{4\,T_1^2\,T_{\text{д}}^2}}.$$

Граничные условия апериодического и колебательного переходных процессов определяются значениями $k_{\text{р}}$:

$$k_{\text{р.гр}} = \frac{2\,T_1\,T_{\text{д}} - T_1\,T_2 - T_2\,T_{\text{д}} - 2\sqrt{T_1\,T_{\text{д}}\,(T_1\,T_{\text{д}} + T_2^2) - T_1\,T_2 - T_2\,T}}{k_0\,T_2^2}$$

Решая последнее уравнение относительно $k_0\,k_{\text{р}}$, получаем кривую граничных условий в плоскости параметров системы (рис 1.25). Согласно выражению для $\Delta t_{\text{п}}$, апериодический переходный процесс состоит из двух экспонент, постоянные времени которых меняются в пределах

$$T_1 > T_a \geqslant \frac{2\,T_1\,T_{\text{д}}}{T_1 + T_{\text{д}} + k_0\,k_{\text{р}}\,T_2} \geqslant T_b > T_{\text{д}}.$$

При значениях $k_{\text{р}}$, близких к нулю, имеем $T_a \approx T_1$ и $T_b \approx T$. С увеличением $k_{\text{р}}$ T_a уменьшается, а T_b увеличивается (рис. 1.26). Так как $T_a > T_b$, вторая экспонента затухает быстрее первой. Следовательно, в конце переходного процесса превалирует первая экспонента, и по

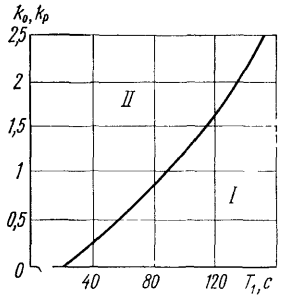


Рис. 1.25. Кривая граничных условий апериодического (*I*) и колебательного (*II*) переходных процессов в пространстве параметров k_0, k_p и T_1

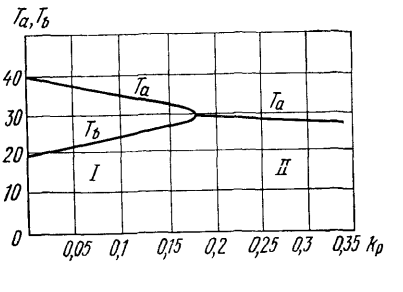


Рис 1.26. Влияние параметра регулятора k_p на характер переходного процесса
I — апериодический; *II* — колебательный

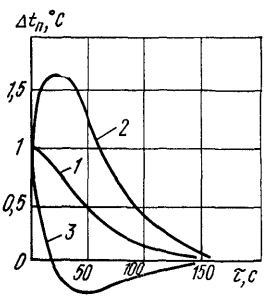


Рис. 1.27. Апериодический переходный процесс при $k_p < k_{p.гр}$

ного процесса в целом, т. е. считать $T_p \approx 3\ T_a$. Таким образом, при увеличении k_p в пределах апериодического переходного процесса ($k_p < k_{p.гр}$) уменьшается время регулирования T_p. Однако при $k_p > k_{p.гр}$, т. е. в области колебательного переходного процесса, влияние k_p на длительность переходного процесса становится минимальным.

На рис. 1.27 и 1.28 даны кривые переходных процессов исследуемой системы (см. рис. 1.6) для секции подогрева КД4018Б центрального кондиционера КД40 с теплоносителем горячей водой. Параметры объекта регулирования: $k = 1{,}05$°С/т, $T_1 = 40$ с, $T_2 = 12{,}5$ с и $T_д = 20$ с. Параметры переходных процессов (начальные условия и значения коэффициента усиления регулятора) даны в табл. 1.1.

Длительность апериодических переходных процессов $T_p = 100$—110 с. Амплитуда колебательных переходных процессов затухает по экспонентам, изображенным пунктиром, с постоянными времени T_a. Длительность колебательных переходных процессов $T_p \approx 60$—90 с. Полный

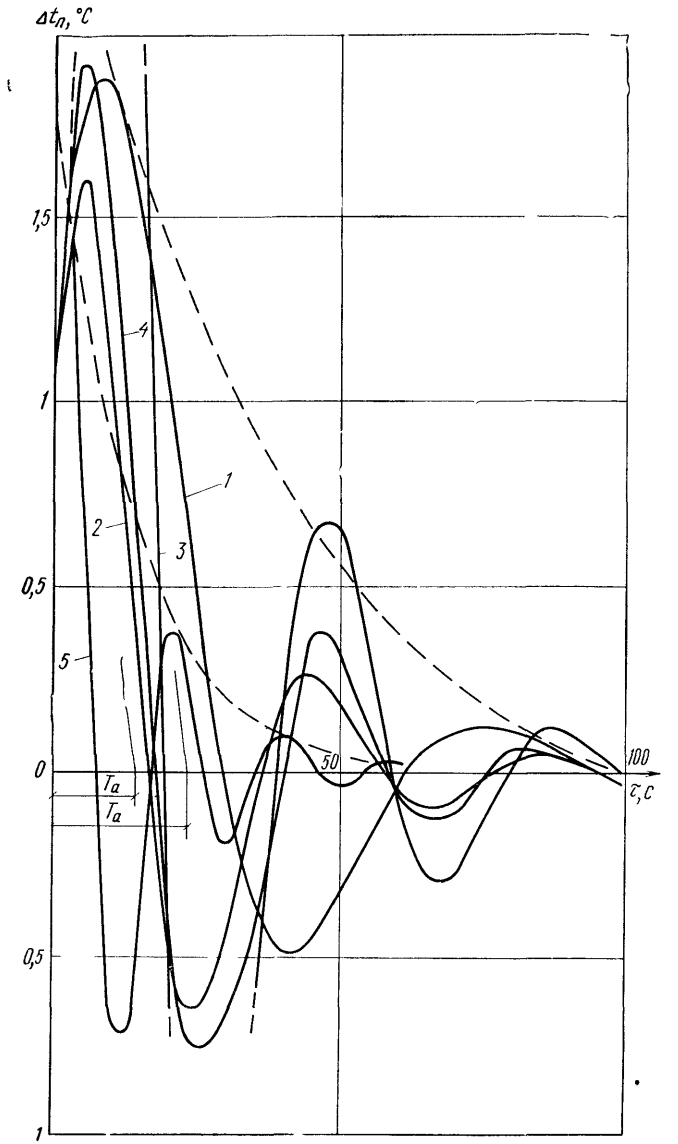


Рис 1 28 Колебательный переходный процесс при $k_{р} > k_{р\,гр}$

ТАБЛИЦА 11. ПАРАМЕТРЫ КРИВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

$k_р$, т/(ч °С)	Δt,°С	Δt, °С/с	Кривая	Процесс
0,1	1	0	*1*	Апериодический (см. рис. 1.27)
0,1	1	0,1	*2*	
0,3	1	—0,1	*3*	
0,5	1	0	*1*	Колебательный (см. рис. 1.28)
1	1	0	*2*	
1	1	0,1	*3*	
1	1	—0,1	*4*	
5	1	0	*5*	

процесс регулирования складывается из двух составляющих: $\Delta t = \Delta t_п + \Delta t_у$. Величина $\Delta t_у$ находится как частное решение характеристического уравнения при $f(\tau) = f_0 = \text{const}$:

$$\Delta t_у = f_0/(1 + k_0 k_р).$$

Рассмотренная линейная система автоматического регулирования температуры воздуха на выходе из теплообменного аппарата имеет в установившемся состоянии постоянное значение отклонения регулируемой переменной от ее заданного значения, определяющее статическую ошибку системы. Для ее уменьшения следует увеличивать коэффициент усиления $k_р$. Однако это требование противоречит требованию к качеству переходного процесса, так как при $k_р > k_{р.гр}$ процесс становится колебательным, что нежелательно.

1.6 АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

В технике автоматизации СКВ представленные локальные САР в большинстве случаев являются лишь отдельными звеньями управляющей части системы. В таком случае правомерно их рассмотрение в качестве подсистем. При анализе и синтезе локальных САР используется аппарат классической теории автоматического регулирования [9, 11]. В основе выполнения подобного анализа лежит выявление структуры технологического процесса кондиционирования воздуха, разработка алгоритмов и определение областей пространства функ-

ционирования как системы в целом, так и ее отдельных подсистем.

Под структурой технологического процесса кондиционирования воздуха понимаются необходимая совокупность и способы соединения технологических агрегатов тепловлажностной обработки, перемещения и смешения воздуха, которые должна содержать система для выполнения целей функционирования и обеспечения желаемого показателя эффективности.

Под алгоритмом функционирования понимается программа выполнения и последовательной смены технологических процессов тепловлажностной обработки воздуха и его подачи в обслуживаемое помещение.

В данном случае рассматриваются алгоритмы функционирования систем кондиционирования воздуха с однохарактерными нагрузками, оснащенных традиционными средствами технического обеспечения. Анализ и синтез алгоритмов функционирования производится на основе использования общего теоретического аппарата СКВ [1, 6, 7] и аппарата их термодинамической модели [8, 12, 48].

Алгоритмы функционирования СКВ получены путем ручного пошагового «проигрывания» или моделирования всего цикла работы систем в базисных координатах процесса от минимальных до максимальных расчетных значений параметров наружного воздуха. Основным методологическим приемом является определение направления отклонений движения процесса от выбранной траектории и сравнение значений целевой функции в близлежащих точках пространства состояний. При этом производится повторение всего или части цикла работы системы, т. е. осуществляется процедура последовательных приближений, направленная на отыскание приемлемого варианта алгоритма функционирования.

Рассматриваемые структуры и алгоритмы функционирования СКВ следует считать субоптимальными, в заданном смысле при условии выполнения ряда технологических и функциональных ограничений. Основным мотивом оптимизации структур и алгоритмов СКВ является стремление обеспечить возможно минимальное потребление энергии. Могут иметь место и другие мотивы оптимизации, например снижение массы и габаритов оборудования, повышение надежности и т. д. Следует иметь в виду, что из всей совокупности перечисленных показателей одни могут рассматриваться в

качестве мотивов оптимизации системы, а другие — в качестве ограничений. В то же время во всех случаях оптимизации СКВ существует ряд технологических ограничений по тем или иным мотивам.

Изложенное выше позволяет сделать заключение о том, что представленные далее структуры и алгоритмы функционирования СКВ следует рассматривать как примеры анализа и синтеза систем, субоптимальных в заданном смысле.

Работа СКВ характеризуется широкой областью изменения определенных переменных состояния и их взаимосвязей. Такими переменными, определяющими основные черты поведения системы, являются температура и влажность или энтальпия воздуха. Указанные переменные считаем базисными координатами СКВ. Изменение базисных координат (движение системы) в пространстве $I-d$-диаграммы из состояния наружного воздуха $X_{\text{н в}}$ в состояние приточного воздуха $X_{\text{п}}$ и далее в состояние воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения $X_{\text{р з}}$ показано на рис. 1.1. Движение системы характеризуется управляемыми лучами процесса тепловлажностной обработки воздуха в технологических аппаратах $\varepsilon_{\text{УКВ}_j}$ и управляемыми лучами вентиляционного процесса в обслуживаемом помещении $\varepsilon_{\text{оп}_l}$.

Подобную ситуацию можно охарактеризовать наличием широкого диапазона ненулевых начальных условий, т. е. $X_0 \in X_{\text{н в}}$. Непрерывное изменение X_0 в широком диапазоне $X_{\text{н в}}$, т. е. изменение параметров наружного воздуха в диапазоне от расчетных зимних до расчетных летних условий, приводит к необходимости выполнения различных режимов обработки воздуха. Простейший режим работы СКВ отмечается в случае, когда параметры наружного воздуха равны параметрам приточного воздуха. Подобная ситуация характеризуется как минимум требуемой функциональной и аппаратной обеспеченностью системы. Область пространства состояний системы, в которой наблюдается равенство параметров приточного и наружного воздуха, назовем областью нулевых термодинамических начальных условий. При нахождении системы в области нулевых термодинамических начальных условий структура ее управляемой части минимизируется до использования только технологических аппаратов реализации требуемого $\varepsilon_{\text{оп}}$.

В реальной системе непрерывное неуправляемое

сохранение равенства параметров наружного воздуха нулевым термодинамическим начальным условиям невозможно. В то же время требуемый показатель качества может быть в той или иной степени сохранен при выполнении двух условий: первое — расширение области пространства состояний параметров приточного воздуха путем введения третьей, помимо температуры и влажности, управляемой переменной состояния. Этой переменной является расход подаваемого в обслуживаемое помещение воздуха [49]; второе — построение структуры управляемой части системы путем использования аппаратов тепловлажностной обработки воздуха, позволяющих вести суммарный процесс в заданную область $X_{\text{п}}$ без противоположно направленных в теплотехническом отношении частных процессов [50]. Совместное рассмотрение этих условий для создания рациональных технологических структур осуществляется на основе использования термодинамической модели СКВ [8, 12, 48].

Процедуру разработки алгоритма функционирования СКВ проиллюстрируем на примере рассмотрения центральной однозональной системы с постоянным расходом воздуха. Для группы обслуживаемых помещений предприятий машиностроения и радиоэлектроники, а также ряда СКВ комфортного кондиционирования параметры воздуха нормируются следующими значениями: температура зимняя 20 ± 2°С, температура летняя 23 ± 2°С, относительная влажность 50 ± 10%. Абстрагируясь от понятий зима и лето, допустимые изменения температуры в обслуживаемом помещении можно представить в виде неравенства $18°\leqslant t_{\text{оп}}\leqslant 25°$. Таким образом, нормируемые параметры внутреннего воздуха можно представить в виде области состояний, ограниченной на $I-d$-диаграмме (рис. 1.29) пространством между точками *1—2—3—4*. Так как реальные системы автоматического регулирования поддерживают параметры воздуха в обслуживаемом помещении с определенной статической и динамической погрешностью, область заданных значений параметров внутреннего воздуха ограничивается [28]. Для систем автоматического регулирования заданные значения лежат в пределах $19°\text{С}\leqslant t_{\text{оп}_3}\leqslant 24°\text{С}$, $45\%\leqslant\varphi_{\text{оп}_3}\leqslant 55\%$. Область заданных значений температуры и влажности ограничивается пространством между точками *5—6—7—8*. В обслуживаемом помещении влаговыделения незначительны, выбранная кратность воздухообмена обес-

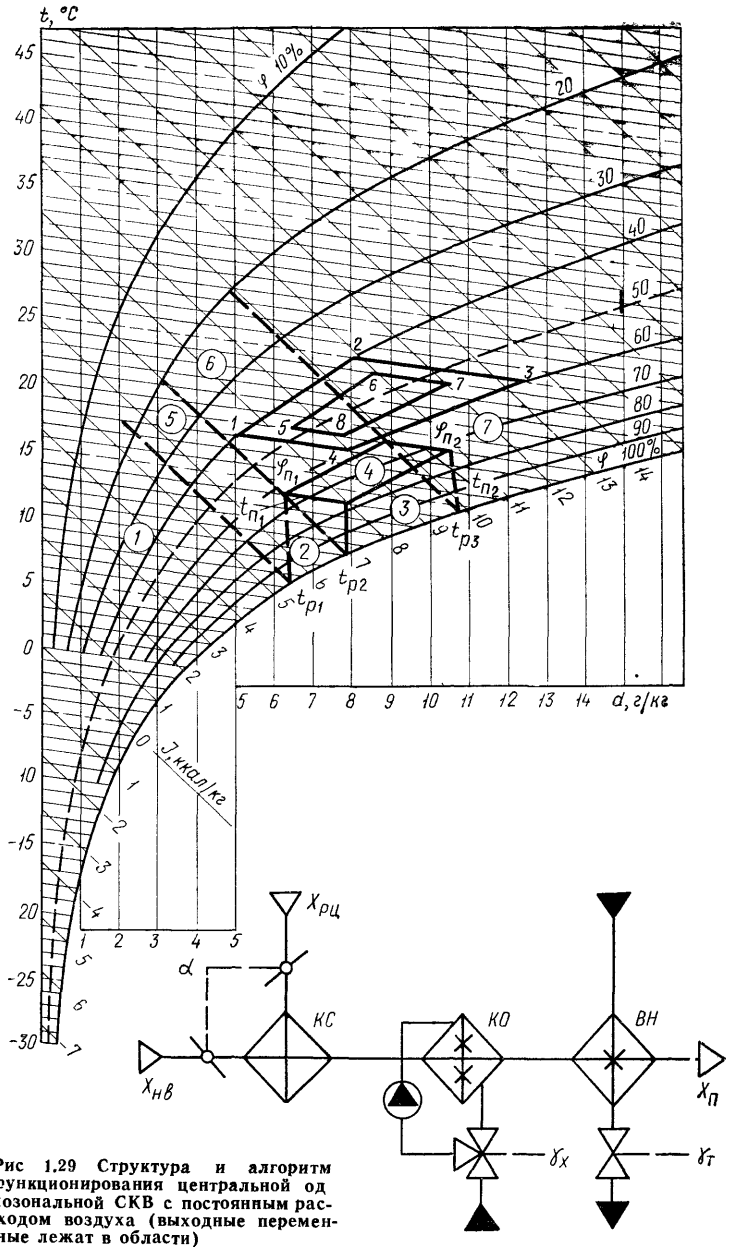


Рис 1.29 Структура и алгоритм функционирования центральной однозональной СКВ с постоянным расходом воздуха (выходные переменные лежат в области)

печивает среднее значение допустимой разности температур внутреннего и приточного воздуха, равное, например, 7°С. В таком случае область параметров приточного воздуха $X_{\text{п}}$ можно представить в виде неравенств $t_{\text{п}_1} \leqslant \leqslant t_{\text{п}} \leqslant t_{\text{п}_2}$; $\varphi_{\text{п}_1} \leqslant \varphi_{\text{п}} \leqslant \varphi_{\text{п}_2}$.

В термодинамическом отношении протекание процессов $\varepsilon_{\text{УКВ}}$ целесообразно направлять к значениям $X_{\text{п}_i}$, лежащим по краям области пространства $X_{\text{п}}$. При этом очевидно, что процессы будут осуществляться путем реализации различных технологических режимов обработки воздуха. Первый режим, как уже отмечалось, соответствует условиям совпадения значений базисных параметров наружного и приточного воздуха. В этом режиме тепловлажностная обработка наружного воздуха не производится, $\varepsilon_{\text{УКВ}} = 0$. Второй режим соответствует обязательному ведению процесса $\varepsilon_{\text{УКВ}}$ в точку пересечения $t_{\text{п}_1}$ и $\varphi_{\text{п}_1}$; третий — ведению процесса $\varepsilon_{\text{УКВ}}$ в семейство точек, лежащих на линии $\varphi_{\text{п}_1}$ между значениями $t_{\text{п}_1} \leqslant \leqslant t_{\text{п}_i} \leqslant t_{\text{п}_2}$; четвертый — ведению процесса в семейство точек, лежащих на линии $t_{\text{п}_1}$ между значениями $\varphi_{\text{п}_1} \leqslant \leqslant \varphi_{\text{п}_i} \leqslant \varphi_{\text{п}_2}$; пятый — ведению процесса $\varepsilon_{\text{УКВ}}$ в семейство точек , лежащих на линии $t_{\text{п}_2}$ между значениями $\varphi_{\text{п}_1} \leqslant \leqslant \varphi_{\text{п}_i} \leqslant \varphi_{\text{п}_2}$; шестой — ведению процесса $\varepsilon_{\text{УКВ}}$ в семейство точек $\varphi_{\text{п}_2}$, лежащих между значениями $t_{\text{п}_1} \leqslant t_{\text{п}_i} \leqslant t_{\text{п}_2}$ и седьмой режим — ведению процесса $\varepsilon_{\text{УКВ}}$ в точку пересечения линий $t_{\text{п}_2}$ и $\varphi_{\text{п}_2}$.

Реализация тех или иных режимов обработки воздуха определяется возможностью технической реализации структуры СКВ. В рассматриваемой СКВ, структура которой представлена на рис. 1.29, имеется функциональное ограничение, связанное с технической необходимостью реализации на выходе из камеры орошения промежуточного состояния воздуха — точки росы. Поэтому целесообразность ведения процессов в семейство точек, лежащих на линиях $t_{\text{п}_2}$ и $\varphi_{\text{п}_2}$, отпадает. Несмотря на это, алгоритмы функционирования СКВ также состоят из семи режимов (цифры *1—7* на рис. 1.29, взятые в кружки). В первом режиме осуществляется управляемое смешение наружного воздуха (НВ) и рециркуляционного воздуха (РЦ) в камере смешения, затем неуправляемая адиабатная обработка воздуха в камере орошения до состояния $t_{\text{р}_1}$ и изовлажностный нагрев в

воздухонагревателе до состояния $t_{п_1}$. Во втором режиме осуществляется только управляемое смешение наружного и рециркуляционного воздуха в КС до состояния $t_{п_1}$; в третьем режиме — также управляемое смешение наружного и рециркуляционного воздуха, но до состояния $\varphi_{п_2}$. В четвертом режиме параметры наружного и приточного воздуха равны, т. е. выполняются нулевые термодинамические условия; тепловлажностная обработка воздуха, подаваемого в обслуживаемое помещение, не производится. В пятом режиме только наружный воздух адиабатно обрабатывается в КО до состояния $t_{р_1} \leqslant \leqslant t_{р_i} \leqslant t_{р_2}$, затем в ВН воздух нагревается до состояния $\varphi_{п_1}$. В шестом режиме так же, как и в пятом, только наружный воздух адиабатно обрабатывается в КО до состояния $t_{р_2} \leqslant t_{р_i} \leqslant t_{р.з}$, затем в ВН нагревается до состояния $\varphi_{п_2}$. В седьмом режиме в КО воздух политропно обрабатывается до состояния $t_{р.з}$, затем в ВН нагревается до состояния $t_{п_2}$ или $\varphi_{п_2}$.

Для ряда помещений электротехнической промышленности нормируемые показатели температуры и влажности воздуха в рабочей зоне лежат в пределах $20°C \leqslant \leqslant t_{р.з} \leqslant 23°C$ и $35\% \leqslant \varphi \leqslant 40\%$. Такие требования к поддержанию t и φ выполняются в системе кондиционирования воздуха, снабженной общепромышленными приборами и устройствами, при условии $t_{max} - t_{min} = 2\Delta t_{САР}$ и $\varphi_{max} - \varphi_{min} = 2\Delta\varphi_{САР}$ [28]. Это означает, что область допустимых значений $t_{р.з}$ и $\varphi_{р.з}$ вырождается в точку $t_{р.з} = 21{,}5 \pm 1{,}5°C$ и $\varphi_{р.з} = 37{,}5 \pm 2{,}5\%$ (рис. 1.30).

На систему накладывается ряд специальных или вынужденных ограничений, к которым, например, относятся невозможность использования рециркуляционного воздуха $G_{р.д} = 0$ и вынужденный постоянный расход приточного воздуха $G_п = \text{const}$. Для рассматриваемой системы влагоизбытки в обслуживаемом помещении принимаются равными нулю. Расход воздуха в системе выбирается по меньшей мере из двух условий: 1) выполнение заданных пределов кратности воздухообмена и 2) обеспечение допустимой разности значений температуры воздуха в рабочей зоне и зоне притока $t_{р.з} - t_п = \Delta t_{доп}$. При этом полагается, что значительные отклонения в потерях тепла в обслуживаемом помещении отсутствуют или компенсируются другими системами, а допустимые уменьшения $(-\Delta Q)$ или увеличения $(+\Delta Q)$ тепло-

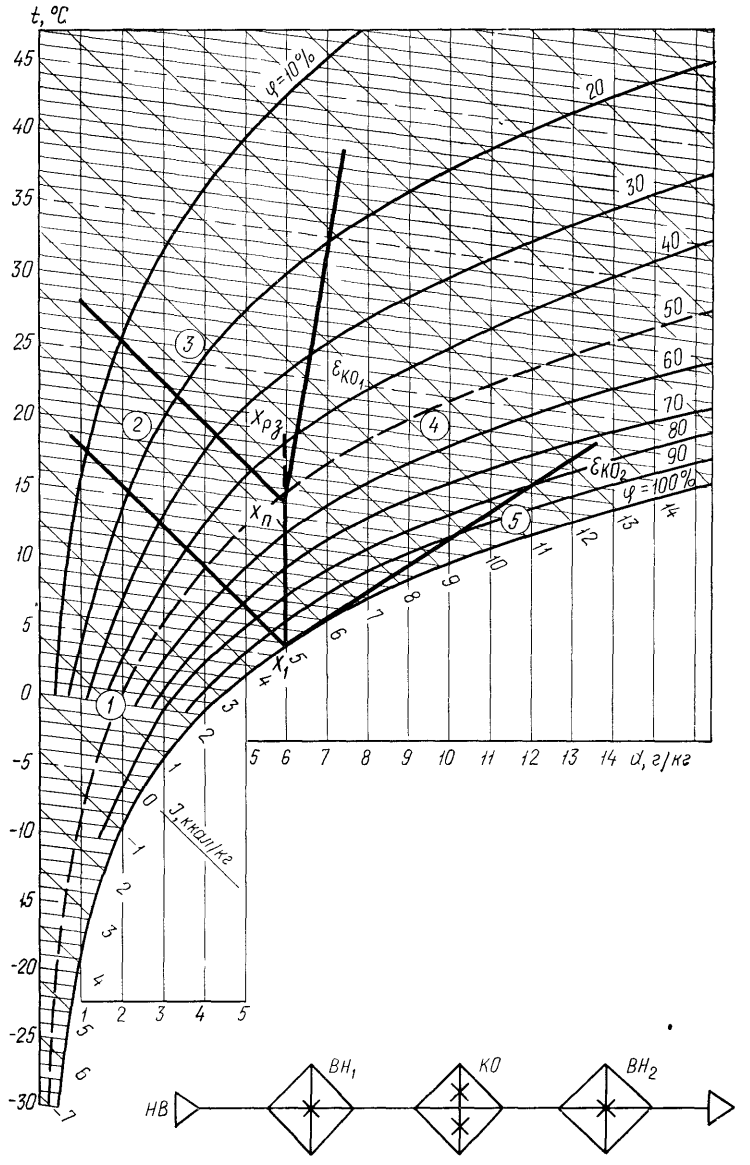


Рис 1 30 Структура и алгоритм функционирования СКВ (выходные переменные сводятся в точку)

избытков не приводят по условиям работы УКВ к значительному изменению необходимого $\Delta t_{доп}$.

При значениях параметров наружного воздуха $x_{н.в}$, соответствующих условию $I_н < I$, производится изовлажностный нагрев воздуха до I_1, адиабатное увлажнение до d_1 и второй подогрев до $t_п$ (первый технологический режим). При значениях $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $I_1 \leqslant I_н$, $I_н \leqslant I_п$, и $d_н < d_1$ производится адиабатное увлажнение воздуха до $d = d_1$ и подогрев до $t_п$ (второй технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих в пределах $I_н > I_1$ и слева от линии $\varepsilon_{КО_1}$, осуществляется политропная обработка воздуха с увлажнением или осушкой до параметров, соответствующих значениям $X_п$ (третий технологический режим). При значениях $X_н$, лежащих в пределах $d_н > d_1$ и между линиями $\varepsilon_{ОК_1}$ и $\varepsilon_{КО_2}$, производится политропное охлаждение и осушка воздуха до $d = d_1$ и подогрев до $t_п$ (четвертый технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих ниже линии $\varepsilon_{КО_2}$, производится нагрев воздуха, его политропное охлаждение и осушка до $d = d_1$ и последующий второй нагрев до $t_п$ (пятый технологический режим).

Таким образом, функциональная схема тепловлажностной обработки воздуха представляет собой последовательность аппаратов первого подогрева $ВН_1$, камеры орошения КО и калорифера второго подогрева $ВН_2$ (см. рис. 1.30). В отличие от предыдущего примера (см. рис. 1.29) в данном случае отсутствует условие реализации обязательного промежуточного состояния обрабатываемого воздуха — точки росы. Это означает, что в рассматриваемой СКВ используется камера орошения, которая позволяет реализовать управляемые адиабатные и политропные процессы обработки воздуха. Алгоритмы функционирования системы кондиционирования воздуха состоят из последовательной совокупности процессов тепловлажностной обработки воздуха, включающей пять технологических режимов, зоны реализации которых на рис. 1.30 обозначены цифрами, взятыми в кружки.

Переход с одного технологического режима на другой или автоматическое переключение технологических режимов (ПТР) работы системы кондиционирования воздуха, а также управление процессами внутри технологических режимов осуществляются согласно подлежащему разработке алгоритму управления СКВ.

Для ряда помещений сборочных производств точного

машиностроения допустимые значения параметров воздуха в рабочей зоне лежат в пределах: в летний период $t=23\pm2°C$, $\varphi=50\pm10\%$; в зимний период $t=20\pm2°C$, $\varphi=50\pm10\%$. В таком случае область допустимых значений $X_{р.з}$ в годовом цикле будет: $t_{min}=18°C$, $t_{max}=25°C$, $\varphi_{min}=40\%$ и $\varphi_{max}=60\%$. Такие требования к поддержанию температуры и влажности выполняются системой кондиционирования воздуха, снабженной общепромышленными приборами и устройствами, при условии $t_{max}-t_{min}>2\Delta t_{САР}$ и $\varphi_{max}-\varphi_{min}>2\Delta\varphi_{САР}$ [28]. Это означает, что область допустимых значений выходных переменных $X_{р.з}$ ограничивается, например, областью, $t_{р.з}=(19-24)\pm1°C$ и $\varphi=(43-57)\pm3\%$.

На рассматриваемую группу СКВ накладываются те же ограничения: $G_{р.д}=0$ и $G_{п}=\text{const}$. Кроме того, влагоизбытки в обслуживаемом помещении равны нулю. Расход воздуха в системе выбирается по тем же соображениям, что и в предыдущем случае. В качестве технических средств обеспечения берутся поверхностный воздухонагреватель и камера орошения.

При значениях параметров наружного воздуха $X_{н.в}$, лежащих в пределах $I_н<I_{п\,min}$ и $d_н<d_{п\,min}$, в установке кондиционирования воздуха производится нагрев воздуха до $I_{п\ min}$ и адиабатное увлажнение до $d=d_{п\,min}$ (первый технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих в пределах $d_{п\,min}\leqslant d_н\leqslant d_{п\,max}$ и ниже значений $t_{п\,min}$ или $\varphi_{п\,max}$, воздух нагревается до значений $t_{п\,min}$ или $\varphi_{п\,max}$ (второй технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих в пределах $d_н>d_{п\,max}$ и ниже линии $\varepsilon_{КО}$, воздух нагревается до значений температур, лежащих на линии $\varepsilon_{КО}$, а затем осуществляется политропное охлаждение и осушка до $d=d_{п\ max}$ (третий технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих в пределах $I_{п\,min}\leqslant I_н\leqslant I_{п\,max}$ и выше значений $\varphi_{п\,min}$ и $t_{п\,max}$, производится адиабатное увлажнение воздуха до $\varphi_{п\ min}$ или $t_{п\ max}$ (четвертый технологический режим). При значениях параметров наружного воздуха, равных значениям параметров приточного воздуха, т. е. $X_{н.в}\in X_п$, тепловлажностная обработка воздуха не производится (пятый технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих в пределах $I_н>I_{п\,max}$ и выше линии $\varepsilon_{КО}$, производится политропное охлаждение с увлажнением или осушкой до $d=d_{п\ max}$ (шестой технологический режим).

Таким образом, функциональная схема тепловлаж-

ностной обработки воздуха представляет собой последовательность двух аппаратов — воздухонагревателя и камеры орошения (рис. 1.31). Алгоритм функционирования системы кондиционирования воздуха состоит из последовательной совокупности процессов тепловлажностной обработки воздуха, включающей шесть технологических режимов.

Следует отметить, что для рассмотренной группы систем кондиционирования воздуха при появлении в обслуживаемых помещениях определенного количества влагоизбытков функциональные схемы и алгоритмы функционирования не изменяются. Это очевидно для СКВ, приведенной на рис. 1.30, и проиллюстрировано для СКВ, приведенной на рис. 1.32.

В ряде систем технологического кондиционирования воздуха отсутствует ограничительное условие на использование рециркуляционного воздуха, но по тем или иным соображениям сохраняется вынужденное ограничение на постоянство расхода приточного воздуха.

Рассмотрим СКВ, представленную на рис. 1.33, где область допустимых значений выходных переменных ограничивается точкой согласно $t_{р.з}=20\pm1°C$; $\varphi_{р.з}=40\pm\pm5\%$. При $G_{р.ц}\neq0$ граничные значения соотношений в расходе воздуха имеют вид: $G_{п}=G_{н}+G_{р.ц}=\text{const}$; $G_{н\ max}=G_{п}$; $G_{п\ min}=0{,}2\ G_{п}$.

Выбор расхода приточного воздуха осуществляется по тем же мотивам, а средства технического обеспечения те же, что и в предыдущем примере (плюс воздушная смесительная камера).

При значениях параметров наружного воздуха $X_{н.в}$, лежащих в пределах $I_{н}<I$, в установке кондиционирования воздуха производится смешение минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным, нагрев смеси до $I_{п}$ и адиабатное увлажнение до параметров $X_{п}$ (первый технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих в пределах $I_{1}\leqslant I_{н}\leqslant I_{п}$ и $d_{н}<d_{п}$, осуществляется смешение переменного количества наружного воздуха с рециркуляционным до состояния $I_{с.м}=I_{п}$ и адиабатное увлажнение до параметров $X_{п}$ (второй технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих в пределах $I_{п}<\\<I\leqslant I_{р.з}$ и слева от линии $\varepsilon_{КО_1}$, производится политропное охлаждение с увлажнением или осушкой максимального количества наружного воздуха до параметров $X_{п}$ (третий технологический режим). При значениях $X_{р.в}$,

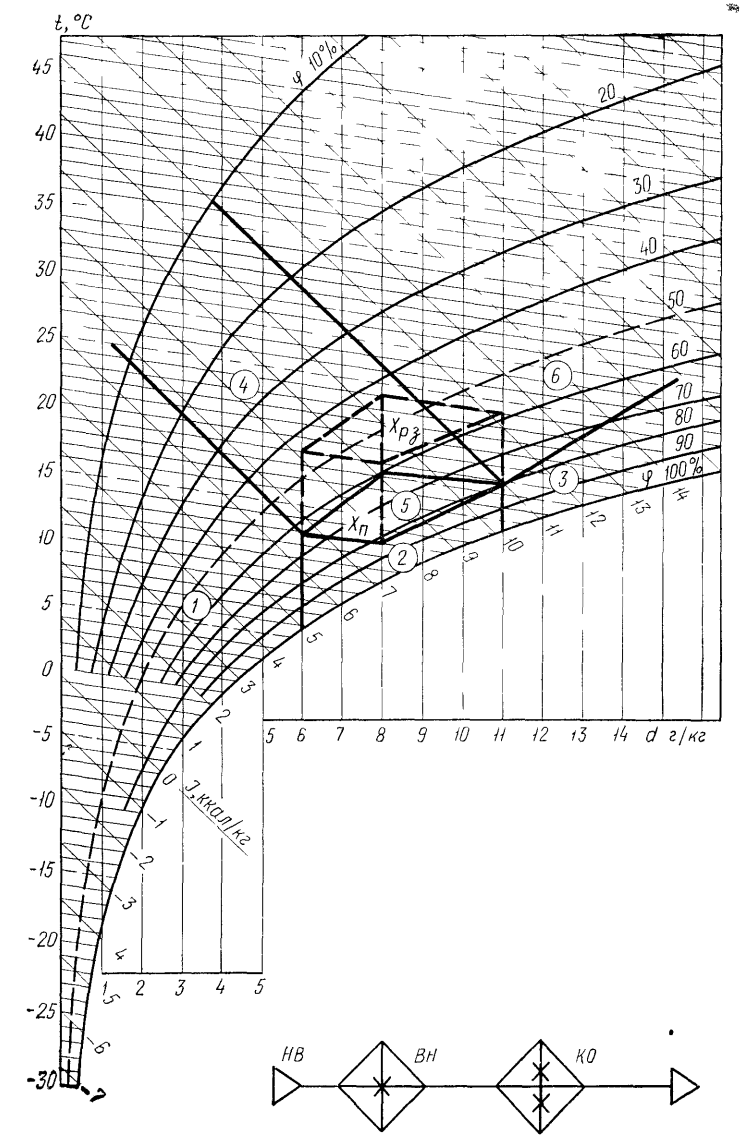


Рис 1 31 Структура и алгоритм функционирования СКВ, реализующей шесть технологических режимов обработки воздуха

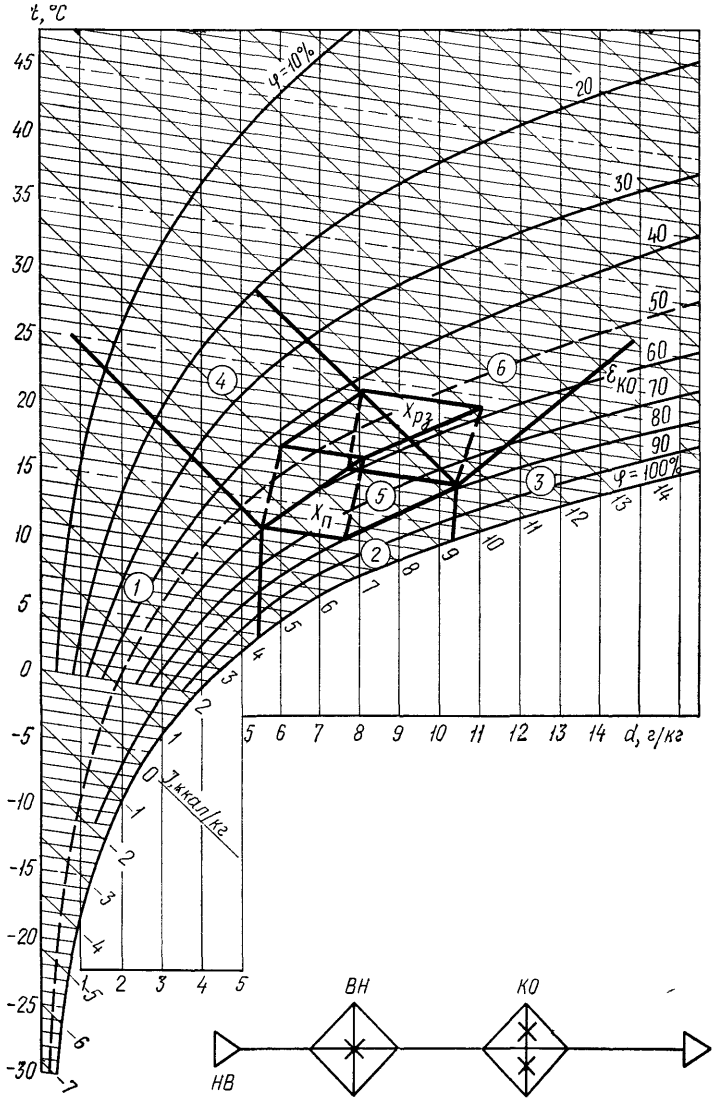


Рис 1 32. Структура и алгоритм функционироваиия СКВ с наличием влаговыделений в ОП

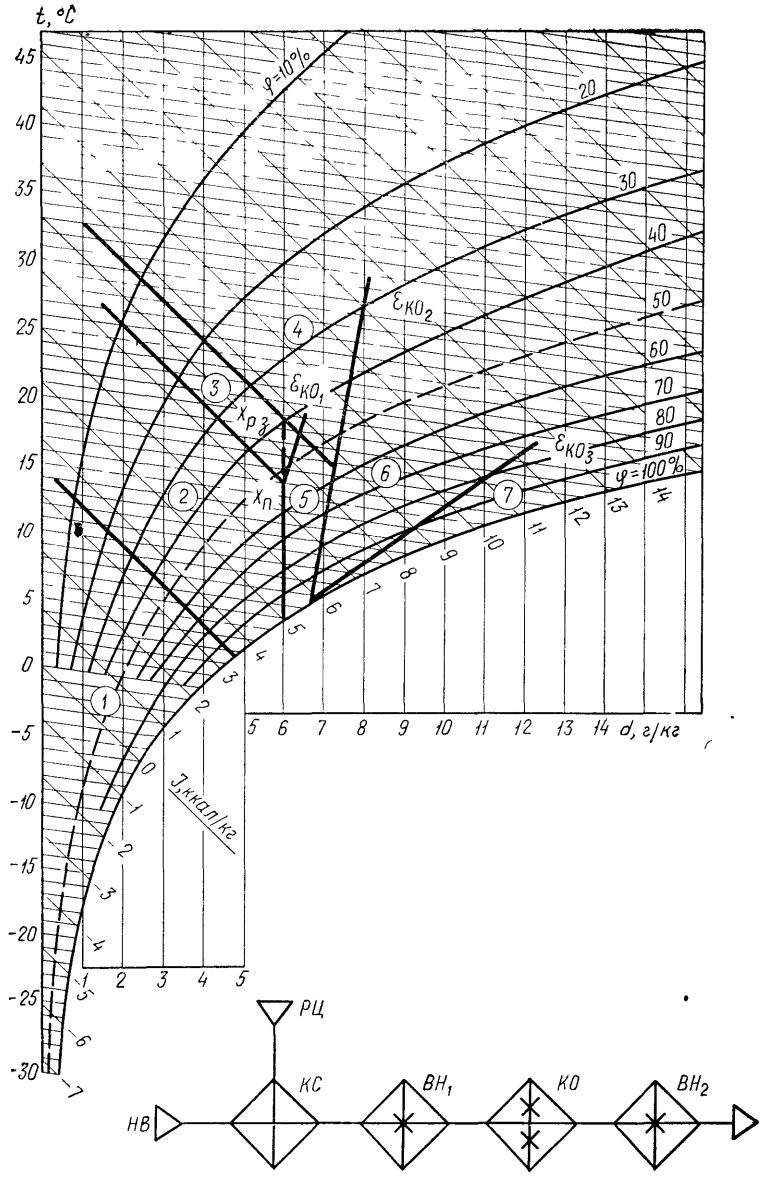


Рис. 1.33. Структура и алгоритм функционирования СКВ с использованием канала рециркуляции

лежащих в пределах $I_н > I_{р.з}$ и слева от линии $\varepsilon_{КО_2}$, осуществляется смешение минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным и политропное охлаждение с осушкой или увлажнением до параметров $X_п$ (четвертый технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих между линиями $\varepsilon_{КО_1}$ и $\varepsilon_{КО_2}$ при условиях $d_н > d_п$ и $I_н < I_{р.з}$, производится смешение переменного количества наружного воздуха с рециркуляционным до состояния, характеризуемого параметрами, лежащими на линии $\varepsilon_{КО_1}$, с последующим политропным охлаждением и осушкой смеси до параметров $X_п$ (пятый технологический режим). При значениях $X_{н.в}$, лежащих между линиями $\varepsilon_{КО_2}$ и $\varepsilon_{КО_3}$, осуществляется смешение переменного количества наружного воздуха с рециркуляционным, политропное охлаждение и осушка смеси до $d = d_п$ и подогрев до $t_п$ (шестой технологический режим). При значениях параметров наружного воздуха, лежащих ниже линии $\varepsilon_{КО_3}$, производится смешение минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным, нагрев смеси и политропное охлаждение и осушка до $d = d_п$ и второй подогрев до $t_п$ (седьмой технологический режим).

Таким образом, в рассматриваемом случае функциональная схема тепловлажностной обработки воздуха представляет собой последовательность смесительной камеры, калорифера первого подогрева, камеры орошения и калорифера второго подогрева (см. рис. 1.33). Алгоритм функционирования системы кондиционирования воздуха состоит из последовательной совокупности процессов тепловлажностной обработки воздуха, включающей семь технологических режимов. Переход с одного режима на другой или автоматическое переключение режимов, а также управление процессами внутри режимов осуществляются согласно подлежащему разработке алгоритму управления СКВ.

Для цехов прецизионного машиностроения нормируемые показатели температуры и влажности воздуха в рабочей зоне лежат в пределах $19°C \leqslant t_{р.з} \leqslant 21°C$ и $30\% \leqslant \varphi_{р.з} \leqslant 60\%$. Такие требования к поддержанию значений t и φ выполняются в системе кондиционирования воздуха, снабженной общепромышленными приборами и устройствами, при $t_{max} - t_{min} = 2\Delta t_{САР}$ и $\varphi_{max} - \varphi_{min} > 2\Delta\varphi_{САР}$ [28]. С позиций управления СКВ область допустимых значений ее выходных переменных $X_{р.з}$ ог-

раничивается, например, областью $t_{р\,з}=20\pm1°C$ и $\varphi_{р\,з}=(35\div55)\pm5\%$ (рис. 1.34)

В рассматриваемой системе кондиционирования воздуха влагоизбытки в обслуживаемом помещении равны нулю. На систему накладываются ограничения: $G_{рц\,II}=0$ и $G_п=\text{const}$. Граничные значения соотношений в расходе воздуха имеют вид. $G_п=G_н+G_{рцI}=\text{const}$; $G_{н\,max}=G_п$; $G_{н\,min}=0{,}2\ G_п$ Расход воздуха выбирается по тем же соображениям, что и в предыдущих примерах, средства технического обеспечения те же

При значениях параметров наружного воздуха $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $I_н<I_1$, в установке кондиционирования воздуха производится смешение минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным, нагрев смеси до $I=I_{п\,min}$ и адиабатное увлажнение до $d=d_{п\,min}$ (первый технологический режим). При значениях $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $I_1\leqslant I_н\leqslant I_{п\,min}$ и $d_н<d_{п\,min}$, производится смешение переменного количества наружного воздуха с рециркуляционным до состояний смеси, характеризуемых $I_{сп}=I_{п\,min}$, и адиабатное увлажнение до $d=d_{п\,min}$ (второй технологический режим). При значениях $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $d_{п\,min}\leqslant d_н\leqslant d_{п\,max}$, и $t_н<t_п$ производится только смешение переменного количества наружного и рециркуляционного воздуха до температуры смеси, равной $t_п$ (третий технологический режим). При значениях $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $I_{п\,min}\leqslant I_н\leqslant I_{п\,max}$, и $t_н>t_п$ осуществляется только адиабатное увлажнение максимального количества наружного воздуха до $t=t_п$ (четвертый технологический режим). При значениях $X_{н\,з}$, лежащих в пределах $I_{п\,max}<I_п$ $I_н\leqslant I_{р\,з}$ и выше линии $\varepsilon_{КО}$, производится политропное охлаждение с увлажнением или осушкой максимального количества наружного воздуха до $d=d_{п\,max}$ (пятый технологический режим) При значениях $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $d_н>d_{п\,max}$, $I_н<I_{р\,з}$ и ниже линии $\varepsilon_{КО}$, осуществляется смешение переменного количества наружного воздуха с рециркуляционным до состояния смеси, характеризуемого параметрами, лежащими на линии $\varepsilon_{КО}$, и политропное охлаждение с осушкой до $d=d_{п\,max}$ (шестой технологический режим). И, наконец, при значениях $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $I_н>I_{р\,з}$, производится смешение минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным с последующим политропным охлаждением и осушкой или

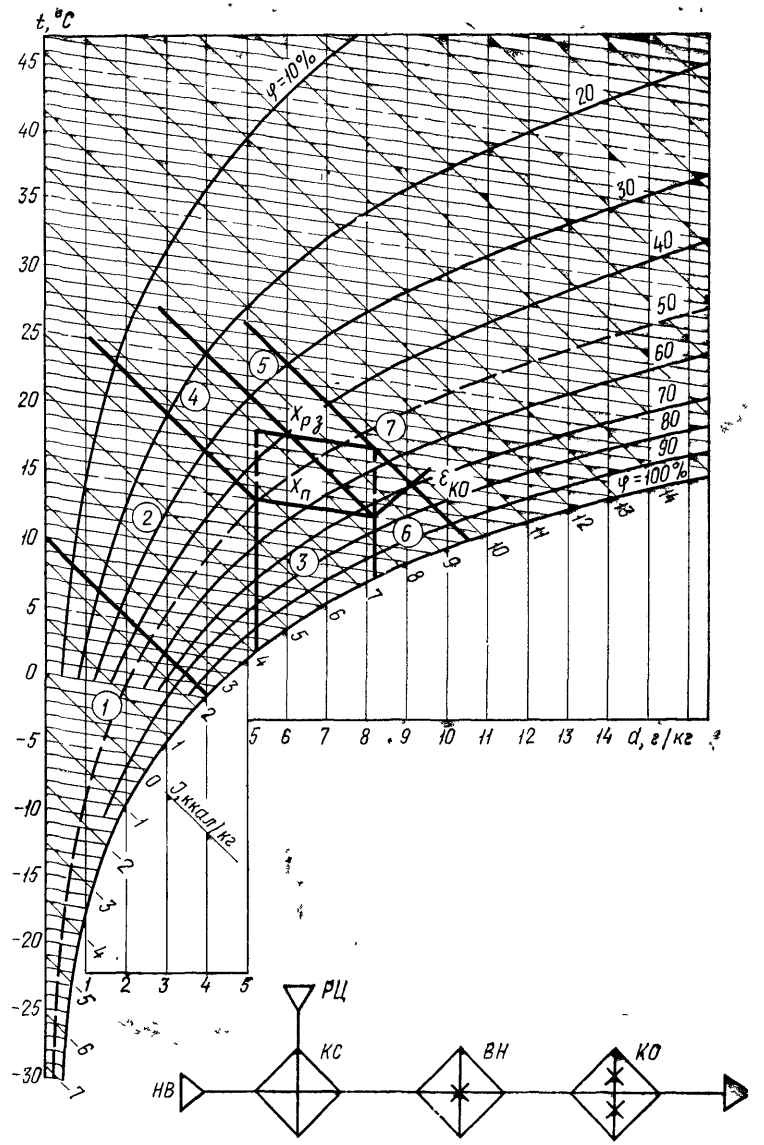


Рис. 1.34. Структура и алгоритм функционирования СКВ (выходные переменные сводятся в линию)

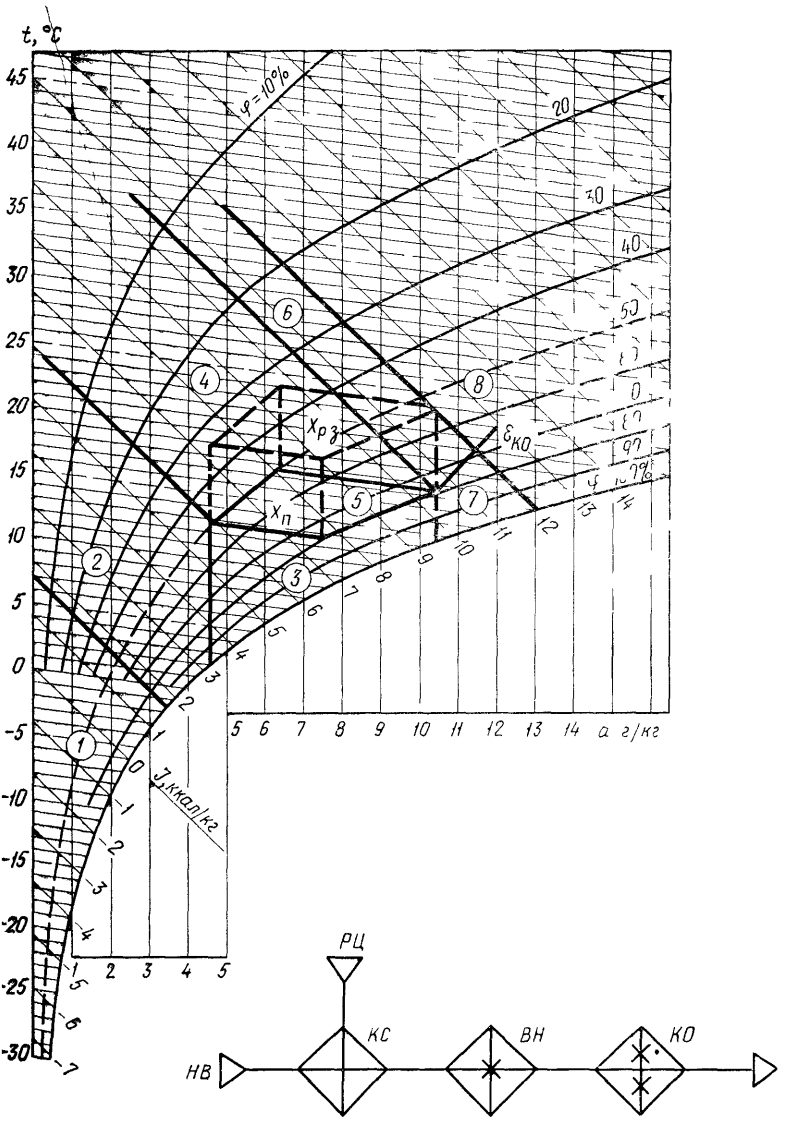


Рис. 1.35. Структура и алгоритм функционирования СКВ (выходные переменные сводятся в область)

увлажнением до $d=d_{п\,max}$ (седьмой технологический режим).

Таким образом, в рассмотренной группе систем функциональная схема тепловлажностной обработки воздуха

представляет собой последовательность трех аппаратов — смесительной камеры, калорифера и камеры орошения (см. рис. 1.34). Алгоритм функционирования подобных систем кондиционирования воздуха состоит из последовательной совокупности процессов тепловлажностной обработки воздуха, включающей семь технологических режимов. Переход с одного режима на другой или автоматическое переключение режимов, а также управление процессами внутри режимов осуществляется согласно подлежащему разработке алгоритму управления системой

Если в рассмотренной в предыдущем примере СКВ область нормируемых значений температуры и влажности в обслуживаемом помещении можно расширить и трансформировать из линии в пространство $t_{р\,з} = (19—24) \pm 1°C$; $\varphi_{р\,з} = (35—50) \pm 5\%$, как это представлено на рис. 1.35, то функциональная схема технологического процесса КВ не претерпевает изменения. Однако несколько изменяется алгоритм функционирования системы. Появляется новый технологический режим (на рис. 1.35 и далее обозначен пятым), в котором при значениях параметров наружного воздуха, равных значениям параметров приточного воздуха, отсутствует тепловлажностная обработка воздуха. Границы четвертого технологического режима расширяются, а процесс адиабатного увлажнения ведется до $t = t_{п\,max}$ или $\varphi = \varphi_{п\,min}$. Таким образом, в данной системе кондиционирования воздуха алгоритм функционирования будет состоять из восьми технологических режимов.

При синтезе алгоритма функционирования наиболее общим будет случай системы кондиционирования воздуха, представленной на рис. 1.36. В данной системе сохраняются ограничительные условия на постоянный расход приточного воздуха и возможность использования только первой рециркуляции. Но в то же время соотношения $X_{р\,з}$ и $X_п$, а также $G_п$ и $G_{н\,min}$ приводят к тому, что при сохранении структуры в алгоритме функционирования системы дополнительно появляются два новых технологических режима.

При значениях параметров наружного воздуха $X_{н\,в}$, лежащих в пределах $d^*_{п\,min} \leqslant d_н \leqslant d^*_{п\,max}$ и $t_н < t^*_{п\,min}$ или $\psi_н < \varphi_{п\,max}$, в установке кондиционирования воздуха производится смешение минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным и нагрев до

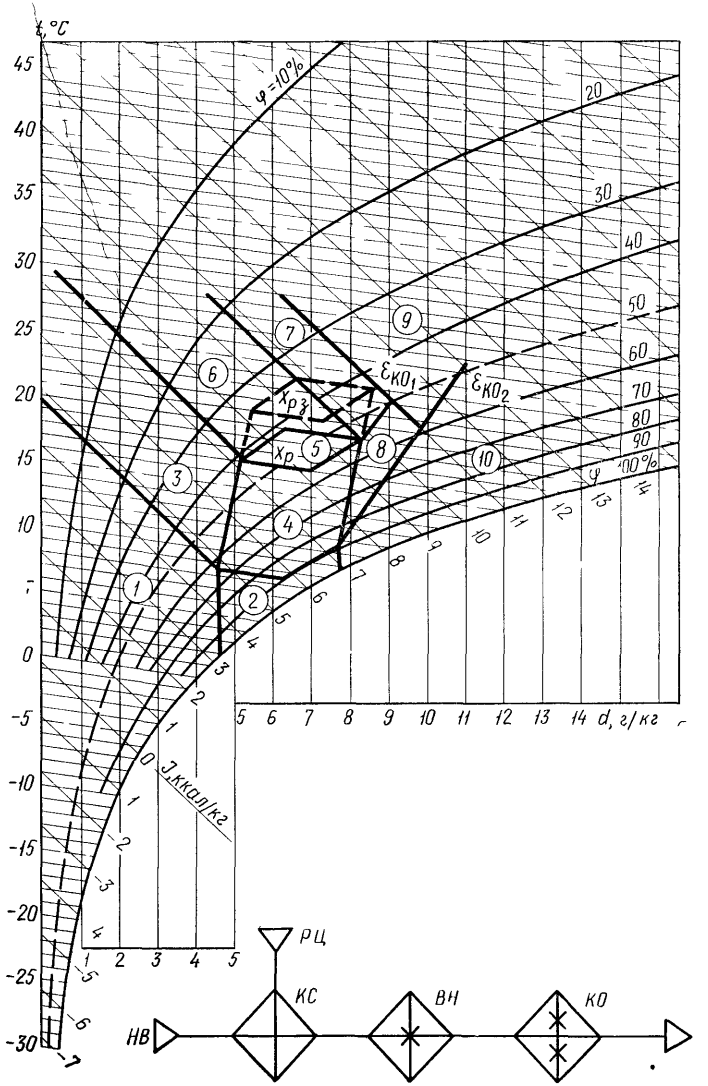


Рис 1 36. Структура и алгоритм функционирования ЦСКВ с наличием влаго выделений в ОП и с использованием канала рециркуляции

$t_{см}=t_{п\,min}$ или $\varphi_{см}=\varphi_{п\,max}$ (второй технологический режим). При значениях $X_{н\text{-}в}$, лежащих в пределах $d_н>d^*_{п\,max}$ и ниже линии $\varepsilon_{КО_2}$, производится смешение минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным, нагрев смеси до состояний, характеризуемых параметрами линии $\varepsilon_{КО_2}$, с последующим политропным охлаждением и осушкой до $d=d_{п\,max}$ (десятый технологический режим). Таким образом, в рассмотренной системе функциональная схема тепловлажностной обработки воздуха представляет собой последовательность трех аппаратов — смесительной камеры, калорифера и камеры орошения (см. рис. 1.36). Алгоритм функционирования СКВ состоит из последовательной совокупности процессов тепловлажностной обработки воздуха, включающей десять технологических режимов.

Представленный алгоритм функционирования является наиболее полным для любых центральных однозональных СКВ с постоянным расходом воздуха и первой рециркуляцией. Это объясняется тем, что рассматриваемая СКВ характеризуется первым классом нагрузок [8]. При соответствующем изменении соотношений $X_{р.з}$, $X_п$, $G_п$ и $G_{н\,min}$ система кондиционирования воздуха будет характеризоваться другим классом нагрузок, как это показано на рис. 1.37. При этом структура будет оставаться неизменной, а алгоритм функционирования СКВ будет упрощаться (с учетом того, что выходные переменные лежат в области $t_{р.з}=(19—24)\pm1°С$; $\varphi_{р.з}=(35—55)\pm5\%$.

Синтез алгоритма функционирования дает наиболее полную информацию о структуре системы и подлежащих управлению технологических режимов ее работы. Поэтому алгоритм функционирования СКВ является основой для последующей разработки алгоритмов управления и далее автоматизированной системы в целом.

Представленные структуры технологических процессов кондиционирования воздуха и алгоритмы функционирования СКВ являются субоптимальными по критерию минимума расхода энергии, так как получены в результате ручного пошагового моделирования. Действительно, при использовании, например, одной только первой рециркуляции совершенствуется СКВ и в то же время усложняется алгоритм функционирования. Это

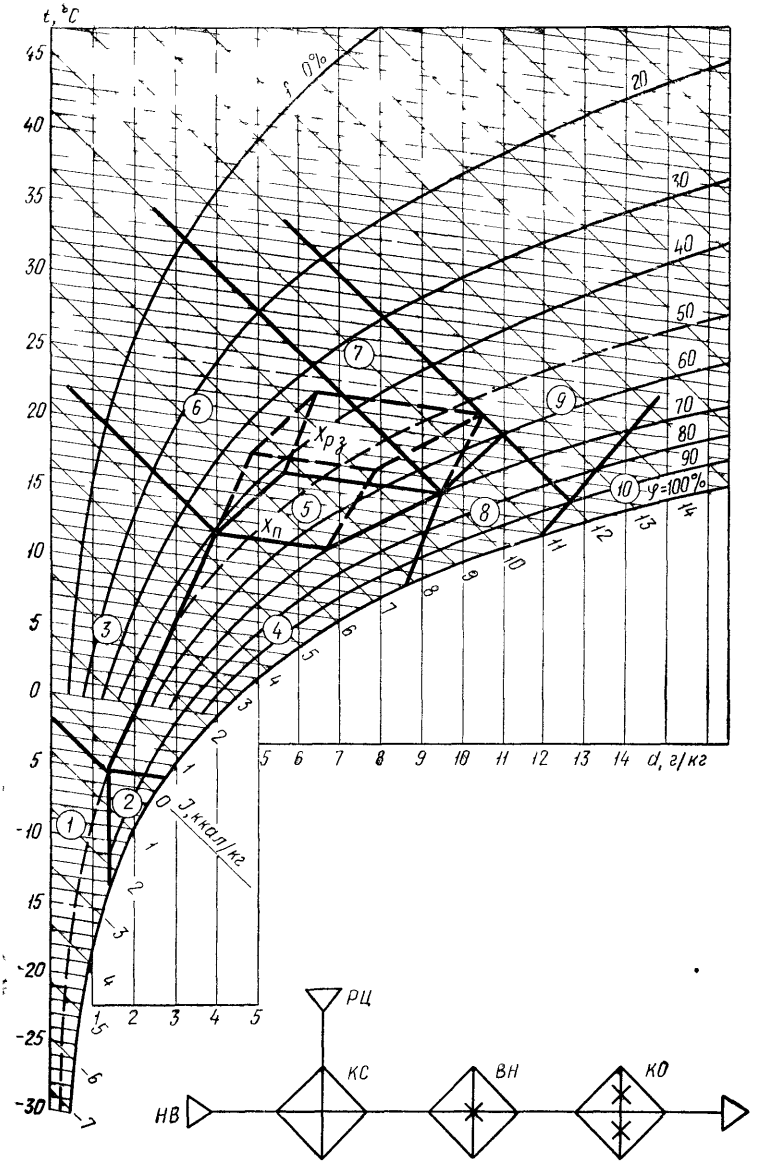


Рис 1 37. Структура и алгоритм функционирования СКВ II класса нагрузок (выходные переменные лежат в области)

естественно, поскольку появляется еще канал управляемого воздействия на процессы в системе. В таких условиях возникает многовариантность алгоритмов функционирования. При решении задачи компромиссного выбора наилучшего варианта проявляется несовершенство ручного пошагового моделирования, заключающееся в ограниченной производительности. Это видно из примеров СКВ, представленных на рис. 1.33 (пятый — седьмой режимы) и рис. 1.36 (восьмой и десятый режимы), где очевидно наличие других вариантов построения структур и алгоритмов функционирования, а выбор наилучшего из них является многокритериальной задачей. Поэтому наиболее полно решение задачи оптимизации систем кондиционирования воздуха и оптимизации управляемых режимов их работы достижимо с помощью применения метода математического моделирования.

В то же время выполненная задача синтеза и представленные в результате алгоритмы функционирования центральных однозональных СКВ достаточны для дальнейшей разработки метода синтеза алгоритмов управления системами данного класса и разработки принципов их технической реализации.

17. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Разработка общей концепции систем кондиционирования воздуха как управляемых систем позволяет определить цель и назначение, структуры и алгоритмы управляющей части системы, получившей название системы автоматического управления кондиционированием воздуха (САУ КВ).

В системах кондиционирования воздуха следует различать автоматическое управление процессами и автоматическое регулирование (стабилизацию) хода процессов.

Задачей управления СКВ является активное вмешательство непосредственно в ход технологического процесса путем изменения каналов регулирования, выработки заданий на значения регулируемых переменных состояния, введения отдельных управляющих воздействий по разомкнутым каналам, на реализацию совокупности технологических процессов, т. е. на реализацию того или иного технологического режима.

Задачей регулирования (стабилизации) является

поддержание некоторых выходных переменных состояния на заданном уровне путем использования определенных постоянных для заданного технологического режима каналов обратной связи по отклонению.

Процессы тепловлажностной обработки воздуха характеризуются заданной периодичностью и последовательностью в пространстве базисных координат состояния Контуры стабилизации переменных, определяемые заданной последовательностью технологических процессов, помимо взаимосвязанности характеризуются структурной вариантностью и переменностью. Это означает, что одно и то же регулирующее воздействие в различных технологических режимах может быть в составе различных контуров стабилизации, и в одном и том же контуре стабилизации внутри одного технологического режима могут использоваться различные каналы регулирующих воздействий. Например, соотношения наружного и рециркуляционного воздуха в камере смешения или расход воды в камере орошения могут изменяться в процессе стабилизации либо температуры, либо влажности воздуха на выходе из УКВ. И далее, температура на выходе из УКВ может поддерживаться, например, путем изменения расхода или температуры холодной воды в камере орошения.

Таким образом, в процессе кондиционирования воздуха, как и во всяком другом технологическом процессе, имеется ряд функциональных и технических задач и возможностей, наиболее полно представляющих данный класс систем и определяющих структуру технологического тракта, которая, в свою очередь, оказывает основное влияние на функциональную структуру и состав алгоритмов автоматического управления.

Система автоматического управления кондиционированием воздуха представляет собой совокупность средств, которые на основе получения и использования информации о наблюдаемых переменных состояния технологического процесса кондиционирования микроклимата поддерживают заданные значения параметров микроклимата в обслуживаемом помещении при функционировании системы в условиях непрерывного действия возмущений путем обеспечения рационального протекания того или иного технологического процесса, изменения тепловлажностного состояния и перемещения воздуха, а также необходимой по тем или иным мотивам оптимизации смены одной совокупности технологи-

ческих процессов, т. е. одного технологического режима, на другую.

Анализ задач контроля и управления процессами кондиционирования микроклимата показывает, что в общем комплексе задач управления СКВ могут быть выделены три функциональные группы:

включение и выключение системы с целью исключения предаварийных ситуаций, а также включение и управление нештатными режимами работы системы;

автономная стабилизация заданных переменных состояния на выбранных промежуточных этапах технологического тракта и на его выходе, обеспечивающая достижение цели функционирования системы, а также возможности оптимального протекания технологического процесса;

управление последовательностью переключений технологических режимов (ПТР) и коммутирование необходимых контуров автоматической стабилизации в зависимости от выбранного по тем или иным мотивам оптимизации алгоритма функционирования.

Выделение функциональных групп управления СКВ предопределяет иерархическую многоуровневую структуру функций управления (рис. 1.38).

Первый уровень составляет совокупность средств пуска и останова системы, а также средств сигнализации включения или перевода на нештатный режим работы при возникновении предаварийной ситуации, например замерзания по сигналу t_{w_2} температуры обратной воды, падения давления теплоносителя по сигналу P_{w_1}, выключения вентилятора по сигналу $P_В$ расхода приточного воздуха, образования застойных воздушных зон в ОП по сигналу $\Delta t_{доп}$ разности температур приточного воздуха и воздуха в рабочей зоне и т. д.

Второй уровень составляет совокупность средств стабилизации $P_ц$ и $P_к$, включающих чувствительные элементы наблюдаемых переменных состояния, усилители-преобразователи, исполнительные механизмы и регулирующие органы.

Третий уровень составляет совокупность средств управления переключением технологических режимов (ПТР), включающих датчики наблюдаемых переменных состояния, а также устройства формирования управляющих сигналов и коммутации контуров регулирования.

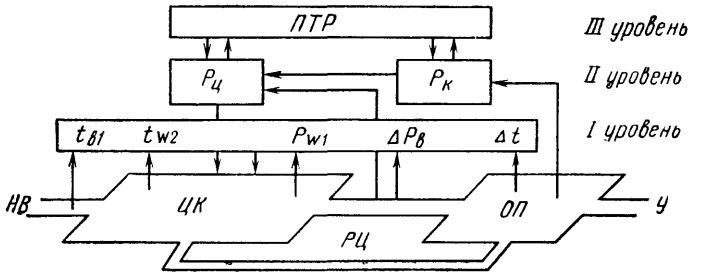


Рис. 1.38 Иерархическая структура функций управления

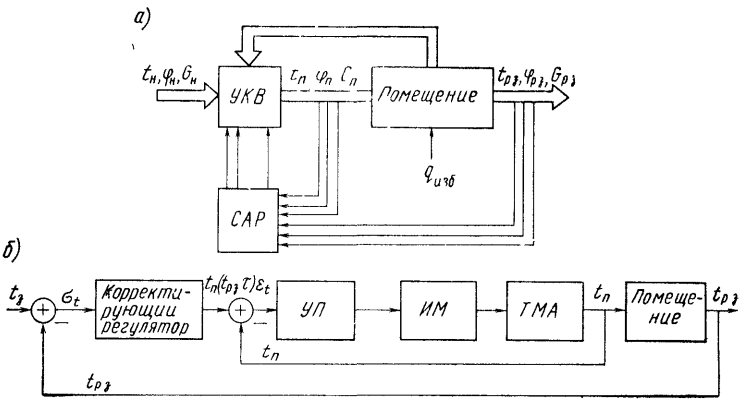


Рис. 1.39. Структура каскадного способа регулирования

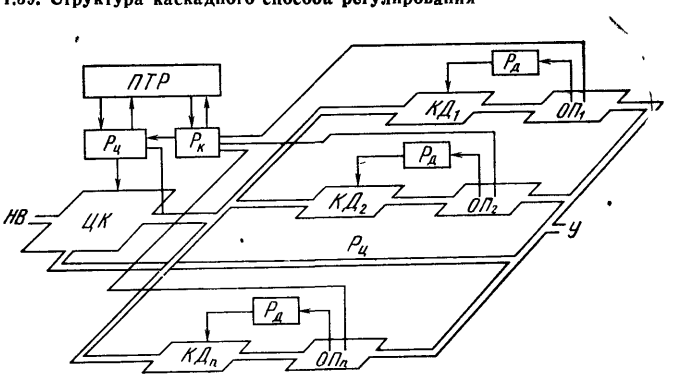


Рис. 1.40. Контуры автоматической стабилизации в многозональной СКВ

Многоуровневая иерархическая структура управления предусматривает выполнение функциональных задач низшим уровнем независимо от более высших. Это качество позволяет организовать управление СКВ с различной степенью развития. По условиям эксплуатации САУ КВ может быть реализована только с устройствами пуска, останова и приборами предаварийной защиты, т. е. при наличии низшего уровня управления. Остальные функции управления при этом в той или иной мере осуществляются обслуживающим персоналом вручную. Низший уровень может быть дополнен вторым уровнем, т. е. приборами и устройствами автоматической стабилизации, при этом функции переключения технологических режимов, автоматически осуществляемые приборами и устройствами ПТР, при их отсутствии осуществляются вручную.

Функциональная структура управляемой части СКВ (включающая установку кондиционирования воздуха и обслуживаемое помещение), а также условия заводского изготовления УКВ и строительства ОП, условия монтажа, настройки и последующей эксплуатации системы предопределяют целесообразность применения каскадного способа регулирования (рис. 1.39, *а*).

Помимо не явно выраженной иерархической структуры управления СКВ по вертикали развития управляющих функций в САУ КВ отмечается явно выраженная последовательность этапов выполнения функций второго вертикального уровня (рис. 1.39, *б*) — уровня автоматической стабилизации переменных состояния, развивающаяся как бы по горизонтали технологического тракта кондиционирования воздуха.

Целесообразность использования каскадного способа регулирования обусловливается применением в СКВ двух последовательных этапов подготовки кондиционированного воздуха. Центральная многозональная СКВ (рис. 1.40) может включать первый этап обработки наружного воздуха (НВ) — центральный кондиционер (ЦК) и второй этап — ряд концевых доводчиков (КД), каждый из которых может представлять собой полную УКВ, осуществляющую осушку или увлажнение, нагрев или охлаждение воздуха. Подобная последовательность функций технологического тракта и его разветвляющаяся древовидная структура предопределяют схему контуров автоматической стабилизации переменных состояния.

Использование в системе кондиционирования воздуха каких-либо устройств «доводки» параметров приточного воздуха (калориферы второго подогрева, кондиционеры-доводчики и т. д.) ни в коей мере не нарушает предложенной структуры. Средствами автоматической защиты и стабилизации оснащается центральная часть УКВ до доводчиков, в то же время управление работой доводчика ведется независимо от центральной части по сигналам о выходных переменных состояния в обслуживаемом помещении. С позиций глобальной оптимизации СКВ необходимо использование программного управления центральной частью УКВ, при этом режимы работы доводчиков автономны и независимы.

Средства автоматического управления работой любых «доводочных» устройств не должны структурно объединяться со средствами автоматической защиты и стабилизации центральной части УКВ. Любой доводчик следует рассматривать как УКВ более низкого уровня иерархии тепломассообменных устройств. Поэтому в зависимости от собственной структуры и сложности реализуемых технологических процессов он должен быть снабжен средствами защиты и стабилизации с возможными дополнительными входами для сигналов управления, поступающих от более высоких уровней САУ КВ. В зависимости от функционального совершенства доводчик можно рассматривать как локальную местную установку кондиционирования воздуха внутри большой центральной УКВ, входящую в многоуровневую систему кондиционирования воздуха. Оснащение подобной системы кондиционирования воздуха средствами автоматического управления производится при условии строгого соблюдения уровней иерархии и последовательности этапов выполнения функций среднего уровня. В противном случае достижение универсального технического решения аппаратного оформления средств управления затруднительно.

По условиям изготовления УКВ, в которую могут входить ЦК и КД, обеспечения максимальной заводской готовности и интегрированности УКВ и средств автоматики, а также монтажа, настройки и эксплуатации СКВ в целом обратная связь контура стабилизации параметров воздуха в ОП охватывает лишь регуляторы $Р_к$ процессов в КД. Регуляторы $Р_ц$ процессов в ЦК включены по схеме стабилизации параметров воздуха в точке системы между ЦК и КД. Эти регуляторы целесо-

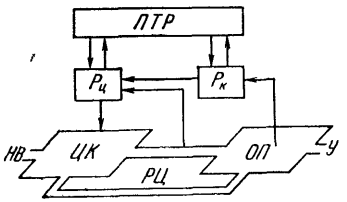


Рис. 1.41 Контур автоматической стабилизации в однозональной СКВ

образно сделать подчиненными, формирование коррекции задания для которых выполняется корректирующим регулятором $Р_к$, сигнал обратной связи которого поступает от датчика, установленного в ОП. В корректирующем регуляторе $Р_к$ возможно использование нескольких каналов обратной связи из каждого ОП. При этом выбор канала сигнала обратной связи производится по априорной информации о тепловлажностных нагрузках согласно условиям оптимизации по тем или иным мотивам. Селекция сигнала обратной связи зависит от совершенства алгоритма управления и технических средств его реализации. В простейшем случае используется сигнал обратной связи постоянно из одного ОП, принятого как бы за представительное; в другом случае возможно использование нескольких сигналов с периодическим переключением и, наконец, возможна селекция эквивалентного сигнала обратной связи путем логического сравнения или вычислений.

Выбор или вычисление и формирование эквивалентного сигнала обратной связи производится аппаратурой более высокого уровня управления СКВ, например уровня переключения режимов работы технологического оборудования.

Предложенная структура целесообразна и для центральной однозональной СКВ (рис. 1.41), в которой имеется один канал корректирующей обратной связи по каждой из стабилизируемых переменных. В центральной однозональной СКВ кондиционер-доводчик отсутствует, тем не менее остается контур стабилизации параметров приточного воздуха, регуляторы которого являются подчиненными, а формирование коррекции задания для них производится корректирующими регуляторами $Р_к$ по сигналам обратной связи из ОП.

Использование каскадной схемы регулирования позволяет достичь определенной функциональной и структурной автономности контуров автоматической стабилизации параметров воздуха как на выходе из центрального кондиционера, так и в ОП, а также понизить порядок астатизма системы. Управление несколькими

взаимосвязанными переменными при недостаточно полно учтенном взаимном влиянии между отдельными контурами автоматической стабилизации может значительно ухудшить функционирование системы и даже привести к неустойчивости. Это обстоятельство усугубляется тем, что для систем высокого порядка астатизма некоторое увеличение коэффициента воздействия по ошибке всегда приводит к неустойчивости.

Кроме того, использование каскадной схемы облегчает достижение требуемого качества перехода с одного технологического режима на другой. Чистое запаздывание или монотонный плавный переход из одного состояния в другое наблюдается лишь в отдельных случаях, например выключение калорифера первого подогрева или включение холодильной машины. В других случаях, например реверс воздушных заслонок, могут возникнуть колебания и недопустимо большие отклонения стабилизируемых переменных, что также может быть причиной потери устойчивости.

Одной из центральных проблем теории и техники управления СКВ является проблема оптимального переключения параллельно-последовательных режимов работы технологического оборудования. Переключение режимов работы оборудования встречается в управлении СКВ и известно как технические решения «последовательной работы исполнительных механизмов» и «реверс воздушных заслонок». Однако наиболее успешное решение задачи определения оптимальной стратегии переключений достигается на основе использования аппарата теории термодинамической модели процессов в СКВ [8], а также изложенных выше положений об иерархии функций управления и последовательности (этапах) технологических функций СКВ.

В зависимости от степени полноты предварительных априорных сведений о характеристиках управляемой системы и характере внешних воздействий возможны различные подходы к решению этой проблемы — детерминированный, стохастический и адаптивный. Полагая, что сведения об управляемой системе кондиционирования воздуха, а также внешних и внутренних воздействиях достаточно известны, задачу оптимального переключения технологических режимов можно решить, используя детерминированный подход. При этом чем большей априорной информацией мы располагаем, тем надежнее можно решить проблему стратегии ПТР.

Моделирование системы кондиционирования воздуха позволяет определить конечное число технологических режимов, функционирование которых определяется тем же числом технологических зон в пространстве I—d-диаграммы. Взаимное расположение зон и их границы определяются соотношением допустимых состояний $X_{\text{н в}}$, $X_{\text{п}}$ и $X_{\text{р.з}}$. Очевидно, что следствием текущих изменений параметров наружного воздуха и тепло- и влагоизбытков или стоков в обслуживаемом помещении, приводящих к перемещению переменных состояния системы из одной технологической зоны в другую, по условиям оптимизации должен быть управляемый переход в функционировании СКВ с одного технологического режима на другой.

Задача синтеза алгоритма ПТР формируется так, чтобы искомый управляемый переход с одного режима на другой производился по программе, основанной на использовании информации о граничном состоянии всех возможных управлений, о текущих управляющих воздействиях и предельно допустимых значениях параметров воздуха в обслуживаемом помещении без использования информации о параметрах наружного и приточного воздуха (кроме одного значения $I_{\text{н}}=I_{\text{р з, max}}$), а также каких-либо вычислений для отображения процессов и переменных состояний системы в пространстве I—d-диаграммы.

В таком случае решается задача построения автомата по заданной совокупности информации об управляемой СКВ с реализацией конечного числа булевых функций. Задача анализа состоит в определении для искомого автомата его поведения на основе нахождения логической зависимости между сигналами о состоянии управляемой СКВ и управляющими воздействиями. Разработка алгоритма дешифрования входной информации и коммутирования выходных сигналов приводит к созданию устройства логического управления, являющегося основой управляющей системы, получившей название программно-параметрической системы автоматического управления кондиционированием воздуха (ПП САУ КВ).

Решение проблемы алгоритмизации программно-параметрического управления целесообразно проиллюстрировать на примере задачи управления наиболее общей из центральных однозональных СКВ (рис. 1.42) с

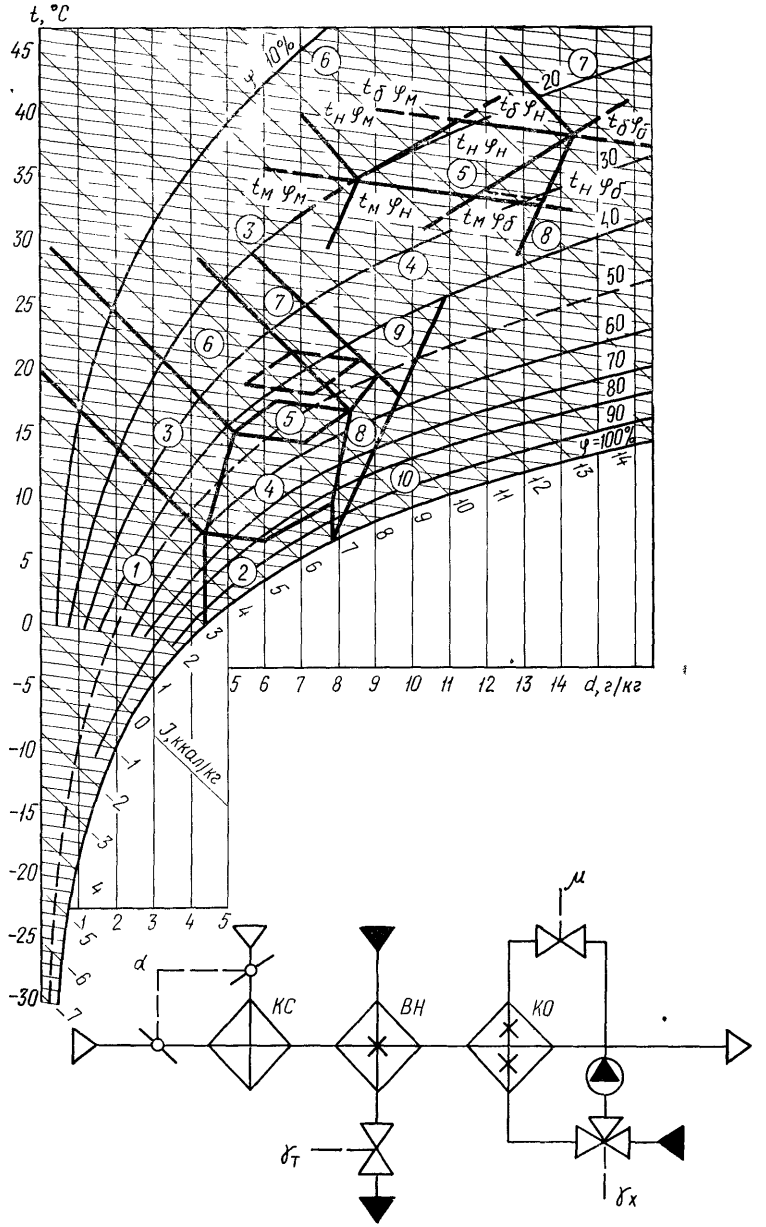


Рис. 1.42. Структура и алгоритм управления

учетом вынужденных и специальных ограничений, имеющихся в системах, представленных на рис. 1.36 и 1.37. Следует, однако, отметить, что алгоритм управления центральной однозональной или многозональной СКВ с однохарактерными нагрузками I класса (см. рис. 1.42) является общим для любых однозональных систем с постоянным расходом воздуха. С теми или иными упрощениями данный алгоритм применим для всей группы СКВ, показанных на рис. 1.29—1.36.

Технологические режимы обработки воздуха и алгоритм работы дешифратора рассматриваются с позиций управления системой, поэтому вводятся количественные характеристики управляющих воздействий α, $\gamma_т$, $\gamma_х$ и μ (см. рис. 1.42), которые имеют следующий смысл:

$\alpha_i = G_{нi}/G_{пi}$ — коэффициент использования наружного воздуха, где $G_{нi} = G_{н\,min} + \Delta G_{нi}$; $G_{пi} = G_{нi} + G_{р\,цi}$ (здесь $\Delta G_{нi} = var$, $G_{р.цi} = var$ — текущие значения соответственно дополнительного к минимально необходимому расходу наружного воздуха и расхода рециркуляционного воздуха; $\alpha^* \leqslant \alpha \leqslant 1$;

$\gamma_т = G_{\text{в}т_i}/G_{\text{в}т_0}$ — коэффициент теплопроизводительности калорифера, характеризуемый степенью открытия клапана на трубопроводе теплоносителя, где $G_{\text{в}т_i}$ и $G_{\text{в}т_0}$ максимальные значения соответственно текущего и расчетного расхода теплоносителя; $0 \leqslant \gamma_т \leqslant 1$;

$\gamma_х = G_{\text{в}х_i}/G_{\text{в}х_0}$ — коэффициент расхода холода, характеризуемый степенью открытия клапана на трубопроводе подачи холодной воды, где $G_{\text{в}х_i}$ и $G_{\text{в}х_0}$ — максимальные значения соответственно текущего и расчетного расхода хладоносителя; $0 \leqslant \gamma_х \leqslant 1$;

$\mu = (\varphi_0 - \varphi_1)(\varphi_0 - \varphi_2)$ — степень влажностной обработки воздуха в камере орошения, где φ_0, φ_1, φ_2 — значения относительной влажности воздуха соответственно перед камерой и за ней (φ_1 — при управляемом, а φ_2 — неуправляемом режимах ее работы); $0 \leqslant \mu \leqslant 1$.

Характер режимов тепловлажностной обработки воздуха и их последовательность для квазистационарного состояния ($Q = const$, $W = const$) при изменяющихся параметрах наружного воздуха могут быть проиллюстрированы следующим образом (см. рис. 1.42).

Пятый режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *5*. Максимальное количество наружного воздуха подается в обслуживаемое помеще-

ние без тепловлажностной обработки. Температура и относительная влажность воздуха в рабочей зоне изменяются ($t=\text{var}, \varphi=\text{var}$) в допустимых пределах $t_{\min} \leqslant t \leqslant t_{\max}$, $\varphi_{\min} \leqslant \psi \leqslant \varphi_{\max}$ под влиянием изменения температуры и влажности наружного воздуха, а также отклонений теплоизбытков ($\pm\Delta Q$) и влагоизбытков ($\pm\Delta W$) и стоков в помещении. Выход t и φ из заданных допустимых пределов изменения контролируется с помощью датчиков — реле, выдающих команды: «Меньше» ($t_{\text{м}} < t_{\min}$; $\varphi_{\text{м}} < \varphi_{\min}$), «Норма» ($t_{\min} \leqslant t_{\text{н}} \leqslant t_{\max}$; $\varphi_{\min} \leqslant \varphi_{\text{н}} \leqslant \varphi_{\max}$), «Больше» ($t_{\text{б}} > t_{\max}$; $\varphi_{\text{б}} > \varphi_{\max}$). Команды «Меньше» и «Больше» свидетельствуют о выходе параметров наружного воздуха за пределы зоны *5* и служат сигналами о необходимости перехода на другие технологические режимы работы в соответствии со следующими выражениями:

$$\left.\begin{array}{l} t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{м}} \rightarrow 3; \\ t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{м}} \vee t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{м}} \vee t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{м}} \rightarrow 6; \\ t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{н}} \vee t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{б}} \vee t_{\text{п}}\ \varphi_{\text{б}} \rightarrow 4; \\ t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{б}} \rightarrow 8. \end{array}\right\} \qquad (1.90)$$

Шестой режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *6*. В обслуживаемое помещение подается максимальное количество наружного воздуха, адиабатно увлажненного с определенной степенью ($\mu=\text{var}$) в камере орошения так, чтобы в зависимости от состояния наружного воздуха, тепловой и влажностной нагрузки помещения либо влажность φ поддерживалась на уровне $\varphi_{\min}$, а температура при этом может изменяться ($t=\text{var}$) в допустимых пределах $t_{\min} \leqslant t \leqslant t_{\max}$, либо температура поддерживалась на уровне $t_{\max}$, а влажность при этом может изменяться ($\varphi=\text{var}$) в допустимых пределах $\varphi_{\min} \leqslant \varphi \leqslant \psi_{\max}$. Это может осуществляться с помощью $P_{\text{с}}$-регуляторов температуры и влажности. Используя прерыватели, они реализуют астатический закон регулирования путем подачи на исполнительные механизмы постоянной скорости командных сигналов на увеличение ($\uparrow$) или уменьшение ($\downarrow$) степени влажностной обработки воздуха μ, следующим образом:

$$\left.\begin{array}{l} \mu\uparrow = t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{н}} \vee t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{м}} \vee t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{м}}; \\ \mu\downarrow = t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{н}} \vee t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{б}} \vee t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{б}}. \end{array}\right\} \qquad (1.91)$$

Уменьшение степени влажностной обработки воздуха

до нуля свидетельствует о переходе параметров наружного воздуха из зоны *6* в зону *5* и может служить сигналом о необходимости перехода на пятый технологический режим.

Сочетание $t_{\text{М}}\ \varphi_{\text{М}}$ служит сигналом о переходе на третий режим, а сочетание $t_{\text{Б}}\ \varphi_{\text{М}}$ — на восьмой режим, т. е.

$$\left.\begin{array}{l} \mu = 0 \rightarrow 5; \\ t_{\text{М}}\ \varphi_{\text{М}} \rightarrow 3; \\ t_{\text{Б}}\ \varphi_{\text{Б}} \rightarrow 8. \end{array}\right\} \qquad (1.92)$$

Третий режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *3*. В обслуживаемое помещение подается смесь переменного количества наружного воздуха с рециркуляционным, адиабатно увлажненная в камере орошения. При этом коэффициент использования наружного воздуха α и степень влажностной обработки μ выбираются так, чтобы обеспечить поддержание параметров воздуха в обслуживаемом помещении в точке $(t_{\min}, \varphi_{\min})$. Это может осуществляться с помощью P_c-регуляторов температуры и влажности путем подачи командных сигналов на увеличение или уменьшение α и μ следующим образом:

$$\left.\begin{array}{l} \alpha\uparrow = (+\Delta t) \vee (-\Delta\varphi); \\ \alpha\downarrow = (-\Delta t) \vee (+\Delta\varphi); \\ \mu\uparrow = (-\Delta\varphi) \vee (+\Delta t); \\ \mu\downarrow = (+\Delta\varphi) \vee (-\Delta t), \end{array}\right\} \qquad (1.93)$$

где $\Delta t = t_i - t_{\min}$; $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{\min}$.

Уменьшение расхода наружного воздуха до минимума, чему соответствует полное открытие клапана рециркуляции ($\alpha = \alpha^*$), служит сигналом для перехода на первый технологический режим, а его увеличение до максимума ($\alpha = 1$) — о переходе на шестой режим. Уменьшение коэффициента увлажнения до нуля служит сигналом о переходе на четвертый режим, т. е.

$$\left.\begin{array}{l} \alpha = \alpha^* \rightarrow 1; \\ \alpha = 1 \rightarrow 6; \\ \mu = 0 \rightarrow 4. \end{array}\right\} \qquad (1.94)$$

Первый режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *1*. Минимальное количество наружного воздуха смешивается с рециркуляционным

($\alpha=\alpha^*$), нагревается в калорифере ($\gamma_т=\text{var}$) и адиабатно увлажняется в камере орошения ($\mu=\text{var}$). Параметры воздуха в обслуживаемом помещении поддерживаются в точке ($t_{\min}$; $\varphi_{\min}$) путем воздействия $Р_с$-регуляторов t и φ на теплопроизводительность воздухонагревателя $\gamma_т$ и степень влажностной обработки μ в камере орошения следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
&\gamma_т\,(\uparrow) = (-\Delta t) \vee (+\Delta\varphi);\\
&\gamma_т\,(\downarrow) = (+\Delta t) \vee (-\Delta\varphi);\\
&\mu\ (\uparrow) = (-\Delta\varphi) \vee (+\Delta t);\\
&\mu\ (\downarrow) = (+\Delta\varphi) \vee (-\Delta t),
\end{aligned}\right\} \qquad (1.95)$$

где $\Delta t = t_i - t_{\min}$; $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{\min}$.

Уменьшение теплопроизводительности воздухонагревателя до нуля ($\gamma=0$) служит сигналом для перехода на третий технологический режим, а уменьшение до нуля степени увлажнения ($\mu=0$) — на второй режим, т. е.

$$\left.\begin{aligned}
&\gamma_т = 0 \to 3;\\
&\mu = 0 \to 2.
\end{aligned}\right\} \qquad (1.96)$$

Четвертый режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *4*. В обслуживаемое помещение подается смесь наружного и рециркуляционного воздуха так, чтобы обеспечить поддержание либо температуры на уровне $\varphi_{\min}$ при изменении влажности в диапазоне $\varphi_{\min}\leqslant\varphi\leqslant\varphi_{\max}$, либо влажности на уровне $\varphi_{\max}$ при изменении температуры в диапазоне $t_{\min}\leqslant t\leqslant t_{\max}$. Это можно осуществить путем увеличения или уменьшения расхода наружного воздуха α с помощью $Р_с$-регуляторов температуры и влажности. Используя прерыватели, они реализуют астатический закон регулирования путем подачи командных сигналов на исполнительные механизмы постоянной скорости для увеличения ($\uparrow$) или уменьшения ($\downarrow$) коэффициента использования наружного воздуха, следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
&\alpha\uparrow = t_Н\,\varphi_Н \vee t_Н\,\varphi_М \vee t_Б\,\varphi_Н;\\
&\alpha\downarrow = t_М\,\varphi_М \vee t_М\,\varphi_Б \vee t_Н\,\varphi_Б.
\end{aligned}\right\} \qquad (1.97)$$

Уменьшение расхода наружного воздуха до минимума служит сигналом о переходе на второй технологический режим, а его увеличение до максимума, что соответствует уменьшению расхода рециркуляционного воздуха до нуля, — на пятый режим.

Сочетание $t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{н}}$ служит сигналом о переходе на третий режим, а сочетание $t_{\text{б}}$ — на восьмой режим. Следовательно,

$$\left.\begin{aligned} &\alpha = 0 \to 2;\\ &\alpha = 1 \to 5;\\ &t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{м}} \to 3;\\ &t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{б}} \to 8. \end{aligned}\right\} \qquad (1.98)$$

Второй режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *2*. В обслуживаемое помещение подается смесь минимального количества наружного воздуха с рециркуляционным ($\alpha = \alpha^*$), подогревается в калорифере так, чтобы обеспечить поддержание либо температуры на уровне $t_{\min}$ при изменении влажности в диапазоне $\varphi_{\min} \leqslant \varphi \leqslant \varphi_{\max}$, либо влажности на уровне $\varphi_{\max}$ при изменении температуры в диапазоне $t_{\min} \leqslant t \leqslant t_{\max}$. Это может осуществляться с P_c-регуляторами температуры и влажности путем изменения теплопроизводительности воздухонагревателя следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} &\gamma_{\text{т}} \uparrow = t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{н}} \vee t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{б}} \vee t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{б}};\\ &\gamma_{\text{т}} \downarrow = t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{н}} \vee t_{\text{н}}\ \varphi_{\text{м}} \vee t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{м}} \vee t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{н}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.99)$$

Уменьшение теплопроизводительности воздухонагревателя до нуля служит сигналом о переходе на четвертый режим, сочетание $t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{м}}$ — на первый режим, а сочетание $t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{б}}$ — на десятый режим. Следовательно,

$$\left.\begin{aligned} &\gamma_{\text{т}} = 0 \to 4;\\ &t_{\text{м}}\ \varphi_{\text{м}} \to 1;\\ &t_{\text{б}}\ \varphi_{\text{б}} \to 10. \end{aligned}\right\} \qquad (1.100)$$

Седьмой режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *7*. Максимальное количество наружного воздуха политропно охлаждается и увлажняется или осушается в камере орошения и подается в обслуживаемое помещение, где параметры воздуха в рабочей зоне поддерживаются в точке ($t_{\max}$; $\varphi_{\max}$) путем изменения температуры холодной воды ($\gamma_{\text{х}} = \text{var}$) и степени увлажнения ($\mu = \text{var}$) в камере орошения. Это может осуществляться с помощью P_c-регуляторов температуры и влажности воздуха следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} &\gamma_x\ (\uparrow) = (+\Delta t) \vee (-\Delta \varphi);\\ &\gamma_x\ (\downarrow) = (-\Delta t) \vee (+\Delta \varphi);\\ &\mu\ (\uparrow) = (+\Delta \varphi) \vee (+\Delta t);\\ &\mu\ (\downarrow) = (-\Delta \varphi) \vee (-\Delta t). \end{aligned}\right\} \qquad (1.101)$$

Закрытие клапана на трубопроводе холодной воды ($\gamma_x=0$) служит сигналом о переходе на шестой технологический режим, а его полное открытие ($\gamma_x=1$) — на восьмой или девятый режим. В зависимости от команды сигнализатора теплосодержания наружного воздуха, настроенного на значение $I_{р\,з\,max}$, при $I_н<I_{р\,з\,max}$ осуществляется переход на восьмой режим, а при $I_н>I_{р\,з\,max}$ — на девятый режим. Уменьшение степени влажности обработки воздуха в камере орошения до нуля ($\mu=0$) при $\gamma_x=1$ также служит сигналом о переходе на восьмой режим. Следовательно,

$$\left.\begin{array}{l}\gamma_x=0\to 6;\\ (\gamma_x=1)\ (\mu=0)\to 8,\\ (\gamma_x=1)\ (I_н>I_{р\ з\ max})\to 9.\end{array}\right\} \qquad (1.102)$$

Восьмой режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *8*. Переменное количество наружного воздуха ($\alpha=$var) смешивается с рециркуляционным, смесь политропно охлаждается и осушается в камере орошения ($\gamma_x=1$; $\mu=$var) и подается в обслуживаемое помещение. Параметры воздуха в рабочей зоне поддерживаются в точке (t_{max}, φ_{max}) путем изменения коэффициента использования наружного воздуха и степени влажностной обработки воздуха μ с помощью P_c-регуляторов температуры и влажности воздуха следующим образом:

$$\left.\begin{array}{l}\alpha(\uparrow)=(+\Delta t)\vee(-\Delta\varphi);\\ \alpha(\downarrow)=(-\Delta t)\vee(+\Delta\varphi);\\ \mu(\uparrow)=(-\Delta\varphi)\vee(+\Delta t).\\ \mu(\downarrow)=(+\Delta\varphi)\vee(-\Delta t),\end{array}\right\} \qquad (1\ 103)$$

где $\Delta t_в=t_в-t_{max}$; $\Delta\varphi=\varphi_в-\varphi_{max}$.

Уменьшение количества наружного воздуха до минимума ($\alpha=\alpha^*$) служит сигналом о переходе на десятый технологический режим, а его увеличение до максимума ($\alpha=1$) — на седьмой режим. Уменьшение степени влажностной обработки воздуха до нуля ($\mu=0$) служит сигналом о переходе на четвертый режим; срабатывание сигнализатора теплосодержания наружного воздуха, т. е. $I_н>I_{р\,з\,max}$, — на девятый режим. Следовательно,

$$\left.\begin{array}{l}\alpha=\alpha^*\to 10;\\ \alpha=1\ \to\ 7,\\ \mu=0\ \to\ 4,\\ (I_н>I_{р\ з\ max})\to 9.\end{array}\right\} \qquad (1.104)$$

Девятый режим. Параметры наружного воздуха находятся в зоне *9*. Минимальное количество наружного воздуха смешивается с рециркуляционным ($\alpha=\alpha^*$), политропно охлаждается с увлажнением или осушением в камере орошения ($\gamma_x=\text{var}$, $\mu=\text{var}$) и подается в обслуживаемое помещение, где параметры воздуха в рабочей зоне поддерживаются в точке (t_{max}, φ_{max}) путем изменения температуры воды и степени влажностной обработки в камере орошения. Это может осуществляться с помощью P_c-регуляторов температуры и влажности воздуха следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
&\gamma_x(\uparrow)=(+\Delta t)\ \vee\ (-\Delta\varphi);\\
&\gamma_x(\downarrow)=(-\Delta t)\ \vee\ (+\Delta\varphi);\\
&\mu(\uparrow)=(+\Delta\varphi)\ \vee\ (+\Delta t);\\
&\mu(\downarrow)=(-\Delta\varphi)\ \vee\ (-\Delta t),
\end{aligned}\right\} \qquad (1.105)$$

где $\Delta t=t_i=t_{max}$; $\Delta\varphi=\varphi_i-\varphi_{max}$.

Полное открытие клапана на трубопроводе холодной воды ($\gamma_x=1$) служит сигналом для перехода на десятый технологический режим, а сигнал $I_H\leqslant I_{p.з\,max}$ — на седьмой или восьмой режим в зависимости от того, полностью или не полностью откроется клапан на трубопроводе холодной воды после реверса клапана первой рециркуляции. Следовательно,

$$\left.\begin{aligned}
&\gamma_x=1\rightarrow 10;\\
&(I_H\leqslant I_{p.з\,max})\ (\gamma_x\neq 1)\rightarrow 7;\\
&(I_H\leqslant I_{p.з\,max})\ (\gamma_x=1)\rightarrow 8.
\end{aligned}\right\} \qquad (1.106)$$

Десятый режим. Параметры наружного воздуха находятся в пределах зоны *10*. Минимальное количество воздуха смешивается с рециркуляционным ($\alpha=\alpha^*$), с определенным перерасходом энергии нагревается в калорифере ($\gamma_т=\text{var}$) и затем политропно охлаждается ($\gamma_x=1$) и осушается ($\mu=\text{var}$) в камере орошения. Параметры воздуха в рабочей зоне поддерживаются в точке (t_{max}, φ_{max}) путем изменения степени влажностной обработки воздуха в камере орошения и теплопроизводительности воздухонагревателя. Это осуществляется с помощью P_c-регуляторов температуры и влажности воздуха следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
&\gamma_т(\uparrow)=(-\Delta t)\ \vee\ (+\Delta\varphi);\\
&\gamma_т(\downarrow)=(+\Delta t)\ \vee\ (-\Delta\varphi);\\
&\mu(\uparrow)=(-\Delta\varphi)\ \vee\ (+\Delta t);\\
&\mu(\downarrow)=(+\Delta\varphi)\ \vee\ (-\Delta t),
\end{aligned}\right\} \qquad (1.107)$$

где $\Delta t = t_t - t_{max}$; $\Delta \varphi = \varphi_t - \varphi_{max}$.

Уменьшение теплопроизводительности воздухонагревателя до нуля ($\gamma_т = 0$) служит сигналом для перехода на восьмой или девятый режим в зависимости от сигнала $I_Н < I_{р\,з\,max}$ или $I_Н > I_{р\,з\,max}$; уменьшение степени влажностной обработки воздуха до нуля ($\mu = 0$) — на второй режим. Следовательно,

$$\left.\begin{array}{l} \mu = 0 \to 2; \\ (\gamma_т = 0)\ (I_Н < I_{р\ з\ max}) \to 8; \\ (\gamma_т = 0)\ (I_Н > I_{р\ з\ max}) \to 9. \end{array}\right\} \qquad (1.108)$$

Представленный алгоритм ничем не отличается от алгоритмов управления систем кондиционирования воздуха, по своим характеристикам относящихся ко II и III классам нагрузок [7].

Следует отметить, что выражения (1.90), (1.92), (1.94), (1.96), (1.98), (1.100), (1.102), (1.104), (1.106) и (1.108) представляют собой алгоритм работы дешифратора, а выражения (1.91), (1.93), (1.95), (1.97), (1.99), (1.101), (1.103), (1.105) и (1.107) представляют собой не что иное, как алгоритм работы заданных контуров стабилизации температуры и влажности воздуха. Приведенные рассуждения касались измерения текущих отклонений этих переменных в рабочей зоне обслуживаемого помещения, однако, как это показано на рис. 1.43

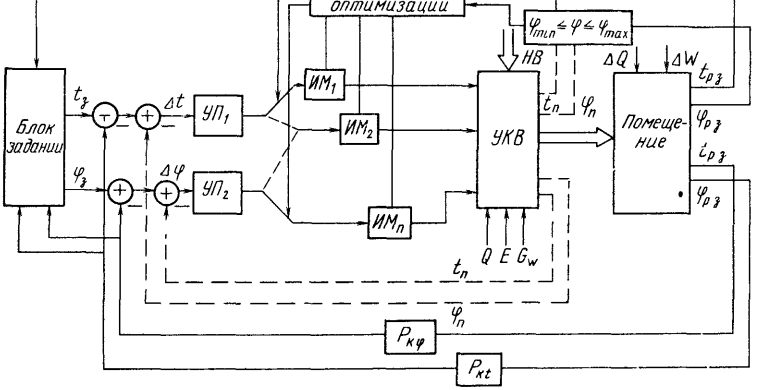


Рис 1 43 Принцип построения ПП САУ КВ

пунктирными линиями связей, полученные решения (1.90)—(1.108) распространимы на каскадную структуру регулирования (см. рис. 1.39). Как видно из полученных выражений, синтез структуры каждого из контуров регулирования значительно осложняется взаимосвязанностью процессов стабилизации температуры и влажности в любой из точек системы как в рабочей зоне ОП, так и на выходе из УКВ. Если в идеализированном случае каждая из выходных переменных определяется свойствами своего канала и видом воздействия своего регулирующего органа, то в рассматриваемом случае задача осложняется наличием каналов перекрестных связей, характеризуемых существенными передаточными коэффициентами, расчет и определение уровня которых представляет собой отдельную достаточно сложную аналитическую задачу. Поэтому исследование качества систем автоматического регулирования температуры и влажности целесообразно вести с применением методов математического моделирования.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

2.1. ТРЕБОВАНИЯ К УПРАВЛЕНИЮ НА ОСНОВЕ ОБЩИХ ПРИНЦИПОВ ОПТИМИЗАЦИИ. КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

Одним из определяющих факторов развития систем кондиционирования микроклимата является удельное энергопотребление в единицу времени. Для достижения требуемых значений этого показателя интенсифицируются процессы тепломассообмена в УКВ, а также совершенствуется технология кондиционирования микроклимата в целом. При этом стремятся реализовать рациональные в отношении энергопотребления алгоритмы функционирования систем и использовать дополнительные источники энергии, в частности низкопотенциальные, утилизируя тепло или холод выбросных потоков [51].

Наибольший эффект в решении подобных вопросов следует ожидать при использовании системных методов

в проектировании СКМ [52, 53]. В настоящее время получили достаточное развитие методы количественной оценки внешних и внутренних факторов в системах кондиционирования микроклимата. Разработан теоретический аппарат расчета суточной и годовой тепловой нагрузки на системы с учетом нестационарности процессов, протекающих в обслуживаемых помещениях [3, 30, 54], а также метод выбора рациональных технологических структур, основанный на использовании аппарата термодинамической модели систем [48]. В то же время в теории и практике создания СВ и СКВ вопросы автоматического управления недостаточно разработаны.

При автоматическом управлении системами кондиционирования микроклимата должны выполняться по меньшей мере три задачи: стабилизация, выполнение программ и оптимизация.

Задача выполнения стабилизации является наиболее изученной и развитой в практике автоматизации СКВ. Тем не менее не получили должного применения аспекты теории систем с переменной структурой (СПС) [55, 56], принципы построения систем связанного регулирования [57], а также методы построения схем каскадного регулирования [58].

Существенное значение при совершенствовании автоматического управления системами вентиляции и кондиционирования воздуха имеет использование новейших средств технического обеспечения [59, 60].

Задача выполнения программы возникает в случаях, когда заданные значения управляемых переменных, структура и параметры системы изменяются во времени заранее известным образом. Несмотря на очевидную простоту и рациональность постановки подобной задачи, ее решение при автоматизации СКВ ограничивается реализацией несложных режимов работы, например зима — лето, реверс воздушных заслонок в каналах рециркуляции и т. д.

В настоящее время получили широкое распространение понятие оптимизации СКМ и понятие оптимальных СКВ Использование термина «оптимальность» зачастую не подкрепляется содержательным обоснованием Следует иметь в виду, что понятие оптимальности должно быть конкретизировано для каждого отдельного случая и не имеет смысла без указания на мотивы или критерии оптимизации [22] Сказанное непосредственно относится

к оптимизации управления СКМ, повышение качества которого достигается только благодаря использованию технико-экономических критериев.

Задача оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием наиболее успешно и полно решается путем использования человеко-машинной системы управления, обеспечивающей автоматизированный сбор и обработку информации. Опыт показывает, что повышать интенсивность технологических процессов без использования современных методов и средств управления неэффективно или не представляется возможным [61].

Одной из форм организации управления технологическими объектами является автоматизированная система управления (АСУ), использующая экономико-математические методы и высокоэффективную вычислительную и управляющую технику [62].

Производя централизованную и интегрированную обработку первичной информации в темпе протекания технологического процесса кондиционирования микроклимата, АСУ ТП использует ее не только для управления этим процессом, но и одновременно для решения организационно-экономических задач. Критерий управления реализуемый в АСУ микроклимат, — это показатель, характеризующий качество функционирования СКМ в целом и принимающий конкретные числовые значения в зависимости от используемых управляющих воздействий.

По отношению к системам кондиционирования воздуха не применимы понятия производство, прибыль. В сфере народного хозяйства, производящей материальные ценности, СКВ являются вспомогательными, выполняющими одно из необходимых условий осуществления основного технологического процесса (ОТП). Если в ОТП основным показателем эффективности управления правомерно считать прибыль, то для управления системой кондиционирования воздуха следует выбирать показатель, связанный с прибылью основного технологического процесса. Таким показателем является показатель ценности результатов функционирования СКВ — $Ц_ф$, определяемый в случаях технологического кондиционирования главным образом зависимостью изменения величины прибыли в ОТП от тех или иных значений параметров воздуха в рабочей зоне обслуживаемого СКВ помещения.

В то же время качество управления системой кондиционирования воздуха

ционирования воздуха в значительной мере, а для систем комфортного кондиционирования микроклимата главным образом характеризуется себестоимостью функционирования системы, т. е. показателем затрат на ее эксплуатацию $З_э$. Основу эксплуатационных затрат в СКВ составляют заработная плата обслуживающего персонала и оплата потребляемых системой тепла, холода, воды и электроэнергии. Следует особо отметить, что каких-либо материальных ценностей (материалов, продуктов, изделий и т. п.), сравнимых по стоимости с перечисленными затратами, система кондиционирования воздуха в процессе эксплуатации не расходует.

Третьим укрупненным показателем, влияющим на эффективность управления системами кондиционирования воздуха, является показатель $З_к$, определяемый суммой затрат на приобретение приборов и устройств автоматики.

Очевидно, что перечисленные показатели $Ц_ф$, $З_э$ и $З_к$ взаимосвязаны. Сумма $З_э$ и $З_к$ известна как приведенные затраты на создание и эксплуатацию системы. Но этот показатель недостаточен для технико-экономического анализа работы автоматизированной СКВ. Наиболее полным показателем технико-экономической эффективности управления системой кондиционирования воздуха является количественный показатель $Э$, определяемый отношением показателя ценности функционирования системы в автоматическом режиме управления к сумме приведенных затрат, т. е.

$$Э = Ц_ф/(З_э + З_к). \qquad (2\ 1)$$

Таким образом, общая технико-экономическая постановка задачи управления системой кондиционирования воздуха является многокритериальной, в которой в качестве критериев управления правомерно использование: 1) критерия максимизации прибыли основного обслуживаемого СКВ технологического процесса (цель управляемого функционирования системы микроклимата); 2) критерия минимизации себестоимости управляемого функционирования (качество управления системой) и 3) критерия минимизации затрат на приобретение средств автоматического управления системой кондиционирования воздуха.

Показатель $Ц_ф$ характеризует СКВ в сфере ее использования, показатели $З_э$ и $З_к$ — в сфере эксплуатации.

Как известно, ценность функционирования СКВ за-

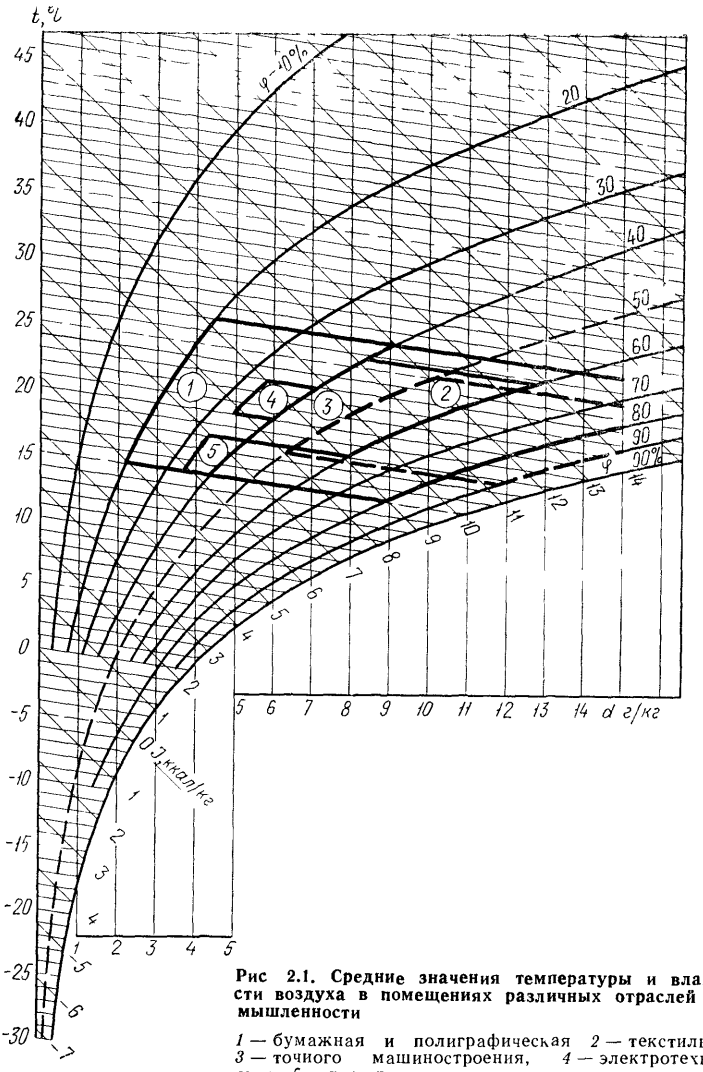


Рис 2.1. Средние значения температуры и влажности воздуха в помещениях различных отраслей промышленности

1 — бумажная и полиграфическая *2* — текстильная *3* — точиого машиностроения, *4* — электротехниче ская, *5* — химическая

ключается в сохранении здоровья людей и повышении их творческой активности, в обеспечении качества и увеличении объема выпуска продукции. Показатели ценности результатов функционирования $Ц_Ф$ систем кондиционирования воздуха (показатель в сфере исполь-

зования) в настоящее время являются наименее изученными. В одних случаях их относят к социальному эффекту и не подсчитывают. В других случаях (технологическое кондиционирование) известны лишь нормируемые пределы параметров микроклимата, при обеспечении которых сохраняются заданные количество и качество выпускаемой продукции (рис. 2.1).

Расчет объема и количественных показателей выпускаемой продукции, выраженных через прогнозируемую прибыль от реализации основного технологического процесса и отнесенных к разностным значениям, например температуры $\Delta t_{рз}$ и влажности $\Delta\varphi_{рз}$ в рабочей зоне, лежащим внутри нормируемых диапазонов, относится к задаче системного исследования основного технологического процесса. Статистическая обработка дифференцируемых по t и φ значений прибыли в основном технологическом процессе, нахождение обратной зависимости, т. е значений $\Delta t_{рз}$ и $\Delta\varphi_{рз}$ как функций значений прибыли, и дифференцирование этих функций по переменной времени τ позволят определить оптимальные значения статической и динамической точности стабилизации параметров воздуха в рабочей зоне обслуживаемого СКВ помещения. Эти значения будут оптимальны по критерию максимизации прибыли в ОТП. Они достижимы только при использовании тех или иных средств автоматической стабилизации и управления, которые, в свою очередь, характеризуются оптимальными значениями тех же переменных $\Delta t_{рз}$ и $\Delta\varphi_{рз}$ по критерию минимизации капитальных затрат на приобретение оборудования и по критерию минимизации затрат на расходуемые системой тепло, холод и электроэнергию. Только тогда при выборе метода и средств управления системой кондиционирования воздуха правомерна постановка задачи достижения компромиссно выбранных значений выходных управляемых переменных.

Определение количественных показателей эффективности автоматизации систем кондиционирования воздуха объективно затруднено из-за отсутствия статистических данных по количественным показателям ценности их функционирования в условиях автоматического управления, т. е из-за отсутствия оперативных, а зачастую и прогнозируемых технико-экономических показателей СКВ в сфере их использования. В таком случае совершенно правомерно сравнение систем автоматического

управления кондиционированием микроклимата только для случая эквивалентных сфер использования. При этом можно считать, что $Ц_ф = 1$. При равенстве значений $Ц_ф$ повышение эффективности автоматизации СКВ достигается за счет снижения составляющих значений $З_э$ и $З_к$.

Целью создания автоматизированной системы кондиционирования воздуха является поддержание в обслуживаемом помещении выходных управляемых переменных:

$$t_{min} \leqslant t_{р.з} \leqslant t_{max}; \quad \varphi_{min} \leqslant \varphi_{р.з} \leqslant \varphi_{max}. \qquad (2.2)$$

При этом чем больше допустимый разброс параметров $t_{max} - t_{min}$ и $\varphi_{max} - \varphi_{min}$, тем меньше эксплуатационные затраты, связанные с минимально неизбежными расходами тепла, холода, воды и электроэнергии на обработку воздуха. т. е. затраты, определяемые способом управления системой. Одной из характерных особенностей управляемой части системы кондиционирования воздуха является ее способность изменять свое движение, переходить в различные состояния $X_п(\tau)$ и $X_{р.з}(\tau)$ под влиянием различных управляющих воздействий. В СКВ существует некоторое множество траекторий движения $\varepsilon_{УКВj}$ и $\varepsilon_{опi}$, из которых по тем или иным мотивам выбирается предпочтительная.

Так как общепромышленные системы кондиционирования воздуха относятся к классу систем, потребляющих большое количество тепловой и электрической энергии (других существенных составляющих потребления материальных ценностей в процессе эксплуатации СКВ нет), правомерен выбор того или иного технического решения управления системами кондиционирования воздуха по мотивам обеспечения минимально неизбежных расходов энергии (для случая $Ц_ф = 1$).

Количество тепловой и электрической энергии, потребляемой системой кондиционирования воздуха, определяется способом тепловлажностной обработки воздуха [5—7], тепловым, воздушным и влажностным режимом обслуживаемого помещения [1, 3, 4], совокупным значением переменных состояния $X_н$, $X_п$, $X_{р.з}$, $X_{рц}$ и $X_у$ [8, 12], а также в значительной мере алгоритмами функционирования и управления [28].

Расчет значений минимально неизбежных расходов тепла, холода, воды и электроэнергии [8] показывает, что далеко не безразлично ведение процесса к состоянию

$X_{р\,з_1}$, $X_{р\,з_2}$ или $X_{р\,зn}$ (рис. 2.2), хотя составляющие каждого из них лежат в пределах допустимых отклонений, определенных нормируемыми показателями микроклимата. Это означает, что для каждого мгновенного значения $X_н$ и f существует только одно программное значение $X_{р\,з\,пр}$, принадлежащее области допустимых $X_{р\,з}$, $X_{р\,з\,пр} \in X_{р\,з}$. Выбор этого значения и его достижение осуществляются с помощью совокупности управлений при обеспечении минимально неизбежных затрат энергии, т. е.

$$X_{р\,з_{пр}} = F\,(X_н;\ X_п,\ X_{р\,з},\ U;\ f)$$

Для того чтобы процесс кондиционирования микроклимата вести в конечное состояние $X_{р\,з_2}$, а не в состояние, например, $X_{р\,з_3}$, средства управления должны обладать качествами, позволяющими различать наблюдаемые показатели состояний $X_{р\,з}$ в пределах заданной чувствительности по Δt и $\Delta\varphi$ (см. рис. 2 2). Кроме того, в выбранном способе управления должна быть заложена возможность выхода по конечным показателям процесса в подобласть пространства точки $X_{р\,з_{пр}}$; это означает, что формирование управляющих воздействий должно осуществляться на основе реализации выбранной совокупности и последовательности квазистационарных процессов тепломассообмена, а также выбранного качества нестационарных переходных процессов

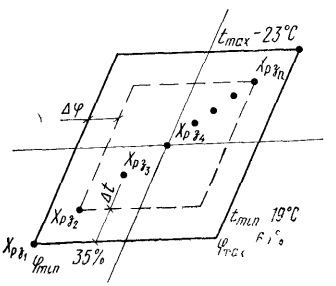


Рис 2 2 Возможные пределы допустимых отклонений параметров воздуха в рабочей зоне

В таком случае условие (2.2) дополняется

$$t_{р\,з} = t_{р\,з_{пр}};\quad \varphi_{р\,з} = \varphi_{р\,з_{пр}}. \qquad (2.3)$$

Для определения экономичной работы СКВ, можно использовать экстремальные значения двух переменных состояния воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения. В предлагаемом способе управления СКВ такими переменными являются энтальпия и влагосодержание, алгоритм, определения экстремальных значений которых приводится далее.

Следовательно, управляющая часть системы кондиционирования воздуха должна выполнять выбор $X_{\text{р.з}}$ согласно выражениям (2.2) и (2.3) и стабилизацию выбранных значений управляемых переменных при изменениях параметров наружного воздуха, а также колебаниях тепло- и влаговыделений в обслуживаемом помещении.

Реальная система автоматической стабилизации или регулирования работает с некоторой погрешностью и при настройке на некоторые $t_{\text{пр}_i}$ и $\varphi_{\text{пр}_i}$ обеспечивает $t=t_{\text{пр}_i}+\Delta t_{\text{САР}}$; $\varphi=\varphi_{\text{пр}_i}+\Delta\varphi_{\text{САР}}$, поэтому САР необходимо настраивать на обеспечение стабилизации следующих параметров воздуха в помещении:

$$\left.\begin{aligned} t_{\min}+\Delta t_{\text{САР}} \leqslant t \leqslant t_{\max}-\Delta t_{\text{САР}};\\ \varphi_{\min}+\Delta\varphi_{\text{САР}} \leqslant \varphi=\varphi_{\max}-\Delta\varphi_{\text{САР}}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.4)$$

Тем самым область разброса сужается (см. рис. 2.2), что в лучшем случае при

$$t_{\max}-t_{\min} \geqslant 2\Delta t_{\text{САР}};\quad \varphi_{\max}-\varphi_{\min} \geqslant 2\Delta\varphi_{\text{САР}} \qquad (2.5)$$

приводит к некоторому перерасходу энергии на обработку воздуха и невозможности обеспечения выходных переменных $X_{\text{р.з}_1}$ и $X_{\text{р.з}_{n+1}}$. В худшем случае при

$$t_{\max}-t_{\min} < 2\Delta t_{\text{САР}};\quad \varphi_{\max}-\varphi_{\min} < 2\Delta\varphi_{\text{САР}} \qquad (2.6)$$

выбор технических средств автоматического управления приводит к невыполнению условия (2.2), т. е. к невыполнению цели функционирования системы.

Погрешности $\Delta t_{\text{САР}}$ и $\Delta\varphi_{\text{САР}}$ имеют статистический смысл и могут быть $\Delta t_{\text{САР}}=3\sigma_t$; $\Delta\varphi_{\text{САР}}=3\sigma_\varphi$, где σ — среднеквадратические ошибки в выбранной системе регулирования при заданных вероятностных характеристиках действующих на нее внешних возмущений.

Существует некоторый минимально необходимый набор средств автоматизации для построения простейшей работоспособной системы автоматической стабилизации. Погрешность такой системы максимальна, а ее стоимость минимальна. Улучшая характеристики регулирующей аппаратуры, переходя на более совершенные законы регулирования, вводя дополнительные средства статической и динамической коррекции задания переменных и т. п., погрешность регулирования можно уменьшить. Капитальные затраты на средства автоматического управле-

ния при этом возрастут, но уменьшатся эксплуатационные затраты на энергию, необходимую для обработки воздуха, в результате чего суммарные приведенные затраты имеют минимум, которому соответствует экономически оправданный выбор средств автоматического управления (рис. 2 3). Следует иметь в виду, что эксплуатационные затраты имеют конечное минимально неизбежное значение [8, 12], теоретически достижимое только в случае нулевой погрешности управления, а капитальные затраты бесконечно возрастают при стремлении добиться погрешности управления, близкой к нулю.

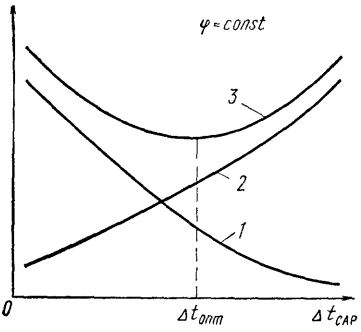


Рис. 2 3. Зависимость изменения затрат от точности работы САР
1 — капитальные *2* — эксплуатационные *3* — приведенные

В общем виде цель управления, вытекающая из назначения системы, отражается единым критерием в форме целевой (критериальной) функции или функционала. Для выполнения условий оптимального управления требуется найти такой алгоритм $U_{\Sigma}(\tau) = U(X_{н}; X_{п}; X_{р\,з}; X_{у}; f_{н}; f_{вн}; \tau)$, при котором выбранный функционал принимал бы экстремальное значение, т. е.

$$I = I\,[X_{н}(\tau),\ X_{п}(\tau);\ X_{р\,з}(\tau),\ X_{у}(\tau);$$
$$U(\tau),\ f(\tau)] = \text{extremum}. \qquad (2.7)$$

В таком общем виде задача нахождения алгоритмов управления не решается. Необходимо произвести выбор критериев оптимизации и оптимизирующего функционала. Так как функционал выражает меру отклонения возмущенного движения системы от желаемого искомого и существует достаточное множество таких мер, то в принципе каждая из них может быть выбрана для оптимизации Идеальным или близким к идеальному был бы такой критерий, который учитывал бы все наиболее важные требования к системе, ее назначение и условия работы, такие, например, как стоимость, надежность, быстродействие, расход энергии, точность и т. д Получить математическое выражение функционала подобного критерия, учитывающего перечисленные качества системы, весьма трудно Поэтому при оптимизации управле-

ния СКВ выделим, например, два ее качества, характеризующие назначение системы и условия ее работы: точность и экономичность управления. В то же время выполнение таких требований к системе, как надежность, стоимость и т. д., оценивается и учитывается на этапе технической реализации системы.

С целью упрощения задачи отыскания алгоритма управления выбранные критерии представим как показатели качества управления (экономичность расхода энергии) и его цели (точность), при этом считаем, что первый из них не зависит в явной форме от второго.

Очевидно, что качество управления с позиций минимизации энергозатрат на тепловлажностную обработку и перемещение воздуха целесообразно рассматривать при отклонении $X_{\text{р.з}}$ от $X_{\text{р.з}_{\text{пр}}}$ не в переходном процессе, а в квазистационарном, рассматриваемом в годовом цикле, поскольку именно в последнем могут быть существенные перерасходы энергии, а не в переходном процессе поддержания $X_{\text{р.з}_{\text{пр}}}$, где суммарное отклонение в расходе энергии нивелируется из-за знакопеременности и ограниченной длительности.

В то же время при оценке качества переходного процесса автоматической стабилизации $X_{\text{р.з}_{\text{пр}}}$ для большинства систем кондиционирования воздуха целесообразно сохранить критерии минимума абсолютного или среднеквадратичного интегрального отклонения, считая длительность и характер переходного процесса некритичными показателями.

В таком случае общая задача синтеза оптимального управления системой кондиционирования воздуха может быть разделена на две части: определение оптимальной программы управления и определение оптимального закона управления.

Задача оптимизации управления рассматривается как задача отыскания управления $U+\Delta U$, при котором минимизируется критерий оптимальности (неизбежные мгновенные затраты тепла, холода, электроэнергии и воды в годовом цикле):

$$I_0 = I\,[\lambda_1 Q_{\text{т}}(X_{\text{н}};\ X_{\text{п}};\ X_{\text{р.з}}) + \lambda_2 Q_{\text{х}}(X_{\text{н}};\ X_{\text{п}};\ X_{\text{р з}}) + \lambda_3 N_{\text{В}}(X_{\text{н}};\ X_{\text{п}};\ X_{\text{р з}}) + \lambda_4 N_4(X_{\text{н}};\ X_{\text{п}};\ X_{\text{р з}}) + \lambda_5 G_{\omega}(X_{\text{н}};\ X_{\text{п}};\ X_{\text{р з}})] = \text{minimum} \qquad (2.8)$$

при условии $X_{\text{р з}} \in D$, где $D(t_{\min} \leqslant t \leqslant t_{\max};\ \varphi_{\min} \leqslant \varphi \leqslant \varphi_{\max}$

и связях, накладываемых технологической схемой $f_j(X_н, X_п, X_{р\,з}, X_{рц}, X_у, K_1, K_2, \ , K_j)=0$, где K_j — конструктивные параметры

Под оптимальной программой управления будем понимать управление $U=U(X_н, f_\Sigma)$, при котором на интервале $X_н$ расчетный летний $X_н$ расчетный зимний и $(f_{\Sigma л}, f_{\Sigma зн})$ выполняются заданные ограничения (например, пределы и минимально допустимые значения расхода наружного и приточного воздуха, значения температуры точки росы в камере орошения не меньше нуля градусов и т д) и принимает минимальные значения функционал (2 8).

Решение этой задачи может быть найдено в классе параметрических программ управления в виде функций, не зависящих от аргумента времени. Составление параметрических программ и определение совокупности управлений U, оптимальных по минимуму тех или иных составляющих энергии, осуществляется на основе решения системы уравнений термо- и аэродинамической модели СКВ.

Под оптимальным законом управления понимаем дополнительные управления, определяемые отклонениями параметров состояния $X_{р\,з}(\tau)$ от их программных значений $\Delta U=\Delta U(\Delta X_{р\,з}\ \tau)$, при которых выполняются ограничения типа $X_{is_1} \leqslant X_{is} \leqslant X_{is_2}$ и минимизируется функционал

$$\left.\begin{aligned} &I_д = \Phi_1 [X_{р\,з_{пр}} - X_{р\,з}(\tau)] = \min, \\ &\text{или} \\ &I_д = \Phi_2 \left\{ \int_0^\infty [X_{р\,з_{пр}} - X_{р\,з}(\tau)]^2\, d\,\tau \right\} = \min, \end{aligned}\right\} \quad (2\ 9)$$

где Φ_2 — некоторая непрерывная функция ошибки, являющейся показателем точности управления, $X_{р\,з\,пр}(X_н\ X_п, f_\Sigma)$ и $X_{р\,з}(\tau)$ — соответственно идеальные программные и реальные текущие показатели состояния системы

Так как при решении этой задачи минимизируется имеющий другой физический смысл функционал, может оказаться, что оптимизация закона управления несущественна для минимизации функционала оптимизации программы управления Однако коэффициенты оптимального закона управления выбираются так, чтобы при известном распределении возмущающих воздействий минимизировалась дисперсия отклонения запрограммированного расхода энергии

Оптимизация систем кондиционирования воздуха заключается в нахождении условий управляемого ведения процесса кондиционирования микроклимата. Для СКВ сущность протекания процессов и функционирования системы неотъемлема от условий управления процессами и системой в целом. Это объясняется нестационарностью условий протекания процессов, многообразием и большим диапазоном возмущающих воздействий. В таком случае цель функционирования системы кондиционирования воздуха и ожидаемый искомый уровень показателей эффективности предопределяют функциональную зависимость и структуру управления. Исходя из этого задачу оптимизации СКВ решают в два этапа.

На первом этапе производится оптимизация системы в ее понимании как «большой системы кондиционирования микроклимата». При этом рассматриваются такие элементы, как здание, энергоблоки, инженерное оборудование вспомогательного II контура СКВ [1] и т. д., выбираются структура и технические средства элементов «большой системы», рассматриваются технологические и конструктивные показатели этих элементов и системы в целом, тщательно исследуются варианты структуры «большой системы» с позиций минимизации капитальных затрат на технологическое оборудование при прогнозируемых эксплуатационных затратах, укрупненно рассматриваются алгоритмы функционирования системы. На втором этапе на основании полученных решений производится оптимизация «малой системы», т. е. оптимизация управляемого функционирования системы кондиционирования воздуха. В данном случае рассматриваются такие элементы системы, как УКВ, УТОС и ОП, выбираются структура СКВ и ее технические средства, включая средства автоматического управления, тщательно рассматриваются функциональные показатели системы, включая показатели ценности ее функционирования. Главное, что на втором этапе на основе известных показателей капитальных затрат на технологическое оборудование выбираются алгоритмы функционирования и управления с целью минимизации эксплуатационных затрат на холод, тепло и электроэнергию с учетом стоимости технических средств автоматического управления и заработной платы обслуживающего персонала.

Первый этап оптимизационной задачи исследован в работах А. А. Рымкевича [8, 48] и А. Я. Креслиня [50].

Задачи второго этапа (этапа оптимизации управления СКВ) рассматриваются, например, в работе [28] и в данной книге.

В задаче оптимизации управления системами кондиционирования воздуха существует две стадии: статическая и динамическая оптимизация. На первой решаются вопросы создания и реализации управления квазистационарным процессом кондиционирования микроклимата, на второй — автоматической стабилизации выходных управляемых переменных состояния системы.

Рассматриваемый метод статической оптимизации управления системой кондиционирования воздуха вполне правомерен, поскольку непрерывные процессы в системе после внесения возмущения, согласно программе управляющих воздействий, достигают нового установившегося состояния за приемлемый отрезок времени при условии достижения требуемого качества переходного процесса.

В процессе управления системой кондиционирования воздуха реализация оптимальных вариантов ведения процессов и использования оборудования достигается путем выполнения операций переключения. Эти операции выполняются в соответствии с некоторой оптимальной стратегией переключения, которая формируется в виде программы управления.

Задачи переключения режимов работы оборудования занимают существенное место среди множества задач, возникающих при решении проблемы управления системой кондиционирования воздуха. Это объясняется тем, что специфичная для СКВ параллельно-последовательная совокупность технологических процессов обработки воздуха не исключает возможности протекания противоположно направленных в теплотехническом отношении процессов. С целью исключения подобных ситуаций используется принцип периодического действия тех или иных технологических аппаратов при условии согласования циклов их работы.

Определение программы переключений производится решением задачи (2.8). Такая оптимизация предполагает, что процесс находится в установившемся состоянии и может быть мгновенно переведен в новое состояние. Решение выражения (2.8) основано на использовании статической модели системы.

Следует иметь в виду, что проблема оптимизации возникает в тех случаях, когда необходимо решать ком-

промиссную задачу преимущественного выбора двух или более видов управляющих воздействий, различным образом влияющих на переменные состояния в системе. При этом результаты управления оцениваются степенью соответствия текущих значений параметров воздуха в ОП их нормированным значениям, а также себестоимостью функционирования системы.

Метод математической оптимизации выбирается в зависимости от характера разработанной модели. В рассматриваемом случае имеется заданная аналитическая целевая функция и математическая модель системы, в которой число независимых переменных путем агрегирования элементов системы довольно до количества, условно не превышающего барьер многомерности. Модель сложных процессов аэродинамики обслуживаемого помещения представляется в форме ограничений. Процессы ассимиляции тепла и влаги в помещении идентифицируются сосредоточенными моделями. Нелинейные и взаимозависимые параметры гидравлической и вентиляционной сети линеаризуются и представляются по возможности независимыми или линейно-зависимыми переменными.

Отметим также, что оптимизируемый процесс кондиционирования микроклимата представляет собой процесс, дискретно-распределенный во времени и пространстве.

Отдельные стадии процесса ($\varepsilon_{СК}$; $\varepsilon_{ВН}$; $\varepsilon_{КО}$; $\varepsilon_{ОП}$ и т. д.) обладают относительной независимостью, т. е. выходные переменные каждой из них зависят только от входных возмущающих и управляющих воздействий. Глобальный критерий статической оптимизации сформулирован как аддитивная функция локальных критериев оптимизации каждой стадии процесса кондиционирования микроклимата. Кроме того, выявлены параметры и переменные состояния, характеризующие движение системы в каждой из ее стадий, достаточно полно представлена гамма управляющих воздействий на каждой из стадий, определены исходя из конструктивных и технологических условий, а также целей управляемого кондиционирования микроклимата ограничения на переменные состояния и управления.

Результатом проведения аналитической оптимизации является решение задачи отыскания структуры оптимальных управлений как функции переменных состояния системы. Для решения задачи оптимизации управления СКВ могут быть применены различные из известных

математических методов поиска экстремума функции многих переменных при однозначно (детерминировано) заданных значениях влияющих факторов. В качестве основного критерия выбора метода рассматривается объем вычислений на ЭВМ, требуемый для отыскания решений с заданной точностью. Большое значение имеет степень пригодности или приспособленности метода к возможным изменениям физики исследуемых процессов. Немаловажными качествами используемого метода аналитической оптимизации являются гибкость и простота многократного применения, степень трудностей при программировании и наглядность получаемых результатов.

Решение задачи оптимизации управления систем кондиционирования воздуха производится на базе укрупненных проработок применительно к практическим задачам, поскольку опыт применения тех или иных известных методов аналитической оптимизации еще не накоплен и слишком мал.

2 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА УПРАВЛЕНИЯ СКВ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Под структурой системы кондиционирования воздуха понимается совокупность определенным образом связанных функциональных элементов. Всякая автоматизированная СКВ состоит из двух частей: управляемой и управляющей [28]. Первая представляет собой совокупность устройств тепловлажностной обработки, перемещения и распределения воздуха, вторая — совокупность измерительных, управляющих и исполнительных устройств.

Каждая из частей СКВ характеризуется определенной структурой и областью пространства переменных состояния. Так как области пространства состояний частей СКВ определенным образом совпадают, то независимо от специфики процессов и технических средств их реализации структурные решения той и другой частей взаимосвязаны. Интенсификация процессов и совершенствование технологии кондиционирования микроклимата приводят к значительному усложнению структуры объектов автоматизации. Следствием этого явились возросшие требования к качеству автоматического управления, необходимость создания более разветвленной и совершен-

ной структуры, управляющей части автоматизированной СКВ. В настоящее время автоматизируются не только простые функции, например стабилизация, но и значительно более сложные операции, связанные с выработкой воздействий на управляемую часть СКВ.

Работа СКВ характеризуется широкой областью изменения определенных переменных состояния и их взаимосвязей. Движение системы определяется многовариантностью и разнообразием совокупных сочетаний управляемых лучей процесса тепловлажностной обработки воздуха в технологических аппаратах $\varepsilon_{УКВ_j}$ и управляемых лучей вентиляционного процесса в обслуживаемом помещении $\varepsilon_{оп_i}$.

Подобную ситуацию можно охарактеризовать наличием широкого диапазона ненулевых начальных условий X_0. Непрерывное изменение X_0 в широком диапазоне $X_{н\,в}$ предопределяет переменность структуры управляемой части СКВ в термодинамическом отношении. Действительно, при изменении параметров наружного воздуха $X_{н\,в}$ в диапазоне от расчетных зимних до расчетных летних условий в СКВ выполняется совокупность режимов обработки воздуха от нагрева и увлажнения до обработки путем охлаждения и сушки. Для реализации того или иного процесса $\varepsilon_{УКВ_j}$ в структуре СКВ предусматриваются различные аппараты тепловлажностной обработки воздуха. Каждый из этих аппаратов в большинстве случаев характеризуется однонаправленностью функционирования в теплотехническом отношении. При этом каждый из технологических аппаратов характеризуется собственными значениями передаточных коэффициентов и динамических показателей по тем или иным направлениям потоков тепла или массы.

Поскольку очевидна нецелесообразность одновременного ведения противоположно направленных процессов, например нагрев — охлаждение или осушка — увлажнение, в СКВ применяются технологические аппараты, которые работают при одних начальных условиях и не работают при других. В таком случае правомерно считать, что управляемая часть СКВ характеризуется переменностью структуры и нестационарностью. Подобная постановка вопроса в первую очередь относится к анализу движения системы в пространстве базисных координат t и φ.

Структура управляемой части системы будет иметь

простейший вид в области пространства состояний, когда параметры наружного воздуха равны параметрам приточного воздуха. Подобная ситуация характеризуется минимумом требуемой функциональной и аппаратной обеспеченности системы, а также эксплуатационных затрат. При нахождении системы в области пространства состояний нулевых термодинамических начальных условий структура ее управляемой части минимизируется до использования технологических аппаратов реализации только требуемого процесса $\varepsilon_{оп}$. В этих же условиях система наиболее удовлетворительно обеспечивает качество по критерию минимума расхода тепловой и электрической энергии.

В реальной системе непрерывное неуправляемое сохранение равенства параметров наружного воздуха нулевым термодинамическим начальным условиям невозможно. В то же время требуемый показатель качества может быть в той или иной степени сохранен при выполнении двух условий. Первое — расширение области пространства состояний параметров приточного воздуха путем введения третьей, помимо температуры и влажности, управляемой переменной состояния. Этой переменной является расход подаваемого в обслуживаемое помещение воздуха [49]. Второе — построение структуры управляемой части системы путем использования аппаратов тепловлажностной обработки воздуха, позволяющих вести суммарный процесс в заданную область $X_{п}$ без противоположно направленных в теплотехническом отношении частных процессов [50]. Совместное рассмотрение этих условий для создания рациональных технологических структур успешно осуществляется на основе использования термодинамической модели СКВ [8, 28].

Понятие пространства нулевых термодинамических начальных условий приобретает еще более содержательный смысл при решении вопросов автоматизации СКВ. Как известно, при использовании каскадного метода регулирования [8] пространство нулевых термодинамических начальных условий становится областью допустимых значений промежуточных управляемых переменных. В таком случае синтез схемы автоматического управления в основном сводится к задаче обеспечения требуемого процесса управления $\varepsilon_{УКВ}$.

Процедуру разработки структуры СКВ в целом с

учетом взаимосвязанности синтеза структур управляемой и управляющей частей системы проиллюстрируем на примере рассмотрения центральной однозональной СКВ с постоянным расходом воздуха. Для группы обслуживаемых помещений ряда СКВ параметры воздуха нормируются следующими значениями: температура зимняя $20\pm2°C$, температура летняя $23\pm2°C$, относительная влажность $50\pm10\%$. Полагая, что в обслуживаемом помещении влаговыделения незначительны и что выбранная краткость воздухообмена обеспечивает среднее разностное значение температуры воздуха в рабочей зоне и на притоке, равное 5°C, можно представить область нулевых термодинамических начальных условий (рис. 2.4) в виде неравенств $13°C \leqslant t_п \leqslant 20°C$; $55\% \leqslant \varphi \leqslant 85\%$.

Как видно из рис. 2.4, рациональное в термодинамическом отношении ведение процесса $\varepsilon_{УКВ}$ целесообразно направлять к значениям $X_{пi}$, лежащим по краям области пространства $X_п$. При этом очевидно, что процессы $\varepsilon_{УКВj}$ будут осуществляться путем реализации различных технологических режимов обработки воздуха. Следовательно, структура управляющей части СКВ должна обеспечивать переключение технологических режимов в зависимости от выбранного алгоритма функционирования, а также их ведение, т. е. обеспечение возможности стабилизации заданных значений $X_{пi}$.

Независимо от структуры управляемой части СКВ в режиме работы управляющей части должно быть семь режимов. Первый, как уже отмечалось, соответствует условиям совпадения значений базисных параметров наружного и приточного воздуха. В этом режиме выполняются нулевые термодинамические начальные условия, при этом какие-либо управляющие воздействия отсутствуют. Второй режим соответствует обязательному ведению процессов обработки воздуха $\varepsilon_{УКВ}$ в область $t_п=13°C$, $\varphi_п=55\%$; третий — в область $13°C \leqslant t_п \leqslant 20°C$, $\varphi_п=55\%$; четвертый — в область $t_п=13°C$, $55\% \leqslant \varphi_п \leqslant 85\%$; пятый — в область $t_п=20°C$, $55\% \leqslant \varphi_п \leqslant 85\%$; шестой — в область $13°C \leqslant t_п \leqslant 20°C$ $\varphi_п=85\%$ и, наконец, седьмой режим — ведению процесса в область $t_п=20°C$, $\varphi_п=85\%$.

Каждый из шести последних режимов характеризуется собственными значениями выходных управляемых переменных. В зависимости от выбранной струк-

туры технологической части системы в каждом из этих режимов могут иметь место от одного до трех регулирующих воздействий.

Работа СКВ в семи различных режимах рассматривается как качество управляемой и управляющей частей системы, характеризующее переменность ее структуры. Кроме того, следует четко представлять, что в системе отсутствуют неизменные традиционные контуры стабилизации управляемых переменных. Это объясняется прежде всего тем, что формирование одного и того же регулирующего воздействия в одном режиме производится по отклонению одной управляемой переменной, а в другом — по отклонению другой. Иными словами, по отклонению одной и той же наблюдаемой переменной в различных режимах формируются различные регулирующие воздействия. В рассматриваемом случае во втором и седьмом режимах не исключено взаимосвязанное формирование регулирующих воздействий по отклонению двух наблюдаемых переменных.

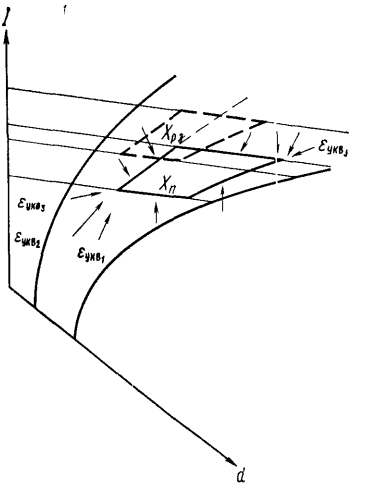


Рис. 2.4. Область нулевых термодинамических начальных условий $X_0 = X_{\Pi}$ в пространстве $I - d$-диаграммы

В общей теории автоматического управления в последнее время получила достаточное развитие теория систем с переменной структурой (СПС) [55]. В 1956 г. С. В. Емельяновым была начата работа, целью которой явилось расширение возможностей управления за счет использования нетрадиционного подхода к синтезу управляющей части системы. С. В. Емельяновым было сформулировано положение о целесообразности реализации ряда структур управляющей части системы, поскольку в непрерывном процессе управления структура управляемой части переменна и нестационарна. Результатом работы явилось создание принципов построения СПС для управления объектами различных классов, а также методов синтеза и расчета таких систем.

Применение принципов построения СПС обеспечивает

более высокое (по сравнению с линейными) качество переходных процессов как при полной, так и неполной информации о состоянии объекта. В системах управления с переменной структурой возникает новый подход к организации процесса адаптации, так как в этих системах информация о характеристиках управляемой части может быть получена достаточно просто. Положения, разработанные для одноконтурных систем, правомерны для многомерных систем с переменной структурой в условиях управления объектами с несколькими управляющими воздействиями [55].

В технике автоматического управления СКВ весьма часто одни и те же управляющие устройства применяются в различных условиях состояния переменных системы. Подобная ситуация приводит к тому, что изменение характеристик объекта и связей между контурами стабилизации переменных t и φ нередко вызывает значительное ухудшение качества переходного процесса, а зачастую приводит к потере устойчивости. Указанные обстоятельства в случае применения регуляторов с постоянными параметрами не позволяют получить минимальный экономический эффект. Исследования, проведенные американской фирмой Foxboro [52], показали, что в США 80% линейных регуляторов, обслуживающих промышленность, работают не в оптимальном режиме. Поэтому наиболее важной задачей при разработке автоматизированных СКВ становится синтез САР с максимально возможным расширением области устойчивости по начальным условиям и достижением требуемого качества стабилизации по выбранным критериям.

Для решения подобной задачи при синтезе управляющего устройства в структуру управляющей части системы вводятся такие функциональные элементы, которые во время протекания процесса управления изменяют его структуру или коэффициенты воздействия по различным переменным.

Для реализации принципов построения систем с переменной структурой целесообразно рассмотреть укрупненные функциональные звенья контуров автоматической стабилизации. Будем считать, что в состав каждого контура автоматической стабилизации помимо одного (О) или нескольких ($О_1$, $О_2$, ...) звеньев объекта управления входят измерительное устройство (ИзУ), управляющее устройство (УУ) и исполнительное устройство (ИУ) [3].

Под измерительным устройством понимаются датчики непрерывных значений наблюдаемых переменных состояния. Под управляющим устройством подразумевается устройство формирования того или иного закона регулирования с требуемыми параметрами. В составе исполнительного устройства будем рассматривать регулирующий орган и исполнительный механизм (возможен и другой состав ИУ).

Применяемые в настоящее время в СКВ исполнительные механизмы типа МЭО имеют постоянную скорость перемещения выходного вала. Наличие различных модификаций исполнительных механизмов обусловливает некоторый ограниченный диапазон постоянных значений скорости. Характерной особенностью СКВ является то, что для достижения заданного качества различных контуров стабилизации требуется использование исполнительных устройств с различными передаточными коэффициентами и исполнительных механизмов с различными значениями скорости перемещения выходного вала. Для расширения диапазона дискретных постоянных значений скорости в СКВ традиционно используются так называемые импульсные прерыватели. В данном случае выбор длительности импульса и периода работы прерывателя становится инструментом настройки передаточного коэффициента исполнительного устройства.

По условиям реализации СПС исполнительное устройство является звеном, которое может или должно обладать переменностью своих характеристик. Однако используемые прерыватели не обладают свойством автоматического изменения своих характеристик. Структурное и далее аппаратное объединение импульсных прерывателей с управляющими устройствами позволяет решить проблему переменности их характеристик хотя бы простым увеличением их числа Сложившаяся практика жесткого аппаратного объединения импульсных прерывателей с исполнительными механизмами зачастую, неприемлема при реализации СПС.

Как уже отмечалось, структура управляемой части системы существенно влияет на варианты структуры ее управления. Это означает, что вопросы автоматизации СКВ и выбора технологической схемы взаимосвязаны.

Для СКВ помещений предприятий машиностроения и радиоэлектроники, а также ряда систем комфортного

кондиционирования нормируемые параметры воздуха в обслуживаемых помещениях ($18°C \leqslant t \leqslant 25°C$, $40\% \leqslant \varphi \leqslant 60\%$) представим в виде области состояний, ограниченной на $I-d$-диаграмме пространством между точками *1—2—3—4* (рис. 2.5). Так как реальные системы автоматического регулирования поддерживают параметры воздуха в обслуживаемом помещении с определенной статической и динамической погрешностью, область заданных значений параметров внутреннего воздуха ограничивается. С учетом выражения (2.4) полагаем, что $\Delta t_{САР} = 1°C$ и $\Delta\varphi_{САР} = 5\%$. В таком случае для предлагаемой к разработке системы автоматического управления заданные значения выходных переменных будут лежать в пределах $19°C \leqslant t_{оп\,j} \leqslant 24°C$, $45\% \leqslant \varphi_{оп\,j} \leqslant 55\%$. Область заданных значений температуры и влажности ограничивается пространством между точками *5—6—7—8*. Полагая, что выбранная кратность воздухообмена обеспечивает среднее значение допустимой разности температур внутреннего и приточного воздуха, равное, например, 7°C, область параметров приточного воздуха $X_п$ можно представить в виде неравенств $t_{п_1} \leqslant t_п \leqslant t_{п_2}$, $\varphi_{п\,1} \leqslant \varphi_п \leqslant \varphi_{п_2}$ (см. рис. 2.5).

В рассматриваемой системе имеется функциональное ограничение, связанное с технической необходимостью реализации на выходе из камеры орошения промежуточного состояния воздуха, — точки росы.

Для СКВ первого и второго класса нагрузок структура, реализующая состояние точки росы, является нерациональной. В традиционном варианте автоматизации СКВ подобным нерациональным структурам сопутствует реализация нерациональных алгоритмов функционирования. Сложившаяся практика является результатом недостаточной проработки принципов построения СКВ с учетом того, что управляемая и управляющая части системы должны обладать качеством переменности структуры.

В СКВ, структура которой представлена на рис. 2.5, реализуется семь режимов работы (на $I-d$-диаграмме взяты в кружки). В первом режиме осуществляется управляемое смешение наружного и рециркуляционного воздуха в камере смешения, затем неуправляемая адиабатная обработка воздуха в камере орошения до состояния $t_{р1}$. В воздухонагревателе производится изовлажностный нагрев до состояния $t_{п_1}$. Во втором режиме

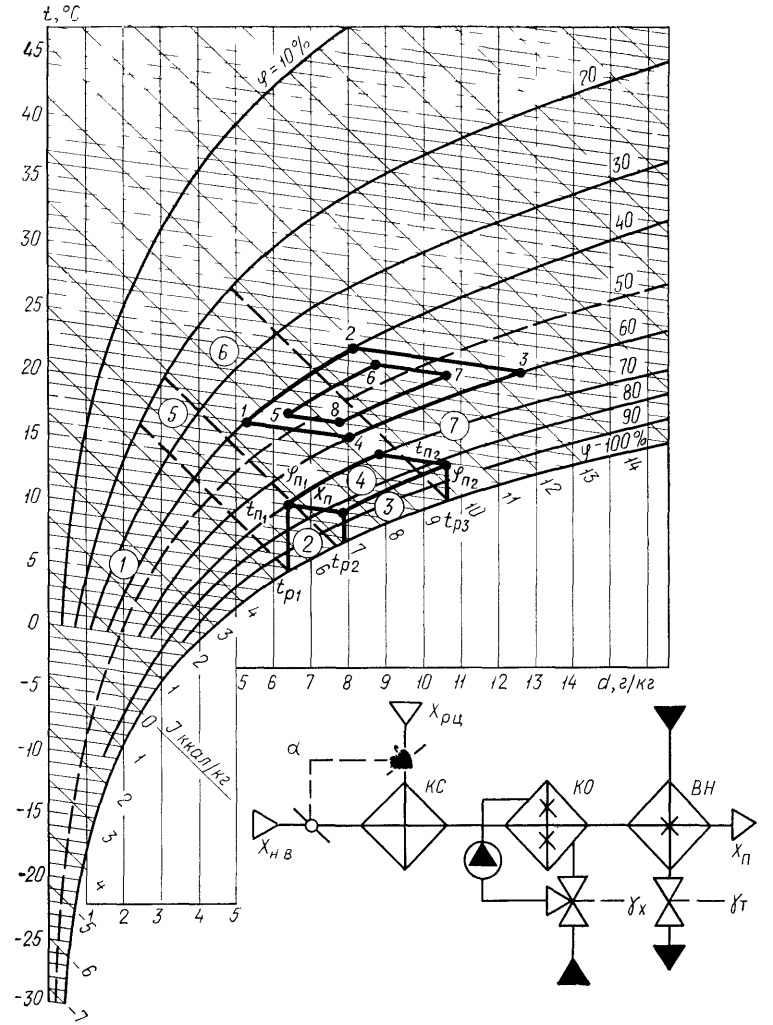


Рис 2 5. Алгоритм функционирования и структура СКВ

осуществляется управляемое смешение наружного и рециркуляционного воздуха в КС до состояния $t_{п_1}$; в третьем — также управляемое их смешение, но до состояния $\varphi_{п_2}$. В четвертом режиме отмечается равенство параметров наружного и приточного воздуха, т. е. выполняются нулевые термодинамические условия;

тепловлажностная обработка воздуха, подаваемого в обслуживаемое помещение, не производится. В пятом режиме только наружный воздух неуправляемо адиабатно обрабатывается в КО до состояния $t_{р_1} \leqslant t_{р_i} \leqslant t_{р_2}$, затем в ВН воздух нагревается до состояния $t_{п_1}$. В шестом режиме так же, как и в пятом, только наружный воздух адиабатно обрабатывается в КО до состояния $t_{р_2} \leqslant t_{р_i} \leqslant t_{р_3}$, затем в ВН нагревается до состояния $\varphi_{п_2}$. В седьмом режиме в КО производится политропная обработка воздуха до состояния $t_{р_3}$, затем в ВН его нагрев до состояния $t_{п_2}$ или $\varphi_{п_2}$.

В каждом режиме, за исключением четвертого, работают определенные контуры автоматической стабилизации, при этом в первом и седьмом режимах одновременно последовательно работают два контура. Работа контуров автоматической стабилизации $t_п$ и $\varphi_п$ реализуется на основе каскадного метода регулирования. Предлагаемые к реализации контуры автоматической стабилизации представлены на рис. 2.6.

В качестве объектов регулирования в контуре *1* рассматриваются процесс смешения потоков наружного и рециркуляционного воздуха $О_1$ и неуправляемый процесс адиабатной обработки воздуха $О_2$. Для первого процесса выходной управляемой переменной является энтальпия смешанного воздуха $I_{см}$. Величина $I_{см}$ косвенно оценивается по значениям температуры точки росы $t_{р_i}$ воздуха после адиабатной обработки в камере орошения. Работа контура рассматривается с учетом внешних возмущений по каналам $\Delta t_{н.в}$ и $\Delta t_{р\,з}$. Контур автоматической стабилизации работает только в первом режиме.

В первом, пятом, шестом и седьмом режимах работает контур автоматической стабилизации температуры или влажности приточного воздуха (контур *2*). В этом контуре в качестве объекта рассматривается процесс изовлажностного нагрева воздуха $О_4$. Внешними возмущениями являются отклонения температуры теплоносителя $\Delta t_{wт}$ и температуры точки росы $\Delta t_{рi}$ (только для пятого и шестого режимов), наблюдающиеся при изменениях температуры наружного воздуха $\Delta t_{н.в}$. Для этого контура в качестве возмущения рассматривается сигнал коррекции $\Delta t_{кор}$ или $\Delta\varphi_{кор}$ по каналу задания стабилизируемой переменной.

Специфичным для СКВ данной технологической

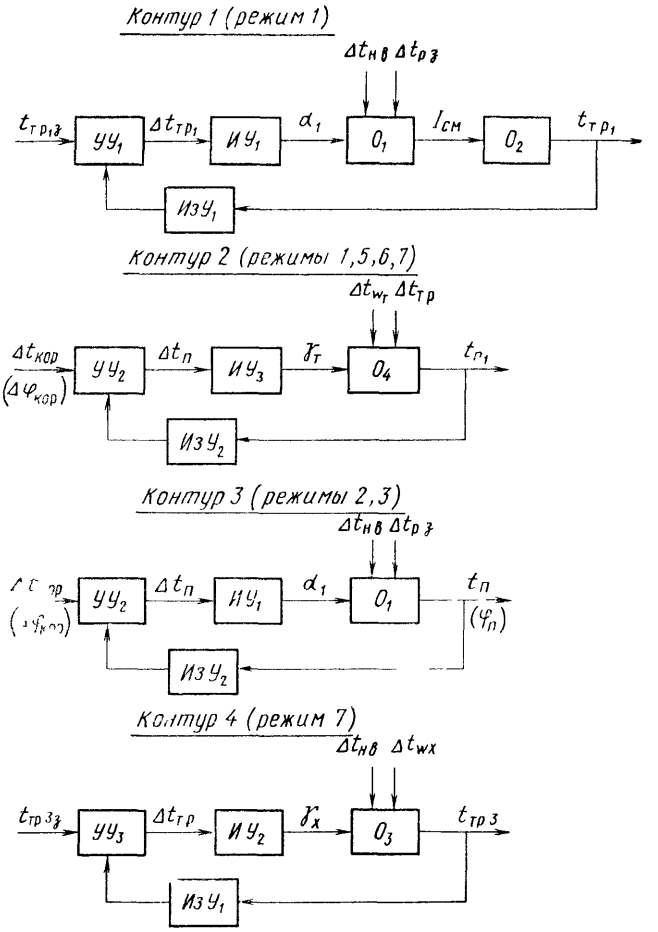


Рис 2 6. Контуры автоматической стабилизации

структуры является третий контур автоматической стабилизации. В этом контуре объектом являются процессы смешения O_1, но наблюдаемой переменной состояния будет не температура точки росы $t_р$, а температура приточного воздуха или его влажность. В таком случае помимо возмущений $\Delta t_{н\,в}$ и $\Delta t_р$ в контуре имеется возмущение по заданию при наличии корректирующего сигнала $\Delta t_{кор}$ или $\Delta\varphi_{кор}$ Третий контур автоматической стабилизации работает во втором и третьем режимах.

Седьмой режим характеризуется работой камеры орошения, осуществляющей политропную обработку воздуха. Стабилизация $t_{р.з}$ осуществляется четвертым контуром. В качестве объекта рассматриваются политропные режимы обработки воздуха O_3. Возмущениями в данном контуре являются отклонения температуры наружного воздуха $\Delta t_{н.в}$ и отклонения температуры холодной воды $\Delta t_{вх}$. Последовательно с контуром автоматической стабилизации $t_{р.з}$ в седьмом режиме так же, как в первом, работает второй контур.

Динамические показатели процессов перехода с одного режима на другой определяются характеристиками объектов управления O_1, O_2, O_3, O_4, а также исполнительных и измерительных устройств. Структура и параметры управляющих устройств выбираются с учетом двух условий: требуемого качества стабилизации и качества переходного процесса в начальный момент работы контура стабилизации.

Следует отметить, что для рассматриваемого случая возможно использование различных вариантов построения структуры автоматизированной СКВ в целом.

В рассматриваемом случае параллельно-последовательно работают четыре контура автоматической стабилизации различных выходных переменных. Работа каждого из контуров определяется подобластью собственных значений начальных условий. Границы этих подобластей совпадают с границами описанных режимов работы СКВ.

При переходе с одного режима работы на другой как управляемая, так и управляющая части автоматизированной СКВ меняют свою структуру. Закономерность или программу изменения структуры в непрерывном процессе управляемого функционирования СКВ будем считать алгоритмом управления системой.

В задаче, сформулированной чл.-кор. АН СССР С. В. Емельяновым, алгоритм управления, т. е. алгоритм выбора структуры, реализуется на основе использования ограниченной информации о состоянии системы. В данном случае необходимой и достаточной информацией является сигнал отклонения одной регулируемой переменной [63].

Автоматизированные СКВ являются многомерными системами. Из-за их сложности постановка и решение классической задачи синтеза СПС значительно за-

труднены. Поэтому на современном этапе развития автоматизации СКВ для реализации принципов СПС допустимо не производить вычисление производных отклонений ε регулируемых переменных и не исследовать фазовое пространство (ε, ε).

При разработке САУ КВ следует иметь в виду, что, как правило, имеется достаточно информации о внутренних переменных состояния системы. При этом качество информации позволяет судить о состоянии управляемой системы с достаточной степенью достоверности. Этим следует воспользоваться при формировании алгоритма управления СКВ.

Очевидно, что на первом этапе оптимизации управления СКВ следует выяснить возможности систем с переменной структурой, фазовое пространство которых не является пространством производных ε сигнала ошибки регулируемой переменной. Как в классическом, так и в предлагаемом случае для реализации алгоритмов управления СПС не требуется дополнительной информации ни о значениях изменяющихся параметров управляемой системы, ни о приложенных возмущениях. Тем не менее использование только предложенного принципа построения автоматизированных СКВ с переменной структурой позволяет получить систему автоматического управления, малочувствительную к изменениям в широком диапазоне начальных условий и как следствие к изменяющимся параметрам объектов управления.

Задача состоит в определении подобластей начальных условий. Пространства этих подобластей выбираются априорно и фиксируются заданными значениями некоторых промежуточных переменных состояния. Их определение в процессе работы системы производится по жесткой программе на основании использования информации о состоянии объектов управления.

Так же, как и в классическом случае, эта задача решается на основе реализации некоторого блока изменения структуры (БИС) и блока ключевых элементов (БКЭ). Одной из форм реализации БИС и БКЭ являются представленные выше программно-параметрические системы автоматического управления кондиционированием воздуха. В этих системах управляемое ведение процессов в подобласти пространства выходных координат системы обеспечивается фиксированными

структурами и алгоритмами. В процессе работы традиционной центральной системы кондиционирования воздуха, согласно исследованиям проф. А. А. Рымкевича, число фиксированных структур может достигать полутора десятков.

Выделение подобластей начальных условий прежде всего приводит к значительному уменьшению диапазонов изменения ненулевых начальных условий. Это позволяет обеспечить более жесткие требования к качеству стабилизации. Так как работа каждого из контуров стабилизации происходит в условиях с ограниченными возмущениями, для настоящего уровня изученности СКВ приемлемо использование линейных или квазилинейных регуляторов. При этом допустимо применение одних и тех же регуляторов в различных режимах работы системы, но с различными коэффициентами воздействия по координате ошибки.

В данном случае рассматриваются две задачи: устойчивости и качества линейного управления внутри подобласти начальных условий без постановки на первом этапе задачи синтеза СПС внутри подобласти.

2.3. СХЕМА КАСКАДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Устойчивость и качество стабилизации в любой системе автоматического регулирования в первую очередь определяется соотношением параметров объекта регулирования и характеристик регулятора. Поэтому иногда качество системы стабилизации можно улучшить с помощью сравнительно небольших усовершенствований в управляемой части системы. Так, использование в качестве исполнительного устройства воздушного клапана в обводном канале приточной камеры вместо регулирующего клапана на трубопроводе теплоносителя приводит к значительному уменьшению постоянной времени объекта. Однако изменение структуры или параметров управляемой части системы не всегда бывает возможным по технологическим или каким-либо другим соображениям. В таком случае следует переходить к более сложным (в отличие от одноконтурных) схемам регулирования, например с использованием дополнительных регуляторов и контуров автоматического регулирования.

Простейшим способом совершенствования системы является использование двух регуляторов, включенных по каскадной схеме. При этом вместо одного контура

автоматической стабилизации выходной переменной работают два контура стабилизации: один — той же выходной переменной, другой — промежуточной переменной состояния.

Использование каскадных схем в системах автоматического регулирования СКВ было проанализировано М. Б. Халамейзером. При этом было показано преимущество этого способа совершенствования одномерных систем автоматического регулирования температуры или влажности воздуха в обслуживаемом помещении. Каскадные схемы автоматической стабилизации получили широкое распространение в системах кондиционирования воздуха за рубежом. Например, по данным инж Г. Н. Соколовой, каскадные схемы, реализованные фирмой Kessler+Lush GmbH (ФРГ), хорошо зарекомендовали себя в системах управления СКВ аэровокзала Шереметьево-2. Однако применение каскадных схем регулирования в отечественной практике автоматизации СКВ до последнего времени имеет единичный характер.

В современной технической литературе два регулятора в каскадных схемах определяются как главный и вспомогательный, корректирующий и центральный, задающий и стабилизирующий. Принцип работы каскадной схемы основан на том, что главный (задающий или корректирующий) регулятор используется для изменения задания вспомогательному (следящему или центральному) регулятору, который, в свою очередь, вырабатывает сигнал на исполнительное устройство. Измеренная выходная регулируемая переменная системы является входным сигналом главного регулятора. Выходной сигнал главного регулятора является непрерывным сигналом задания для вспомогательного регулятора. Кроме того, одним из входных сигналов вспомогательного регулятора является стабилизируемая промежуточная переменная состояния.

Применение каскадных схем регулирования позволяет получить более высокое качество переходного процесса автоматической стабилизации в широком диапазоне возмущений, приложенных к различным точкам системы. В случае когда имеются возмущения на входе управляемой части системы, например изменение параметров наружного воздуха, вспомогательный регулятор вырабатывает регулирующее воздействие еще до того, как на выходе системы появится соответствующее

отклонение стабилизируемой переменной. При этом ошибка стабилизации может быть уменьшена в десятки раз по сравнению с ошибкой в одноконтурной САР. При возмущениях, приложенных к звеньям управляемой части системы, неохваченным обратной связью вспомогательного регулятора, например при изменении тепло- или влаговыделений в обслуживаемом помещении, конечная ошибка стабилизации температуры или влажности уменьшается в несколько раз. Уменьшение ошибки стабилизации происходит в результате более высокой собственной частоты каскадной схемы регулирования.

Применение каскадных схем, помимо улучшения качества стабилизации, позволяет улучшить ряд других показателей. Например, при оснащении вентиляционных установок или установок кондиционирования воздуха автоматикой контуров стабилизации выходных переменных на основе использования вспомогательного регулятора можно достичь уровня максимальной заводской готовности к работе. Кроме того, подобное оснащение технологического оборудования средствами автоматики существенно упрощает их монтаж и наладку, создает возможность эксплуатации вентиляционных установок и установок кондиционирования воздуха в полуавтоматическом режиме работы. Последнее означает, что приточная камера или кондиционер оснащены автоматикой, с помощью которой поддерживаются заданные параметры воздуха на притоке. Параметры же воздуха в обслуживаемом помещении находятся под наблюдением службы эксплуатации. По результатам этих наблюдений производится установка требуемых заданных значений стабилизируемых переменных на выходе из кондиционера или приточной камеры.

Из этих соображений становится очевидной наиболее распространенная обобщенная схема каскадного регулирования при автоматизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха (рис. 2.7). В данном случае очевиден выбор в качестве промежуточной регулируемой переменной того или иного параметра приточного воздуха. Обратной связью вспомогательного регулятора целесообразно охватывать управляемые процессы тепломассообмена $\varepsilon_{\text{VI в}}$ в установке кондиционирования. При этом наблюдаемыми переменными состояния становятся параметры воздуха ($t_{\text{п}}$ или $\varphi_{\text{п}}$) на выходе из кондиционера. Их автоматическую стабилизацию выполняет внутренний контур на основе вспомогательного регулятора.

Рис. 2.7. Обобщенная схема каскадного регулирования в СКВ или СВ

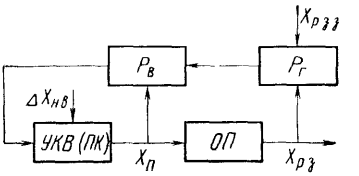
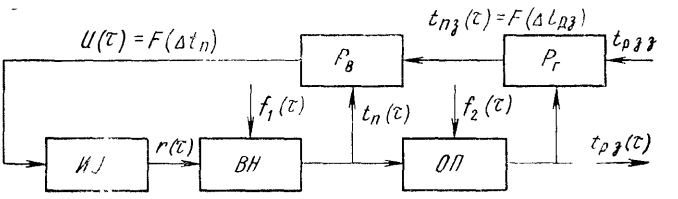


Рис. 2.8. Каскадная схема регулирования температуры воздуха в обслуживаемом помещении



Параметры воздуха в обслуживаемом помещении являются наблюдаемыми переменными для главного регулятора. Обратная связь этого регулятора образует внешний контур автоматической стабилизации.

Каскадная схема регулирования температуры воздуха в обслуживаемом помещении в холодный период года приведена на рис. 2.8. На вход главного регулятора $P_г$ подается сигнал измеренного текущего значения температуры воздуха в обслуживаемом помещении $t_{р.з_i}$, на этом же регуляторе устанавливается заданное значение температуры воздуха в помещении $t_{р.з}$. На выходе главного регулятора по тому или иному закону (1.15) формируется непрерывный сигнал, переменной уставки задания $t_{п.з}$ (τ), являющийся функцией отклонения текущего значения температуры воздуха в помещении от ее заданного значения $\Delta t_{р\,з}$. Сигнал $t_{п.з}$ (τ) подается на один из входов вспомогательного регулятора $P_в$. На другой вход этого регулятора подается сигнал измеренного текущего значения температуры воздуха на выходе из приточной камеры, т. е. температуры приточного воздуха $t_{п\,i}$. На выходе вспомогательного регулятора по тому или иному закону (1.15) формируется сигнал управления U (τ), являющийся функцией отклонения $\Delta t_п$ текущего значения температуры приточного воздуха от ее заданного значения. Сигнал управления U (τ) подается на вход исполнительного устройства и далее в виде регулирующего воздействия r (τ) на вход воздухонагревателя.

В зависимости от типа воздухонагревателя (водовоздушный теплообменник или электрокалорифер), а также от способа изменения теплопроизводительности в качестве исполнительного устройства могут использоваться воздушный клапан или клапан на трубопроводе теплоносителя с исполнительным механизмом, устройство регулирования частоты вращения электродвигателя вентилятора или насоса, устройство регулирования мощности электрокалорифера и т. д

В рассматриваемой системе могут быть возмущения, воздействующие как на воздухонагреватель $f_1(\tau)$, так и на температурный режим обслуживаемого помещения $f_2(\tau)$. В качестве возмущающих воздействий на воздухонагреватель могут рассматриваться изменение температуры наружного воздуха, изменение количества нагреваемого воздуха, изменение температуры или скорости перемещения теплоносителя, изменение напряжения питания электрокалорифера и т д При изменении величины любого из перечисленных воздействий изменяется температура воздуха на выходе из теплообменника. Величина и время отклонения температуры определяются параметрами воздухонагревателя Характер переходного процесса по $t_п$ определяется параметрами внутреннего контура автоматической стабилизации.

Возникающие отклонения температуры приточного воздуха $\Delta t_п$ компенсируются регулирующим воздействием, формируемым по внутреннему контуру автоматической стабилизации. При этом отклонения температуры воздуха в обслуживаемом помещении будут значительно меньшими, чем $\Delta t_п$, благодаря теплопоглощающим свойствам всех поверхностей в помещении [3]

При отсутствии внутреннего контура стабилизации $t_п$ формирование регулирующего воздействия $r(\tau)$ было бы более замедленным из-за инерционных характеристик помещения, а время отклонения $\Delta t_{рз}$ было бы гораздо бо́льшим, чем при каскадном регулировании.

В качестве возмущающих воздействий $f_2(\tau)$ на температурный режим помещения могут рассматриваться изменение температуры наружного воздуха, а также изменение поступлений и стоков тепла в помещении. Начальный эффект такого возмущения обнаруживается по каналу обратной связи внешнего контура автоматической стабилизации. Регулирующее воздействие по каналу $\Delta t_{рз}$ формируется с инерционностью, определяемой воздухонагревателем. При этом величина отклоне-

ния $\Delta t_{р.з}$ может быть лишь немногим меньше, чем в одноконтурной системе. Однако время отклонения $\Delta t_{р.з}$ при использовании каскадной схемы всегда меньше, так как внутренний контур уменьшает инерционность системы.

Применение каскадных схем регулирования наиболее эффективно тогда, когда внутренний контур стабилизации обладает значительно бо́льшим быстродействием, чем внешний, и когда основные возмущения приложены к звеньям внутреннего контура. Поэтому при автоматизации приточных камер с использованием в качестве воздухонагревателей электрокалориферов целесообразно применять именно каскадные схемы регулирования. Преимущество каскадного способа регулирования перед однократным очевидно и в случаях автоматизации приточных камер с использованием водовоздушных теплообменников. При регулировании их теплопроизводительности путем изменения расхода теплоносителя стабилизация расхода почти полностью исключает возмущения, связанные с изменением температуры воздуха и теплоносителя. При этом отклонения по температуре приточного воздуха оказывают весьма малое влияние на температуру воздуха в обслуживаемом помещении.

В отличие от систем вентиляции в системах кондиционирования воздуха управляемая часть представляет собой объект из двух и более последовательных звеньев. Например, имеются такие режимы работы СКВ, когда в кондиционере последовательно производится нагрев воздуха в теплообменнике, адиабатная или политропная обработка в камере орошения и затем второй нагрев. В качестве промежуточной стабилизируемой переменной в этом случае может быть принята не только температура точки росы, но и температура или влажность приточного воздуха (рис. 2.9). Известно, что постоянная времени процесса в дождевом пространстве камеры орошения на порядок меньше постоянных времени изовлажностного нагрева в поверхностных теплообменниках. Поэтому в данном случае следует стремиться к снижению постоянных времени нагрева. Это достигается использованием в качестве исполнительных устройств заслонок в каналах байпасирования воздуха. При применении схемы, показанной на рис. 2.9, несколько снижается положительный эффект каскадного способа регулирования. Это объясняется тем, что внутренний контур автоматической стабилизации должен быть бо-

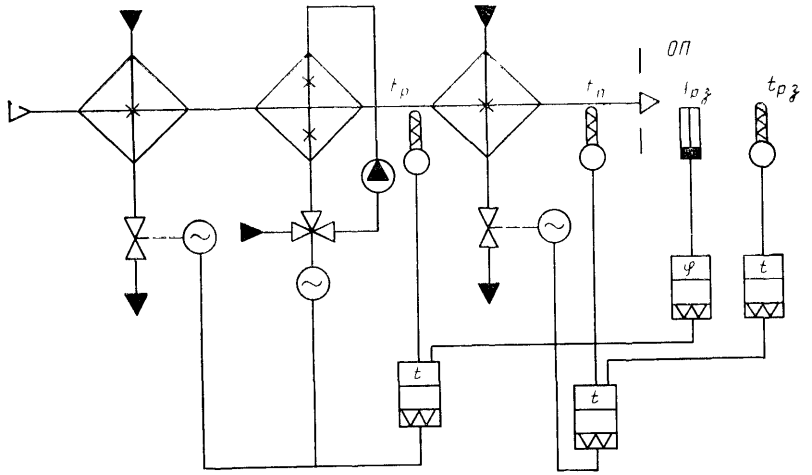


Рис. 2.9. Вариант каскадной схемы регулирования температуры и влажности воздуха

лее быстродействующим, чем внешний. Однако в целом применение подобной схемы целесообразно, так как при этом внутренний контур охватывает наибольшее число звеньев объекта, подверженных возмущающим воздействиям.

Следует иметь в виду, что качество переходного процесса в системе автоматического регулирования будет наиболее высоким, когда сумма постоянных времени звеньев внутреннего контура будет меньше постоянных времени процессов изменения температуры и влажности в обслуживаемом помещении.

Определение параметров настройки главного и вспомогательного регулятора начинается с исследования внутреннего контура, рассматриваемого так же, как и для одноконтурных систем. Можно выбрать коэффициент усилия, равный половине максимального, если внутренний контур стабилизации содержит три или более инерционных звена первого порядка или звено с чистым запаздыванием. Если же внутренний контур стабилизации содержит только два звена первого порядка, то можно выбирать большой коэффициент усиления, обеспечивающий значительно меньший запас по устойчивости. Система регулирования в целом может быть устойчива и при неустойчивом внутреннем контуре. Однако этого

следует избегать, так как не исключена возможность работы внутреннего контура системы автоматической стабилизации в режиме ручного дистанционного управления, а не в автоматическом режиме в совокупности с главным регулятором.

Во внутреннем контуре системы автоматической стабилизации можно использовать регулятор, позволяющий реализовать П- или ПИ-закон. В том случае, когда коэффициент усиления вспомогательного регулятора достаточно велик, допустимо использование пропорционального регулятора. Имеющаяся в этом случае статическая погрешность невелика и компенсируется при работе главного регулятора. Если во внутреннем контуре автоматической стабилизации выбран небольшой коэффициент усиления, то следует использовать пропорционально-интегральный регулятор. Такой регулятор наиболее целесообразен при стабилизации промежуточной переменной путем изменения расхода обменивающихся сред. В случае когда обратная связь внутреннего контура охватывает несколько инерционных звеньев, допустимо использование ПИД-регулятора.

Наиболее точные сведения о качестве настройки главного регулятора определяются на основании анализа частотных характеристик внешнего контура автоматической стабилизации. Частотная характеристика этого контура может быть получена из проведения передаточных функций звеньев внешнего контура на $W(p)/[1+W(p)]$, где $W(p)$ — произведение передаточных функций звеньев внутреннего контура.

Использование каскадной схемы регулирования позволяет в 2 раза увеличить коэффициент усиления вспомогательного регулятора, что приводит к увеличению критической частоты внутреннего контура автоматической стабилизации. Увеличение критической частоты происходит вследствие того, что фазово-частотная характеристика для $W(p)/[1+W(p)]$ весьма полога для частот ниже критической частоты внутреннего контура. Эта кривая не была бы такой пологой, если бы вспомогательный регулятор имел более низкий коэффициенг усиления, тогда и критическая частота каскадной системы не была бы столь высокой.

Известно, что при пропорциональном регулировании объекта, состоящего из одного инерционного звена первого порядка, замкнутая система имеет также первый порядок с постоянной времени, равной $T_0/(1+\kappa_0\kappa_р)$.

Следовательно, охватив это звено обратной связью внутреннего контура каскадной схемы, можно уменьшить инерционность звена объекта регулирования. Если это звено характеризуется второй по величине постоянной времени среди всех звеньев управляемой части системы, то наблюдается улучшение качества стабилизации промежуточной переменной состояния Реализация подобной структуры не приводит к существенному изменению собственной частоты или максимального коэффициента усиления системы в целом. Однако при этом происходит некоторое улучшение качества стабилизации выходной переменной при возмущениях, приложенных к звеньям внутреннего контура.

Если внутренний контур автоматической стабилизации содержит только одно инерционное звено первого порядка, то его постоянная времени может быть значительно уменьшена путем увеличения коэффициента усиления вспомогательного регулятора.

Как внешний, так и внутренний замкнутый контур автоматической стабилизации имеет дополнительное инерционное звено, представляющее собой измерительное устройство. Следует иметь в виду, что если инерционность собственно объекта очень мала, то дополнительное инерционное звено во внутреннем контуре, связанное с измерением промежуточной переменной, может свести на нет все преимущества каскадной схемы регулирования.

Используя каскадную схему регулирования, необходимо учитывать нелинейность регулирующих органов. При большом коэффициенте усиления вспомогательного регулятора небольшие отклонения промежуточной стабилизируемой переменной состояния или изменения управляющего сигнала от главного регулятора могут приводить к тому, что регулирующий орган будет переходить из одного крайнего положения в другое. Как уже говорилось, система в целом может быть при этом устойчивой, но качество переходных процессов в ней хуже, чем в одноконтурных системах.

2.4 СИСТЕМЫ СВЯЗАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В системах кондиционирования воздуха в большинстве случаев автоматизируются процессы изменения тепловлажностного состояния воздуха, в которых управляемыми (как промежуточными, так и выходными)

переменными являются по меньшей мере два параметра воздуха: его температура и влажность. Поэтому правомерно рассмотрение автоматизированных СКВ в классе многомерных и, в частности двухмерных систем, в которых управление ведется по двум или нескольким переменным.

В отдельных случаях при реализации простых процессов, например изотермического увлажнения или изовлажностного нагрева, применяется одна управляемая переменная. Для управления подобными процессами используются автономные системы автоматического регулирования. При этом изменение каждой переменной определяется свойством своего канала и видом своего исполнительного устройства. Однако общая картина управляемости СКВ, складывающаяся из некоторой суммы одномерных управлений простыми процессами, характеризуется ярко выраженной многомерностью и многосвязанностью.

В большинстве управляемых процессов кондиционирования воздуха и в первую очередь в политропных процессах между технологическими каналами создания требуемых температуры и влажности воздуха имеются перекрестные связи, приводящие к взаимному влиянию этих каналов. В условиях реализации программно-параметрических систем автоматического управления кондиционированием воздуха (ПП САУ КВ), когда значительно повышаются требования к точности стабилизации каждой из выходных переменных, такие связи могут существенно повлиять на качество работы системы управления. Если при создании ПП САУ КВ, в которых ведется управление несколькими переменными, не учитывать наличие связей между этими переменными и пытаться обеспечить требуемый процесс управления по каждой из них независимо друг от друга, то неучтенное взаимное влияние между отдельными каналами стабилизации может значительно ухудшить функционирование системы и даже привести к потере ее работоспособности.

Известно, что в случае, когда две связанные переменные стабилизируются отдельными независимыми контурами, между ними возникает взаимодействие, которое оказывает существенное влияние на характер переходного процесса. Подобная ситуация наблюдается при управлении политропными процессами в форсуночной камере орошения. Температура и влажность воз-

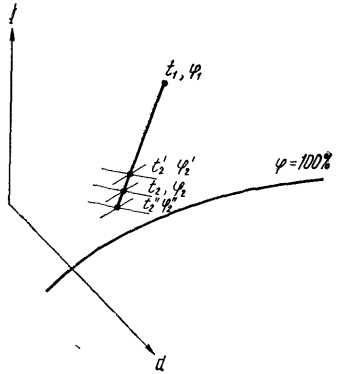


Рис. 2.10 Зависимость температуры и влажности воздуха от изменения расхода воды

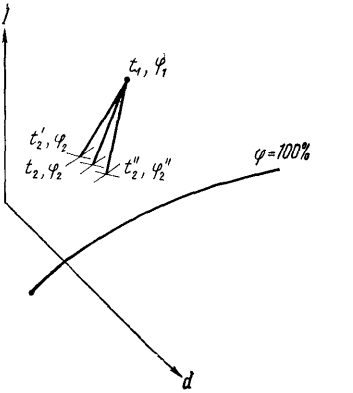


Рис 2.11. Зависимость температуры и влажности воздуха от изменения температуры воды

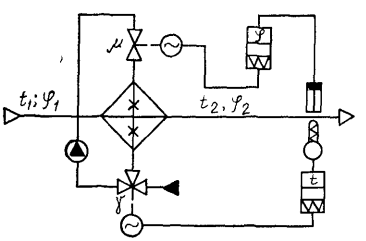


Рис 2.12 Схема регулирования температуры и влажности в политропном процессе обработки воздуха

духа на выходе из камеры орошения может стабилизироваться путем формирования регулирующих воздействий по расходу распыливаемой воды μ и ее температуре γ. Характер изменения температуры и влажности воздуха на выходе из камеры орошения при изменении расхода воды (рис. 2.10) и температуры (рис. 2.11) описывается уравнениями вида (1.90) и (1.91). Согласно уравнениям связи, регулирующие воздействия по расходу G_w и температуре t_w воды одновременно изменяют температуру и влагосодержание воздуха. Поэтому при реализации схемы регулирования, изображенной на рис 2.12, необходимо учитывать взаимодействие двух контуров автоматической стабилизации.

Взаимодействие возникает, например, когда один из регуляторов стабилизирует температуру воздуха на выходе из камеры орошения, но при этом формируется возмущающее воздействие на контур стабилизации влажности воздуха. Аналогичная картина происходит при работе регулятора влажности. С учетом того, что инерционные составляющие того и другого контура стабилизации приблизительно равны, эффект взаимодействия может привести к потере их устойчивости.

Для того чтобы движение в одном контуре сделать независимым от движения в другом, рекомендуется использование развязывающих звеньев. Введением идеальных развязывающих звеньев теоретически можно полностью устранить внутренние связи между отдельными контурами регулирования. При известных операторах перекрестных связей, считая взаимодействия по каналам связей внешними возмущениями и применяя принцип компенсации, можно добиться независимости или автономности стабилизации температуры и влажности воздуха. В таком случае развязанные контуры стабилизации могут настраиваться по традиционной методике.

В практике автоматизации различных технологических процессов развязывающие звенья используются сравнительно редко. Причиной этому является высокая стоимость дополнительной аппаратуры, а также трудности с которыми приходится сталкиваться при реализации идеальных развязывающих звеньев. Эти трудности состоят главным образом в том, что должны быть точно известны операторы перекрестных связей или, что то же самое, передаточные функции развязываемых каналов стабилизации.

Более приемлемо использование нестрогой неидеальной развязки. Часто бывает, что неидеально развязанная или даже вообще неразвязанная система в динамическом отношении может оказаться лучше идеально развязанной и позволяет достичь лучшего качества стабилизации. Поэтому в системах многосвязанного регулирования не всегда следует стремиться к подобной автономности [63]. В ряде случаев наибольший эффект достигается установлением характера связей между стабилизируемыми переменными и использование специальных приемов настройки регуляторов [64].

Структурная схема связной системы регулирования с двумя стабилизируемыми переменными x_1 и x_2 приведена на рис. 2.13. Для каждой из переменных x_1 и x_2 имеется заданное стабилизируемое значение $x_{1з}$ и $x_{2з}$, независимое одно от другого. В системе используются два регулятора P_1 и P_2. Управляемые процессы или объекты регулирования O_1 и O_2 в отличие от заданных значений стабилизируемых переменных независимы друг от друга и по каналам регулирующих воздействий r_1 и r_2 связаны между собой соединительными звеньями O_{12} и O_{21}.

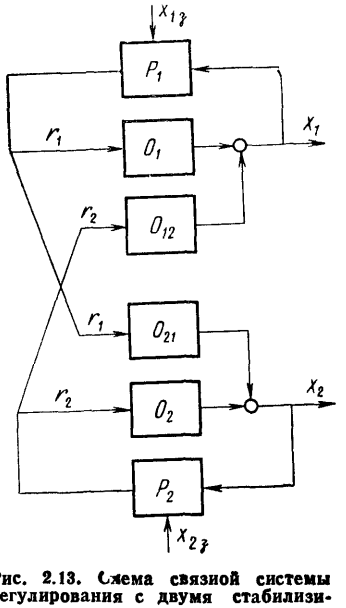


Рис. 2.13. Схема связной системы регулирования с двумя стабилизируемыми перемеиными x_1 и x_2

При разработке связанной системы автоматического регулирования в первую очередь необходимо исследовать ее структурную устойчивость. По структурной схеме системы задаются направление, в котором передается сигнал по связывающим звеньям O_{12} и O_{21}, и узлы суммирования сигналов. Полярность суммируемых сигналов, поступающих с основных каналов регулирования O_1 и O_2 и с выходов связывающих звеньев, определяет характер связи между каналами в системе. Эта связь может быть положительной или отрицательной и зависит от характеристик объекта регулирования и выбора регулирующих воздействий по тому или иному каналу.

Полярности сигналов должны быть выбраны так, чтобы регуляторы P_1 и P_2 вместе с соответствующими регулируемыми объектами O_1 и O_2 составляли контуры, при обходе которых знак менялся бы на обратный. При положительной связи два или четыре звена структурной схемы имеют одинаковую полярность передаваемых сигналов. При отрицательной связи три звена имеют одинаковые знаки.

Следует иметь в виду, что при положительной связи контур и вся система регулирования могут стать неустойчивыми, чего не бывает при отрицательной связи.

Значения переменных x_1 и x_2, которые должны поддерживаться обоими регуляторами, могут быть найдены из выражений:

$$x_1(\tau) = W_{01}(p)\, r_1(\tau) + W_{012}(p)\, r_2(\tau); \qquad (2.10)$$

$$x_2(\tau) = W_{02}(p)\, r_2(\tau) + W_{021}(p)\, r_1(\tau), \qquad (2.11)$$

где $W_{01}(p)$ — передаточная функция регулируемого объекта O_1 по каналу регулирующего воздействия r_1; $W_{012}(p)$ — передаточная функция соединительного звена O_{12} по каналу регулирующее воздействие r_2 — переменная x_1; $W_{02}(p)$ — передаточная функция регулируемого объекта O_2 по каналу регулирующего воздействия r_2; $W_{021}(p)$ — пе-

редаточная функция соединительного звена O_{21} по каналу регулирующее воздействие r_1 — переменная x_2

Регулирующие воздействия r_1 и r_2, которые прикладываются исполнительными устройствами регуляторов P_1 и P_2 к регулируемым объектам O_1 и O_2 соединительными звеньями O_{12} и O_{21}, определяются выражениями:

$$r_1(\tau) = W_{p1}(p)\,[x_1(\tau) - x_{1з}]; \tag{2.12}$$

$$r_2(\tau) = W_{p2}(p)\,[x_2(\tau) - x_{2з}]. \tag{2.13}$$

Решая систему уравнений двухсвязного регулирования (2.10) — (2.13) относительно стабилизируемой переменной x_1, получаем

$$x_1(\tau)\left\{\frac{[1+W_{01}(p)\,W_{p1}(p)]\,[1+W_{02}(p)\,W_{p2}(p)]}{W_{p1}(p)\,W_{p2}(p)\,W_{012}(p)\,W_{021}(p)} - 1\right\} = x_{1з}\left\{\frac{W_{01}(p)\,[1+W_{02}(p)\,W_{p2}(p)}{W_{p2}(p)\,W_{012}(p)\,W_{021}(p)} - 1\right\} + x_{2з}\frac{1}{W_{p1}(p)\,W_{012}(p)}. \tag{2.14}$$

Решение уравнений (2.10)—(2.13) относительно стабилизируемой переменной x_2 имеет аналогичный вид

$$x_2(\tau)\left\{\frac{[1+W_{02}(p)\,W_{p2}(p)]\,[1+W_{01}(p)\,W_{p1}(p)]}{W_{p1}(p)\,W_{p2}(p)\,W_{012}(p)\,W_{021}(p)} - 1\right\} = x_{2з}\left\{\frac{W_{02}(p)\,[1+W_{01}(p)\,W_{p1}(p)]}{W_{p1}(p)\,W_{021}(p)\,W_{012}(p)} - 1\right\} + x_{1з}\frac{1}{W_{p2}(p)\,W_{021}(p)}. \tag{2.15}$$

Для исследования устойчивости системы следует положить задающие воздействия $x_{1з}$ и $x_{2з}$ равными нулю. В таком случае уравнение для проверки устойчивости получается путем приравнивания нулю одинаковых сомножителей при $x_1(\tau)$ и $x_2(\tau)$ в выражениях (2.14), (2.15):

$$\frac{[1+W_{01}(p)\,W_{p1}(p)]\,[1+W_{02}(p)\,W_{p2}(p)]}{W_{p1}(p)\,W_{p2}(p)\,W_{012}(p)\,W_{021}(p)} - 1 = 0. \tag{2.16}$$

Если одна из передаточных функций $W_{012}(p)$ или $W_{021}(p)$ звеньев, связывающих оба контура стабилизации, равна нулю, то двухсвязанная система распадается на две несвязанные системы стабилизации.

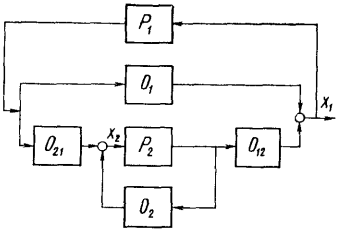


Рис. 2.14. Преобразованная схема связанной системы регулирования двух переменных x_1 и x_2

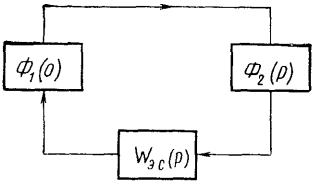


Рис. 2.15. Эквивалентная схема системы с двумя связанными стабилизируемыми переменными

Для анализа влияния на процесс стабилизации переменной x_1 и связанного с ним процесса стабилизации переменной x_2 рассмотрим структурную схему системы, показанную на рис. 2.14. Согласно структурной схеме, регулятор P_1, предназначенный для стабилизации переменной x_1, работает совместно с системой, которая состоит как бы из двух объектов регулирования. В отличие от случая с одной стабилизируемой переменной объект регулирования для регулятора P_1 состоит из двух параллельно включенных каналов: первый — собственно управляемый процесс O_1; второй — звенья связи O_{21} и O_{12} и замкнутый контур с регулятором P_2 в прямой цепи и звеном, характеризующим второй стабилизируемый процесс O_2 в цепи обратной связи.

Возможен случай, когда связь между контурами стабилизации, осуществляемая через второй канал O_{21} — P_2—O_{12}, характеризуется слабым уровнем сигналов и значительной инерционностью по сравнению с первым каналом, включающим звено O_1. В таком случае влияние связанности на настройку регулятора P_1 будет практически малозаметным.

В том случае, когда второй канал достаточно быстродействующий и уровень проходящих через него сигналов достаточно высок, при настройке регулятора P_1 надлежит учитывать связанность контуров стабилизации. При этом существенное значение имеют знаки суммируемых сигналов с выходов обоих каналов.

В общем случае следует иметь в виду, что наличие связи быстродействующего контура стабилизации с контуром стабилизации, обладающим меньшим быстродействием, следует обязательно учитывать при настройке регулятора контура с меньшим быстродействием.

Для получения конкретных оценок устойчивости и качества регулирования в системе представим ее характеристическое уравнение в виде

$$[1 + W_{01}(p)\, W_{p1}(p)]\,[1 + W_{02}(p)\, W_{p2}(p)] - \\ - W_{p1}(p)\, W_{p2}(p)\, W_{012}(p)\, W_{021}(p) = 0 \qquad (2\ 17)$$

Разделив обе части уравнения (2.17) на произведение выражений, стоящих в квадратных скобках, можно получить

$$1 - \frac{W_{01}(p)\, W_{p1}(p)}{1 + W_{01}(p)\, W_{p1}(p)} \cdot \frac{W_{02}(p)\, W_{p2}(p)}{1 + W_{02}(p)\, W_{p2}(p)} \times \\ \times \frac{W_{012}(p)\, W_{021}(p)}{W_{01}(p)\, W_{02}(p)} = 0 \qquad (2\ 18)$$

По форме характеристического уравнения (2.18) можно представить структурную схему эквивалентной одноконтурной системы, имеющей такое же характеристическое уравнение, как и исходная система с двумя связанными стабилизируемыми переменными (рис. 2.15). Эквивалентная схема состоит из трех последовательно включенных звеньев.

Первое звено представляет собой замкнутый контур регулирования переменной x_1 с передаточной функцией

$$\Phi_1(p) = \frac{W_{01}(p)\, W_{p1}(p)}{1 + W_{01}(p)\, W_{p1}(p)}; \qquad (2.19)$$

второе — замкнутый контур регулирования переменной x_2 с передаточной функцией

$$\Phi_2(p) = \frac{W_{02}(p)\, W_{p2}(p)}{1 + W_{02}(p)\, W_{p2}(p)}; \qquad (2.20)$$

третье — эквивалентное звено между каналами регулирования в системе с двумя переменными, включающей четыре звена объекта регулирования. Передаточная функция этого звена имеет вид

$$W_{э\,с}(p) = \frac{W_{012}(p)\, W_{021}(p)}{W_{01}(p)\, W_{02}(p)}. \qquad (2\ 21)$$

Статическое значение передаточной функции эквивалентного звена связи определяется как $k_{э\,с} = k_{012}k_{021}/k_{01}k_{02}$, где через k обозначены передаточные коэффициенты звеньев объекта регулирования. Параметр $k_{э\,с}$

называют коэффициентом статической степени связанности.

Значение коэффициента статической степени связанности может иметь положительный или отрицательный знак, что соответствует наличию положительной или отрицательной обратной связи в схеме эквивалентной системы. Значение $k_{э.с}=0$ соответствует отсутствию связи между каналами регулирования при условии, что в выражении $W_{э.с}(p)$ отсутствуют операторы чистого дифференцирования или интегрирования. При $k_{э.с}<0$ в системе имеется отрицательная связь между каналами регулирования. Значение $k_{э.с}>0$ соответствует условно положительной связи между каналами регулирования, при этом $k_{э.с}>1$ соответствует случаю, когда система монотонно неустойчива, если передаточные функции обоих регуляторов содержат составляющие чистого интегрирования.

Устойчивость системы связанного регулирования определяется помимо $k_{э.с}$, также и видом всех четырех передаточных функций объекта регулирования. При одинаковом значении $k_{э\,с}$ системы со звеньями связи, обладающими малой инерционностью, более предрасположены к потере устойчивости, чем системы со звеньями связи, обладающими большой инерционностью.

Могут быть использованы две другие представительные характеристики систем с двумя регулируемыми переменными. Одной из них является показатель степени связанности $k_c=\operatorname{sign}k_{э.с}/W_{э.с}(j\omega)/\omega=\omega_g$, где ω_g — доминирующая собственная частота полной системы. Второй характеристикой является показатель частотной симметрии каналов регулирования ω_1/ω_2, где ω_1 — доминирующая собственная частота контура регулирования, включающего звенья с наибольшей инерционностью, без учета связанности; ω_2 — собственная частота при критической настройке регулятора контура регулирования, включающего звенья с меньшей инерционностью.

Для исследования рассматриваемых систем с двумя регулируемыми переменными подставляем в уравнения (2.19) и (2.20) произвольные значения комплексно-сопряженного корня $p_{1,2}=-\alpha\pm j\beta$, при этом выделим вещественную часть $x(\omega)$, содержащую четные степени ω, и мнимую часть $y(\omega)$, содержащую нечетные степени ω. Далее необходимо определить влияние различных параметров системы, например коэффициентов усиления регуляторов $k_{р_1}$ и $k_{р_2}$, на ее устойчивость. Для решения

этой задачи производится построение областей устойчивости, т. е. определение таких областей значений параметров $k_{р_1}$ и $k_{р_2}$, при которых система оказывается устойчивой. Совокупность всех кривых на плоскости параметров, разбивающая всю плоскость на области с определенным распределением корней, называется D разбиением плоскости параметров [9, 11].

Для выражений (2.19) и (2.20) любого порядка удобно использовать критерий Михайлова. Колебательной границе устойчивости в этом случае соответствует равенство нулю характеристического комплекса $D(j\omega)=0$, т. е. прохождение кривой Михайлова через начало координат [9, 11].

При исследовании устойчивости в области параметров $k_{р_1}$ и $k_{р_2}$ границы устойчивости уравнение $D(j\omega, k_{р_1}, k_{р_2})=0$ колебательного типа распадается на два уравнения:

$$\left.\begin{aligned} X(\omega;\ k_{р_1};\ k_{р_2}) &= 0;\\ Y(\omega;\ k_{р_1};\ k_{р_2}) &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (2.22)$$

Выражения (2.22) представляют собой параметрические уравнения границы устойчивости при соблюдении дополнительного условия отрицательности вещественных частей всех остальных корней, кроме чисто мнимых.

Рассмотрим область параметров настройки $k_{р_1}$ и $k_{р_2}$ для системы с отрицательной связью между каналами регулирования при $k_{э.с}=-1$ и показатели частотной симметрии каналов $\omega_1/\omega_2=1$. Регуляторы $Р_1$ и $Р_2$ реализуют пропорциональный закон регулирования. На рис. 2.16 изображены области устойчивости несвязанной и связанной систем регулирования. В качестве координат на осях графика взяты значения $k_{р_1}$ и k_{2_2}, отнесенные к значениям $k_{р_1кр}$ и $k_{р_2кр}$, т. е. к максимальным значениям коэффициентов усиления $Р_1$ и $Р_2$, при которых на границе устойчивости оказывается каждая из несвязанных систем регулирования. Как видно из рисунка, область устойчивости связанной системы существенно меньше, чем несвязанной. Это еще раз подтверждает положение о том, что связанная система более предрасположена к потере устойчивости. Из рис. 2.16 также видно, что из двух связанных регуляторов более широкий диапазон настройки имеет регулятор менее инерционного контура. Коэффициент усиления этого регулятора может быть

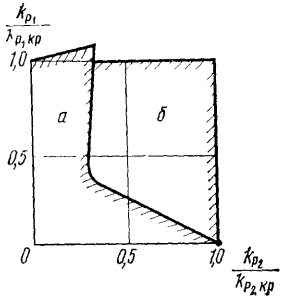


Рис. 2.16. Область устойчивости связаиной (*а*) и несвязанной (*б*) систем регулнрования при $k_{э.с} = -1$

равен и даже несколько больше, чем такой же коэффициент в случае несвязанной системы. Коэффициент усиления регулятора более инерционного контура, напротив, по сравнению со случаем несвязанной системы должен быть существенно уменьшен.

Области устойчивости, подобные приведенным на рис. 2.16, могут быть получены по данным моделирования или непосредственно на реальной системе. В таком случае желательно использовать какой-либо критерий качества переходных процессов.

Использование в системе связанного регулирования пропорционально-интегральных регуляторов позволяет улучшить качество регулирования. При этом может быть так, что по одному контуру регулирования имеется некоторый выигрыш, а по другому — заметный проигрыш.

При настройке регуляторов P_1 и P_2 следует учитывать два требования, которые между собой слабо связаны и даже в некоторой степени противоречат. С одной стороны, оптимальной или близкой к оптимальной настройкой регуляторов необходимо обеспечить определенную точность стабилизации, а с другой, из практических соображений желательно, чтобы методика настройки регуляторов была достаточно простой. В большинстве случаев второму требованию, обеспечивающему удобство эксплуатации, придается наибольшее значение.

В некоторых случаях ставится задача обеспечить удовлетворительную настройку регуляторов при минимальных знаниях об объекте регулирования и при небольшом числе требуемых для настройки измерений. Удовлетворительная настройка регуляторов предполагает достижение приемлемого времени переходного процесса и минимума отклонения стабилизируемых переменных. Как и при использовании традиционной методики [14], считается выполненным необходимое условие настройки регуляторов в одноконтурных сис-

темах. Это условие заключается в том, что отдельные несвязанные контуры стабилизации могут быть выведены на границу устойчивости с применением лишь пропорциональных регуляторов. Это условие наиболее существенно для случая, когда контуры стабилизации содержат инерционные звенья высокого порядка или инерционные звенья и чистое запаздывание. Из-за различий в условиях устойчивости связанных систем регулирования необходимо рассматривать отдельно случаи, когда $k_{э.с}<0{,}0<k_{э.с}<1$ и $k_{э.с}>1$.

Случай $k_{э.с}<0$, т. е. когда в системе имеется отрицательная связь между контурами стабилизации, характерен для подавляющего числа процессов, возможных в технике автоматизации систем кондиционирования воздуха с двумя стабилизируемыми переменными. При настройке подобных систем сначала оба регулятора включаются как пропорциональные. В случае, если используемый регулятор позволяет реализовать пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования, время изодрома $T_и$ устанавливается по возможности максимальным, а постоянная времени дифференцирования — минимальной. Затем один регулятор, например $Р_2$, полностью отключается, а коэффициент усиления другого регулятора $k_{р_1}$ увеличивается до значения $k_{р_1 к}$, соответствующего нахождению системы на границе устойчивости. После этого регулятор $Р_{22}$ вновь подключается. При увеличении коэффициента усиления регулятора $Р_{22}$ могут возникнуть три ситуации, описанные ниже.

1. Система становится устойчивой (рис. 2.17). Этот факт легко устанавливается по виду переходных процессов и свидетельствует о наличии у области устойчивости системы ярко выраженного всплеска. Коэффициент усиления $k_{р2}$ увеличивается до значения $k_{р_2 у}$, соответствующего тому, что система вновь попадает на границу устойчивости. Период возникающих при этом в системе колебаний можно выбрать в качестве меры при определении времени изодрома $T_и$.

2. Система остается на границе устойчивости (рис. 2.18). Область устойчивости в этом случае не имеет характерного пика. Коэффициент усиления $k_{р2}$ можно увеличивать до значения $k_{р_2 у}$, пока система не выйдет на границу устойчивости. Период $T_у$ медленных колеба-

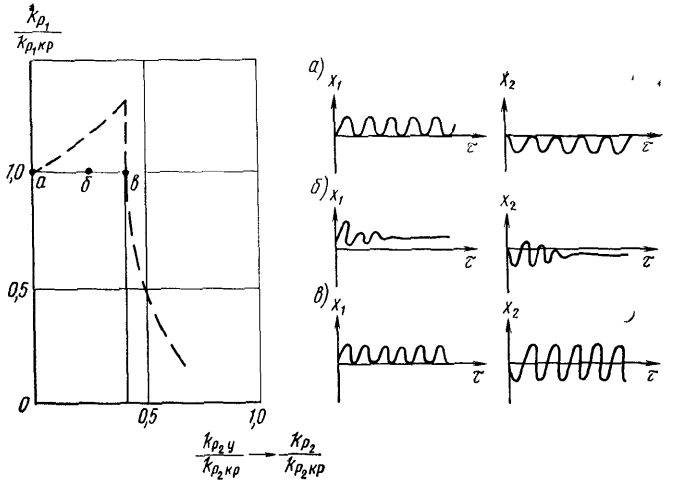


Рис. 2.17. Область устойчивости и кривые переходных процессов (*а*, *б*, *в*) в системе при $k_{э.с} < 0$ для случая 1

а, *б*, *в* — для кривых соответственно в точках *а*, *б*, *в*

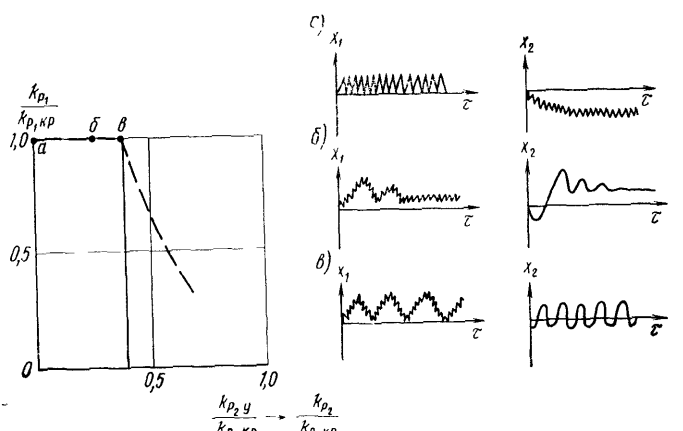


Рис. 2.18. Область устойчивости и кривые переходных процессов (*а*, *б*, *в*) в системе при $k_{э.с} < 0$ для случая 2

а, *б*, *в* — для кривых соответственно в точках *а*, *б*, *в*

ний, возникающих при этом в системе, может служить мерой при выборе времени изодрома $T_и$.

3. Система остается неустойчивой (рис. 2.19). В этом случае значение k_{p_1} уменьшается до значения

$0{,}5k_{р_1кр}$ с последующим увеличением $k_{р_2}$ до значения $k_{р_2у}$, система оказывается на границе устойчивости. Мерой для выбора значения времени изодрома $T_и$ может служить период колебаний системы, находящейся в этом состоянии.

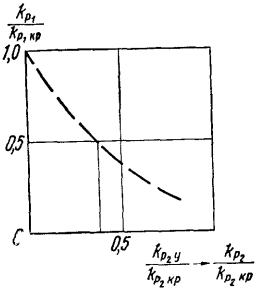


Рис 2 19 Область устойчивости в системе при $k_{э\,с}<0$ для случая 3

Аналогичным образом могут быть произведены настройки для отыскания области устойчивости для другой части системы. В этом случае сначала полностью отключается регулятор $Р_1$, и увеличением коэффициента усиления $k_{р_2}$ до значения $k_{р_2кр}$ система выводится на границу устойчивости Затем после подключения регулятора $Р_1$ при увеличении его коэффициента усиления могут возникнуть три возможные ситуации, рассмотренные выше.

Таким образом, для определения границ области устойчивости системы и в дальнейшем параметров регуляторов, соответствующих области устойчивости, достаточно рассмотреть ограниченное число состояний системы. На рис. 2.17—2.19 эти состояния обозначены точками.

В настоящее время все большее применение находят ПИ-регуляторы, поэтому рассмотрим некоторые аспекты настройки именно этих регуляторов. При использовании ПИ-регуляторов значения их коэффициентов усиления выбираются с тем расчетом, чтобы точка настройки лежала приблизительно в середине самого широкого пространства области устойчивости. Для случая, представленного на рис. 2.17 и 2.18, $k_{р_2}=0{,}5\,k_{р_2у}$; $k_{р_1}=0{,}5\,k_{р_1к}$; для случая, представленного на рис. 2.19, $k_{р_1}=0{,}25k_{р\,1\,к}$.

Мерой для определения времени изодрома регулятора T служит величина периода колебаний в связной системе, находящейся на границе устойчивости. При этом определенное значение имеет также и ширина области устойчивости. Для относительно узких областей устойчивости при $k_{р\,у}/k_{р\,к}<0{,}3$ следует пользоваться уравнениями $0{,}75T_{и_1}=T_у$ и $1{,}5\,T_{и_2}=T_у$. Из двух рекоменду-

емых значений времени изодрома меньшее предназначается для регулятора с меньшим коэффициентом усиления. Для более широких областей устойчивости с $k_{р\,у}/k_{р\,к}=0{,}3—0{,}7$ рекомендуется брать $T_{и_1}=T_{и_2}=T_у$. При еще большей ширине области устойчивости, т. е. при $k_{р\,у}/k_{р\,к}>0{,}7$, следует задаваться $T_{и\,1}=T_{1_у}$ и $1{,}2\ T_{и_2}=T_{2у}$. В этом случае связь между контурами стабилизации имеет значительное влияние, и поэтому значения времени изодрома $T_{и\,1}$ и $T_{и\,2}$ выбираются так же, как и в одноконтурных системах.

Для систем связанного регулирования с целью повышения качества переходных процессов весьма перспективно применение ПИД-регуляторов. При использовании ПИД-регуляторов значения их коэффициентов усиления $k_р$ могут быть увеличены на 25%, а значения постоянных времени при интеграторах уменьшены на 50%. Полагая, что параметры ПИ-регуляторов известны, и учитывая, что максимальное значение времени предварения обычно принимают равным $T_д=0{,}25\ \ T_и$, можно рекомендовать следующие соотношения для определения параметров регуляторов:

$k_{р\ пид}=1{,}25k_{р\ пи}$; $T_{и\,пид}=0{,}5\ T_{и\,пи}$; $T_{д\,пид}=0{,}25T_{и\,пи}$.

При настройке регуляторов системы могут быть использованы следующие дополнительные рекомендации.

1. Если область устойчивости имеет ярко выраженный пик, то положение последнего может быть приближенно определено из небольшого числа опытов (рис. 2.20,*а*). В подобной системе точка настройки регуляторов выбирается приблизительно посередине отрезка *ОВ*. Соотношения для определения постоянных времени остаются прежними.

2. Если период колебаний в связанной системе значительно меньше, чем в соответствующей несвязанной ($T_у\ll\ll T_к$), то область устойчивости может иметь вид, показанный на рис. 2.20, *б*. Значение $k_{р_2}$ выбирается в этом случае несколько бо́льшим, но таким, чтобы точка настройки оставалась приблизительно в середине узкого пространства области устойчивости, ширину которого в этом месте следует определить точнее.

3. Если период колебаний в связанной системе существенно бо́льше, чем в соответствующей несвязанной ($T_у\gg T_к$), то коэффициенты усиления обоих регуляторов следует выбирать небольшими.

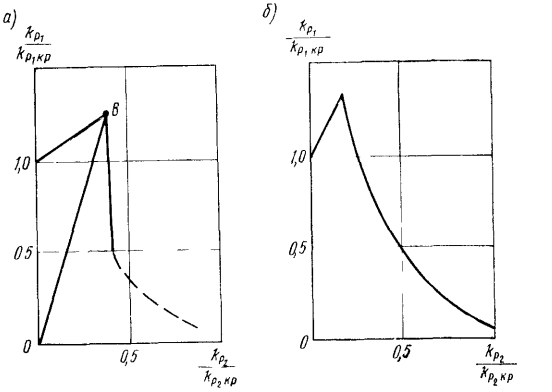


Рис. 2 20. Область устойчивости в системе с ПИД-регулятором
а и *б* — соответственно для случаев 1 и 2

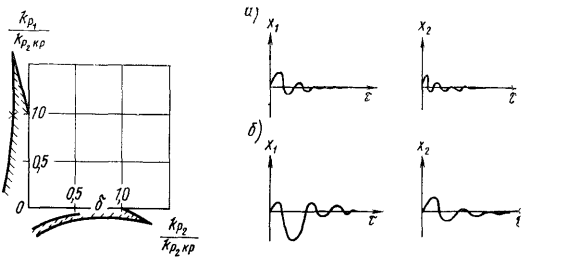


Рис. 2.21. Область устойчивости в связанной системе регулирования при $k_{э.с}>1$ и кривые переходных процессов в несвязанной (*а*) и связанной (*б*) системе

4. Для получения лучшего качества стабилизации той переменной системы, которая представляет наибольший интерес, ее контур следует сделать более быстродействующим. Добиться подобного эффекта можно увеличением коэффициента при дифференцировании, уменьшением коэффициента при интегрировании, уменьшением инерционности контура, а также использованием обратных мер по отношению к другому контуру стабилизации.

Несколько отлична от рассмотренной методика настройки регуляторов при положительной связи между контурами стабилизации. В случае, если $0<k_{э.с}<1$, точка настройки регуляторов, так же, как и раньше, выбирается по возможности в середине широкого пространства области устойчивости. Значения времени изодрома определяются следующими соотношениями: $T_{и_1}=T_{и_2}=0{,}33\ T_у$ при $k_{р\,у}<0{,}3\ k_{р\,к}$; $T_{и_1}=T_{и_2}=0{,}66\ T_у$ при $k_{р\,у}=(0.3—0{,}7)\ k_{р.к}$; $T_{и\,1}=0{,}83\ T_{1к}$ и при $k_{р\,у}>0{,}7\ k_{р\,к}$; $T_{и_2}=0{,}83\ T_{2к}$.

Следует иметь в виду, что эти рекомендации дают, однако, меньшие гарантии, чем в случае отрицательной связности между контурами стабилизации. Опыт показывает, что, как правило, выбор неравных значений $T_и$ для регуляторов с учетом величины периода колебаний в несвязанной системе дает лучшие результаты.

Как уже отмечалось, в случае положительной связи при $k_{э.с}>1$ и наличии у обоих регуляторов интегральной составляющей, система оказывается монотонно неустойчивой. Настройка регуляторов, обеспечивающая устойчивую работу системы, возможна лишь при изменении полярности сигналов у обоих регуляторов. Пример такой несимметричной системы с сильной положительной связью приведен на рис. 2.21. При выборе точки настройки в середине широкого пространства области устойчивости качество переходных процессов (рис. 2.21, *б*) хуже, чем в случае несвязанной системы (рис. 2.21, *а*). Однако приведенный пример показывает, что даже в этом наиболее неблагоприятном случае принципиально возможна работоспособная настройка регуляторов.

2.5. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ И СХЕМ КАСКАДНОГО И СВЯЗАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Многорежимное функционирование автоматизированных СКВ достигается при использовании принципов построения систем с переменной структурой. Следует, однако, иметь в виду, что рассмотренные в п. 2.2 принципы построения автоматизированных СКВ с переменной структурой несколько отличаются от классических положений СПС [55].

В данном случае основным свойством автоматизированных СКВ является способность изменять свою структуру при движении в пространстве базисных координат, т. е. в пространстве изменения температуры и влажности наружного воздуха. Другое отличительное свойство автоматизированных СКВ состоит в использовании принципа программного изменения переменности выходных координат. Это означает, что поддерживаемые в обслуживаемом помещении температура и влажность воздуха могут приобретать различные значения, которые являются функцией показателя расхода энергии системой.

Допустимые отклонения текущих значений температуры и влажности воздуха в обслуживаемом помещении от требуемых ограничиваются пределами заданной зоны с максимальными и минимальными значениями нормируемых параметров. При этом традиционная автоматизированная СКВ работает так, что допустимые отклонения температуры и относительной влажности от их заданных значений в пределах указанной зоны имеют случайный и неорганизованный характер.

Для нахождения наиболее экономичного в отношении расхода энергии режима работы СКВ необходимо измерять параметры наружного, приточного и внутреннего воздуха, а также учитывать их расход. При этом управление системой ведется так, чтобы выходные управляемые переменные лежали внутри заданной зоны и в то же время приобретали некоторые экстремальные значения. Выбор этих значений, производимый средствами программного или аппаратного обеспечения, осуществляется одновременно с выбором вида структуры системы*.

В большинстве случаев изменение структуры автоматизированной СКВ происходит с длительностью, соизмеримой с длительностью изменения температуры и влажности наружного воздуха в суточном и годовом цикле. В то же время отдельные переменные системы изменяют свое состояние с длительностью переходных процессов, измеряемой минутами. Эти изменения происходят при сохранении постоянного и неизменного вида структуры системы. Таким образом, в СКВ имеются переходные процессы, измеряемые суточным или годовым интервалом, а также интервалом, соизмеримым с несколькими минутами.

Кратковременные переходные процессы характеризуются такой работой системы, при которой потребляется только один вид энергии, например только тепловой. Возможная колебательность переходного процесса определяет знакопеременность отклонений в расходе энергии от некоторого установившегося значения. Очевидно, что при интегральной оценке показателя расхода энергии именно подобная знакопеременность нивелирует качественные суммарные показатели.

Показатели расхода энергии в значительной мере определяются характером переходных процессов суточ-

* А. с. 576496 (СССР). Способ автоматического управления параметрами воздуха в помещении./С. В Нефелов, А. А. Рымкевич, М. Б. Халамейзер. — Заявл. 28.07.76, № 2377765, опубл. в БИ, 1977, № 38.

ного или годового цикла. Именно в этих циклах происходит перемена структуры системы. Таким образом, энергетические показатели системы зависят от уровня использования принципов построения систем с переменной структурой.

Принципы построения систем с переменной структурой в автоматизированных СКВ отражают специфику систем, работающих непрерывно в длительном цикле, т. е. систем с большой инерционностью и медленно протекающими процессами. Поэтому изменение структуры в СКВ происходит не в фазовом пространстве отклонения управляемой переменной и ее производной, а в пространстве изменения базисных координат системы и некоторых промежуточных переменных состояния. При этом в управляющей части системы средства получения сигнала производной отклонения какой-либо переменной не используются. В данном случае внутри области пространства функционирования одного вида структуры используются регуляторы, позволяющие реализовать пропорционально-интегральный закон регулирования. Именно здесь уместно говорить как бы о подструктуре того или иного контура стабилизации.

Требуемый показатель качества подструктуры системы автоматической стабилизации достигается другими в отличие от [55] схемными средствами. В данном случае целесообразно использовать такие средства автоматического управления, как схемы каскадного или связанного регулирования.

Качество автоматической стабилизации при использовании каскадных схем регулирования улучшается за счет понижения порядка астатизма действующей системы и повышения ее быстродействия. Кроме того, использование каскадных схем регулирования позволяет получить ряд других положительных качеств автоматизированной СКВ: 1) организационно-техническая заводская возможность агрегирования технологического оборудования средствами автоматики; 2) заводская паспортизация технических характеристик автоматизированной системы.

При использовании каскадной схемы регулирования наиболее полно реализуется предлагаемый принцип построения автоматизированных СКВ с переменной структурой. При этом вспомогательный регулятор становится средством стабилизации определенного регулирующего

воздействия. В свою очередь, это регулирующее воздействие становится средством стабилизации различных выходных переменных. Это означает, например, что постоянно действующий внутренний контур стабилизации расхода теплоносителя может попеременно входить в структуру внешнего контура стабилизации температуры или влажности воздуха. В результате достигается эффект использования ограниченного числа регулирующих воздействий в различных контурах стабилизации выходных управляемых переменных. При этом главный регулятор остается регулятором заданной управляемой переменной, а тот или иной вспомогательный регулятор в совокупности со звеньями контура становится его исполнительным устройством.

Таким образом, использование каскадных схем регулирования дополняет и совершенствует автоматизированные СКВ, построенные по принципу систем с переменной структурой.

Существенный технико-экономический эффект от использования принципов построения автоматизированных СКВ с переменной структурой можно достичь только в случае повышения качества стабилизации как температуры, так и влажности воздуха.

В настоящее время в отечественной практике наиболее распространенным аппаратом, используемым для увлажнения и осушки воздуха, является форсуночная камера орошения Для получения несвязанности управления температурой и влажностью воздуха на выходе из камеры орошения или кондиционера применяется технологический процесс обработки воздуха с обязательным наличием его промежуточного состояния, характеризуемого состоянием точки росы. Однако доказано, что реализация промежуточного состояния воздуха — точка росы на выходе из камеры орошения — неэффективна для работы СКВ по соображениям требуемой экономии энергии.

Для снижения суммарного расхода энергии в кондиционере на выходе из камеры орошения необходимо получить воздух с относительной влажностью, неравно 100%. Подобный эффект достигается в результате того, что распыление воды в потоке воздуха осуществляется не непрерывно, а импульсно Длительность распыления изменяется пропорционально отклонению относительной влажности воздуха от заданного значения, при этом

период следования импульсов распыления остается постоянным. Соотношение между длительностью интервалов, в течение которых производится распыление воды в поток воздуха, и интервалов, в течение которых распыление отсутствует, определяет среднее значение относительной влажности воздуха на выходе из камеры орошения. Длительность периода включения и отключения распыла находится из условия: колебания относительной влажности воздуха около стабилизируемого среднего значения не превышают допустимых значений. При последующем движении воздуха через калориферы, вентилятор и воздуховоды происходит сглаживание пульсаций относительной влажности*.

В каскадной схеме регулирования выходной сигнал главного регулятора $Р_г$ является командным сигналом (сигналом задания) x_3 для вспомогательного регулятора $Р_в$. В системе двухсвязанного регулирования изменение задающего воздействия $x'_{1з}$ для регулятора $Р_{г_1}$ влияет не только на соответствующую этому регулятору стабилизируемую переменную x_1, но одновременно и на другую стабилизируемую переменную x_2. Аналогично и задающее воздействие $x'_{2з}$ для регулятора $Р_{г_2}$ влияет не только на соответствующую этому регулятору стабилизируемую переменную x_2, но и на стабилизируемую переменную x_1. Зависимости для этих связей аналогичны зависимостям (2.14) и (2.15).

Очевидно, что взаимное влияние задающих воздействий ухудшает работу системы. От этого можно избавиться, если одновременно с задающим воздействием в один регулятор вводится соответствующее воздействие, устраняющее влияние его на второй регулятор. Структурная схема такой системы приведена на рис. 2.22. Согласно схеме, каждый вспомогательный регулятор имеет дополнительное соединение с другим главным регулятором через звенья $P_{г_{12}}$ и $P_{г_{21}}$. Приведенные ранее уравнения (2.12) и (2.13) можно записать в следующем виде:

$$r_1(p) = W_{р.в_1}(p)\,[x_1(\tau) - x_{1з}] + W_{р\ г_{21}}(p)\,x'_{2з}; \qquad (2.23)$$

$$r_2(p) = W_{р.в_2}(p)\,[x_2(\tau) - x_{2з}] + W_{р.г_{12}}(p)\,x'_{1з}. \qquad (2.24)$$

* А. с. 567031 (СССР) Способ регулирования влажности воздуха в помещении / С. В. Нефелов, Ю. В. Фролов. — Заявл 31 05 75, № 2118071, опубл. в БИ, 1977, № 28.

Решая уравнения (2.23) и (2.24) совместно с уравнениями (2.10) и (2.11) (см. рис. 2.13), получаем искомое выражение для передаточной функции

$$W_{\text{р.г}_{21}}(p) = \frac{W_{021}(p)\,[2\,W_{\text{р.в}_2}(p)\;W_{02}(p) - 1]}{W_{012}(p)\,W_{021}(p) + W_{01}(p)\,W_{02}(p) + \dfrac{W_{02}(p)}{W_{\text{р.в}_2}(p)}}. \quad (2.25)$$

При этом отсутствует влияние на регулятор со стороны задающего воздействия во втором контуре системы взаимосвязанного регулирования.

Таким же образом получаем выражение для передаточной функции $W_{\text{р.г}_{12}}(p)$ для аналогичных условий:

$$W_{\text{р.г}_{12}}(p) = \frac{W_{012}(p)\,[2\,W_{\text{р.в}_1}(p)\;W_{01}(p) - 1]}{W_{021}(p)\;W_{012}(p) + W_{01}(p)\,W_{02}(p) + \dfrac{W_{01}(p)}{W_{\text{р.в}_1}(p)}}. \quad (2.26)$$

Путем реализации соответствующих дополнительных звеньев в регуляторах $\text{Р}_{\text{в}\,1}$ и $\text{Р}_{\text{в}2}$ или $\text{Р}_{\text{г}_1}$ и $\text{Р}_{\text{г}_2}$ с передаточными функциями вида (2.25) и (2.26) достигается устранение влияния между внутренними контурами автоматической стабилизации. Во многих случаях этого бывает достаточно для получения требуемого качества стабилизации переменных x'_1 и x'_2 по внешним контурам каскадной схемы регулирования.

Таким образом, нами была рассмотрена возможность применения трех способов совершенствования автоматизированных СКВ: принципа построения систем с переменной структурой, каскадной схемы регулирования и схемы связанного регулирования. Совершенно не обязательно их одновременное применение.

В первую очередь следует широко использовать принципы построения автоматизированных

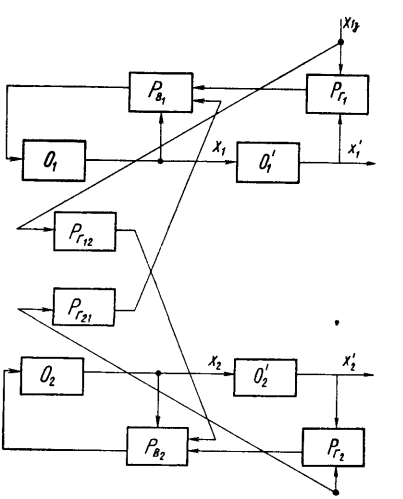


Рис. 2.22. Структура контуров двухсвязанного регулирования по каскадной схеме

СКВ с переменной структурой. Специфика реализации принципов переменности структуры в СКВ позволяет отнести подобные системы к классу программно-параметрических. Совершенствование программно-параметрических систем автоматического управления кондиционирования воздуха (ПП САУ КВ) возможно путем использования каскадного и связанного регулирования. Следует иметь в виду, что использование принципа построения систем с переменной структурой позволяет обеспечить гибкое многорежимное ведение технологического процесса кондиционирования микроклимата. Это является первым необходимым условием достижения экономии энергии. Использование же схем каскадного и связного регулирования позволяет достичь более высокого качества процессов стабилизации внутри каждого из режимов работы СКВ. Это является достаточным условием достижения экономии энергии.

Схемы каскадного регулирования следует широко применять и в простых однорежимных или одноконтурных системах. Это относится прежде всего к системам вентиляции.

2.6. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СКВ

Проблема технического обеспечения управления системами кондиционирования воздуха является наиболее изученной и разработанной по сравнению с вопросами анализа и синтеза структур и алгоритмов их управления. Однако в связи с постановкой задачи реализации программно-параметрических систем автоматического управления и в данной проблеме возникает ряд вопросов, подлежащих исследованию.

Одним из основных вопросов является необходимость повышения уровня заводской готовности отдельных агрегатов СКВ, а также упорядочение регламентов монтажа, настройки и эксплуатации как отдельных агрегатов, так и систем в целом. Очевидно, что уровень заводской готовности агрегатов СКВ в значительной мере определяется оснащенностью средствами автоматического управления и их готовностью к работе.

Оснащение технологических агрегатов средствами автоматики в заводских условиях, дифференцированный подход к использованию средств автоматики, т. е. к уровню развития автоматизации СКВ в тех или иных

условиях эксплуатации, успешно решается на основе предложенного принципа ранжирования функций управления СКВ в целом и последовательного управления этапами технологического процесса кондиционирования микроклимата на среднем иерархическом уровне.

Приборы и устройства каждого иерархического уровня структуры управления имеют достаточную функциональную автономность. В то же время они должны обладать полнотой и законченностью, а также совместимостью как между собой внутри уровня, так и с приборами и устройствами других уровней. Действительно, например, датчик-реле защиты от замерзания информационно никак не связан с контуром стабилизации температуры на выходе из кондиционера или контур стабилизации влажности в процессе работы в границах одного технологического режима никак не связан с логическими устройствами блока переключения структуры. Такие функциональные качества приборов и устройств позволяют заменять их в одном конструктивном уровне исполнения, не производя изменений в конструкции приборов и устройств других уровней.

Функциональная автономность каждого из иерархических уровней САУ КВ делает целесообразным их автономное конструктивное оформление. Кроме того, по тем или иным причинам (стоимость, условия эксплуатации и т. д.) возможно создание и эксплуатация системы кондиционирования воздуха, снабженной только низшим уровнем, уровнем пуска, остановки и защиты от аварийных ситуаций, или первым и вторым уровнем, т. е защитой и стабилизацией При этом функции недостающих средств автоматики, т. е. функции верхних уровней управления системами, могут в определенной мере выполняться с помощью ручного управления, а при наличии только первого уровня — путем изменения расходов или потоков обменивающихся сред с помощью немеханизированных вентилей и заслонок.

Кроме того, благодаря многоуровневой структуре управления, функциональной и конструктивной автономности каждого из уровней появляется возможность изменить, расширить и усложнить функции одного уровня. При этом могут использоваться новые приборы и устройства и в то же время любые из этих изменений не требуют каких-либо конструктивных изменений внутри другого уровня

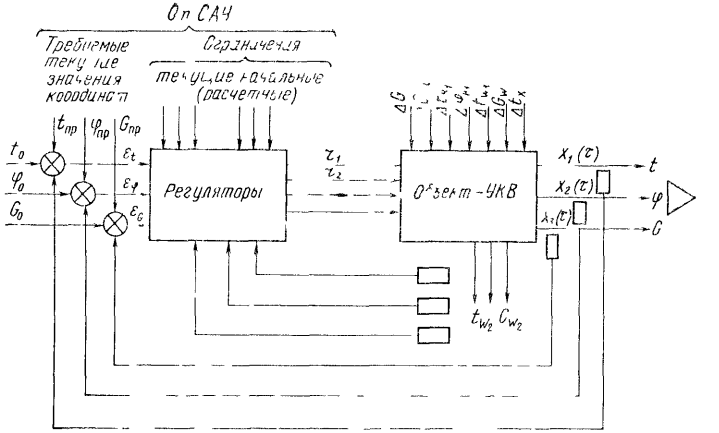


Рис. 2 23. Структурная схема автоматизированного кондиционера

Использование предложенного принципа последовательного управления режимами технологического процесса кондиционирования микроклимата позволяет решать задачу оснащения средствами автоматической защиты и стабилизации установок кондиционирования воздуха. Любой кондиционер можно снабдить устройствами автоматической стабилизации параметров воздуха на выходе. Структура автоматизированной установки кондиционирования воздуха представлена на рис. 2.23. Выполнение предложенной структуры является основой конструктивного интегрирования установки кондиционирования воздуха и средств автоматики на этапе заводского изготовления. Независимо от возможной будущей структуры СКВ установка кондиционирования воздуха должна быть снабжена всеми элементами контуров автоматического управления и стабилизации. Наличие вспомогательного подчиненного контура регулирования в кондиционере дает возможность установить необходимые диапазоны, а также динамические и статические характеристики поддержания параметров приточного воздуха в условиях заводской проверки, провести их паспортизацию и дать гарантию их соблюдения в оговоренных условиях эксплуатации.

Очевидно, что глобальная оптимизация управления производится только в объеме системы кондиционирования в целом и только с учетом характеристик обслуживаемого помещения Однако для решения задачи гло-

бальной оптимизации управления при отсутствии информации о возможности СКВ, в которой будет использован кондиционер, необходимо в нем применять регуляторы $Р_в$, снабженные дополнительными входами для сигналов от центральной системы управления об изменении заданий на стабилизацию выходных переменных, а также для сигналов от периферийных корректирующих регуляторов об изменениях тепловлажностной нагрузки в обслуживаемых помещениях. В свою очередь, использование по тем или иным мотивам корректирующих регуляторов позволяет вести процесс кондиционирования микроклимата в автоматическом режиме управления — по выходным переменным СКВ, т. е. по параметрам воздуха в обслуживаемом помещении, а в ручном режиме — по параметрам приточного воздуха. Мотивы использования или неиспользования приборов и устройств автоматики корректирующего контура могут быть самые разнообразные, но они не влияют на уровень автоматизации кондиционера и на степень его заводской готовности к эксплуатации.

Задача правильного выбора аппаратных средств является важной проблемой в технике автоматического управления кондиционированием микроклимата. Это касается в первую очередь средств измерения и, в частности, характеристик их чувствительности к изменению наблюдаемых переменных состояния.

Анализ годовых пределов изменения нормируемых показателей микроклимата для неспециальных технологических и комфортных систем кондиционирования воздуха позволяет определить диапазоны изменения выходных переменных: по температуре — 1—5°С, по влажности — 7—30%, по расходу воздуха — 0,6—1 номинального расхода. Однако эти довольно широкие пределы изменения выходных переменных не связаны с чувствительностью каналов их измерения, так как совершенные алгоритмы управления систем кондиционирования воздуха основаны на программно-параметрическом изменении выходных переменных, диапазоны изменения мгновенных значений которых значительно меньше допустимых изменений в годовом цикле.

Очевидно, что поддержание параметров микроклимата целесообразно вести в различных точках заданной общей области выходных переменных состояния: зимой — при меньших значениях температуры и меньших

значениях влажности, летом — наоборот. Также очевидно, что сужение диапазонов мгновенных изменений выходных переменных приводит к повышению требований к точности управления, а следовательно, чувствительности измерения. Это, в свою очередь, обусловливает увеличение стоимости аппаратуры управления.

Анализ количественного показателя эффективности систем кондиционирования воздуха [см. формулу (2.1)] показывает, что при применении программно-параметрического управления необходимо повышение точности и чувствительности управляющей части системы. Это приводит к тривиальной ситуации, когда снижение эксплуатационных затрат связано с повышением капитальных затрат на средства автоматического управления

Оценка эксплуатационных расходов в системе кондиционирования воздуха по стоимости энергии на обработку воздуха для поддержания параметров микроклимата в той или иной допустимой области позволила получить [1] аналитическую зависимость расхода тепла в виде функции чувствительности управляющей части системы по каналам измерения влагосодержания, относительной влажности и температуры:

$$\left.\begin{aligned} &\Delta Q_d \approx G_{\text{н}}\, l\, \Delta d; \\ &\Delta Q_{\varphi} \approx G_{\text{н}}\, 0{,}623\, l\, \frac{P_{\text{н п}}}{B}\, \Delta \varphi; \\ &\Delta Q_t = G_{\text{н}} \left[c_{\text{с в}} + 0{,}623\, l \frac{2 \cdot 1{,}62\, B\, \varphi \sqrt{P_{\text{н п}} - 479}}{(B - \varphi P_{\text{н п}})^2} \right] \Delta t \end{aligned}\right\} \quad (2\ 27)$$

Согласно выражениям (2.27), загрубление чувствительности управляющей части системы приводит к перерасходу тепла, отнесенному к 1 кг/ч обрабатываемого наружного воздуха: по каналу влагосодержания на 1 г/кг — 2,5 кДж; по каналу относительной влажности на 1% — 0,37 кДж; по каналу температуры на 0,1°С — 0,2 кДж.

Таким образом осуществляется постановка задачи аналитического проектирования управляющей системы, в частности аналитического конструирования датчиков наблюдаемых переменных.

Существенно новым в автоматизации систем кондиционирования воздуха является применение блока переключения технологических режимов (ПТР), являющегося обязательным для программно-параметрических САУ

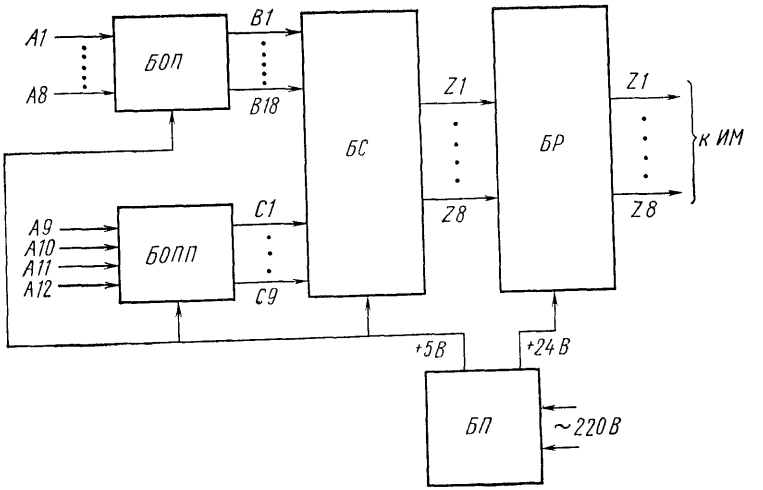


Рис 2 24 Структурная схема логического устройства ПП САУ КВ

КВ Блок ПТР представляет собой дискретное логическое устройство, выполняющее функции дешифратора входных сигналов или блока изменения структуры и коммутатора команд на исполнительные механизмы или блока ключевых элементов

Блок ПТР разрабатывается на основе представленных в предыдущих разделах алгоритмов управления и регулирования для систем кондиционирования воздуха с постоянным расходом.

Аппаратное решение блока ПТР возможно на электромагнитных реле, на элементах управления серии «ЛОГИКА — И», на интегральных микросхемах, а также на базе использования микроЭВМ

Использование элементов серии «ЛОГИКА — И» или интегральных микросхем позволяет получить устройство, состоящее из следующих функциональных блоков блок определения позиции (БОП), блок определения промежуточного параметра (БОПП), блок сравнения (БС); выходной блок или блок реле (БР), блок питания (БП).

Сигналы от концевых выключателей исполнительных механизмов и от регуляторов *A1*, , *A8* поступают в БОП (рис. 2 24), в котором происходит определение комбинаций входных сигналов и формирование выходных сигналов *B1*, . ., *B18*, соответствующих этим комбинациям

(каждой комбинации входных сигналов соответствует один выходной сигнал). В блоке определения промежуточного параметра формируются выходные сигналы, соответствующие комбинациям сигналов от регуляторов температуры и относительной влажности.

Выходные сигналы с БОП и БОПП поступают на блок сравнения, в котором по заложенному в его схему алгоритму происходит формирование командных сигналов 1, ..., 8. Сигналы 1, ..., 8 поступают на БР, являющийся усилителем мощности выходных команд. Блок питания обеспечивает стабилизированное напряжение для питания микросхем БОП, БОПП и БС и постоянное напряжение для питания БР.

Исследование наблюдаемости, управляемости и структурной устойчивости системы кондиционирования воздуха позволяет сформулировать некоторые функциональные требования к средствам управления. Для большинства технологических и комфортных СКВ на первом плане стоят требования управления последовательностью технологических процессов, а также управления с целью исключения аварийных ситуаций. Классическая задача автоматической стабилизации тех или иных переменных в ряде рассмотренных систем имеет ограниченный состав. Для них не критично, например, качество переходного процесса. Исключение составляет условие устойчивости автоматической стабилизации, а также возможная величина статической ошибки.

Анализ показывает, что для большинства систем кондиционирования воздуха допустимо и достаточно применение П- и ПИ-регуляторов, трехпозиционных датчиков-реле температуры и влажности, позволяющих реализовать P_c-регуляторы, и двухпозиционных датчиков-реле теплосодержания воздуха. Использование в рассмотренных СКВ простейших сигнализаторов достаточно для реализации возможных алгоритмов защиты, стабилизации и управления. В схемах, например, защиты от замерзания или управления приемными воздушными заслонками, а также в любых микролокальных схемах управления и регулирования целесообразно применение регуляторов прямого действия. При этом необходимо введение сигнализаторов конечного состояния регулирующих или управляющих воздействий для обеспечения работы других устройств управления и, в частности, блока переключения технологических режимов.

27. АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СКВ

В настоящее время разработка управляемой и управляющей частей системы КВ осуществляется в определенной мере независимо одна от другой. При этом если результаты разработки первой части системы предопределяют состав разработки второй, то результаты разработки второй части системы очень слабо влияют на результаты разработки ее первой части. Другими словами, сначала разрабатывается технологическая часть системы кондиционирования воздуха, а затем как бы ее оснастка — система автоматического управления. В процессе такой разработки большинство решений, касающихся технологической части системы, не изменяется. Такая разработка приводит либо к несовершенству результатов проектирования, либо к многократному повторению полного цикла проектирования.

Одним из новых методов разработки автоматизированных технологических схем является метод совместной разработки управляемой и управляющей частей.

Анализ опыта разработки автоматизированных систем кондиционирования воздуха позволяет представить весь комплекс работ в виде последовательной схемы получения решений. Применение этой схемы дает возможность определить основные принципы построения СКВ на первом этапе и САУ на втором. При этом следует исходить из общих целей функционирования как управляемой, так и управляющей частей системы.

Проблема сводится к определению таких структур, конструктивных и технологических параметров СКВ и САУ КВ, которые удовлетворяют некоторому заданному критерию эффективности.

Подобный метод проектирования предполагает наиболее полное соответствие САУ технологическому процессу и учет задач управления при разработке СКВ. Таким образом, предметом разработки является замкнутая система: объект — система управления. Необходимость совместной разработки частей системы обусловлена наличием общей цели их функционирования в замкнутой системе, а также тем, что пространства состояний СКВ и САУ должны пересекаться. Область пересечения будет характеризовать пространство S, в котором должна описываться замкнутая система — автоматизированная СКВ. Анализ пространства S, его желаемое измене-

ние возможны лишь при совместном синтезе и анализе СКВ и САУ КВ.

Исходными данными для решения подобной задачи служит информация, полученная в результате системного анализа технологического процесса кондиционирования воздуха и микроклимата, а также САУ. При рассмотрении СКВ исследуются возможные технологические структуры, математические модели реализуемых процессов, значения конструктивных и технологических параметров и ограничения на них. При рассмотрении САУ изучаются результаты работы систем управления как для СКВ, так и для аналогичных объектов, возможность использования тех или иных методов и средств автоматизации, конструктивные и функциональные параметры.

Обязательным для решения поставленной задачи является анализ условий заданного функционирования системы, а также управляемости и наблюдаемости реализуемых физических процессов. Управляемость и наблюдаемость зависит от того, пусто или нет пространство S.

Решение задачи начинается с выбора варианта структуры СКВ. Математическая модель данной СКВ может быть представлена, например, системой уравнений (1.36) и может быть сведена к форме $x=F(x;\ \mu\ k)$, где $x=\|x_1,\ x_2, ..., x_n\|$ — вектор состояния системы; $\mu=\|\mu_1, \mu_2, ..., \mu_3\|$ — вектор входов системы; $k=\|k_1,\ k_2\ ..,\ k\|$ — вектор конструктивных параметров СКВ. При этом $x\in A$, $\mu\in Б$, $k\in B$, где A, $Б$ и B — множества, определяемые из условий ограничений на конструктивные и технологические параметры СКВ.

Задача совместной разработки автоматизированной системы кондиционирования воздуха сводится к получению замкнутой системы, наиболее полно удовлетворяющей некоторому функционалу $I=\Phi(x,\ u;\ k)=\text{extremum}$. В таком случае математическую модель системы можно представить в виде $x=F_1(x,\ u,\ f,\ \hat{k})$; $y=F_2(x,\ u,\ f,\ \hat{k})$; $z=F_3(z;\ y;\ N)$; $U=F_4(u;\ z;\ M)$ где $U=\|U_1,\ U_2,\ ..,\ U\|$ — вектор управляющих входов; $f=\|f_1,\ f_2,\ ..\ f\|$ — вектор возмущающих входов; $u=\|y_1,\ y_2,\ ..,\ y\|$ — вектор измеряемых управляемых выходов, $z=\|z_1,\ z_2,\ ..,\ z\|$ — вектор наблюдаемых состояний; $\hat{k}$, N, M — векторы оптимальных конструктивных параметров, соответственно: $\hat{k}$ — технологической части системы кондиционирования

воздуха; N — системы наблюдения; M — системы управления. При этом должны выполняться условия $K \in B$, $U \in Б$; $N \in D$, $M \in D$, где D — множество, определяемое из условий ограничения на конструктивные и функциональные параметры системы наблюдения и управления.

Далее определяются функциональные элементы замкнутой системы и их взаимосвязи, а тем самым векторы конструктивных и технологических параметров $\hat{K}$, N, M.

Для нахождения векторов u, f, z, y допустимо использовать результаты анализа управляемости и наблюдаемости СКВ. Проанализировав структурную и аппаратную управляемость СКВ, а также области управляемости технологических звеньев системы, для различных комбинаций компонент вектора μ выбираем те комбинации, при которых система управляема. Путем анализа структурной и аппаратной наблюдаемости для различных комбинаций компонент векторов z и y находим комбинации, при которых система наблюдаема.

Метод совместной разработки СКВ и САУ КВ заключается в отыскании таких структур, конструктивных и технологических параметров, а также допустимых областей изменения переменных состояния, которые наиболее полно удовлетворяют выбранному критерию эффективности системы в целом. Это объясняется тем, что только для системы в целом, т. е. для управляемой и управляющей ее частей, формируется цель функционирования и задается показатель эффективности.

Предлагаемый метод иллюстрируется специальной блок-схемой, показанной на рис. 2.25. В процессе проектирования, помимо традиционных известных этапов расчета системы кондиционирования воздуха, анализируются варианты решения наблюдаемости и управляемости СКВ, а также исследуется структурная устойчивость замкнутой системы. Например, анализ наблюдаемости системы кондиционирования воздуха, заключающийся в оценке возможности определения тех или иных переменных состояния по результатам измерения физических величин, для ряда систем позволяет исключить измерение переменных состояния приточного воздуха с целью определения программы управления или измерение температуры обратной воды с целью защиты калориферов первого подогрева от замерзания.

Анализ управляемости систем кондиционирования воздуха, заключающийся в оценке возможности приведе-

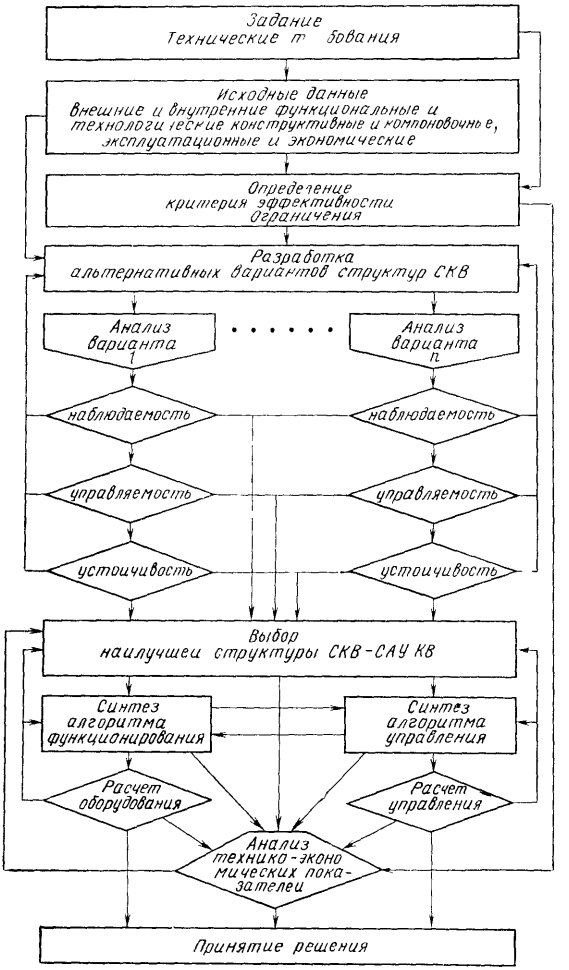


Рис 2 25 Алгоритм разработки автоматизированной СКВ

ния того или иного технологического процесса в заданное состояние с помощью известных управляющих воздействий, позволяет обосновать целесообразность применения, например, широтно-импульсной модуляции расхода воды в камере орошения или обводного регулирующего воздушного клапана в теплообменнике и т. д.

Анализ структурной устойчивости, заключающийся в оценке способности системы кондиционирования воздуха достаточно длительное время и с достаточной точностью

сохранять некоторый заранее заданный вид (форму) технологического процесса, позволяет обосновать применение в ряде случаев автоколебательных режимов, например, в работе приточных камер при срабатывании защиты, что позволяет избежать выключения системы в целом (нештатный режим).

При разработке замкнутой системы СКВ — САУ КВ или совместной разработке автоматизированной системы кондиционирования воздуха можно получить более оптимальные структуры СКВ, конструктивные и технологические параметры оборудования, а также исключить поиск критерия для САУ, который, как правило, не поддается строгому математическому обоснованию.

Применение метода совместной разработки связано с повторением отдельных этапов (циклов) исследования и расчетов. Однако этот метод позволяет исключить повторное определение структуры СКВ в случае неуправляемости, ненаблюдаемости или неустойчивости замкнутой системы. В конечном счете использование предлагаемого метода позволяет существенно сократить общий объем проектных работ.

ГЛАВА 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

3.1. СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Одним из условий повышения эффективности систем кондиционирования микроклимата и прежде всего достижения требуемых показателей их энергоемкости является использование совершенных методов автоматического управления. Новыми для СКВ, очевидно, будут методы управления, основанные на использовании принципов построения программно-параметрических систем автоматического управления, а также применение схем каскадного и связанного регулирования. Реализация перечисленных методов и способов автоматического управления связана с необходимостью использования новых приборов и средств автоматического управления.

Традиционно используемые в технике автоматизации СВ и СКВ приборы и устройства малопригодны как для

построения программно-параметрических САУ, так и для создания автоматизированных систем управления, т. е. для создания АСУ «Микроклимат».

Представляет интерес опыт зарубежных разработок и сравнительные данные по функциональным возможностям, стоимостным и надежностным показателям систем автоматического управления, построенных на релейной технике, полупроводниковых элементах и микропроцессорах [65]. Автоматизируемая технологическая установка по количеству наблюдаемых и управляемых переменных схожа с СКВ, состоящей из одного центрального кондиционера. Задачей управления объектом является его запуск и эксплуатация без участия людей, а также обеспечение производственного персонала информацией о ходе технологического процесса, что необходимо для своевременного вмешательства службы эксплуатации в чрезвычайных обстоятельствах.

В случае использования традиционной релейной автоматики применяются готовые релейные шкафы. Источники питания, входы и выходы подключаются на месте. Достоинством релейных систем является то, что в них применяются широко известные серийные элементы. Это позволяет рационально использовать запчасти, а также эксплуатировать систему силами имеющегося персонала без его переподготовки. В этих системах применяются сигналы сравнительно высоких уровней, нечувствительные к электрическим помехам и колебаниям температуры, имеющимся в промышленных условиях.

Для системы автоматического управления, реализуемой на полупроводниковых элементах, используются модули на интегральных схемах. Эти модули соединены между собой в управляющих панелях. Последние соединяются с входными и выходными ячейками и блоками питания. Полупроводниковые панели обычно более компактны и потребляют значительно меньше электроэнергии. Затраты на приобретение технических средств оцениваются по количеству модулей различных видов и необходимых соединений. К указанной статье затрат прибавляется стоимость стоек, шкафов, источников питания и другого вспомогательного оборудования. Полупроводниковые системы обладают рядом преимуществ при поиске неисправностей, поскольку модули обычно снабжаются индикаторами состояния; кроме того, ремонт системы осуществляется простой заменой дефектных

элементов или их сборок В полупроводниковых системах используются сигналы низких уровней, однако в большинстве случаев в состав систем включаются устройства, обеспечивающие соответствующую защиту от электрических помех и колебаний температуры Последнее обстоятельство позволяет использовать полупроводниковые системы управления в достаточно жестких промышленных условиях

При использовании в системе автоматического управления микропроцессоров необходимо наличие соответствующих входных и выходных преобразователей Подобные системы еще более компактны Технические средства в этом случае являются универсальными и реализация конкретной логики управления осуществляется программным путем Программы вводятся с помощью специальных устройств Программируемость микропроцессоров обеспечивает большую гибкость в функциональных возможностях системы управления Изменения в технологическом процессе или в используемых способах управления, а также совершенствование системы управления могут быть осуществлены путем использования устройств ввода новых программ в большинстве случаев без всяких изменений в конструкции Расходы по созданию систем этого типа определяются степенью сложности микропроцессоров Микропроцессоры обычно оборудуются индикаторами состояния, и в состав их алгоритмов включается периодическая проверка работоспособности системы Ремонтные операции осуществляются путем замены плат Аппаратура снабжена средствами защиты от электрических помех и колебаний температуры.

Проведенный анализ показывает, что наиболее целесообразным вариантом для рассмотренного технологического объекта является система управления, реализуемая на микропроцессоре Последняя характеризуется наименьшими приведенными затратами и наибольшим значением среднего времени наработки на отказ, а также наиболее широкими функциональными возможностями [65].

Для создания систем автоматического управления различными технологическими процессами, в том числе процессами кондиционирования микроклимата, должны применяться разнообразные по функциональным и конструктивным признакам технические средства автоматизации Так, например, по результатам изучения и

оценки задач автоматизации в различных отраслях производства было выявлено, что только в группе датчиков имеется потенциальный спрос на приборы для измерения более чем 2000 физических величин [66]. С учетом известных методов измерений, различных диапазонов значений измеряемых величин и специфики условий эксплуатации подобная потребность может привести к необходимости изготовления нескольких десятков тысяч модификаций датчиков Поскольку известно, что даже простейший контур регулирования, кроме датчика, включает в себя ряд других устройств, становится понятным огромное разнообразие технических средств автоматизации.

С целью создания необходимого объема номенклатуры унифицированных устройств, способных максимально удовлетворять потребности народного хозяйства, в нашей стране была введена в действие Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) В основе построения ГСП лежит применение определенных системотехнических принципов, суть которых сводится к следующему:

система должна состоять из приборов и элементов с едиными унифицированными сигналами и параметрами питания, нормализованными габаритами и присоединительными размерами

система представляется в виде отдельных ветвей: пневматической, электрической, гидравлической и ветви без использования вспомогательной энергии (объединяющей приборы и регуляторы прямого действия);

система должна отвечать единым техническим требованиям, предусматривающим наиболее широкое ее использование в различных отраслях промышленности;

система должна обеспечивать решение как простейших задач локального контроля и регулирования, так и сложных задач комплексной автоматизации с использованием новейших средств вычислительной техники для обработки данных и управления технологическими процессами;

система строится по блочно-модульному принципу, ее структура должна быть гибкой и предусматривать возможность усовершенствования путем замены отдельных блоков и элементов без изменения системы в целом.

Конструктивная совместимость изделий предусматривает прежде всего унификацию присоединительных раз-

меров отдельных узлов, деталей и модулей, введение типовых конструкций, создание единой элементной базы и разработку общих принципов конструирования приборов. При конструировании устройств ГСП принят блочно-модульный принцип построения изделий. Применение этого принципа делает приборы более универсальными, позволяет использовать при их создании рациональный минимум конструктивных элементов (сокращается число наименований деталей). Вместе с тем возможность простой и легкой замены отдельных узлов и их ремонтопригодность позволит расширить круг решаемых задач (путем различных сочетаний функциональных звеньев и введением специализированных деталей).

Большинство технических средств автоматизации по функциональному признаку можно сгруппировать следующим образом: измерительные устройства (ИзУ), управляющие устройства (УУ), исполнительные устройства (ИУ). Аналогично производится распределение по функциональному признаку всех изделий ГСП.

К первой группе относятся первичные измерительные преобразователи (датчики), которые вместе с нормирующими устройствами, формирующими унифицированный сигнал, образуют устройства измерительной информации. К этой же группе устройств относятся релейные (позиционные преобразователи — контактные, индукционные, пневматические, оптические, радиационные) и другие преобразователи, реагирующие на определенные состояния среды и выдающие дискретные сигналы, а также устройства формирования алфавитно-цифровой информации.

Во вторую группу входят коммутаторы измерительных цепей, преобразователи сигналов и кодов, шифраторы и дешифраторы, согласующие устройства, а также устройства телеизмерения, телесигнализации и телеуправления. Технические средства этой группы используются для преобразования сигналов, содержащих измерительную информацию, и сигналов, несущих команды управления.

Третью группу устройств составляют анализаторы сигналов, функциональные и операционные преобразователи, логические и запоминающие устройства, регуляторы, задатчики всех типов, а также управляющие вычислительные устройства.

В четвертую группу устройств входят исполнительные устройства — электрические, пневматические, гидравлические или комбинированные исполнительные механизмы, усилители мощности и вспомогательные устройства к ним.

Устройства ГСП по роду используемой энергии носителя сигналов для приема и передачи информации делятся на электрические, пневматические и гидравлические. В ГСП входят также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии, — приборы и регуляторы прямого действия. Устройства, питаемые энергией одного вида, образует единую структурную группу ГСП, или ветвь ГСП.

Практически в автоматизированных системах наиболее эффективно комбинированное применение ветвей или отдельных устройств в различных сочетаниях. Поэтому понятие «ветвь» имеет главным образом классификационное значение.

Связь электрических, пневматических и гидравлических устройств осуществляется с помощью соответствующих преобразователей сигналов.

Использование приборов электрической ветви придает системе управления свойства высокой чувствительности, точности, быстродействия, дальности связи, обеспечивает высокую схемную и конструктивную унификацию приборов. В современных САУ и АСУ применение устройств электрической ветви особенно целесообразно в группе средств получения информации, так как становится возможной непосредственная связь последних с управляющими вычислительными машинами.

Приборы пневматической ветви характеризуются безопасностью применения в легковоспламеняемых и взрывоопасных средах, высокой надежностью в тяжелых условиях работы, особенно при использовании в агрессивной атмосфере; производство их дешевле, чем электронных приборов того же назначения. Однако пневматические приборы уступают электронным в тех случаях, когда технологический процесс требует большого быстродействия или передачи сигналов на значительные расстояния (свыше 300 м).

Информационная совместимость изделий ГСП обеспечивается унификацией информационных связей, используемых в качестве носителей информации. Обмен

информацией различных устройств ГСП осуществляется с помощью сигналов связи и интерфейсов.

Понятие сигналы связи в настоящее время распространяется преимущественно на сопряжение аналоговых устройств или устройств с дискретными выходными сигналами, обеспечивающих передачу информации в одном направлении. К таким устройствам относится, например большинство средств получения информации и исполнительные механизмы

Понятие интерфейса, включающее в общем случае и понятие сигнала связи, появилось в связи с широким применением вычислительной техники и кодированных сигналов в системах управления. Интерфейсы обеспечивают передачу информации в обоих направлениях и используются для сопряжения технических средств управляющих вычислительных комплексов (УВК) и других технических средств с кодированными сигналами.

Интерфейс представляет собой совокупность единых правил и средств, устанавливающих и реализующих взаимодействие устройств системы, предназначенной для сбора, переработки и использования информации. Интерфейсы для передачи информации и управляющих сигналов непосредственно между техническими средствами называют аппаратными интерфейсами для обмена информацией. В состав аппаратного интерфейса входят.

перечень сигналов взаимодействия и правила (протоколы) обмена этими сигналами (алгоритмы и временные диаграммы);

совокупность физических элементов, реализующих передачу и прием сигналов взаимодействия (модули приема и передачи сигналов, кабели связи);

совокупность конструктивных элементов, обеспечивающих соединение взаимодействующих элементов (разъемы, интерфейсные блоки).

Сигналы связи можно рассматривать как простейшую разновидность интерфейса. Они обеспечивают передачу информации в одном направлении (от источника к приемнику) и используются для дистанционной связи аналоговых устройств управления между собой, для передачи результатов измерений от средств получения информации к устройствам контроля и управления, а также для передачи управляющих сигналов на исполнительные механизмы.

Параметры сигналов дистанционной связи, реко-

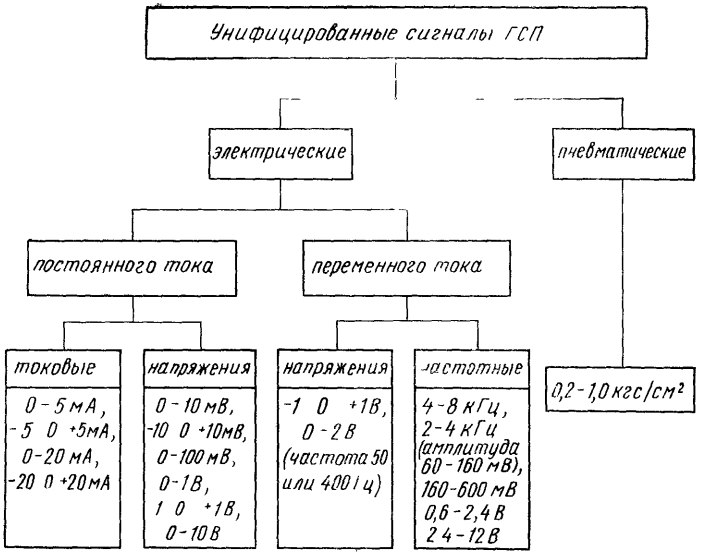


Рис 3 1. Основные аналоговые унифицированные сигналы ГСП

мендуемых для использования в промышленных приборах и средствах автоматизации, регламентируются соответствующими государственными стандартами. Классификация основных информационных сигналов связи ГСП приведена на рис. 3.1.

Из электрических сигналов наибольшее распространение получили унифицированные сигналы постоянного тока и напряжения. Они используются как для передачи информации от средств получения информации к устройствам управления и от них к исполнительным устройствам, так и для обмена информацией устройств управления между собой.

В значительно меньшей степени применяются сигналы переменного напряжения частотой 50 Гц (в ферродинамической системе приборов). Частотные сигналы используются главным образом в телемеханической аппаратуре и в комплексе приборов КТС ЛИУС, где применяется сигнал с изменением частоты от 4 до 8 кГц.

В объеме Государственной системы приборов существует ряд классификационных подразделений на унифицированные или агрегатные комплексы. В унифицированные комплексы объединяются изделия нескольких

типов, предназначенные для измерения различных параметров или выполнения различных функций, но построенные на основе одного принципа действия и имеющие одинаковые конструктивные элементы Агрегатные комплексы технических средств представляют собой совокупность типов изделий, взаимосвязанных между собой по функциональному назначению, конструктивному ис-

ТАБЛИЦА 31 АГРЕГАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

Наименование комплекса	Функциональный состав	Область применения
Агрегатный комплекс аналоговых электрических средств регулирования на микроэлектронной базе — АКЭСР [67]	Регулирующие устройства аналоговые и релейные (П, ПИ, ПИД) Функциональные преобразовательные устройства Вспомогательные устройства (оперативного управления, питания)	Общепромышленное применение в АСУ ТП
Агрегатный комплекс электрических исполнительных механизмов АКЭИМ [68]	Исполнительные механизмы однооборотные, многооборотные и прямоходовые, построенные из унифицированных блоков и модулей	То же
Агрегатный комплекс щитовых электрических средств регулирования «Каскад» [69]	Регулирующие аналоговые и релейные устройства Функциональные блоки Вспомогательные устройства	Общепромышленное применение для автоматизации технологических процессов
Комплекс технических средств для локальных информационно управляющих систем — КТС ЛИУС [70, 71]	Комплектные средства преобразования, ввода, коммутации, обработки хранения, обмена, вывода и использования информации	Комплектование различных АСУ ТП которые по информационным объемам и типам решаемых задач не требуют применения УКВ, а также применение в системах, управляемых с помощью УКВ, для создания периферийных локальных систем

пользованию, главным параметрам и другим техническим данным

Агрегатные комплексы технических средств промышленных систем контроля и регулирования, пригодные к использованию в САУ или АСУ кондиционированием микроклимата, приведены в табл 3 1.

3 2 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В технике автоматизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха наиболее распространенной измеряемой переменной является температура воздуха и воды В качестве устройств для измерения температуры используются стеклянные термометры, биметаллические, дилатометрические и манометрические датчики, а также термопары, термисторы и термометры сопротивления

Отечественная промышленность, помимо показывающих стеклянных термометров, выпускает контактные термометры

Группа стеклянных контактных термометров может быть представлена электроконтактными термометрами типов ТЭК и ТПК, а также палочными термоконтакторами типов ТК-1 и ТК-3 Электроконтактные термометры типа ТЗК представляют собой стеклянные датчики, заполненные ртутью и снабженные одним, двумя или тремя контактными устройствами Работа датчиков основана на том, что при изменении температуры происходит электрическое замыкание (размыкание) контактов В датчиках этого типа заданные значения контролируемых температур являются постоянными В отличие от ТЗК электроконтактные термометры типа ТПК снабжены контактным устройством с переменным заданием контролируемой температуры, при этом точка задания может находиться в пределах всего рабочего интервала термометра Электроконтактные термометры снабжены шкалой (рис 3 2) Общий (независимо от модификации) диапазон контролируемых температур составляет от 0 до +300°С, цена деления шкалы 1 и 2°С, допустимые отклонения показаний не превышают наименьшего деления шкалы, допустимые отклонения температуры срабатывания контактного устройства — 1 —5°С.

Палочные термоконтакторы изготовляются в виде массивной капиллярной трубки и имеют один (ТК-1)

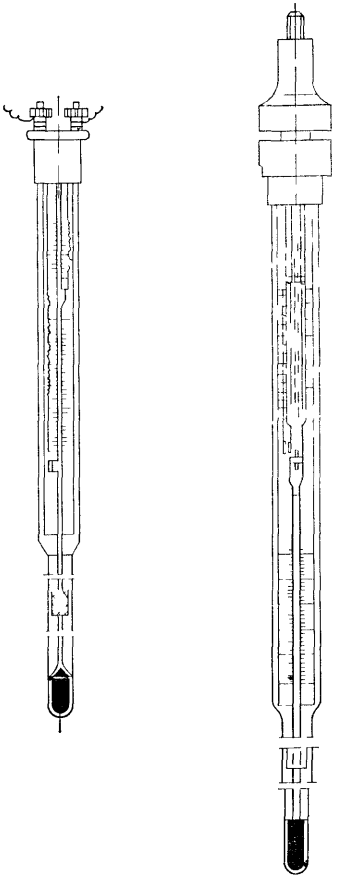


Рис. 3 2. Внешний вид электроконтактных термометров типа ТЭК и ТПК

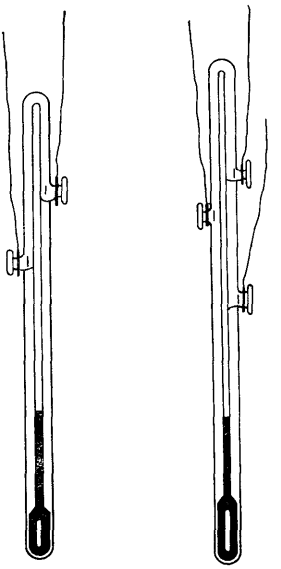


Рис. 3 3 Внешний вид палочных термоконтакторов ТК-1 и ТК 3

или два (ТК-3) контактных устройства (рис. 3.3). Диапазон контролируемых температур для ТК-1 от —5 до +70°С и далее 70; 80; 90, 100; 120 и 150°С. Диапазон контролируемых температур для ТК-3 от 0 до +100°С и от +100 до +150°С. Разность температур, контролируемых контактными устройствами, составляет от 10 до 50°С, допустимая погрешность срабатывания контактных устройств — от 2 до 5°С.

Электроконтактные термометры и палочные термоконтакторы пригодны для работы в цепях постоянного и переменного тока не более 0,5 МА при напряжении не более 0,3 В. В качестве промежуточного усилителя для работы с контактными термометрами и термоконтакторами используется специальное устройство типа УКТ-4У2 (ТУ 2б.П.1378—77). Максимальный допусти-

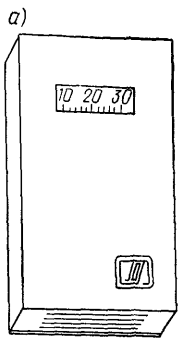
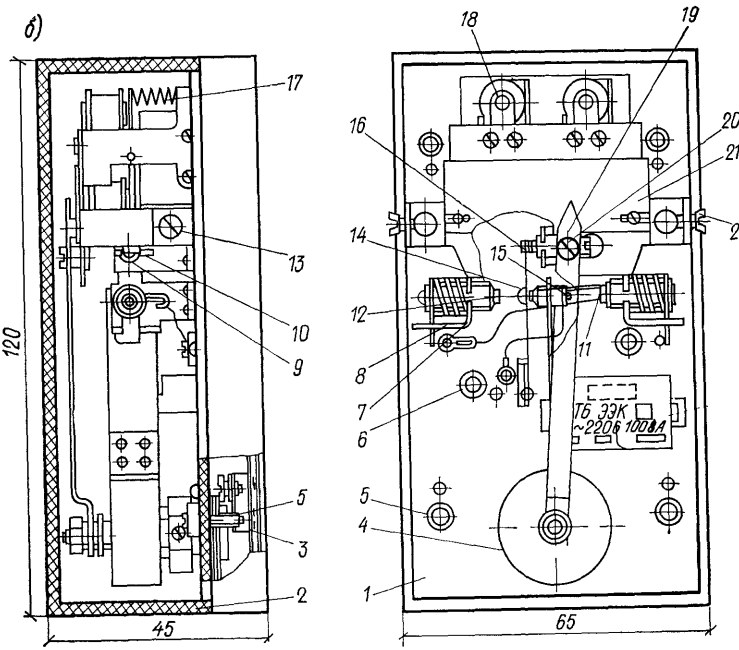


Рис 3 4 Внешний вид (*а*) и конструкция (*б*) датчика-реле температуры типа ТБ-ЭЗК



мый коммутируемый при активной нагрузке ток не более 4А, напряжение питания устройства 220В, частота 50 Гц Конструктивно устройство представляет собой малогабаритный блок размером 117×67×215 мм.

Из ряда биметаллических датчиков температуры следует выделить выпускаемые приборостроительной промышленностью датчики-реле типа ТБ-ЭЗК, внешний вид которых показан на рис 3.4, *а*. Принцип действия

прибора основан на зависимости положения свободного конца биметаллического чувствительного элемента, замыкающего и размыкающего контакты при изменении контролируемой температуры. Прибор состоит из основания *1* (см. рис. 3 4, *б*), крышки *2* и монтажной панели *3* На основании прибора размещены биметаллический чувствительный элемент *4* с контактами *14* и *15* на свободном конце, стойки *7*, *9* и *12* с соответствующими винтами *8*, *10* и *11*, контактодержатель *16*, кронштейн *13* с двумя импульсными двухпозиционными выключателями *18*, положение срабатывания которых фиксируется пружиной *17*. Прибор снабжен указателем *19*, с помощью которого устанавливают требуемую температуру по шкале уставок *21*. Положение указателя фиксируется винтом *20*. Основание *1* крепится к монтажной панели *3* винтами *5* и *6*. Крышка закрепляется винтами *22*.

Датчик-реле температуры типа ТБ-ЭЗК выпускается в трех модификациях, технические данные прибора приведены в табл. 3.2.

ТАБЛИЦА 3.2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДАТЧИКОВ-РЕЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТИПА ТБ-ЭЗК

Модификация прибора	Пределы установок, °С	Диапазон, °С	Зона чувствительности, °С	
			минимальное значение, не более	максимальное значение, не менее
ТБ-ЭЗК-01	0—20	20	2	6
ТБ-ЭЗК-02	10—30	20	2	6
ТБ ЭЗК-03	25—45	20	2	6

Точность срабатывания выходной контактной группы не более $\pm 0{,}5$°С. Коммутируемая мощность контактов при напряжении переменного тока 220 В частотой 50 Гц при $\cos\varphi \geqslant 0{,}8$ составляет 100 ВА.

Дилатометрическими терморегулирующими устройствами являются датчики-реле типов ТУДЭ-1—ТУДЭ-12 (рис 3.5, *а*). Принцип действия приборов основан на зависимости разности приращения длины чувствительной трубки и стержня от изменения температуры контролируемой среды. Вследствие полученного приращения размыкаются или замыкаются контакты. Прибор состоит из следующих основных частей: дилатометрического элемента, контактного устройства, узла настройки уставок. При изменении температуры контроли-

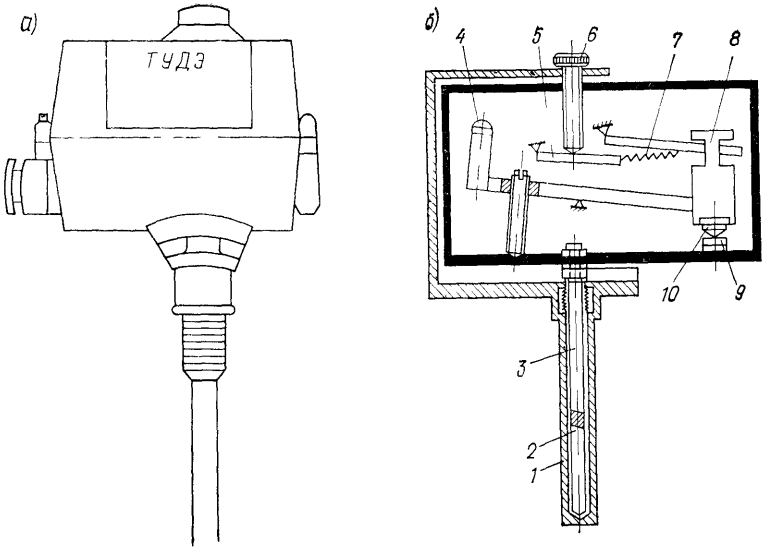


Рис. 3.5. Внешний вид (*а*) и конструкция (*б*) датчика-реле температуры типа ТУДЭ

руемой среды изменяется длина чувствительной трубки *1* (см. рис. 3.5, *б*), что вызывает продольное перемещение стержней *2* и *3* совместно с контактным устройством. Рычаг *5*, упираясь в винт задания *6*, поворачивается относительно своей оси и занимает такие положения, при которых силы действия пружины *7* меняют свое направление, приводя в движение рычаг *8*. Рычаг *4*, связанный с рычагом *8*, замыкает или размыкает контакты *9* и *10*.

Датчик-реле температуры типа ТУДЭ выпускается в 12 модификациях, технические данные 10 из которых приведены в табл. 3.3.

Коммутируемый ток цепи контактной группы при напряжении переменного тока 220 В частотой 50 Гц в случае активной нагрузки составляет 10 А и в случае индуктивной нагрузки — 2 А.

Принцип действия манометрических датчиков температуры основан на свойстве газов и жидкостей изменять давление и объем при изменении температуры контролируемой среды. Эти датчики являются простыми механическими приборами прямого измерения. Основным элементом конструкции манометрических термомет-

ТАБЛИЦА 3.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДАТЧИКОВ-РЕЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТИПА ТУДЭ

Модификация прибора	Диапазон регулируемых температур, °С	Класс точности	Максимальная толщина изоляции, мм	Длина чувствительной трубки мм, не более	Зона нечувствительности, °С
ТУДЭ-1	от —30 до +40	4	50	265	4—20
ТУДЭ-2	0—100	2,5	50	505	2—10
ТУДЭ-3	30—100	4	50	265	4—20
ТУДЭ-4	0—250	2,5	50	265	4—20
ТУДЭ-5	100—250	1,6	50	265	4—20
ТУДЭ-8	0—40	4	50	265	4,5—20
				505	2,5—10
ТУДЭ-9	0—100	2,5	50	265	4,5—20
ТУДЭ-10	30—100	4	50	265	4,5—20
				505	2,5—10
ТУДЭ-11	30—160	2,5	50	265	4,5—20
				505	2,5—10
ТУДЭ-12	0—250	2,5	50	265	4,5—20

ров является герметично замкнутая термосистема. Термосистема датчика состоит из баллона, являющегося чувствительным элементом, соединенного капиллярной трубкой с упругим элементом. Для создания показывающей шкалы и сигнализатора используются различные кинематические устройства упругого элемента. Манометрические термометры благодаря наличию капиллярной трубки позволяют дистанционно измерять температуру без использования дополнительной энергии. Конструкция манометрических датчиков проста и надежна в эксплуатации.

В зависимости от вещества, заполняющего термосистемы, отечественная промышленность выпускает газовые, жидкостные и конденсационные манометрические термометры. В газовых манометрических термометрах в качестве заполнителя используются азот, аргон и гелий. В жидкостных манометрических термометрах — полиметилсилоксановые жидкости и в конденсационных термометрах — ацетон, метил хлористый, фреон. За рубежом широко применяются манометрические термометры с ртутным заполнением, отечественная приборостроительная промышленность манометрические ртутные термометры не выпускает.

В термосистемах конденсационных манометрических термометров рабочее вещество находится в жидкой и га-

зообразной фазах. Поверхность раздела между ними должна находиться в баллоне и в зависимости от изменений температуры слегка колебаться. Термометры этой группы неприменимы в том случае, если температура среды, окружающей капиллярную трубку и деформируемый элемент манометра, близка к измеряемой температуре. В жидкостных и газовых манометрических термометрах необходимо применять устройства компенсации температуры окружающей среды. Если в датчике не предусмотрено подобное устройство, то тепловое расширение и увеличивающееся давление, вызванное увеличением температуры окружающей среды, влияют на показания индикатора. Обычно предусматриваются различные компенсаторы (встроенные и выполненные в виде отдельного узла) и различное компенсирующее изменение свойств деформирующегося элемента, а в ряде случаев и капиллярной трубки. Для конденсационных манометрических термометров компенсация изменений температуры вдоль капиллярной трубки не требуется. Это объясняется тем, что в термосистемах датчиков этой группы давление зависит от местонахождения границы раздела между жидкостью и газом, а эта граница находится всегда в баллоне.

Преимущества газовых термометров — в сравнительно малой температурной погрешности и наибольшей дистанционности соединительной капиллярной трубки; жидкостных термометров — в малых инерционности и размерах термобаллона; парожидкостных термометров — в небольшой температурной погрешности при изменении температуры окружающей среды и сравнительно малых размерах термобаллона.

В качестве устройств дистанционного измерения температуры воздуха и теплоносителя можно использовать манометрические термометры газовые типа ТПГ4 и жидкостные типа ТПЖ4 (рис. 3.6). Данные термометры выпускаются в нескольких модификациях, перекрывающих температурный диапазон от — 50 до +200°С. Класс точности приборов 1 или 1,5.

Для дистанционного измерения и сигнализации заданного значения температуры могут использоваться электроконтактные термометры газовые типа ТПГ-СК (рис. 3.7) и конденсационные типа ТПГ-СК. Диапазон контролируемых температур тот же, что и у предыдущей группы термометров. Разрывная мощность контактов

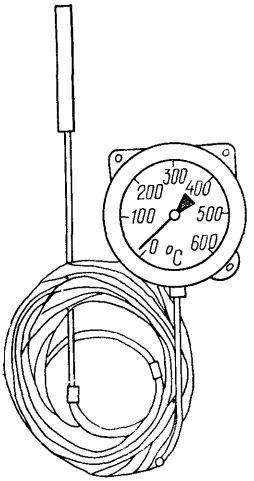


Рис 3.6. Внешний вид термометра типа ТПГ4

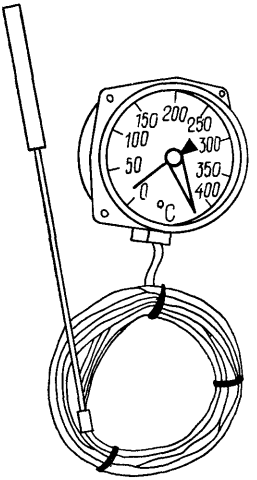


Рис. 3 7. Внешний вид электроконтактного термометра типа ТПГ-СК

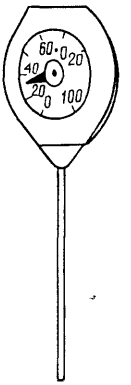


Рис. 3.8. Внешний вид термометра типа ТПП-М

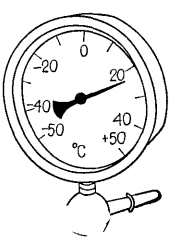


Рис. 3 9. Внешний вид термометра типа ТКП-160

при напряжении до 220 В постоянного или переменного тока не более 10 ВА.

В качестве местных устройств измерения температуры воздуха или теплоносителя можно использовать показывающие термометры типа ТПП-М (рис. 3.8) и типа ТКП-160 (рис. 3.9). Пределы измерений термометром ТПП-М от 0 до +100°С, класс точности 1,5, длина погружения термобаллона не менее 100 мм. Термометр типа ТКП-160 выпускается в нескольких модификациях; диапазон измеряемых температур от —50 до +300°С; класс точности 1; 1,5 и 2,5; длина погружения термобаллона от 100 до 400 мм. Исполнение хвостовика прибора шарнирное, обеспечивающее установку термобаллона на объекте под любым углом.

Отечественной промышленностью выпускаются стандартные термометры сопротивления из медной и платиновой проволоки. С помощью платиновых термометров сопротивления измеряют температуру в диапазоне от —260 до +1300°С, а с помощью медных — от —50 до +180°С.

Кроме платины и меди для чувствительных элементов могут использоваться вольфрам, рений, графит, молибден, тантал и ниобий. Тугоплавкие металлы — вольфрам, молибден, тантан и ниобий — пригодны только в определенных условиях, так как их трудно получить в виде тянутой проволоки.

В качестве чувствительных элементов термометров сопротивления могут использоваться и полупроводниковые и монокристаллические материалы.

Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве металла изменять свое сопротивление с изменением температуры. Сопротивление измеряется логометром или уравновешенным мостом, отградуированным в градусах Цельсия. Наиболее высокая точность измерения достигается платиновыми термометрами сопротивления, так как платина имеет высокую химическую стабильность, хорошую обрабатываемость и линейность температурной зависимости электросопротивления.

Термометры сопротивления выпускаются двух модификаций: одинарные и двойные. В двойном термометре в общую арматуру вмонтированы два чувствительных элемента, электрически не связанных между собой. Каждый чувствительный элемент имеет свою пару зажимов в головке термометра.

Двойной термометр сопротивления предназначен для работы с двумя вторичными приборами, параллельная работа которых от одного чувствительного элемента не допускается.

Термометры сопротивления состоят из чувствительного элемента и наружной арматуры. Чувствительный элемент платиновых термометров сопротивления (рис. 3.10) представляет собой платиновую спираль *1*, расположенную в капиллярных керамических трубках *3*, заполненных керамическим порошком *2*, который служит изолятором, создает эффект подпружинивания спиралей и обладает ингибиторным свойством. Такие элементы надежны в условиях вибрации и высокой температуры. В медных термометрах сопротивления чувствительный элемент представляет собой бескаркасную безындукционную обмотку из медной проволоки. Обмотка покрыта фторопластовой пленкой. К обмотке чувствительных элементов припаиваются выводы *4*. Для обеспечения виброустойчивости медный элемент помещается

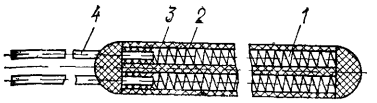


Рис. 3.10 Чувствительный элемент термометра сопротивления

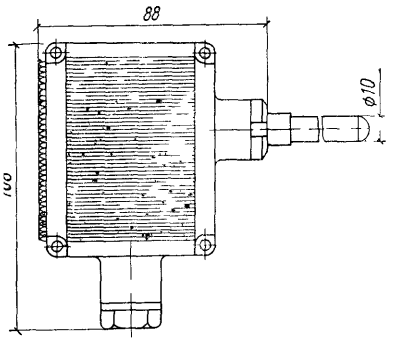


Рис 3 11. Внешний вид датчика-реле температуры типа ТСПР

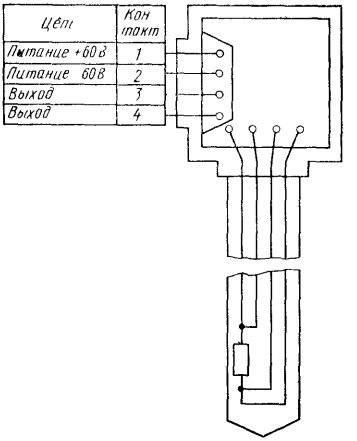


Рис. 3 12. Схема подключения датчика реле температуры типа ТСПР

в тонкостенную металлическую гильзу, засыпается керамическим порошком и герметизируется.

Наружная арматура термометра состоит из защитной трубы, подвижного или неподвижного штуцера для крепления термометра и головки. При подвижном штуцере термометр можно погружать на различную глубину. В головке помещена контактная колодка с зажимами для присоединения проводов, соединяющих термометр сопротивления с измерительным устройством. Это присоединение может быть двух-, трех- и четырехпроводным. Ввод проводов в головку может быть уплотнен сальником. В термометрах без головки выводные проводники специально заделываются.

Чувствительные элементы платиновых и медных термометров сопротивления помещаются в герметичные защитные трубки. Исключение представляют термометры, предназначенные для измерения температуры в помещениях, и специальные термометры.

С платиновым термометром сопротивления выпускается датчик-реле температуры типа ТСПР-0180. Термопреобразователь сопротивления данного типа предназначен для контроля температур в диапазоне от 0 до +500°С. В зависимости от диапазона измеряемых температур приборы выпускаются в четырех модификациях. Пределы допускаемой основной погрешности срабатыва-

ния датчика-реле, выраженные в процентах от верхнего значения диапазона измеряемых температур, составляют: ±0,6% для диапазона измерения от 0 до +100°С; ±0,4% для диапазона измерения от 0 до +200°С; ±0,25% для диапазона измерения от 0 до +400°С; ±0,25% для диапазона измерения от 0 до +500°С. Внешний вид датчика-реле температуры типа ТСПР представлен на рис. 3.11. Установка заданного значения контролируемой температуры производится дискретно с помощью сменных устройств. Зона возврата (неоднозначности) срабатывания датчика-реле не превышает допускаемой погрешности. Питание прибора осуществляется от источника постоянного тока напряжением 60 В, потребляемая мощность не превышает 5 Вт.

Датчик-реле состоит из первичного термопреобразователя сопротивления и электронного усилителя. Принцип работы основан на мостовом методе измерения. Напряжение низкого уровня с выхода мостовой измерительной схемы поступает на вход усилителя, собранного на интегральных микросхемах. С выхода усилителя сигнал разбаланса поступает на вход каскада, работающего в ключевом режиме. Выходным элементом этого каскада является электромагнитное реле РЭС10. Схема внешних соединений датчика-реле температуры приведена на рис. 3.12.

В отдельных случаях совершенствуются функциональные характеристики датчиков-реле. Простейшее конструктивное изменение заключается во введении дополнительного настраиваемого параметра, а именно регулируемой зоны неоднозначности, или, как ее часто называют, зоны возврата. В таком случае правомерно считать любой датчик-реле двухпозиционным регулятором.

Для автоматического позиционного регулирования температуры воздуха или воды можно использовать регулятор типа РТ-2. Регулятор работает по принципу нуль-органа, на входе которого сравниваются напряжение измерительного моста переменного тока и опорное напряжение. В момент равенства напряжений противоположной фазы, т. е. при нулевом входном напряжении нуль-органа, происходит срабатывание выходного реле, контакты которого управляют работой исполнительного устройства. Нуль-орган представляет собой усилитель переменного тока с фазочувствительным выходом, связанным

через согласующий каскад с триггером. С помощью триггера срабатывает выходное реле. Регулятор температуры работает в комплекте с медным термометром сопротивления градуировки 23 (ГОСТ 6651—78) с безындукционной намоткой чувствительного элемента. Приборы выпускаются в двух вариантах:

А — с замыканием контактов реле при повышении температуры выше заданной;

Б — с замыканием контактов реле при понижении температуры ниже заданной.

Регляуторы выпускаются в пяти модификациях, технические характеристики которых приведены в табл. 3.4.

ТАБЛИЦА 3.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИКАЦИЙ ДВУХПОЗИЦИОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ТИПА РТ-2

Модификация прибора	Диапазон регулируемых температур, °С	Основная погрешность, °С	Модификация прибора	Диапазон регулируемых температур, °С	Основная погрешность, °С
РТ-2-01	—30 до 0	±0,8	РТ-2-04	30—60	±0,8
РТ-2-02	—10— +20	±0,8	РТ-2-05	50—100	±1
РТ-2-03	5—35	±0,8			

Величина зоны неоднозначности настраивается в диапазоне 0,5—5°С. Коммутируемая мощность контактов выходного реле при напряжении 220 В частотой 50 Гц не более 500 В. А. Максимальная длина трехпроводной соединительной линии датчик — прибор 300 м. Напряжение питания 220 В с частотой 50 Гц.

Регулятор РТ-2 выполнен в пластмассовом корпусе, в котором на двух печатных платах расположены радиоэлементы блока питания, мостовой измерительной схемы, фазочувствительного усилителя, триггера и выходного реле. На лицевой стороне панели расположены ручки шкалы уставки температуры и зоны возврата, сигнальная лампочка и предохранитель. В нижней части корпуса расположены разъем для подключения прибора, датчика, исполнительных механизмов и клемма «Земля».

Представляет интерес новое исполнение датчика (рис. 3.13), являющегося накладным трубным датчиком температуры с термометром сопротивления. Предложенная конструкция позволяет производить установку датчика на любом трубопроводе теплоносителя без меха-

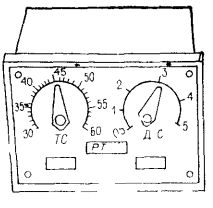


Рис. 3.13 Внешний вид регулятора температуры типа РТ-2 и накладного датчика-термометра сопротивления

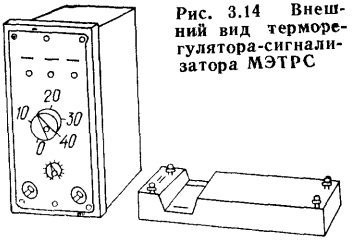


Рис. 3.14 Внешний вид терморегулятора-сигнализатора МЭТРС

нических доработок. В таком случае возможно использование регулятора в качестве сигнализатора опасности замерзания водовоздушных калориферов в системах вентиляции.

Наиболее широко регулятор с новым датчиком может использоваться в системах отопления, что делает его универсальным. Технические характеристики универсального авторегулятора температуры те же, что и у регулятора типа РТ-2.

Для работы в системах контроля и автоматического регулирования температуры предназначен новый микроэлектронный терморегулятор-сигнализатор МЭТРС. Внешний вид прибора со снятой передней крышкой, которая снабжена смотровой щелью, приведен на рис. 3.14 Смотровая щель позволяет наблюдать за сигнализацией состояния выходных команд регулятора: «ниже», «норма», «выше».

Прибор работает в комплекте с микроэлектронным термоэлементом МТЭ или термопреобразователем ТСМ-50М при регулировании температуры от —50 до +150°С и термопреобразователем ТСП-100П при регулировании температуры от —100 до 0°С и от 100 до 300°С.

Сигнализирующее устройство позволяет контролировать соответствие температуры объекта регулирования заданному значению, а также определять температуру объекта регулирования с точностью основной погрешности задания значения температуры и контролировать исправность линии, соединяющей датчик с прибором.

Прибор выпускается в двух модификациях: двухпозиционный МЭТРС-2А и МЭТРС-2Б, трехпозиционный МЭТРС-3. Двухпозиционный терморегулятор-сигнализатор имеет два варианта исполнения:

А — с выдачей команды выходным устройством

(замыканием контактов реле) и срабатыванием сигнализирующего устройства «выше» при повышении регулируемой температуры относительно установленного значения;

Б — с выдачей команды выходным устройством (замыканием контактов реле) и срабатыванием сигнализирующего устройства «ниже» при понижении регулируемой температуры относительно установленного значения.

Диапазон наблюдаемых температур, основная погрешность задания контролируемой температуры и тип датчика приведены в табл. 3.5.

ТАБЛИЦА 3.5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИКАЦИЙ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА-СИГНАЛИЗАТОРА МЭТРС

Диапазон регулирования, °С	Основная погрешность задания значения температуры, °С	Тип датчика
—40—0 —20—+20 0—+40 +40—80 60—100 80—120 —50—+50	±1	МТЭ или ТСМ с номинальной статической характеристикой 50 Ом
50—150 —100—0 100—200 200—300	±2	ТСП с номинальной статической характеристикой 100 Ом

Величина зоны неоднозначности настраивается в диапазоне от 0,5 до 10°С. Коммутируемая мощность выходных контактов при напряжении питания 220 В с частотой 50 Гц 550 В·А. Напряжение питания регулятора 220 В с частотой 50 Гц.

Для преобразования измеренной температуры воздуха или воды в унифицированный электрический сигнал (см. рис. 3.1) можно использовать новый термопреобразователь сопротивления типа ТСПУ-1179. Термопреобразователь типа ГСПУ предназначен для измерения температуры в диапазоне от 0 до +500°С с выходной нормированной информацией о температуре в виде токового сигнала 0—5 мА.

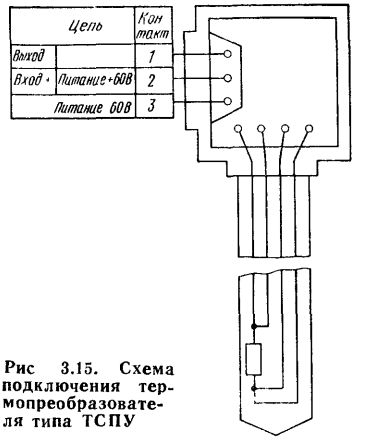


Рис 3.15. Схема подключения термопреобразователя типа ТСПУ

Термопреобразователь имеет внешнее конструктивное исполнение, аналогичное исполнению датчика-реле типа ТСПР (см. рис. 3.13). Термопреобразователь изготовляется в четырех модификациях. Предел допустимой основной погрешности термопреобразователя, выраженной в процентах от верхнего значения диапазона измерения, составляет $\pm 0{,}6\%$ для диапазона измерения от 0 до $+100°C$; 0,4% для диапазона измерения от 0 до $+200°C$ и $\pm 0{,}25$ — для диапазонов измерения от 0 до $+400°C$ и от 0 до $+500°C$.

Питание прибора осуществляется от источника напряжения постоянного тока 60 В. Схема внешних соединений термопреобразователя ТСПР приведена на рис. 3.15. Измерительная схема питается от внутреннего стабилизатора, собранного на интегральной микросхеме, стабилитроне и резисторах. В усилителе постоянного тока используется гибридная микросхема. Выходной сигнал усилителя постоянного тока поступает на преобразователь напряжение — ток. Выходной сигнал термопреобразователя 0— 5 мА. С целью линеаризации зависимости выходного сигнала от температуры применяется метод компенсаций нелинейности изменения сопротивления чувствительного элемента от температуры путем пропускания через чувствительный элемент термопреобразователя сопротивления дополнительного тока, зависящего от температуры.

Уровень развития отечественной микроэлектроники позволяет перейти к разработке и выпуску новых приборов специализированного назначения на интегральных микросхемах. На базе применения микроэлектроники разработан цифровой термометр.

Аналогичные термометры выпускают многие зарубежные фирмы. Так, фирма M. K. Iuchheim (ФРГ) разработала и выпустила новую серию цифровых термометров «Digitherm» на диапазоны измерений от —100 до $+199{,}9°C$ и 200—1200°С с ценой деления 0,1 и 1°С соот-

ветственно. В качестве чувствительных элементов в этих термометрах использованы платиновые термопреобразователи сопротивления и термоэлектрические хромоникелевые преобразователи. Результаты измерений индицируются на светодиодном дисплее (высота цифр 13 мм) непосредственно в градусах Цельсия; по заказу индикатор может быть выполнен на жидких кристаллах (высота цифр 14 мм). Термометр имеет запоминающее устройство максимальных и минимальных значений. В качестве источника питания использована никелево-кадмиевая батарея. Фирма Ltd (Великобритания) изготовляет цифровые приборы для измерения температуры в диапазоне от —220 до +1750°С. Цифровые термометры серии 8000 охватывают диапазон измерения от —150 до +1750°С. Серия состоит из 11 моделей, при этом четыре модели (8501, 8525, 8050 и 8062) имеют высокую разрешающую способность, равную 0,1°С. Все модели питаются от батарей. Показания выдаются на светодиодном семисегментном табло. Приборы серии 1000 имеют диапазон измерения от —30 до +450°С, точность 0,3% ±1°С. Работают с четырьмя термоэлектрическими термометрами. Индикация на жидкокристаллическом дисплее. Панельные цифровые термометры серии 7500 в отличие от других приборов имеют схему подачи аварийного сигнала при превышении заданного предела, а также снабжены дополнительными устройствами с шестью или 12 позициями переключения термопар, что позволило повысить функциональную возможность приборов. Диапазон измерения от —220 до +1750°С, точность 0,1% ±1 ед.

Новый термометр серии Digitemp выпустила фирма Schuntermann & Benninghoven GmbH&Co (ФРГ). Диапазон измеряемых температур от —199,9 до +1600°С (3 $^1/_2$-разрядная индикация). Прибор содержит схему линеаризации выходного сигнала. Подключаемые чувствительные элементы — термоэлектрические преобразователи или термопреобразователи сопротивления. Устройство индикации имеет аналоговый выход по напряжению 0—5 или 0±5 В постоянного тока 10 мА (максимально). Аналого-цифровой преобразователь действует по принципу двойной интеграции. Прибор имеет встроенный блок питания и заключен в стандартный корпус размером 96×48×108 мм.

Электронный цифровой термометр серии SIKA вы-

пустила фирма Dr. Siebert & Kahn GmbH & Co. KG (ФРГ). Прибор изготовляется в двух модификациях: TT 5000 с диапазоном измерений от —150 до +750°С (чувствительный элемент Pt 100) и TT 5010 с диапазоном измерений от —65 до +1150°С (чувствительный элемент — NiGr — Ni). Встроенный индикатор на жидких кристаллах позволяет осуществлять считывание даже при ярком солнечном освещении (высота цифр 12 мм). Источник питания — батарея, рассчитанная на 100 ч работы.

Фирма Testoterm KG Fritsching разработала термометр типа PYROTERM-8500, предназначенный для использования в промышленных условиях и при научных исследованиях. Диапазон измерений от —50 до +700°С. Быстродействие прибора — около нескольких миллисекунд. Термометр имеет устройство индикации на жидких кристаллах (высота цифр 13 мм, индикация в градусах Цельсия), а также встроенное стандартное запоминающее устройство максимальных значений.

Большой интерес для использования в системах кондиционирования микроклимата представляет цифровой термометр серии 5500 фирмы Qenway Ltd. (Великобритания), который позволяет измерять температуру (от —30 до +150°С) и относительную влажность (10—100%). Прибор снабжен двумя датчиками, один из которых замеряет температуру сухого воздуха, а второй — влажного. После обработки данных индицируется величина относительной влажности. Точность при измерении относительной влажности ±2%. Для индикации значений температуры в приборе имеется переключатель.

Опыт разработки этой фирмы показывает, что применение интегральных схем позволяет перейти от кусочно-линейной аппроксимации передаточных характеристик измерительных преобразователей к полиминальной, обеспечивающей более высокую точность. Любую гладкую функцию можно представить полиномом, степень и число членов которого будет зависеть от желаемой точности аппроксимации.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки по созданию кремниевых микродатчиков — устройств, которые изготовляются по технологии, применяемой при производстве интегральных схем, и могут объединяться в единых интегральных схемах с микропроцессорами. Последнее рассматривается как главное достоинство

микродатчиков, так как интеграция позволит применять микропроцессоры в системах автоматического управления вентиляцией и кондиционированием воздуха. Кроме того, подобная интеграция обеспечит непосредственное преобразование аналогичных сигналов датчиков в цифровую форму, удобную для последующего использования в вычислениях и для выдачи на устройства визуального отображения информации. Интегральная технология позволит создавать одно- и двухмерные панели датчиков. Наличие микропроцессоров способствует повышению точности датчиков, так как оказывается технически и экономически целесообразным периодически выполнять их автоматическую градуировку с применением методов статистической корреляции, цифровой фильтрации и сглаживания. Большим достоинством микродатчиков является то, что они надежнее традиционных датчиков.

3.3 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Вторым после температуры нормируемым параметром воздуха в помещениях, обслуживаемых системами кондиционирования, является относительная влажность воздуха. Поддержание относительной влажности воздуха на определенном уровне является необходимым условием для выполнения самых разнообразных технологических операций. Слишком сухой воздух — причина нарушений функционирования ЭВМ, повреждения приборов точной механики, снижения прочности материалов, изменения массы, размеров некоторых изделий. В основных производственных помещениях предприятий различных отраслей промышленности рекомендуется поддерживать относительную влажность воздуха в определенном диапазоне. В табл. 3.6 приведены оптимальные значения относительной влажности и температуры воздуха в рабочей зоне для ряда производственных цехов и помещений [72].

Наиболее критичными значения температуры и влажности становятся в технологических СКВ, где ненормируемые отклонения температуры и относительной влажности воздуха в рабочей зоне от заданных значений являются причиной появления брака продукции в основном технологическом процессе. На-

ТАБЛИЦА 3.6. ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ЦЕХОВ

Цехи	Температура, °С	Относительная влажность, %	Цехи	Температура, °С	Относительная влажность, %
Хлопкоткацкие	20—22	35—50	Молокозаводов	20—25	80—85
Печатные	22—26	45—60	Производства бумаги	20—22	50—60
Предприятий точной механики	20—22	50—55	Предприятий фармацевтической промышленности	21—27	35—50
Производства пленки	20—24	40—65	Шелкоткацкие	24—27	60—75
Обработки древесины	20—22	50—60	Переработки табака	21—24	55—65
Керамических заводов	26—28	60—70			
Предприятий пищевой промышленности	20—25	45—55			

пример, на текстильных предприятиях прядения камвольной шерсти отклонение относительной влажности воздуха от 60 до 50% приводит к увеличению обрывности на 10—15% [73]. В связи с этим становится понятной важность решения вопросов аппаратной обеспеченности автоматического контроля влажностного состояния воздуха.

Автоматический контроль влажности воздуха связан с рядом сложных технических проблем [74]. Достижение высокой точности измерения влажности в широком диапазоне при достаточном быстродействии и высокой стабильности характеристик остается сложной аппаратной задачей. Это объясняется разнородностью физико-химических, электрических и других процессов во влагочувствительных элементах гигрометров [75].

В технике гигрометрии известны приборы, использующие различные способы и методы измерения влажности. Первую группу приборов измерения влажности составляют психрометрические гигрометры, принцип действия которых основан на измерении разности показаний сухого и мокрого термометров в зависимости от влажности окружающего воздуха. К психрометрическим гигрометрам относятся аспирационные гигрометры, фитильные психрометры, психрометры с бесфитильным

смачиванием мокрого термометра (например, смачиванием поверхности термометра распыляемой жидкостью).

Вторую группу гигрометров составляют приборы, реализующие конденсационный метод измерения. Этот метод измерения влажности основан на том, что при поддержании на охлаждаемой несорбирующей поверхности (зеркальце) равновесного слоя росы или инея (конденсата) парциальное давление водяного пара под слоем конденсата соответствует давлению насыщения при температуре конденсата. Это означает, что температура равновесного слоя конденсата равна температуре точки росы. Необходимым условием работы приборов подобного типа является автоматическое поддержание требуемой высоты слоя конденсата.

В третью группу приборов входят так называемые сорбционные гигрометры. В основе их конструкции лежит использование гигроскопических материалов, которые изменяют свои электрические (электролитические приборы) или геометрические (деформационные приборы) характеристики в зависимости от количества влаги, поглощенной из окружающего воздуха.

В четвертую группу приборов измерения влажности входят подогревные хлористолитиевые гигрометры. Принцип работы этих приборов основан на автоматическом поддержании температуры слоя электролита, при которой влажность окружающего воздуха соответствует давлению водяного пара в точке фазового перехода раствор — соль. При наличии контакта поверхности кристаллов гигроскопической соли с влажным воздухом в первый момент времени влага адсорбируется поверхностью кристалла, которая в результате адсорбции покрывается тонкой пленкой насыщенного раствора данной соли. В последующие моменты продолжается адсорбция воды поверхностью раствора данной соли. При этом в результате поглощения воды поверхностью раствора его концентрация у поверхности понижается, в растворе возникает градиент концентрации, приводящий к потоку молекул воды к поверхности кристалла гигроскопической соли и его дальнейшему растворению. Этот процесс происходит до полного растворения гигроскопической соли. Дальнейшая адсорбция воды понижает концентрацию раствора и, следовательно, повышает давление паров воды над поверхностью раствора. Адсорбция воды, скорость которой пропорциональна разности

давлений водяного пара окружающего воздуха и водяного пара над поверхностью раствора, замедляется и, наконец, прекращается полностью, когда давление водяного пара над поверхностью раствора станет равным давлению водяного пара в окружающем воздухе. Так заканчивается процесс адсорбции и достижение фазового равновесия пар — раствор. В приборах производится измерение температуры фазового равновесия (равновесной температуры), при этом фиксируется значение парциального давления водяных паров в окружающем воздухе.

Приборы, использующие метод фиксаций температуры фазового равновесия, называют подогревными, так как для достижения равновесной температуры, которая выше температуры окружающего воздуха, им необходим источник тепла. В качестве такого источника тепла выступает насыщенный раствор гигроскопической соли, являющийся электролитом, по которому проходит электрический ток.

Использование насыщенного раствора гигроскопической соли в качестве нагревательного элемента приводит к возможности автоматического поддержания равновесной температуры. При постоянном напряжении питания, приложенного к электролиту, количество выделяемого тепла зависит от количества электролита, которое, в свою очередь, определяется разностью температур между насыщенным раствором и воздухом. Отклонение температуры от равновесной ведет к нарушению условия равенства давлений, что является причиной процесса массопереноса между насыщенным раствором и воздухом до тех пор, пока количество выделяемого тепла не окажется равным необходимому теплу для поддержания температуры фазового равновесия.

В качестве гигроскопической соли наибольшее распространение получил хлористый литий. Хлористолитиевый подогревной датчик влажности (рис. 3.16) по конструкции представляет собой трубчатую форму на основе изолятора *1*, внутри которого помещен термометр сопротивления *2*, а снаружи — влагочувствительный элемент. Влагочувствительный элемент состоит из стеклотканевого чулочка *3*, пропитанного хлористолитиевым раствором, с навитыми на него электродами *4*. Электроды подключаются к источнику переменного напряжения *5* и служат контактами для пропускания электрическо-

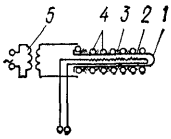


Рис. 3.16 Подогревной хлористолитиевый датчик влажности

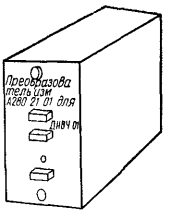


Рис 3 17. Внешний вид преобразователя типа А280

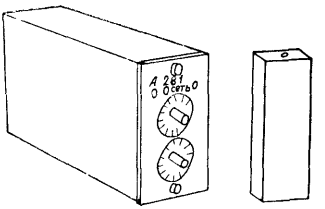


Рис 3.18 Внешний вид регулятора относительной влажности типа А281 и датчика типа ДИВ

го тока через раствор гигроскопической соли, смачивающей стеклотканевый чулочек.

Находясь в контакте с окружающим воздухом, содержащим влагу, гигроскопическая соль адсорбирует ее и намокает. При этом стеклотканевый чулочек оказывается пропитанным раствором хлористого лития, т. е. электролитом. Через электролит проходит ток, нагревающий влагочувствительный слой датчика

Повышение температуры влагочувствительного слоя приводит к достижению ее равновесного значения. При этом прекращается адсорбция влаги из окружающего воздуха. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению парциального давления водяного пара над поверхностью раствора, к изменению направления массопереноса и к испарению влаги из влагочувствительного элемента. Уменьшение количества влаги во влагочувствительном элементе приводит к уменьшению количества электролита и, следовательно, к уменьшению величины тока через раствор электролита, что, в свою очередь, приводит к уменьшению тепловой мощности, выделяемой в датчике, и последующему его охлаждению. При наличии достаточного количества гигроскопической соли в стеклотканевом чулочке образуется насыщенный раствор данной соли и автоматически достигается и поддерживается равновесная температура. Таким образом, датчик оказывается охваченным отрицательной обратной связью, следящей за установлением и поддержанием равновесной температуры.

В технике автоматизации систем кондиционирования воздуха используются сорбционные и подогревные гигрометры. В группу сорбционных электрических гигрометров входят датчики с вторичным прибором типа УДРОВ, СПР, СПР-103 и ВВЧ. Все эти приборы элект-

ролитического принципа действия. Датчик относительной влажности ДОВП со вторичными приборами В4-510У и В4-536У относится к пьезосорбционным частотным гигрометрам.

Для работы в комплекте с электролитическим датчиком влажности ДИВ предназначен новый измерительный преобразователь А280 (рис. 3.17). Выходным сигналом прибора является унифицированный сигнал постоянного тока, пропорциональный измеряемой датчиками относительной влажности воздуха. Для измерения относительной влажности воздуха в диапазоне 20—80% предназначены модификации приборов А280-21-01 и А280-22-01, работающие в комплекте с датчиками ДИВ4-01, ДИВТ2-01 и ДИВТ2-02. Для измерения относительной влажности воздуха в диапазоне 40—90% предназначены модификации приборов А280-21-02 и А280-22-02, работающие в комплекте с датчиком ДИВ4. Выходные унифицированные сигналы — постоянного напряжения (0—10 В) и постоянного тока (0—5 мА). Основная погрешность измерения и преобразования не превышает $\pm 1\%$. Длина связи между датчиком и преобразователем не более 200 мм. Преобразователи модификации А280-21 предназначены для монтажа в стойке, а модификации А280-22 — для монтажа на стене или в щите.

Для работы в комплекте с первичным преобразователем влажности ДИВ4 предназначен новый регулятор относительной влажности воздуха А281 (рис. 3.18). Регуляторы имеют шесть модификаций, характеристики которых приведены в табл. 3.7.

Основная абсолютная погрешность регуляторов по формированию выходного сигнала и по сигнализации не превышает пределов допускаемых значений, равных $\pm 4\%$. Выходные реле регуляторов обеспечивают коммутацию активной нагрузки мощностью до 500 В·А переменного тока при напряжении 220 В частотой 50 Гц и 40 Вт постоянного тока при напряжении 220 В. Постоянная времени регуляторов не превышает 15 мин при скорости воздушного потока, омывающего датчик, не менее 0,3 м/с.

В качестве подогревного датчика относительной влажности и температуры точки росы можно использовать приборы типа ДВ-1К и ДВ-1. Эти приборы являются первичными преобразователями указанных параметров воздуха в электрическое сопротивление термо-

ТАБЛИЦА 3.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯТОРА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА ТИПА А281

Шифр регулятора	Шифр составных частей регулятора		Диапазон измерения параметра, %	Закон регулирования
	формирователь	преобразователь		
А281-01	Б-13,661.83	ПЭ281-01	20—100	Двухпозиционный
А281-02	Б-13,661.83	ПЭ281-02	20—100	Трехпозиционный
А281-03	ДИВА-01	ПЭ281-03	20—80	Двухпозиционный
А281-04	ДИВА-01	ПЭ281-04	20—80	Трехпозиционный
А281-05	ДИВА-02	ПЭ281-05	40—90	Двухпозиционный
А281-06	ДИВА-02	ПЭ281-06	40—90	Трехпозиционный

чувствительных элементов — термометров сопротивления градуировки 22. Рабочий диапазон датчиков составляет: по относительной влажности воздуха от 30 до 98% при температуре от +5°С до +50°С, по температуре точки росы от —10°С±до +50°С. Основная допустимая погрешность преобразования по относительной влажности не более ±1,5%, по температуре точки росы не более ±0,5°С. Постоянная времени датчиков не более 90 с. Электрическое сопротивление термометров при 0°С составляет 100 Ом. Датчики имеют шесть исполнений для двух модификаций: промышленный датчик относительной влажности воздуха ДВ-1К для скоростей потока от 0 до 2 м/с — исполнение 215.184.004; то же, для скоростей потока свыше 2 м/с — исполнение 215.184.004-01; промышленный датчик температуры точки росы ДВ-1 для скоростей потока от 0 до 2 м/с — исполнение 215.184.005-01; то же, для скоростей потока свыше 2 м/с — исполнение 215.184.005-02; комфортный датчик относительной влажности воздуха ДВ-1К для скоростей потока от 0 до 2 м/с — исполнение 215.184.008; комфортный датчик температуры точки росы ДВ-1 для скоростей потока от 0 до 2 м/с — исполнение 215.184.007.

Промышленный датчик ДВ-1К состоит из датчика влажности ДВ-1 и датчика температуры ДТ-1, объединенных общим корпусом, и подсоединяется к входу вторичного прибора с помощью разъема. Электрическая

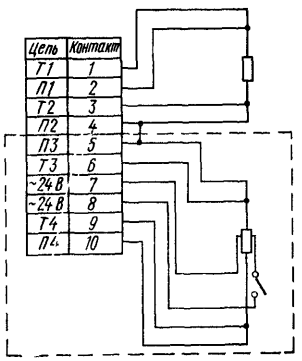


Рис. 3.19. Электрическая схема соединений датчика относительной влажности ДВ-1К (промышленное исполнение)

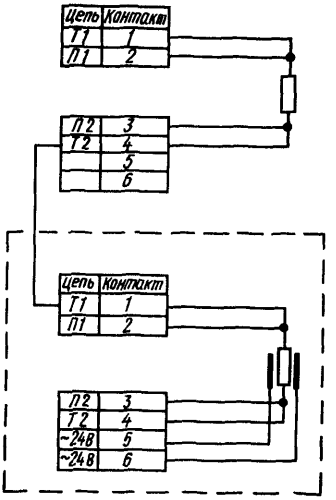


Рис. 3.20. Электрическая схема соединений датчика относительной влажности ДВ-1К (комфортное исполнение)

схема соединений датчика представлена на рис. 3.19. Комфортный датчик ДВ-1К состоит из датчиков влажности и температуры, выполненных в виде отдельных приборов. Присоединение датчиков к вторичным приборам производится с помощью контактных винтов. Электрическая схема комфортного датчика ДВ-1К представлена на рис. 3.20. Техническое описание и инструкция по эксплуатации датчиков (215.184.004ТО) снабжены тремя градуировочными таблицами: первая раскрывает связь переменных состояния воздуха — температуры и относительной влажности; вторая содержит значение равновесной температуры и температуры точки росы; третья — представляет собой градуировочную таблицу термометра сопротивления.

На основе использования хлористолитиевого первичного преобразователя влажности разработан гигрометр-сигнализатор подогревной ГП-215. Гигрометр состоит из первичного преобразователя влажности *1*, первичного преобразователя температуры *2*, промежуточного усилителя *3* и устройства пробоотбора *4* (рис. 3.21). Диапазон измерения относительной влажности от 15 до 80%. Предел допустимой абсолютной погрешности гигрометра при температуре измеряемой среды 60°С составляет ±3%

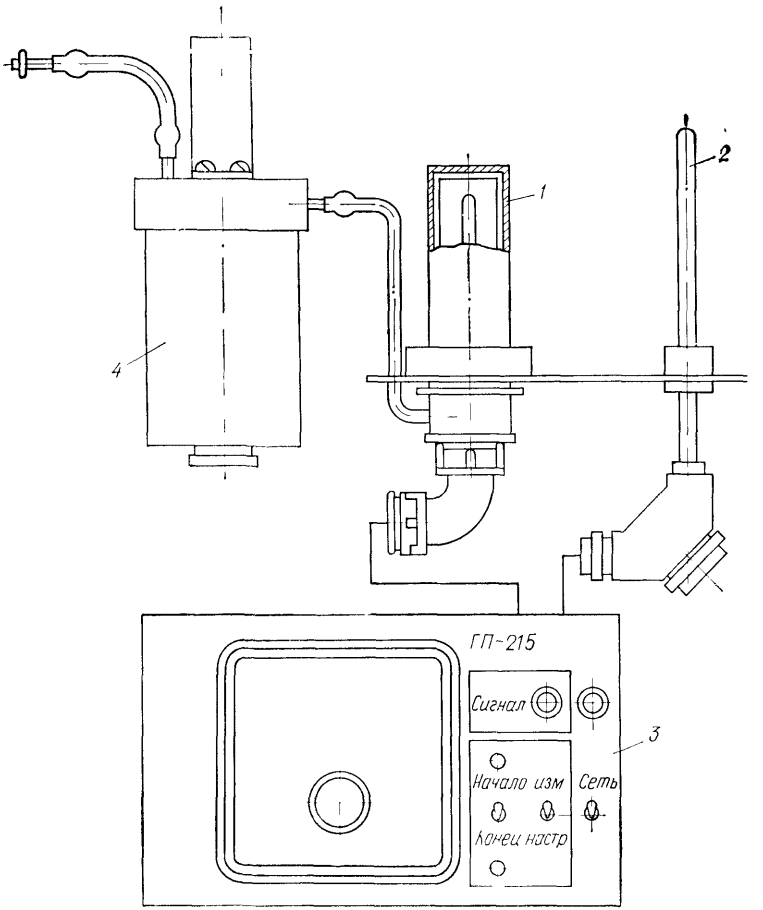


Рис 3 21. Внешний вид регулятора относительной влажности типа ГП-215

относительной влажности. Постоянная времени датчика не более 90 с. Шкала промежуточного усилителя отградуирована в процентах относительной влажности. Промежуточный усилитель обеспечивает коммутацию электрического сигнала напряжением 220 В при токе до 2 А с помощью контактного устройства, а также выдачу сигнала постоянного тока напряжением 0—10 мВ. Электрическая схема соединения регулятора приведена на рис. 3.22.

В зарубежной технике автоматизации СКВ получили

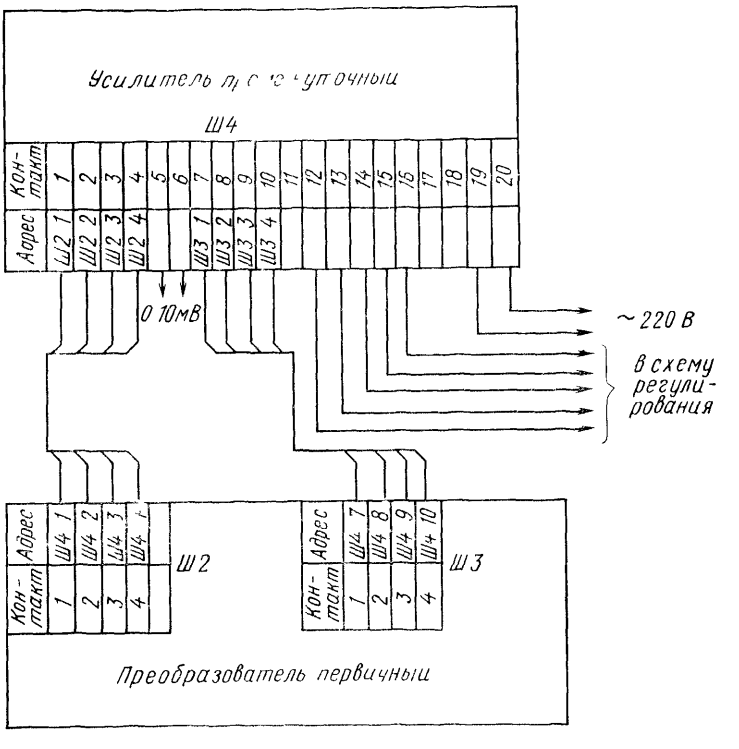


Рис 3 22 Электрическая схема соединений регулятора относительной влажности типа ГП-215

широкое распространение сорбционные датчики-реле относительной влажности, основанные на деформационном принципе действия с электрическим контактным выходом на микропереключателе.

Для двухпозиционного регулирования относительной влажности предназначен датчик-реле типа Н 607А (Honeywell). Диапазон контролируемых значений относительной влажности 30—80%, чувствительность ±2,5%, зона неоднозначности рабочей характеристики 3—5%. Чувствительным элементом датчика является искусственная пленка. В качестве командной выходной группы используется микропереключатель с нормально открытой и закрытой контактной группой, обеспечивающей коммутируемую мощность 3 А при нагрузке переменного тока 120 В и 1,5 А при нагрузке 240 В.

Для трехпозиционного регулирования относительной

влажности предназначен регулятор типа RCS 1.12 (камерного исполнения) и RCS 1.22 (для монтажа в воздуховодах) фирмы Landis und Gyr. Регулятор предназначен для контроля относительной влажности воздуха в диапазоне от 20 до 80%. Зона неоднозначности характеристики регулятора составляет 5%, зона нечувствительности — 5—30% относительной влажности. В конструкцию регулятора входят два двухпозиционных устройства, состоящих из чувствительного элемента (нейлоновая лента), передаточного механизма и микропереключателя. Оба устройства связаны один с другим посредством промежуточной передачи, которая имеет общую установочную ось и кнопку для установки требуемого значения относительной влажности. Коммутируемая мощность контактов микропереключателя составляет 3 А при напряжении переменного тока 24 В и 0,5 А при напряжении 250 В. Принцип работы регулятора основан на том, что при повышении относительной влажности нейлоновая лента растягивается, а при понижении — сокращается. Эти изменения рычажной системой передаются на переключающий штифт микропереключателя.

3.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

При эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха большое внимание уделяют технике измерения расхода. Это относится к измерению расхода тепло- и холодоносителя, воды, используемой в массообменных аппаратах, а также массы перемещаемого воздуха.

Использование рациональных методов и средств измерения расхода целесообразно во всех системах вентиляции и кондиционирования воздуха, где осуществляется управление потоками энергии. В настоящее время предусматривается даже измерение расхода воздуха, удаляемого из обслуживаемого системой помещения в окружающую атмосферу. Известно, что удаляемый воздух в определенные периоды имеет температуру, в той или иной мере отличную от температуры наружного воздуха, а количество удаляемого воздуха может быть различным в различные моменты времени. Это означает, что в системе имеются переменные потери тепла или холода. При наметившейся устойчивой тенденции к повышению цен на тепло и холод рекомендуется непрерывная текущая

оценка величины указанных потерь с целью организации рационального использования выбросного тепла или холода. Целесообразность измерения расхода всего обрабатываемого и перемещаемого приточного воздуха очевидна, поскольку известно, что расходы на его перемещение в отдельных случаях соизмеримы со стоимостью энергии, затрачиваемой на тепловлажностную обработку.

Расходомеры, работающие по принципу измерения перепада давления на стандартных сужающих устройствах, достаточно удобны в эксплуатации. Однако монтаж сужающего устройства в воздушном тракте действующей СКВ часто затруднителен, а порой и невозможен из-за конструктивных соображений. При введении сужающего устройства на время измерения искажается аэродинамическая характеристика воздушного тракта, а при установке его на все время эксплуатации СКВ неоправданно повышается сопротивление сети.

Использование различного рода точечных анемометров (чашечных, крыльчатых, термоэлектрических) позволяет получить картину распределения скоростей и вычислить усредненную по сечению скорость потока воздуха. Существенным недостатком этого метода является его трудоемкость, особенно при снятии расходных характеристик регулирующих органов или при определении взаимного влияния регулирующих воздействий в разветвленной сети воздуховодов.

В настоящее время термоэлектрические анемометры используются как точечные приборы, т. е. чувствительные элементы их настолько малы, что можно пренебречь неравномерностью набегающего потока как по скорости, так и по температуре.

В реальных потоках с неравномерным распределением скорости и температуры по сечению с целью осреднения скорости может быть использован термоанемометр с чувствительным элементом в виде сетки, перекрывающей все сечения воздуховода. Чувствительный элемент в виде сетки можно представить как совокупность точечных чувствительных элементов, соединенных последовательно. При расчете такого распределенного чувствительного элемента используется уравнение теплового баланса подогреваемого точечного чувствительного элемента [76].

Сопротивление последовательно соединенных точечных чувствительных элементов, составляющих распределенный чувствительный элемент и расположенных в неоднородном набегающем потоке, определяется интегри-

рованием сопротивлений точечных элементов по всей длине распределенного элемента. Результат интегрирования показывает, что при равномерном распределении температуры и неравномерном распределении скорости по сечению распределенного чувствительного элемента отношение сопротивления нагретого чувствительного элемента к его сопротивлению при температуре набегающего потока воздуха практически зависит только от средней скорости потока.

Основными элементами описываемого измерителя скорости потока являются: генератор переменного тока, обеспечивающий нагрев чувствительного элемента, мост постоянного тока для измерения сопротивления чувствительного элемента и фильтры для развязки цепей постоянного и переменного тока.

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных Ю. И. Тестоедовым, подтверждена работоспособность предлагаемого устройства, оценены погрешность и границы диапазона измерения. Представленный измеритель расхода воздуха может быть использован при определении средней по сечению скорости набегающего потока воздуха при условии равномерного поля температур. Чувствительные элементы в виде проволочной сетки могут быть использованы в СКВ и установлены в канале наружного и уходящего воздуха, а также в рециркуляционном канале.

Измерение расхода имеет большое значение при управлении потоками теплообменивающихся сред с целью экономии энергии. Поэтому для фактической информации о потреблении тепловой энергии необходима организация измерения расхода в линиях подачи горячей и охлаждающей воды. Известно, что первичные измерительные устройства могут вызывать потери в энергии на преодоление дополнительных сопротивлений при перемещении обменивающихся сред. Потеря давления в одном трубопроводе может не казаться большой, однако годовая сумма потерь по нескольким пунктам измерения расхода может быть значительной. Поэтому при выборе первичного измерительного устройства следует отдавать предпочтение электромагнитным или ультразвуковым расходомерам. В расходомерах подобного типа можно добиться снижения погрешности до 0,25% показаний [77].

Отечественной моделью теплового расходомера, основанного на электромагнитном принципе измерения, явля-

ется однопоточный разностный счетчик тепла типа ТС-20, предназначенный для контроля и учета тепловой энергии, потребляемой установками отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Счетчик тепла определяет мгновенное и интегральное значения потребляемого установкой тепла при теплоносителе горячая вода и при равенстве расходов воды в подающем и отводящем трубопроводах. Счетчик тепла ТС-20 может применяться как локальный прибор коммерческого учета тепловой энергии или как датчик в системах автоматического управления.

Счетчик тепла представляет собой измерительную систему, состоящую из преобразователя объемного расхода теплоносителя, двух преобразователей температуры прямой и обратной воды и блока обработки сигналов и отображения информации.

Преобразователем объемного расхода теплоносителя в унифицированный электрический сигнал постоянного тока силой 0—5 мА является электромагнитный расходомер ИР-51. Преобразователями температуры прямого и обратного потоков теплоносителя являются двойной и одинарный платиновые термометры сопротивления ТСП-5071 градуировки 22. Блок обработки сигналов и отображения информации (БОС) — аналоговое вычислительное и преобразующее устройство приборного типа с унифицированными входным и выходным электрическими сигналами постоянного тока силой 0—5 мА и выходным импульсным сигналом — обеспечивает вычисление и цифровой отсчет интегрального количества отпускаемой или потребляемой тепловой энергии, мгновенный отсчет тепловой энергии по токовому выходу 0—5 мА и частотному 0—1,2 Гц, а также передачу показаний расхода тепловой энергии в виде частотного сигнала 0—1,2 Гц на систему учета и контроля энергии.

Предел допускаемой приведенной погрешности счетчика тепла класса 2,5 при измерении интегрального значения количества тепла и мгновенного значения его расхода в пределах измерения температуры теплоносителя равен $\pm 2{,}5\%$ верхнего предела измерений, а счетчика тепла класса 1,5—$\pm 1{,}5\%$. Пределы измерения объемного расхода теплоносителя представлены в табл. 3.8.

Рабочие пределы измерения температуры теплоносителя в прямом трубопроводе 70—150°С, в обратном — 30—70°С. Диапазон разности температур теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах, в котором прибор отвечает установленному классу точности, равен 30—

ТАБЛИЦА 3.8. ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Верхний предел измерения расхода теплоносителя, м³/ч	Цена импульса, кДж/имп.	Верхний предел измерения расхода теплоносителя, м³/ч	Цена импульса, кДж/имп.	Верхний предел измерения расхода теплоносителя, м³/ч	Цена импульса, кДж/имп.	Верхний предел измерения расхода теплоносителя, м³/ч	Цена импульса, кДж/имп.
0,32	32	3,2	$32 \cdot 10$	32	$32 \cdot 10^2$	320	$32 \cdot 10^3$
0,4	40	4	$40 \cdot 10$	40	$40 \cdot 10^2$	400	$40 \cdot 10^3$
0,5	50	5	$50 \cdot 10$	50	$50 \cdot 10^2$	500	$50 \cdot 10^3$
0,6	60	6	$60 \cdot 10$	60	$60 \cdot 10^2$	600	$60 \cdot 10^3$
0,8	80	8	$80 \cdot 10$	80	$80 \cdot 10^2$	800	$80 \cdot 10^3$
1	100	10	$100 \cdot 10$	100	$100 \cdot 10^2$	1000	$100 \cdot 10^3$
1,25	125	12,5	$125 \cdot 10$	125	$125 \cdot 10^2$	1250	$125 \cdot 10^3$
1,6	160	16	$160 \cdot 10$	160	$160 \cdot 10^2$	1600	$160 \cdot 10^3$
2	200	20	$200 \cdot 10$	100	$200 \cdot 10^2$	2000	$200 \cdot 10^3$
2,5	250	25	$250 \cdot 10$	250	$250 \cdot 10^2$	2500	$250 \cdot 10^3$

100°С. Счетчик тепла имеет цифровой отсчет импульсов, пропорциональных интегральному количеству тепловой энергии. Цена одного импульса (одной единицы нумератора электромеханического счетчика) К зависит от верхнего предела измерения расходомера (см. табл. 3.8). Число разрядов нумератора электромеханического счетчика 6. Нумератор имеет ручной сброс на нуль.

Выходной токовый сигнал, пропорциональный мгновенному расходу тепловой энергии, равен 0—5 мА. Частотный выходной сигнал, пропорциональный мгновенному расходу тепловой энергии, равен 0—1,2 Гц.

Счетчик тепла предназначен для эксплуатации в диапазоне температур окружающего воздуха 5—50°С при относительной влажности до 80% при 35°С. Предел дополнительной погрешности БОС, вызванной отклонением температуры окружающего его воздуха от 20 ± 5°С до любой в пределах от 5 до 50°С, равен 0,375% на каждые 10° изменения температуры.

Прибор питается от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. При изменении напряжения питания на —15% и на +10% от номинального значения, предел допускаемой приведенной погрешности БОС равен $\pm 1{,}5\%$ верхнего предела измерения.

Сопротивление линии связи между БОС и термомет-

рами сопротивлений не должно превышать 2,5 Ом. Мощность, потребляемая БОС из сети, не превышает 40 Вт. Счетчик тепла рассчитан на круглосуточную работу. Время установления рабочего режима 2 ч.

Принцип действия блока обработки сигналов основан на вычислении расхода тепловой энергии, Дж/ч, по формуле

$$q = G_w \rho (I_1 - I_2),$$

где G_w — объемный расход теплоносителя, м³/ч; ρ — плотность воды, кг/м³; I_1 и I_2 — энтальпия воды соответственно прямого и обратного потоков, Дж/кг.

С учетом того, что измеряемыми переменными в прямом и обратном потоках теплоносителя являются не значения энтальпии, а значения температуры, представленное выражение для q с методической погрешностью не выше $\pm 0{,}2\%$, может быть записано в виде

$$q = k G_w \frac{t_1 - m(t_2 + a)}{t_1 + b},$$

где k, m, a, b — постоянные коэффициенты.

Интегральный расход тепловой энергии будет

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} q \, d\tau,$$

где τ_1 и τ_2 — соответственно начало и конец времени интегрирования или измерения расхода тепловой энергии.

Структурная схема счетчика тепла ТС-20 представлена на рис. 3.23. Преобразователь расхода ПРИ и измерительное устройство ИУ-51 входят в состав электромагнитного расходомера ИР-51, который формирует выходной сигнал постоянного тока силой 0—5 мА, соответствующий мгновенному расходу теплоносителя. Для определения только суммарного объемного количества теплоносителя, а не тепловой энергии, расходомер может использоваться в комплекте с любым интегратором, например типа С-1М или С-1АМ.

Расходомер типа ИР-51 в зависимости от типа используемого преобразователя расхода ПРИ может иметь пределы измерения, указанные в табл. 3.9.

Цифры, входящие в условное обозначение типа преобразователя расхода ПРИ, обозначают условный внутренний диаметр его трубы, мм. Следует иметь в виду, что каждый тип ПРИ может быть отградуирован на одно из

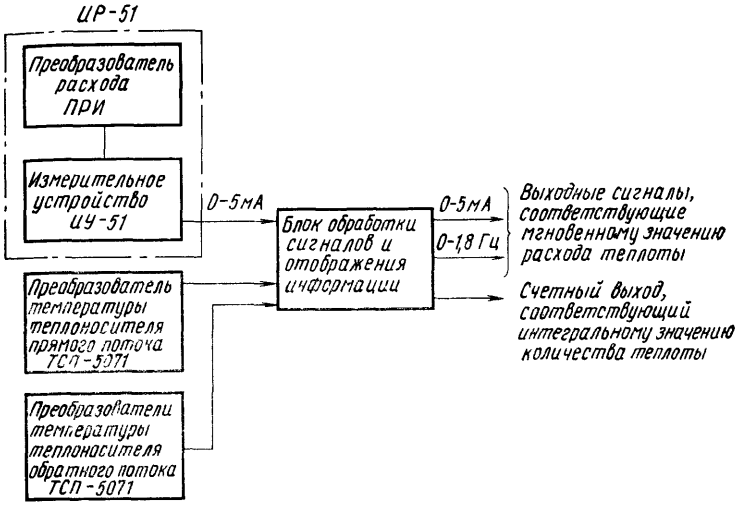


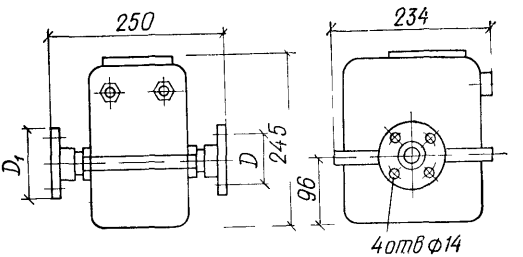
Рис. 3 23 Структурная схема счетчика тепла типа ТС-20

ТАБЛИЦА 3.9. ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА ТИПА ПРИ

Тип преобразователя расхода	Верхний предел измеряемого расхода при верхних пределах скоростей потока измеряемой среды, м/с									
	1,25	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6	8	10
ПРИ-10	0,31	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5
ПРИ-15	0,80	1	1,25	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6
ПРИ-25	2	2,5	3,2	4	5	6	8	10	12	16
ПРИ-50	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	60
ПРИ-80	20	25	32	40	50	60	80	100	125	160
ПРИ-100	32	40	50	60	80	100	125	160	200	250
ПРИ-150	80	100	125	160	200	250	320	400	500	600
ПРИ-200	125	160	200	250	320	400	500	600	800	1000
ПРИ-300	320	400	500	600	800	1000	—	—	—	—

значений верхнего предела измеряемого расхода, например для ПРИ-10 от 0 до 0,32 м³/ч при скорости 1,25 м/с. При этом максимальный расход соответствует сигналу 5 мА, а нижний предел измерения всегда равен нулю. Класс точности расходомера ИР-51 по токовому выходу — 1. Габаритные и присоединительные размеры преобразователей расхода приведены в табл. 3.10—3.12.

ТАБЛИЦА 3.10. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ, ММ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА ПРИ-10, ПРИ-15 И ПРИ-25

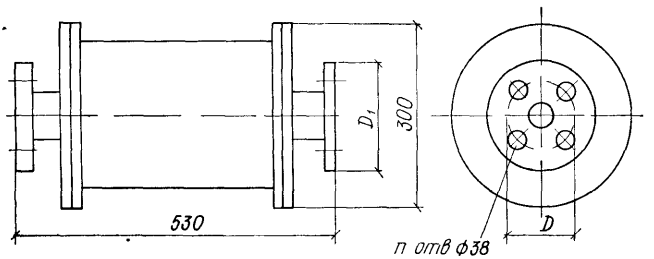


Условное обозначение	Покрытие трубы	D	D_1
ПРИ-10	Полиуретан Эмаль Фторопласт	60	90
ПРИ-15	Полиуретан Эмаль Фторопласт	65	95
ПРИ-25	Полиуретан Эмаль Фторопласт	85	115

Принцип работы преобразователя расхода основан на явлении электромагнитной индукции. При прохождении электропроводной жидкости (вода) через однородное магнитное поле в ней, как в движущемся проводнике, наводится электродвижущая сила, пропорциональная средней скорости потока. Электромагнит *1* (рис. 3.24) создает внутри немагнитной трубы *2*, покрытой изоляционным материалом, магнитное поле. Электродвижущая сила, образующаяся в жидкости, пересекающей магнитное поле, снимается двумя электродами *3*, введенными диаметрально противоположно в одном поперечном сечении в стенке трубы преобразователя расхода.

Сигнал, поступающий от преобразователя расхода, содержит, кроме полезной составляющей, еще и состав-

ТАБЛИЦА 3.11. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ, ММ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА ПРИ-50 И ПРИ-80



Условные обозначения	Покрытие трубы	D	D_1	n
ПРИ-50	Полиуретан Эмаль Фторопласт	125	180	4
ПРИ-80	Полиуретан Эмаль Фторопласт	160	195	8 4

ляющие трансформаторной и емкостной помех. Трансформаторная помеха наводится магнитным полем преобразователя расхода в витке, состоящем из соединительных проводов, электродов, жидкости и входного сопротивления измерительного устройства, как во вторичном витке трансформатора. Трансформаторная помеха сдвинута по фазе относительно полезного сигнала на 90°. Емкостная помеха возникает за счет паразитной емкости между обмоткой возбуждения преобразователя расхода и электродами вместе с монтажными проводами. Емкостная помеха, возникающая в преобразователе расхода, находится

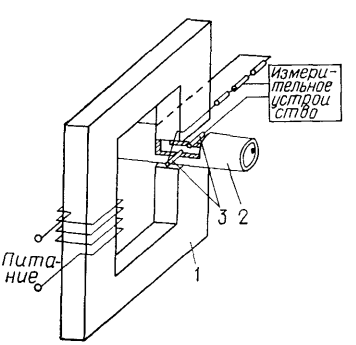
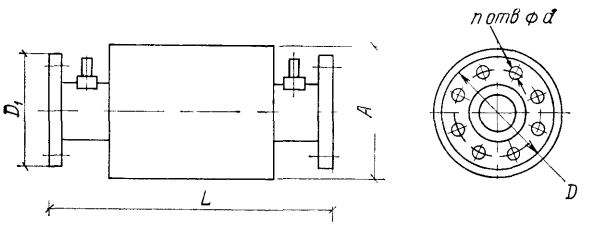


Рис. 3.24. Принцип действия электромагнитного расходомера ИР-51

ТАБЛИЦА 3 12 ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ММ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА ПРИ 100, ПРИ-150, ПРИ 200 И ПРИ 300



Условное обозначение	Покрытие трубы	L	A	D	D_1	d	n
ПРИ 100	Резина или полиуретан / Эмаль / Фторопласт	600	300	190	230	23	8
ПРИ 150	Резина или полиуретан / Эмаль / Фторопласт	750	970	230	300	27	8
ПРИ-200	Резина или полиуретан	850	430	310	360	27	12
ПРИ 300	Резина или полиуретан	1120	350	430	485	30	36

практически в фазе или в противофазе с полезным сигналом Компенсация трансформаторной помехи производится в самом преобразователе расхода. Для этого выводы от одного из электродов монтируются симметрично расположенными проводниками, замкнутыми на низкоомный переменный резистор. Напряжение, получаемое от преобразователя расхода, снимается с движка резистора и другого электрода. При настройке преобразователя расхода (когда преобразователь расхода заполнен неподвижной жидкостью) изменением положения движка резистора добиваются минимума трансформаторной помехи. Для уменьшения величины емкостной помехи в преобразователе расхода выполняется электростатическое экранирование сигнальных цепей. Сигнал от преобразователя расхода подается по экрани-

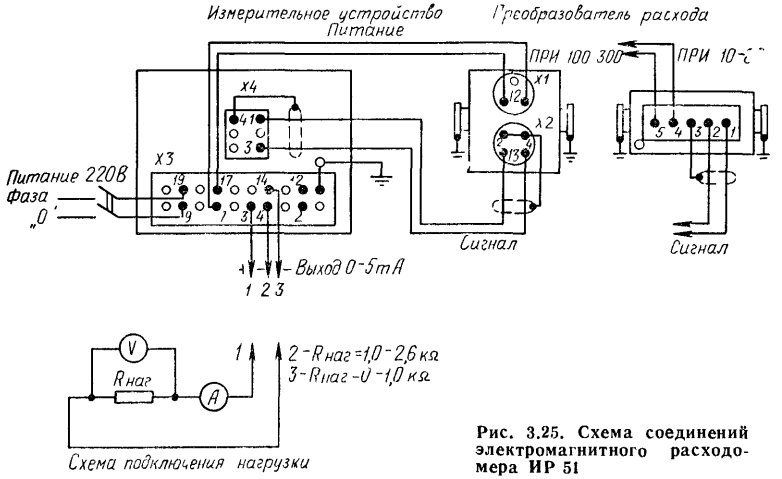


Рис. 3.25. Схема соединений электромагнитного расходомера ИР 51

рованному кабелю на вход измерительного устройства.

Преобразователь расхода расходомера состоит из двух основных узлов — узла трубы и узла электромагнита. Узел трубы преобразователя расхода всех типоразмеров имеет принципиально одинаковую конструкцию. Труба изготовлена из немагнитной нержавеющей стали, ее внутренняя поверхность покрыта изоляционным материалом. В среднем сечении трубы диаметрально противоположно друг другу в стенку введены два электрода (см. рис. 3.24). Электроды изолированы от стенки трубы. По обе стороны трубы размещается электромагнит так, чтобы электроды находились в середине зоны магнитного поля.

Обмотка возбуждения электромагнита состоит из двух одинаковых катушек, которые размещаются по обе стороны от трубы преобразователя расхода. Обмотки имеют определенную конфигурацию, выполняемую в соответствии с законами, обеспечивающими получение заданного магнитного поля. Обмотки устанавливаются на трубе на изоляционных прокладках. Магнитопровод электромагнита собран из пластин электротехнической стали. Узел трубы с электромагнитом заключается в кожух. Преобразователи расхода устанавливаются на трубопроводе с помощью фланцев.

Схема соединений электромагнитного расходомера ИР-51 приведена на рис. 3.25. Измерительное устройство ИУ-51 представляет собой двухкоординатный автоком-

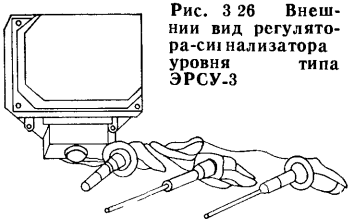


Рис. 3 26 Внешний вид регулятора-сигнализатора уровня типа ЭРСУ-3

пенсатор переменного напряжения, преобразующий полезную составляющую выходного сигнала в унифицированный выходной сигнал постоянного тока силой 0—5 мА

При работе электромагнитного расходомера ИР-51 в комплекте теплосчетчика ТС выходной сигнал измерительного устройства ИУ-51 подается на один из входов блока обработки сигналов и отображения информации Электрическая схема БОС основана на использовании функциональной мостовой схемы, включенной в токовую цепь ИУ-51 и содержащей термометры сопротивления прямого и обратного потоков теплоносителя Кроме того, БОС содержит преобразователи напряжение — ток и ток — частота. Выбор функциональной мостовой схемы обусловлен необходимостью реализации выражения для определения значения мгновенного расхода теплоносителя. Выходное устройство блока обработки сигналов содержит формирователь-расширитель выходных импульсов. Выходные импульсы приводят в действие электромеханический счетчик. Показания счетчика выведены на лицевую панель прибора.

Для измерения расхода воды или других жидкостей, используемых в устройствах изменения влагосодержания воздуха или в качестве холодоносителя, в технике автоматизации систем кондиционирования воздуха применяются различные датчики-реле уровня.

Для поддержания уровня электропроводных жидкостей в различных резервуарах, например в поддоне камеры орошения или баке холодоносителя, предназначен регулятор-сигнализатор уровня типа ЭРСУ-3 (рис. 3.26). Принцип действия прибора основан на изменении электрического сопротивления между электродом датчика и стенкой сосуда. Погружение электрода датчика в контролируемую среду вызывает уменьшение сопротивления, а осушение — увеличение.

Прибор состоит из трех электроконтактных датчиков и релейного блока. Датчик регулятора-сигнализатора уровня состоит из следующих частей· составного электрода, представляющего собой изолированный металлический стержень постоянной длины и неизолированный

металлический стержень, длина которого выполняется по заказу, штуцера, фиксирующего пластмассового колпачка Стержни соединяются с помощью наконечника и гайки

Компенсация усадки фторопластового изолятора стержня датчика осуществляется пружиной. Резиновый колпачок изолирует место присоединения провода к электроду от внешних воздействий и случайных прикосновений. Провод к электроду крепится с помощью гаек.

Релейный блок предусмотрен брызгозащищенного исполнения. Внутри литого алюминиевого корпуса на стальном шасси установлены выходные реле, силовой трансформатор, три платы На платах размещены элементы печатного монтажа Подвод внешних проводов питания и сигнализации осуществляется через групповой кабельный сальник Корпус релейного блока закрывается литой алюминиевой крышкой через уплотнительную резиновую прокладку с помощью четырех винтов. Релейный блок преобразует электрическое сопротивление датчика в электрический релейный сигнал.

Электрическая схема релейного блока состоит из трех транзисторных релейных каскадов и трех выпрямительных элементов, питающихся от понижающего трансформатора. Нагрузкой усилителя служит электромагнитное реле, контакты которого выведены к штепсельному разъему.

Число сигнализируемых с помощью ЭРСУ-3 положений уровня равно четырем (нижний, верхний, средний, аварийный). Минимальная удельная электропроводность контролируемой среды не менее 0,015 Ом/м. Погрешность сигнализации уровня ± 10 мм. Разрывная мощность контактов при переменном токе напряжением 380 В — не более 500 В·А, при постоянном токе напряжением до 220 В — не более 50 Вт. Температура контролируемой среды не более 80 или 200°С. Питается прибор от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц, потребляемая мощность не более 15 В·А.

Для контроля верхнего или нижнего уровня воды или других жидкостей, которые не агрессивны по отношению к стали марки Х18Н10Т и имеют плотность 0,8—1,2 г/см^3, предназначен датчик-реле уровня двухпозиционный типа ДРУ-1 (рис. 3.27, *а*).

При понижении или повышении уровня контролируемой жидкости датчик-реле обеспечивает размыкание или замыкание своих контактов. Принцип действия прибора

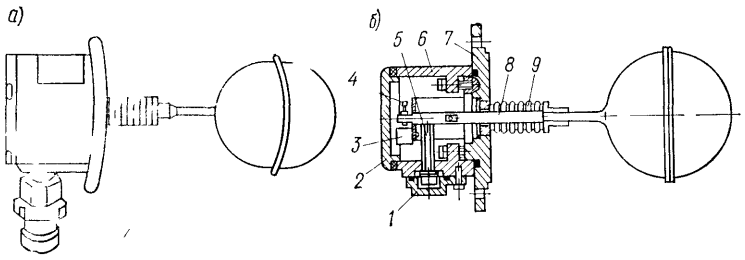


Рис 3.27 Внешний вид (*а*) и конструкция (*б*) датчика-реле уровня жидкости типа ДРУ-1

основан на изменении положения поплавка под воздействием выталкивающей силы контролируемой жидкости. В корпусе *6* (см. рис. 3.27,*б*) на кронштейне укреплен микропереключатель *3*. Стопорный винт *5* служит для фиксации рычага *8* и поплавка (выполняющего роль чувствительного элемента) при транспортировании датчика-реле. Болтом *4*, ввернутым в рычаг *8*, осуществляется настройка датчика-реле на уровень срабатывания. Функцию разделителя между жидкостью в резервуаре и окружающей средой выполняет сильфон *9*, соединенный с фланцем *7* и рычагом *8* путем сварки. Корпус водозащищенного исполнения закрывается крышками *1* и *2*. Заземление датчика-реле осуществляется винтом, расположенным на корпусе.

3.5. РЕГУЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННЫХ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В ФОРМЕ УНИФИЦИРОВАННОГО СИГНАЛА

Для реализации сложных многомерных схем автоматической стабилизации различных переменных в системах кондиционирования воздуха могут использоваться приборы и устройства общепромышленных комплексов средств регулирования, например АКЭСР или КТС ЛИУС (СУПС). Ограниченный характер применения этих приборов до последнего времени объяснялся их сравнительно высокой стоимостью и отсутствием практики проектирования сложных САР. На современном этапе становится очевидной технико-экономическая целесообразность применения приборов агрегатированных комплексов при автоматизации СВ и СКВ.

Решать задачу стабилизации требуемого качества технологических параметров объекта в условиях связан-

ного и каскадного регулирования при изменениях динамических свойств и режимов работы технологического объекта позволяет комплект аппаратуры АКЭСР второй очереди [78]. Регуляторы, входящие в состав комплекта, позволяют реализовать П-, И-, ПИ- и ПИД-законы регулирования в виде перемещения выходного вала (штока) исполнительного механизма постоянной скорости. Кроме того, эти регуляторы позволяют реализовать П- и ПИ-законы регулирования в виде скважности импульсов напряжения 24 В. Приборы и устройства комплекта могут воспринимать командные сигналы в дискретной или аналоговой форме от оператора, логических устройств и управляющих вычислительных комплексов.

В состав комплекта аппаратуры АКЭСР второй очереди входят: регулирующие приборы РП4-У и РП4-Т, блок динамической связи (БДС), блок суммирования и демпфирования (БСД), блок суммирования и сигнализации (БСС), блок задатчика интегрирующего (БЗИ), блоки ручного управления — БРУ-32, БРУ-22 и БРУ-42, блок вычислительных операций БВО-2, блок селектирования БСД-2; ручные задатчики РЗД-22 и РЗД-12, пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2М, защитное устройство ЗУ-04.

Регулирующие приборы типа РП4, предназначенные для установки в щите (рис. 3.28), сравнивают сигнал задания с сигналом контролируемой переменной, выделяют сигнал рассогласования и формируют совместно с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости П- и ПИ-законы регулирования, а при дополнительном включении внешнего дифференциатора — ПИД-закон. В приборах обеспечивается дискретная трехступенчатая дистанционная подстройка коэффициента передачи и постоянной времени интегрирования, имеется возможность подключения внешнего ±5%-ного реостатного задатчика РЗД-12. Блоки имеют внутренний 100%-ный задатчик. Постоянная времени интегрирования 5—500 или 200—2000 с, постоянная времени дифференцирования 0—30 с,

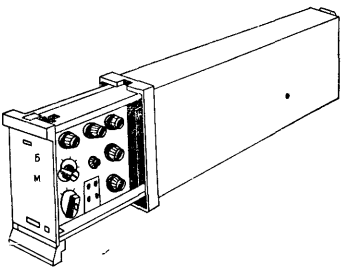


Рис. 3.28. Внешний вид регулятора типа РП4

зона нечувствительности 0,2—2%, коэффициент передачи 0,5—5 с/%.

Регулятор ПР4-У предназначен для работы с токовыми датчиками, имеет четыре входа 0—5 мА или 0—20 мА и два входа 0—10 В. Токовые входы гальванически отделены один от другого и от выхода.

Регулятор РП4-Т предназначен для работы с двумя термопреобразователями сопротивления и одним преобразователем термоэлектрическим, входной сигнал 0—50 мА, датчики подключаются к коробке холодных спаев КХС4.

Регулятор РП4-П предназначен для работы с дифтрансформаторными, индуктивными, реостатными и ферродинамическими датчиками.

Регуляторы типа РП4 предназначены для работы в схемах стабилизации, формируют выходной командный сигнал, воспринимаемый исполнительным устройством на базе исполнительных механизмов типа МЭО. Регуляторы РП4 могут применяться в контурах регулирования с другими исполнительными устройствами при использовании в качестве промежуточного преобразователя командного сигнала блока БЗИ. С этим же блоком регуляторы при-

ТАБЛИЦА 3.13. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯТОРОВ ТИПА РП4-У

Обозначение входных контактов	Вид сигнала	Диапазон изменения	Входное сопротивление	Число входов	Примечание
12;14 *16;18* *20;22*	Аналоговый, постоянный ток	0—5 мА 0—20 мА 4—20 мА	250 Ом 100 Ом	4	Три входа масштабируемые
5;4 *6;4*	Аналоговый, напряжение постоянного тока	0—10 В	10 кОм	2	Вход преобразователя напряжения в ток
11;13 *13;15*	Дискретный, напряжение постоянного тока	0;24 В	—	2	Входы дистанционной подстройки τ_u, α_n
17;19 *21*	Аналоговыи, сигнал внешнего реостатного задатчика	±5%	—	1	—

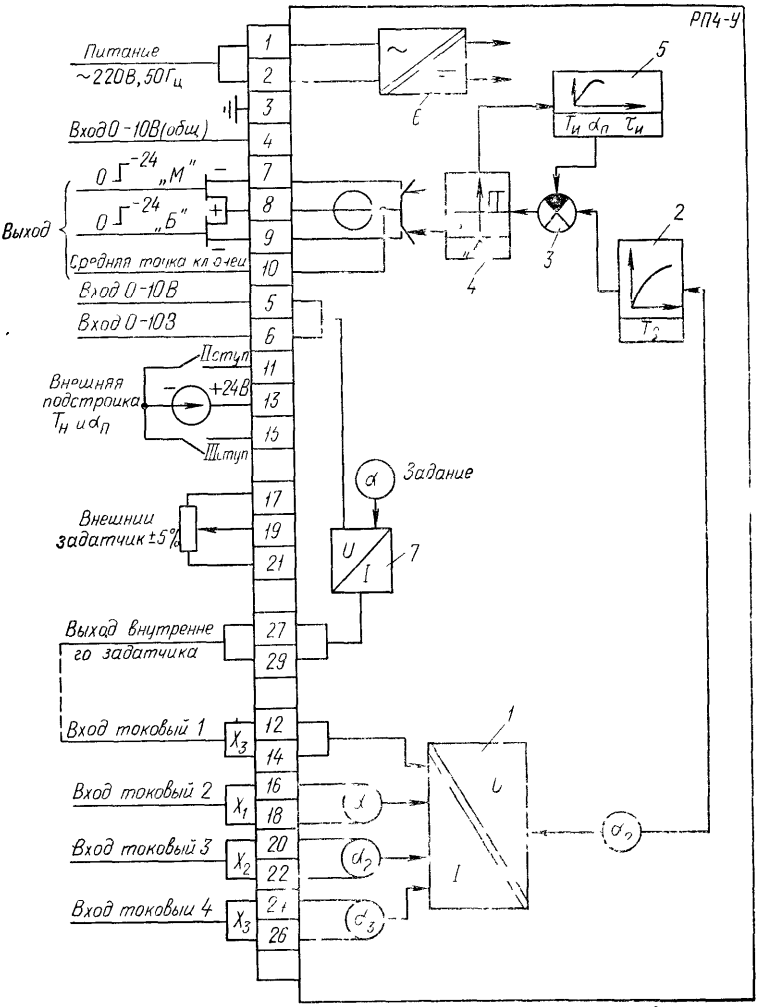


Рис. 3.29. Функциональная схема регулятора типа РП4-У

годны к использованию в схемах каскадного регулирования в качестве главного регулятора.

Схема внешних соединений регулятора типа РП4-У приведена на рис. 3.29. Виды входных сигналов, диапазоны их изменения, входные сопротивления, число входов, номера входных контактов регулятора РП4-У приведены в табл. 3.13.

Номинальный диапазон плавной установки зоны нечувствительности — от 0,2 до 2% диапазона изменения входного сигнала; номинальные значения дискретной установки коэффициента передачи $k_р = 0{,}5$; 0,65; 0,8; 1,1; 1,4; 1,8; 2,2; 3; 3,6; 5; номинальные значения дискретной установки постоянной времени интегрирования $T_и = 5$, 10, 20, 35, 40, 60, 80, 100, 140, 150, 220, 240, 330, 400, 500, 600, 880, 1320 и 2000 с. Постоянная времени дифференцирования $T_д$ устанавливается плавно в диапазоне 0—30 с. Номинальный диапазон плавной установки минимальной длительности командного импульса $\tau_и$ составляет 0,1—1 с.

В регуляторе предусмотрена возможность дискретной трехступенчатой дистанционной подстройки коэффициента передачи $K_р$ и постоянной времени интегрирования $T_и$. В регуляторе РП4-У имеется внутренний задатчик $X_з$ с диапазоном задания от 0 до 5 мА. Номинальный диапазон плавной установки коэффициентов масштабирования соответствует 0—1; диапазон действия коэффициента масштабирования суммарного сигнала контролируемых переменных α_Σ — от 0,4 до 1.

Функциональная схема регулятора типа РП4-У (см. рис. 3.29) содержит: входной сумматор *1*, блок дифференцирования *2*, операционный усилитель-сумматор *3*, трехпозиционный усилитель мощности *4*, инерционное звено отрицательной обратной связи *5*, блок питания *6* и задатчик *7*.

Сигналы контролируемых переменных X_1, X_2, X_3 и сигнал заданного значения регулируемой переменной поступают на вход сумматора *1*, в котором происходит алгебраическое суммирование и формируется сигнал рассогласования ε:

$$\varepsilon = \alpha_\Sigma (\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + X_з).$$

Сигнал рассогласования ε поступает на вход демпфирующего устройства *2*, представляющего собой инерционное RC — звено с регулируемой постоянной времени $T_д$. С выхода демпфера *2* сигнал рассогласования поступает на вход операционного усилителя-сумматора *3*, с выхода которого поступает на вход трехпозиционного нуль-органа *4*, имеющего регулируемую зону нечувствительности Δ.

При сигнале рассогласования, превышающем порог срабатывания регулирующего устройства, нуль-орган срабатывает и скачком подает сигнал в цепь отрицательной обратной связи, представляющей собой активное

инерционное $R\,C$-звено *5*, и на выходные ключи, коммутирующие цепи внешней нагрузки. При срабатывании сигнала рассогласования ключа соответствующей полярности на выходе появляется напряжение. При отключенной цепи отрицательной обратной связи устройство представляет собой трехпозиционный нуль-орган с гистерезисом.

При включении цепи отрицательной обратной связи и сработанном состоянии нуль-органа *4* сигнал отрицательной обратной связи на выходе инерционного звена *5* начинает плавно увеличиваться и компенсировать сигнал рассогласования на входе операционного усилителя-сумматора *3*. Сигнал на входе нуль-органа *4* плавно уменьшается до порога отпускания, после чего нуль-орган отключается, сигналы на выходе устройства и на входе отрицательной обратной связи скачком уменьшаются до нуля. Сигнал отрицательной обратной связи на выходе инерционного звена *3* начинает плавно уменьшаться, а сигнал на выходе нуль-органа *4* — возрастать до порога срабатывания. После этого нуль-орган срабатывает, включает выходные ключи и подает сигнал в цепь отрицательной обратной связи. При сохранении сигнала рассогласования цикл повторяется.

Таким образом, регулирующее устройство РП4 формирует на своем выходе импульсы, чередующиеся паузами. Интегрирование этих импульсов с помощью исполнительного механизма постоянной скорости позволяет получить пропорционально-интегральный ПИ-закон регулирования:

$$\alpha_{ИМ} = K_р \left(\varepsilon_1 + \frac{1}{T_п} \int_0^{\tau} \varepsilon_1 \, d\,\tau \right),$$

где $\alpha_{ИМ}$ — угол поворота исполнительного механизма, $\varepsilon_1 = (1 - e^{-\tau/T_д})\varepsilon$.

Длительность первого командного импульса (пропорциональная часть) зависит от величины сигнала рассогласования и коэффициента передачи $\alpha_п$ инерционного звена *5*.

Коэффициент пропорциональности регулятора, образованного регулирующим устройством РП4 и исполнительным механизмом постоянной скорости, определяется выражением

$$K_р = 100\ \%\ \alpha_п / T_{ИМ},$$

где $\alpha_п$ — коэффициент передачи устройства (в секундах на процент входного сигнала), с/%, $T_{ИМ}$ — время 100%-ного хода исполнительного механизма

Интегрирование последующих импульсов $\tau_и$ дает интегральную часть регулятора, которая характеризуется постоянной времени интегрирования $T_и$ инерционного звена. Коэффициент передачи $\alpha_п$ и постоянная времени интегрирования $T_и$ регулируются с помощью переменных резисторов заряда и разряда активного инерционного *RC*-звена *5*.

Длительность интегральных импульсов на выходе устройства РП4 регулируется сигналом дополнительной положительной обратной связи, поступающим от звена *5* на вход операционного усилителя *3* и расширяющего зону возврата Δb нуль-органа *4* при срабатывании. Во время паузы этот сигнал отсутствует. Минимальная длительность импульса формируется при малых сигналах рассогласования. При увеличении сигнала рассогласования длительность импульса увеличивается. Минимальная длительность импульса устанавливается ручкой $\tau_и$ и определяет статическую точность регулирования в системе.

В схеме РП4 предусмотрена дистанционная дискретная в три ступени подстройка коэффициента передачи $\alpha_п$ и постоянной времени интегрирования $T_и$ путем подачи на входы II и III ступени подстройки напряжения 24 В постоянного тока (см. рис. 3.35).

Контроль срабатывания устройства РП4 осуществляется с помощью световых индикаторов «Меньше» (М) и «Больше» (Б). Для контроля работы устройства служат контрольные гнезда *7* и *9*.

Регулятор РП4 в комплекте с блоком интегрирующего задатчика БЗИ может работать с любым исполнительным устройством, использующим в качестве выходного сигнала унифицированный сигнал 0—5 мА или 0—10 В. Соединение приборов РП4 и БЗИ позволяет использовать их в качестве главного регулятора в каскадной схеме регулирования. В этом случае исполнительным устройством для регулирующего устройства РП4 — БЗИ будет второй вспомогательный регулятор РП4-У.

Блок интегрирующего задатчика (БЗИ), выполненный, как и РП4, в приборном исполнении для размещения в щите (рис. 3.30), предназначен для интегрирования длительности импульсных сигналов (например, выходных сигналов РП4), преобразования интеграла в унифицированный аналоговый сигнал, запоминания значения интеграла, а также для ограничения выходного сигнала по минимальному и максимальному значениям с сигнализацией при достижении указанных уровней переклю-

чающимися сухими контактами. Входные сигналы БЗИ — импульсы постоянного тока и постоянного пульсирующего напряжения 0—24 В. Номинальное значение времени интегрирования 10; 25; 63; 160 и 400 с. Значение интеграла сохраняется после перерыва в питании блока. В приборе предусмотрены: выбор любых трех значений постоянной времени интегрирования,

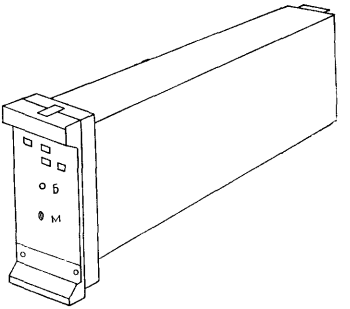


Рис. 3.30. Внешний вид блока задатчика интегрирующего БЗИ

изменение или выбор которых в дальнейшем может производиться дистанционно; внутренний нестабилизированный источник выпрямленного напряжения 24 В, который может использоваться для управления прибором при наличии в качестве командного сигнала сухих контактов; ручное управление с помощью кнопок, вынесенных на переднюю панель, а также указатель выходного сигнала.

Блок конструктивно состоит из шасси и корпуса, предназначенного для щитового утопленного монтажа на вертикальной плоскости. Крепление корпуса к щиту осуществляется двумя специальными кронштейнами с обоймой, с помощью которых передняя рамка корпуса блока притягивается к наружной поверхности щита. На задней стенке корпуса расположена 30-клеммная колодка для внешних электрических соединений. На передней панели блока находятся указатель величины выходного сигнала, кнопки ручного управления блоком, индикаторы световой сигнализации ограничения выходного сигнала.

Органы настройки уровней ограничения выходного сигнала и перемычки настройки времени интегрирования расположены на внутренней полуоперативной панели. Клеммы для лабораторной перестройки выходного сигнала с диапазоном 0—5 мА на диапазон от —2,5 до +2,5 мА расположены на печатной плате блока. Для пользования органами настройки шасси блока выдвигается из корпуса без разрыва электрических цепей, что обеспечивается наличием плоского гибкого жгута, соединяющего шасси с клеммной колодкой корпуса. Шасси фиксируется в корпусе с помощью специального замка.

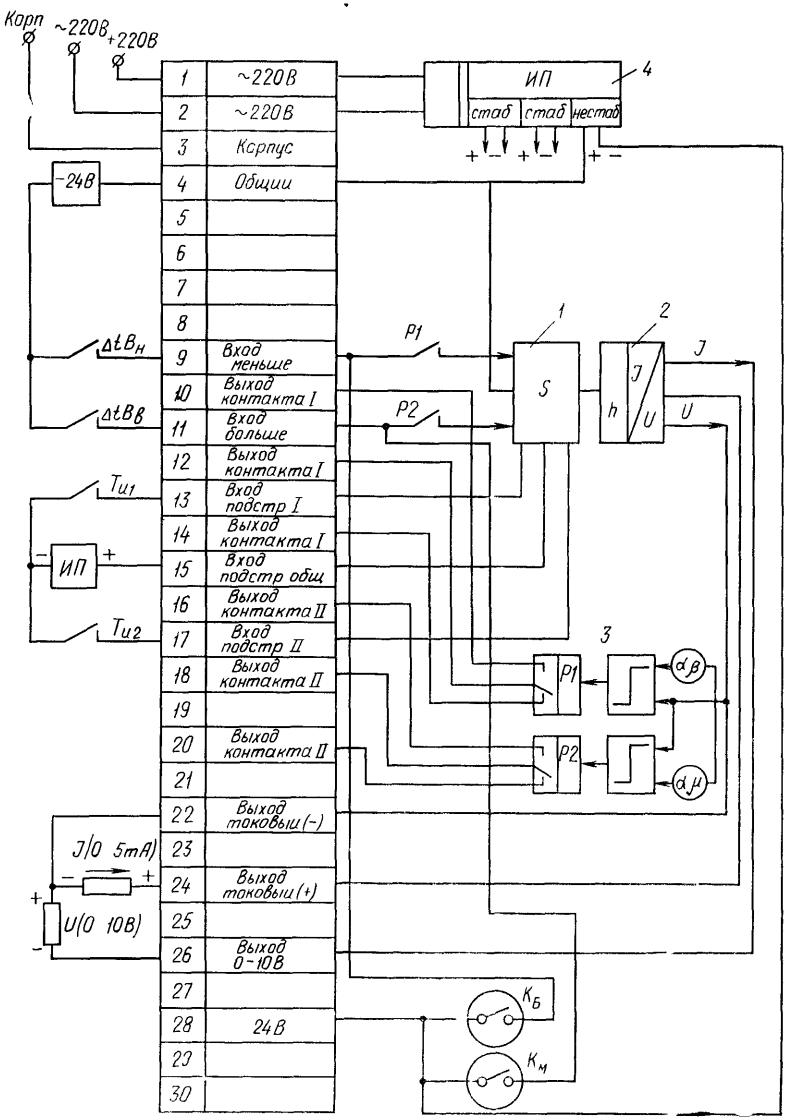


Рис. 3 31. Структурная схема и схема внешних соединений БЗИ

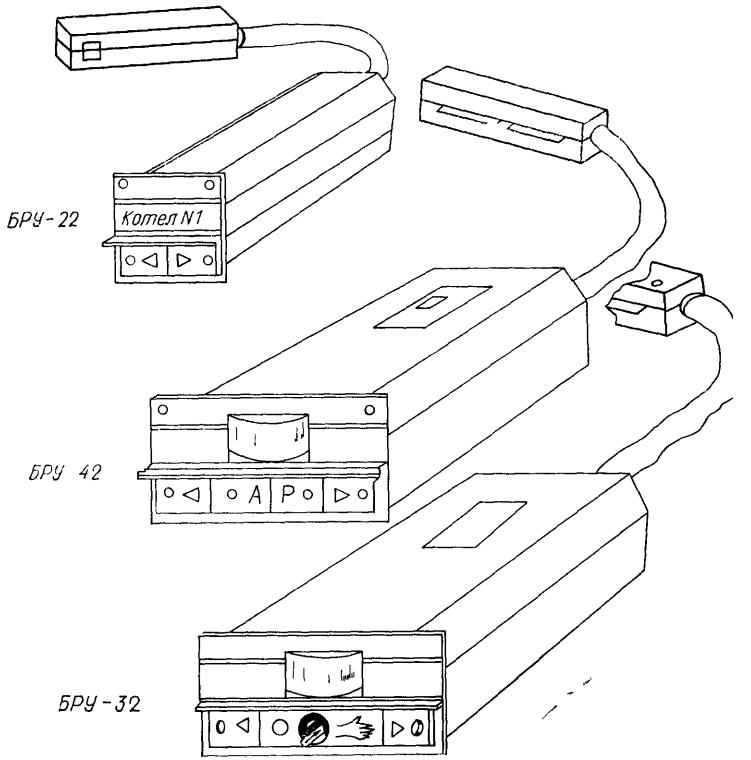


Рис. 3 32. Внешний вид блоков ручного управления

Схема блока состоит из следующих основных функциональных узлов: управляемого электромеханического преобразователя *1* импульсного входного сигнала в линейное перемещение плунжера датчика; преобразователя перемещения — ток (токового датчика) *2*; схемы ограничения выходного сигнала *3*; схемы источника питания *4* (рис 3.31).

Для использования регулятора РП4 в схемах ручного дистанционного управления и в системах автоматического управления, построенных с использованием принципа переменной структуры (СПС), могут применяться блоки ручного управления (БРУ) (рис. 3 32). Блоки ручного управления предназначены выполнять·

БРУ-22 — ручное или дистанционное переключение цепей управления на два положения; световую индикацию положения цепей (рис. 3.33);

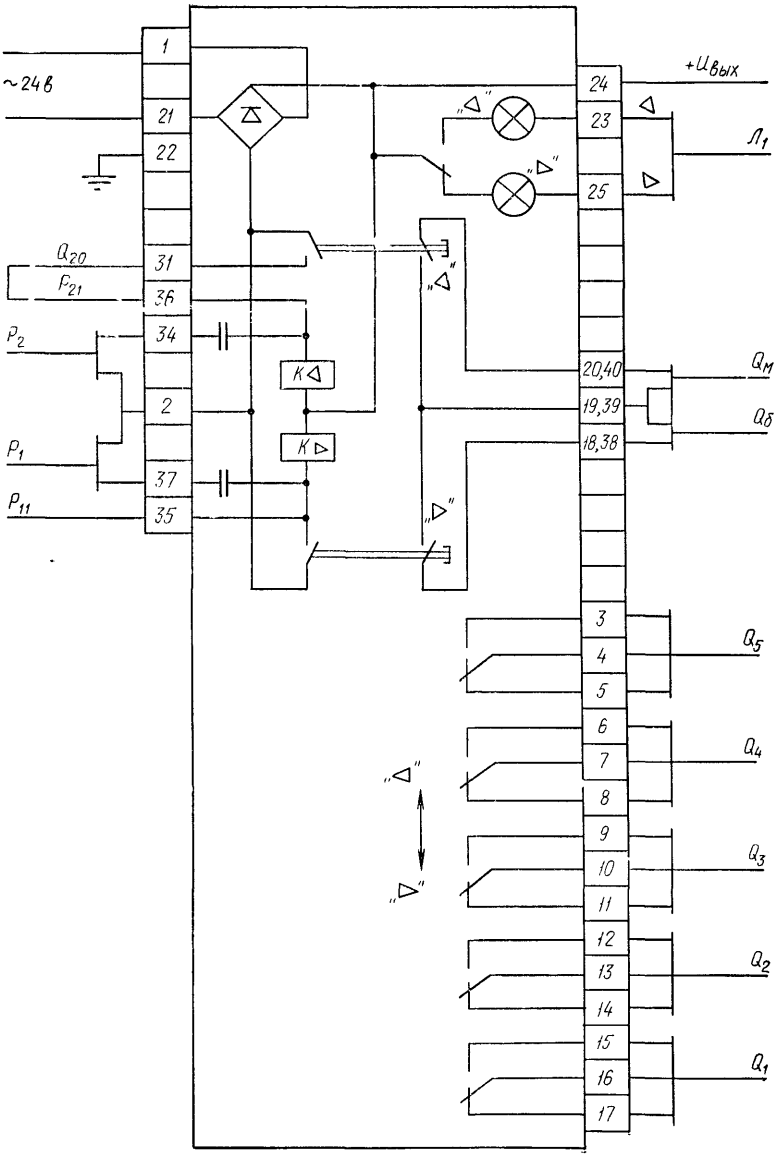


Рис. 3.33. Схема внешних соединений БРУ-22

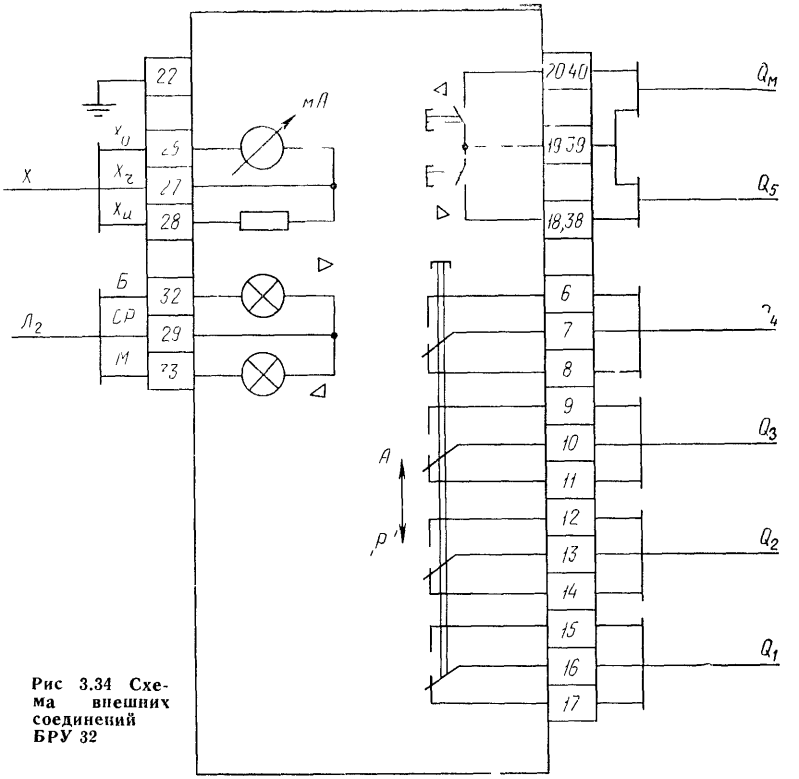


Рис 3.34 Схема внешних соединений БРУ 32

БРУ-32 -- ручное переключение с автоматического режима управления на ручной дистанционный и обратно; кнопочное управление интегрирующими исполнительными устройствами; световую индикацию выходного сигнала регулирующего устройства с импульсным выходным сигналом; определение положения регулирующего органа по сигналу 0—5 мА или 0—10 В от исполнительного устройства (рис. 3.34);

БРУ-42 — ручное или дистанционное переключение с автоматического режима управления на ручной и обратно; кнопочное управление интегрирующими исполнительными устройствами; световую индикацию режимов управления выходного сигнала регулирующего устройства с импульсным выходным сигналом; определение положения регулирующего органа по сигналу 0—5 мА или 0—10 В от исполнительного устройства (рис. 3.35).

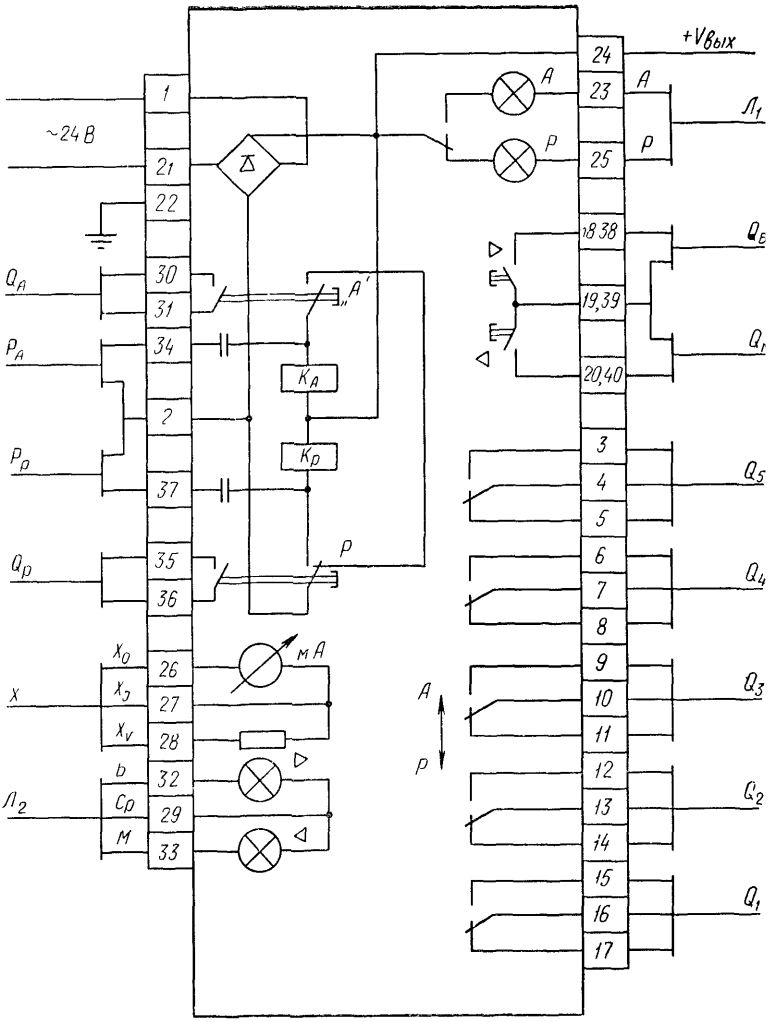


Рис. 3 35. Схема внешних соединений БРУ 42

Для ручного дистанционного изменения установок регулятора РП4 применяют выносные задатчики типа РЗД (рис. 3.36).

Пассивный резисторный задатчик РЗД-12 осуществляет установку задания регулятора РП4 в диапазоне ±5% (рис. 3.37).

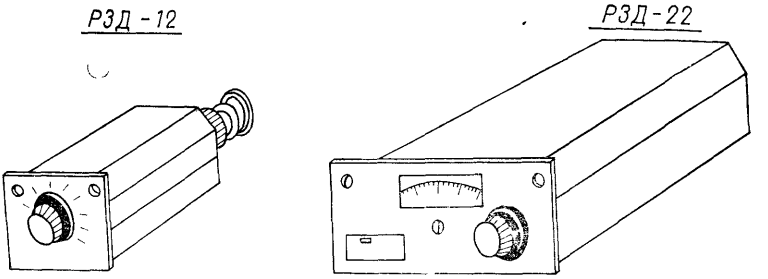
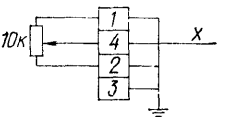


Рис. 3.36 Внешний вид ручных задатчиков

Рис. 3.37. Схема внешних соединений РЗД-12



Задатчик РЗД-22 предназначен для установки задания в диапазоне 0—100%. Выходной сигнал 0—5 мА, 0—20 мА, 4—20 мА и 0—10 В. Устройство преобразует входные сигналы 0—5 мА, 0—10 В в любой из выходных сигналов (рис. 3.38). Точность установки задания по шкале не хуже $\pm 2{,}5\%$, дискретность — не более 0,5%, погрешность преобразования сигналов не более 1,5%.

Еще бо́льшими функциональными возможностями, по сравнению с приборами и устройствами первой очереди АКЭСР [67] и с отдельными приборами второй очереди АКЭСР, обладают аналоговые технические средства управления с переменной структурой (СУПС), являющиеся составной частью комплекса технических средств для локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС) [70]. Широкий спектр функций, выполняемых СУПС, позволяет создавать различные по сложности контуры управления и подсистемы, включая каскадные и многосвязанные системы регулирования.

Известно, что параметры большинства технологических объектов управления в системах вентиляции и кондиционирования воздуха являются существенно нестационарными. Колебания значений передаточных коэффициентов и постоянных времени отдельных звеньев обусловлены особенностями работы СВ и СКВ в суточном и годовом цикле. Пределы этих колебаний зачастую таковы, что применение обычных ПИ- и ПИД-регуляторов малоэффек-

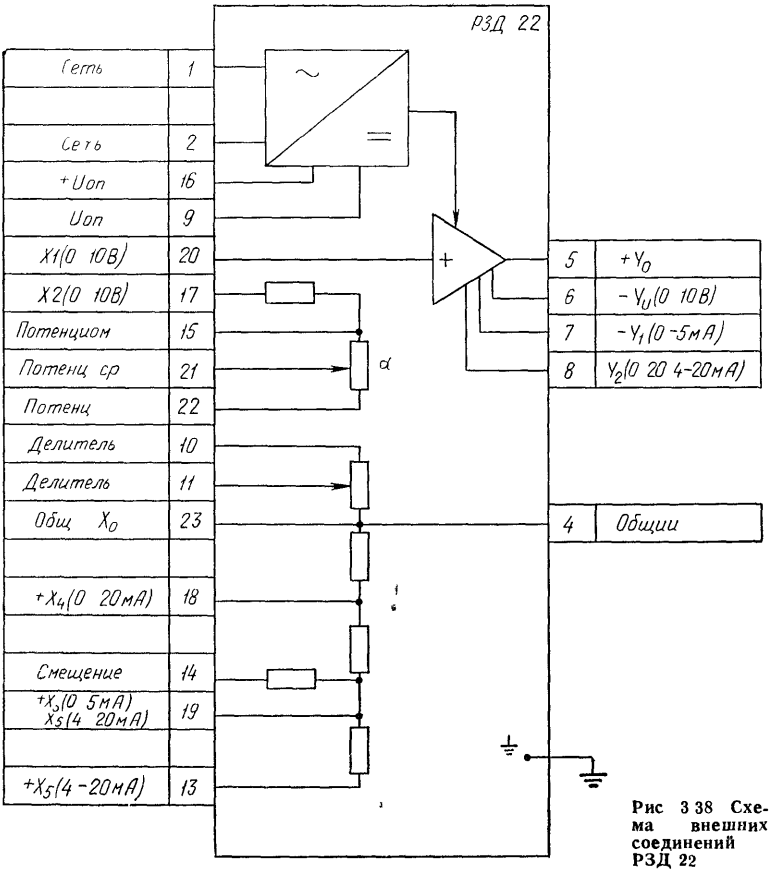


Рис 3 38 Схема внешних соединений РЗД 22

тивно или невозможно. Кроме того, значительная часть объектов управления характеризуется высоким уровнем помех, вызванных пульсацией измеряемых переменных. Подавление помех обычными пассивными или активными фильтрами в условиях переменной интенсивности шума не дает нужных результатов. В таких условиях средства управления с переменной структурой незаменимы [55, 56, 63] Системы, построенные на базе СУПС, обеспечивают высокое качество регулирования даже при изменении коэффициента передачи в 100 раз, времени запаздывания от 1 до 30 000 с и уровне помех, равном максимальной амплитуде полезного сигнала Это достигается благодаря наличию в составе СУПС адаптивных

регуляторов и фильтров, а также помехозащищенных дифференциаторов.

Погрешность выполнения СУПС математических операций и преобразования сигналов в 2 раза меньше, чем у других отечественных аналогов Это позволяет при применении СУПС повысить точность регулирования в условиях, не требующих обязательного использования адаптивных средств.

СУПС обеспечивает решение следующих функциональных задач в АСУТП: преобразование информации и гальваническое разделение цепей; установка задания и управления режимами контуров регулирования; выработка регулирующего воздействия; математическая обработка информации; представление информации.

В состав СУПС входят более 30 субблоков, компоновочные шкафы и блоки питания, позволяющие создавать проектно-компонуемые комплексы КМ2201.

Унификация сигналов позволяет эффективно использовать СУПС в сочетании с устройствами получения информации о процессе (датчиками) и устройствами воздействия на процесс (исполнительными механизмами).

Система, построенная на базе СУПС, работает в комплексе с датчиками, имеющими выходные сигналы 0—5; от —5 до +5; 0—20; 4—20 мА; от —10 до +10 В; 0—20 мГ; 4—8 кГц. При использовании датчиков температуры, мощности и концентрации веществ в СУПС предусмотрен нормирующий преобразователь, например Ф5175 (ППНА1), выходной сигнал которого изменяется в диапазоне 0—10 В или 0—5 мА.

В комплексе с СУПС могут применяться исполнительные механизмы постоянной скорости типа МЭО, управляемые с помощью тиристорного пускателя ПБР-2.

Конструктивно приборы и устройства СУПС выполнены на базе монтажных плат, встраиваемых и настенных кожухов, блочных каркасов и шкафов.

При компоновке систем автоматического управления, создаваемых на базе приборов и устройств комплекса КМ2201, от проектировщиков не требуется разработка конструкторской документации. Проектная компоновка предполагает выполнение следующих этапов работ: составление структурной схемы; выбор функциональных элементов; выбор блочных каркасов и компоновочного шкафа; составление документов для заказа и изготовления комплексов.

Структурная схема, позволяющая определить типы и количество приборов и субблоков СУПС, составляется с учетом алгоритма функционирования, особенностей объекта (стационарный, нестационарный и т. п.), технических характеристик датчиков и исполнительных механизмов. В схеме выделяются функционально законченные части, затем субблоки размещаются в блочных каркасах (по возможности в одном каркасе субблоки одной или нескольких функционально законченных частей). Исполнение каркаса подбирается таким, чтобы обеспечить установку требуемого числа одно- и двухшаговых субблоков. При этом учитываются ограничения по максимальной мощности, потребляемой субблоками каркаса (она не должна превышать мощности блока питания), и по числу проводов связи с внешними устройствами (не более 72). После расстановки всех субблоков в зависимости от полученного числа каркасов выбирают исполнение компоновочных шкафов.

В результате компоновки составляются: карта заказа, содержащая перечень входящих в комплекс КМ2201 приборов и субблоков с указанием их числа и исполнения компоновочного шкафа; структурная схема; схема расположения субблоков, в которой условно показаны позиции в каркасах компоновочного шкафа и исполнение каркасов; таблица соединений, в которой записаны соединения между контактами розеток субблоков, установленных в каркасе, и розеткой адаптерного субблока и соединения субблоков между собой (для каждого каркаса); перемычки между зажимами, соединяющие субблоки, установленные в разных каркасах (для монтажной плоскости шкафа); электрическая схема комплекса с соединениями выносных приборов с компоновочным шкафом и назначением зажимов для подключения внешних устройств (датчиков, исполнительных механизмов и т. д.).

3.6 УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Как известно, в большинстве систем кондиционирования воздуха поддержание заданных значений температуры и влажности воздуха в обслуживаемых помещениях осуществляется способом, основанным на

изменении температуры и влажности приточного воздуха при неизменном его количестве. Однако в ряде исследований [8, 49] убедительно доказана целесообразность применения такого способа поддержания в обслуживаемом помещении параметров микроклимата, который основан на изменении ассимилирующей способности тепла и влаги при переменных кратностях воздухообмена. При этом способе управления параметрами микроклимата количество подаваемого воздуха, определяемое по избыточному теплу, санитарным нормам, условиям воздухораспределения и другим критериям, допускается изменять в пределах 0,6—1 номинального значения [49].

Снижение производительности СВ и СКВ по воздуху экономически оправдано в большинстве случаев [7, 8]. Однако управление расходом приточного воздуха до последнего времени не получило должного распространения. Объясняется это тем, что способы его реализации недостаточно разработаны. Кроме того, серьезным препятствием до последнего времени было отсутствие простых и эффективных технических средств управления работой вентиляторов.

Вентиляционные установки регулируемой работы могут быть с регулируемой и нерегулируемой частотой вращения вала. Ко второй группе относятся установки с регулированием аэродинамических свойств либо вентиляционной сети, либо самих вентиляторов. Эти способы достаточно хорошо изучены [37, 38], схемы их реализации известны. Установки первой группы подразделяются на установки с постоянной частотой вращения вала приводного двигателя, в которых для изменения частоты вращения вала вентилятора используют различные механические устройства (вариаторы, гидромуфты, электромагнитные муфты), и установки с регулируемой частотой вращения вала приводного двигателя, для которых характерно многообразие конструктивных и схемных решений. Конструкция механических устройств, применяемых для изменения частоты вращения вала вентилятора, хорошо изучена, схемы их управления достаточно просты и могут быть разработаны на базе серийно выпускаемых исполнительных механизмов типа МЭО, а также электрических муфт скольжения типа ИМС-7,5 — ИМС-160.

В настоящее время наиболее перспективным следует

считать так называемое электрическое регулирование путем изменения различными способами частоты вращения вала приводного двигателя. Эти способы обладают рядом преимуществ: простотой построения принципиальных схем, неограниченной дистанционностью и возможностью синхронного управления практически неограниченным числом двигателей вентилятора [79] Кроме того, применение электрического способа регулирования позволяет существенно упростить кинематическую передачу от двигателя к валу вентилятора, исключить необходимость применения конструктивно несовершенных пускозащитных устройств вентиляционных систем, а также необходимость применения различных устройств (дроссели, направляющие аппараты и т. д.) в аэродинамической схеме системы вентиляции.

Для комплектации различных типов вентиляторов используются асинхронные электродвигатели серии АО2-0,8 — 75 кВт, серии АОЛ-0,18 — 4 кВт, серии 4А-0,18 — 75 кВт, серии ВАО-0,27 — 30 кВт и серии В-0,25 — 30 кВт [80] В связи с этим вопрос об электрических способах управления работой вентиляторных установок рассматривается применительно к этим типам электрических машин.

Отметим, что при нормальных напряжении и частоте питающей сети, а также при отсутствии добавочных сопротивлений в обмотках асинхронный двигатель характеризуется определенной механической характеристикой, называемой естественной При регулировании частоты вращения изменением различных параметров соответствующая механическая характеристика будет отличаться от естественной, становясь тем самым искусственной или регулировочной. Асинхронный двигатель обладает одной естественной и множеством регулировочных характеристик.

Рассмотрим некоторые зависимости параметров асинхронного двигателя при номинальном режиме его работы. Из теории электрических машин известно, что частота вращения магнитного поля двигателя n_1, об/с, определяется уравнением

$$n_1 = f/p,$$

где f — частота тока, Гц, p — число пар полюсов, а частота вращения ротора — $n = n_1 (1 - S)$, где S — скольжение

Механическая мощность, вырабатываемая электродвигателем для привода вентилятора, пропорциональна электромагнитному моменту и частоте вращения ротора. Поэтому для обеспечения работы вентилятора в номинальном режиме к его валу необходимо приложить вращающийся момент с заданной частотой вращения n, что и происходит при работе в номинальном режиме приводного электродвигателя.

В свою очередь, момент асинхронного двигателя пропорционален произведению магнитного потока и активной составляющей тока ротора. Если пренебречь падением напряжения в обмотках статора, которое в пределах рабочей части механической характеристики незначительно, то магнитный поток двигателя можно считать прямо пропорциональным приложенному к статору напряжению U_1, или

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 S \left[(r_1 + c_1 r_2/S)^2 + (X_1 + c_1 X_2')^2\right]},$$

где m_1 — число фаз обмотки статора; r_2' — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к числу витков обмотки статора; r_1 — активное сопротивление обмотки статора, X_1 — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; X_2' — то же, ротора, приведенное к числу витков обмотки статора, ω_1 — число последовательно включенных витков обмотки статора; c_1 — коэффициент, определяемый индуктивными сопротивлениями обмоток.

Из приведенного выражения видно, что момент двигателя при неизменном скольжении пропорционален квадрату напряжения, приложенного к статору. Согласно этому выражению, частоту вращения ротора можно изменить путем изменения или частоты вращения магнитного поля n_1, или зависимости между скольжением и моментом M. В свою очередь, изменения частоты вращения магнитного поля можно достичь путем изменения или частоты тока f, или числа пар полюсов p обмотки двигателя.

Изменение зависимости между скольжением и моментом может быть достигнуто различными способами. Эта зависимость определяется амплитудой питающего напряжения, действующим значением питающего напряжения, а гакже сопротивлением в цепи статора или ротора.

Регулирование частоты вращения изменением частоты тока может осуществляться лишь при питании двигателя

от источника с регулируемой частотой. В качестве такого источника используются синхронные генераторы с регулируемой частотой вращения, синхронные, асинхронные, ионные и полупроводниковые преобразователи частоты.

Для обеспечения высокой жесткости механической характеристики двигателя и достаточной перегрузочной способности необходимо одновременно с частотой тока регулировать напряжение с тем, чтобы магнитный поток оставался постоянным.

Достаточно широкое применение в электроприводах в настоящее время получили тиристорные преобразователи. Для управления ими используются полупроводниковые элементы. Отечественная электротехническая промышленность тиристорные преобразователи выпускает серийно [81]. Несмотря на очевидные достоинства, а к ним прежде всего относятся экономичность (частота вращения ротора близка в синхронной) и плавность регулирования в широком диапазоне, данный способ регулирования частоты вращения двигателя в приводах вентиляторов в настоящее время не нашел применения. Причинами этого является аппаратурная сложность и высокая стоимость тиристорных преобразователей.

В специальных асинхронных двигателях, получивших название многоскоростных, частота вращения регулируется изменением числа полюсов обмотки статора. Такие двигатели имеют две обычные обмотки, выполненные на разные числа полюсов, либо одну полюсно-переключаемую обмотку, допускающую переключение отдельных ее частей таким образом, что можно изменять число полюсов обмотки. Отечественная промышленность выпускает асинхронные электродвигатели серии АО2 и АОЛ в исполнении, обеспечивающем многоскоростные режимы работы.

При использовании в приводе вентилятора асинхронных двигателей с фазной обмоткой ротора типа АК2, АОК2 для регулирования частоты вращения могут применяться два других способа изменение активного сопротивления цепи обмотки ротора и введение в цепь обмотки ротора дополнительной ЭДС. В первом случае при увеличении активного сопротивления цепи обмотки ротора возрастает критическое скольжение $S_м$ при сохранении постоянным максимального момента $M_м$, а механическая характеристика изменяется, становясь более

мягкой. Следует отметить, что использование данного способа регулирования частоты вращения ограничено из-за возможности применения двигателей типа АК2 или АОК2, а также наличия существенных электрических потерь в цепи ротора, которые пропорциональны величине скольжения.

При регулировании частоты вращения введением в цепь обмотки ротора дополнительной ЭДС необходимо иметь источник с частотой, равной частоте ЭДС в роторе двигателя. В качестве такого источника может быть либо специальная электрическая машина, либо дополнительная обмотка основной машины. При введении ЭДС, находящейся в фазе или противофазе с основной ЭДС, индуктированной в роторе, можно экономично и плавно регулировать частоту вращения (скольжения) ротора асинхронного двигателя в обе стороны от синхронной частоты вращения в широком диапазоне. Регулирование частоты вращения введением в цепь обмотки ротора дополнительной ЭДС от специальной машины производится, как известно, при каскадных соединениях основного асинхронного двигателя с другими электрическими машинами. Аппаратурная сложность данного способа является ограничивающим условием для его применения в СКВ.

Одним из наиболее простых способов регулирования частоты вращения является введние активного сопротивления в цепь обмотки статора. Однако из-за уменьшения критического момента и малого диапазона регулирования реостатное регулирование частоты вращения введением активного сопротивления в статорную цепь не получило практического применения.

Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором возможно применение еще двух способов регулирования частоты вращения ротора: изменение амплитуды питающего напряжения и изменение действующего значения питающего напряжения (фазовое управление).

Регулирование частоты вращения изменением амплитуды питающего напряжения применяется в основном для двигателей малой мощности с повышенным критическим скольжением. Это объясняется тем, что с уменьшением амплитуды питающего напряжения значительно изменяется механическая характеристика асинхронного двигателя, так как максимальный момент

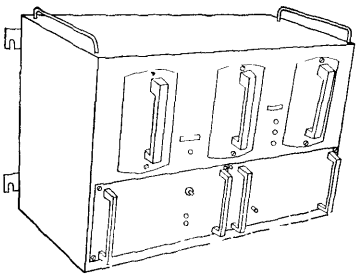


Рис. 3 39. Внешний вид станции управления типа ТСУ-РИ

пропорционален квадрату напряжения питания. В свою очередь, деформация механической характеристики приводит к увеличению скольжения. Следствием этого является снижение перегрузочной способности двигателя, увеличение потерь в роторе, узкий диапазон регулирования частоты вращения. Все перечисленное делает этот способ регулирования работы вентиляторных установок малоприемлемым.

Фазовое управление частотой вращения асинхронных двигателей заключается в управляемом воздействии на двигатель в результате изменения формы питающего напряжения (кривая питающего напряжения значительно отличается от синусоиды). При этом способе управления, как и при некоторых рассмотренных ранее, также отмечаются значительные потери скольжения, что приводит к дополнительному нагреву двигателей.

Весьма перспективной представляется реализация последнего способа управления на базе применения полупроводниковых элементов, в частности тиристоров с управляемым углом открытия по фазе [82]. Обнадеживающим фактором является то, что нагрузочная вентиляторная характеристика имеет параболическую зависимость [37, 38], а также то, что в вентиляционных установках возможно использование электродвигателей повышенной мощности.

Одним из тиристорных преобразователей является станция управления ТСУ-РИ (рис. 3.39), предназначенная для управления частотой вращения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 65 кВт. Устройство выполняет пуск и останов электродвигателя, а также изменение действующего значения выходного напряжения до 0,1 номинального значения. Регулирование выходного напряжения осуществляется в ручном или автоматическом режимах работы устройства. В автоматическом режиме управляющим сигналом является напряжение постоянного тока 0—12 В.

Устройство ТСУ-РИ может работать в комплекте с электродвигателем, снабженным устройством обратной связи, что повышает качество стабилизации регулируемой частоты вращения электродвигателя. Устройство имеет защиту от токов перегрузки, а также от токов короткого замыкания. В случае срабатывания защиты включается сигнализация, повторное включение устройства должно производиться вручную.

В состав устройства входят модуль управления, модуль защиты, силовая часть, панель с коммутирующими и защитными элементами. Конструктивно устройство представляет собой панель, на которой размещены все составные части. Модуль управления и модуль защиты выполнены в виде блоков, закрытых металлическими кожухами. Силовые тиристоры объединены попарно. Каждая пара тиристоров устанавливается встречно-параллельно на трех радиаторах. Оптронные тиристоры, установленные на панели, осуществляют гальваническую развязку силовой цепи с цепью управления. На этой же панели расположены элементы, обеспечивающие нормальную работу силовых и оптронных тиристоров и узел защиты от перенапряжений. В каждой фазе имеются предохранители, установленные в отдельные блоки. Соединения блоков предохранителей с силовыми цепями станции выполнены с помощью ножевых разъемов. Блоки предохранителей связаны механически с микропереключателями, включенными последовательно в цепь питания системы управления. При снятии блоков предохранителей контакты микропереключателей размыкают цепь управления раньше, чем контакты силовой цепи, что обеспечивает отклонение устройства только в обесточенном состоянии.

Устройство работает следующим образом. В каждой из трех фаз питания асинхронного двигателя встречно-параллельно включены два тиристора. Когда тиристоры закрыты, напряжение на зажимах электродвигателя отсутствует. При подаче сигнала управления на управляющие электроды тиристоры открываются и на зажимы двигателя подается напряжение питания. Значение действующего напряжения, приложенного к зажимам двигателя, зависит от угла включения тиристоров, который определяется сигналом модуля управления. Длительность открытого состояния тиристора, а значит, и значение действующего напряжения, определяется только

моментом включения тиристора относительно фазы питающего напряжения, так как выключение его происходит при смене знака анодного тока вне зависимости от управляющих импульсов. Угол включения тиристоров может меняться от 0 до 200°, напряжение на выходе станции ТСУ-РИ теоретически может изменяться от 0 до номинального значения. Таким образом, станция, по существу, является регулятором напряжения. Входное управляющее напряжение может задаваться оператором посредством потенциометра модуля управления (ручной режим) или определяться внешним задатчиком (автоматический режим).

Управление частотой вращения двигателя, осуществляемое станцией ТСУ-РИ, является параметрическим (регулирование напряжения на нагрузке). Недостаток такого регулирования состоит в значительной потере скольжения, выделяемого в роторе. Поэтому при управлении частотой вращения двигателя с помощью тиристорного фазового регулирования необходимо завышать габариты двигателя, что равносильно завышению его мощности. Методика выбора мощности двигателя в зависимости от диапазона регулирования, характера момента сопротивления и режима работы двигателя приводится в техническом описании устройства ТСУ-РИ, которое может управлять как одной, так и группой вентиляционных установок, а также мощностью электрокалориферов.

3.7 ПРОГРАММИРУЕМЫЕ УСТРОЙСТВА

Задачи, выполняемые системами автоматического управления кондиционированием микроклимата, можно представить в виде трех групп: 1) пуск, останов работы технологического оборудования, выведение на штатный режим работы, защита от аварийных ситуаций; 2) стабилизация заданных переменных состояния; 3) управление последовательностью режимов функционирования. Задачи первой группы наиболее просты и решаются на основе применения традиционных устройств промышленной автоматики. Стабилизация заданных переменных — задачи второй группы — в настоящее время решается путем создания САР на основе использования аналоговых электронных регулирующих приборов. В данном случае понятие «аналоговые» распространяется не на закон регулирования, а на вид или форму инфор-

мационных сигналов от датчиков к регуляторам и на форму командных сигналов от регуляторов к исполнительным устройствам. Применяемые в данном случае аналоговые приборы имеют ряд положительных свойств, а именно: простоту использования, минимальное время для настройки и калибровки, широкий диапазон работы, а также возможность сопряжения с другими устройствами. Однако эти приборы обладают и недостатками, в первую очередь к которым следует отнести сравнительно слабую помехозащищенность и большую емкость линий связи между отдельными устройствами.

Все большее число операций системой управления кондиционирования микроклимата выполняется в объеме задач третьей группы — управления переключением режимов функционирования. В настоящее время задачи управления третьей группы традиционно решаются аппаратными средствами, т. е. используемые устройства реализуются на полупроводниковых логических элементах. К последним можно отнести элементы управления серии «ЛОГИКА-И». Системы управления, выполненные на электромеханических реле, отличаются простотой и могут работать в традиционных условиях эксплуатации. Главным недостатком таких систем управления является сравнительно малый срок службы, а также функциональная ограниченность.

Системы управления, выполненные на полупроводниковых дискретных логических элементах и характеризующиеся отсутствием движущихся частей, обладают более высокими характеристиками надежности и большими функциональными возможностями. Эти системы позволяют выполнять некоторую ограниченную математическую обработку данных, что, в свою очередь, позволяет реализовать более сложные алгоритмы управления технологическим оборудованием. Полупроводниковые системы управления дороже систем на электромеханических реле и более чувствительны к электрическим помехам. Для их эксплуатации требуется обслуживающий персонал более высокой квалификации. Ряд зарубежных специалистов считают, что так как системы этого вида по функциональным возможностям не очень сильно отличаются от релейных, выгоды от их применения не будут окупать дополнительных затрат, и поэтому подобные системы не должны получить широкого распространения [83]. Упомянутые системы управления являются

аппаратно-ориентированными, поскольку выполнение заданного алгоритма осуществляется путем раз и навсегда выполненного электромонтажа автономных элементов.

Появление и широкое внедрение микропроцессорной техники вызывает существенный сдвиг в стратегии управления технологическими объектами, приводит к формированию нового подхода к построению систем регулирования и управления, при котором должны оптимально сочетаться свойства децентрализованных и централизованных структур управляющей части системы [84, 85].

Применение средств вычислительной техники, в частности микропроцессоров, в составе систем автоматического управления обосновано их преимуществами по сравнению с приборами и устройствами аналогичного назначения, в которых все функции выполняются чисто аппаратными средствами. Главными их преимуществами являются: расширение функциональных возможностей и упрощение обслуживания, значительное сокращение времени разработки необходимых приборов, возможность несложной реализации функций, отражающих особенности управления на первоначальном и последующих этапах разработки и эксплуатации автоматизированной системы. Подобные системы управления в отличие от аппаратно-ориентированных можно назвать программно-ориентированными.

В программно-ориентированных системах управления используются стандартизированные универсальные средства обработки сигналов, которые отрабатывают требуемые функции путем выполнения последовательности команд программы, хранимой в запоминающем устройстве. При этом одна и та же аппаратура может использоваться в самых различных системах. Следовательно, возникает возможность использования аппаратуры массового производства, благодаря чему обеспечивается высокая надежность и экономическая эффективность.

Еще одним преимуществом программно-ориентированных систем является их гибкость, поскольку «стратегия» управления может легко модифицироваться путем подготовки новых программ. Кроме управления отработкой последовательности операций в периодических процессах СКВ, управляющие вычислительные устройства могут выполнять сложные математические вычисления, накапливать информацию для последующего использова-

ния и выдавать на печать сообщения об аварийных ситуациях. Широкое распространение вычислительной техники непосредственно на производстве связано с появлением миниЭВМ, развитие которых идет по пути повышения быстродействия, уменьшения габаритов, снижения стоимости, создания широкой гаммы недорогих периферийных устройств, а также использования языков программирования, ориентированных на пользователя, и задачи управления технологическими процессами.

Последнее время широкое распространение начинают приобретать микроЭВМ, которые отличаются еще большой компактностью и экономичностью, но работают медленнее, чем миниЭВМ, и характеризуются ограниченным объемом памяти. Развитие промышленной вычислительной техники идет также по пути создания программируемых регуляторов, которые, по существу, представляют собой специализированные ЭВМ, ориентированные на управление отработкой последовательности операций в периодических технологических процессах. Это предполагает наличие входных — выходных средств сопряжения, рассчитанных на работу с логическими сигналами и мощными управляющими сигналами, аппаратурное оформление, ориентированное на установку в жестких условиях окружающей среды, наличие языков программирования, позволяющих использовать методику программирования, аналогичную той, которая используется при проектировании релейных схем.

Если первоначально программируемые регуляторы использовались для замены релейных систем и ориентировались на аналогичные функции, то в настоящее время они включают в свой состав миниЭВМ или микропроцессоры и реализуют такие функции обработки данных, как вычисление, представление информации на визуальных устройствах отображения и регистрации, реализация моделей с аналоговыми выходными сигналами, а также содержат программные средства для автоматического регулирования технологических переменных.

Применение для систем автоматического регулирования программируемых регуляторов с цифровой обработкой информации вместо классических аналоговых регуляторов позволяет ликвидировать наблюдавшееся в течение длительного времени отставание практики от теории регулирования и эффективно реализовать любые

законы и алгоритмы регулирования, предложенные современной теорией, а также делает возможной разработку более сложных, но более оптимальных алгоритмов управления.

Каждый микропроцессорный регулятор, функционирование которого всецело определяется заложенной в его памяти программой, может заменить 10—30 аналоговых регуляторов. Кроме того, применение программируемого регулирующего устройства позволяет реализовать такие функции, которые невозможно выполнить при использовании обычных аналоговых регуляторов. Это особенно важно для систем кондиционирования микроклимата, содержащих нелинейные элементы, элементы с изменяющимися во времени параметрами или элементы с большими постоянными времени.

Таким образом, развитие микропроцессорной техники сделало возможным появление принципиально новых устройств управления и регулирования. Очевидно, что микропроцессорные системы автоматического управления сложны и для достижения высокого качества регулирования и управления необходимы определенный технический опыт и знакомство с техникой программирования. Однако известен опыт применения микропроцессоров французской фирмы Motorola в системе управления кондиционированием воздуха. Экспериментальная проверка работы автоматизированной СКВ с микропроцессорным управлением, обслуживающей помещение объемом 3200 м^3, показала, что реальное снижение энергозатрат в системе может достигать 40% [86].

Микропроцессор, дополненный устройствами памяти, внешними устройствами и набором средств связи, представляет собой вычислительную машину, квалифицируемую как микроЭВМ. МикроЭВМ благодаря своим миниатюрным размерам и небольшой стоимости находят все большее применение в системах управления технологическими процессами Однако использование микроЭВМ в сфере управления технологическими процессами идет медленным темпом. Одной из наиболее важных проблем, препятствующих использованию микроЭВМ для решения задач управления и контроля, является проблема их работы в реальном масштабе времени.

МикроЭВМ представляет собой вычислительную машину, выполненную на одной плате, где располагаются

процессор, память, устройства прерывания, входа-выхода, синхронизации и управления. МикроЭВМ существенно отличается от миниЭВМ. Помимо разницы в цене миниЭВМ выполняют более сложные задачи вычислительного характера. Они могут работать со словами большей разрядности и памятью большего объема, чем микроЭВМ. Они нашли свое собственное применение на производстве, где собирают информацию со всех участков производства, обрабатывают ее и выдают необходимую управляющую и другую информацию. МикроЭВМ работают медленнее и выполняют менее сложные операции, но зато являются менее дорогими и могут непосредственно использоваться людьми, участвующими в производственном процессе.

В системах управления технологическими процессами микроЭВМ не заменяет миниЭВМ, а дополняет ее. МикроЭВМ может собирать и подготовлять данные для миниЭВМ, причем эти данные будут более точными, а затем получать и передавать команды из миниЭВМ. МикроЭВМ освобождают миниЭВМ от лишних обременяющих их задач и позволяют им заниматься более важными операциями. Однако это не означает, что микроЭВМ всегда должны работать только с миниЭВМ. МикроЭВМ имеют свои собственные сферы применения [86]. МикроЭВМ, включенная в цепь обратной связи контура регулирования, выполняет роль регуляторов. Поскольку состояние технологического процесса обычно характеризуется аналоговыми сигналами, а микроЭВМ оперирует только с дискретной информацией, на входе и выходе микроЭВМ стоят соответственно аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП).

Программные средства микроЭВМ, реализующей линейный закон управления в контуре регулирования, обеспечивают выполнение следующих операций: 1) считывание заданного и измеренного значений регулируемой переменной; 2) определение их разности; 3) умножение разностного сигнала на коэффициент усиления; 4) передача вычисленного значения к ЦАП

Использование микроЭВМ в качестве регулятора имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием аналогового регулятора. Прежде всего, эти преимущества заключаются в том, что микроЭВМ одинаково хорошо работает в линейных и нелинейных системах уп-

равления, не требуя, как это необходимо при использовании аналоговых регуляторов, дополнительной аппаратуры. Все вычисления производятся по машинным программам, которые составляются и изменяются по требованию пользователя. МикроЭВМ может регулировать процесс при изменяющемся во времени задании также без подключения дополнительной аппаратуры. При использовании микроЭВМ легко осуществляется изменение коэффициента усиления контура регулирования, что требуется при реализации некоторых нелинейных законов регулирования.

Контроль работы всей системы регулирования проводится микроЭВМ по программе, в состав которой входят самоконтролирующиеся диагностические стандартные подпрограммы. Передача цифровой информации в контуре управления осуществляется с меньшей вероятностью появления ошибок, чем при передаче аналоговых сигналов.

Таким образом, высокая точность, гибкость и надежность систем автоматического регулирования, использующих микропроцессоры, с учетом их невысокой стоимости делает использование микропроцессоров в системах регулирования весьма перспективным.

Одной из форм организации управления кондиционированием микроклимата в больших строительных сооружениях является создание автоматизированных систем управления [62].

Разновидностью АСУ являются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). В данном случае все разновидности процессов кондиционирования микроклимата в обслуживаемых помещениях рассматриваются как технологические процессы. В частности, к таковым относятся процессы тепловлажностной обработки воздуха, его смешения, перемещения и подачи в обслуживаемое помещение, а также процессы ассимиляции или диссимиляции тепла и влаги в обслуживаемом помещении.

АСУ ТП — это человеко-машинная система управления, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием. Критерий управления АСУ ТП представляет собой соотношение, характеризующее качество функционирования технологического объекта уп-

равления в целом и принимающее главное значение в зависимости от реализуемых управляющих воздействий. Для автоматизированных СКВ критерий управления целесообразно выбирать в форме технико-экономического показателя (см. п. 2.1). Целью функционирования АСУ МИКРОКЛИМАТ могут быть экономия тепловой и электрической энергии, обеспечение надежного и безопасного функционирования, оптимизация режимов работы технологического оборудования. Функции АСУ МИКРОКЛИМАТ могут быть представлены как управляющие и информационные. К управляющим функциям относятся: регулирование (стабилизация) отдельных технологических переменных, программно-логическое управление, оптимальное управление установившимися или переходными технологическими режимами, адаптивное управление; к информационным — сбор, обработка и представление необходимой оператору информации. К ним относятся: централизованный контроль и прямое или косвенное измерение (путем вычислений) переменных, характеризующих работу системы, а также обобщенная оценка и прогноз.

Различают два режима реализации функций АСУ: автоматизированный и автоматический. Первый из них представляет собой режим ручного управления, при котором выбор и осуществление управляющих воздействий производит оператор. Разновидностью автоматизированного режима работы АСУ является режим «советчика». В этом режиме комплекс технических средств АСУ вырабатывает рекомендации по управлению, а решение об использовании и реализации производится оператором. Другой разновидностью автоматизированного режима работы АСУ является режим «диалоговый», когда оперативный персонал имеет возможность лишь корректировать постановку и условия выполнения задачи управления.

Автоматический режим реализации управляющих функций представляет собой автоматическую выработку и реализацию управляющих воздействий. Этот режим имеет две структурные разновидности: первая — режим косвенного управления, когда средства вычислительной техники изменяют установки и параметры настройки локальных систем автоматического управления или регулирования; вторая — это реализация прямого (непосредственного) цифрового управления, когда управляющее вычислительное устройство формирует командные сигна-

лы непосредственно на исполнительные устройства. Между автоматизированным и автоматическим режимами работы АСУ можно выделить локально-автоматический режим. В этом режиме автоматически выполняются информационные функции и функции локального управления (регулирования). Решения по управлению процессом в целом и по его оптимизации принимаются и реализуются оператором.

Первая в Европе АСУ МИКРОКЛИМАТ в настоящее время работает в здании аэропорта Орли в Париже. Система управления использует 400 источников информации, измеряя параметры воздуха, температуру, давление воды и т. д. Применение АСУ требует введения также значительного объема информации, касающейся режимов и времени наработки самых различных агрегатов и устройств. Информация автоматически обрабатывается электронной вычислительной машиной, которая также производит запись состояния системы в любой данный момент времени. При необходимости система может быть переведена на ручное управление. При работе с ЭВМ она обеспечивает весьма высокую безопасность благодаря встроенной системе аварийного оповещения. Кроме того, в системе производится автоматическая регистрация данных, которые могут использоваться для изучения и дальнейшего совершенствования работы СКМ.

В настоящее время накоплен достаточный опыт по использованию в АСУ МИКРОКЛИМАТ в качестве управляющего комплекса таких систем, как Delta (США) и Visonic (Швеция) [65]. Известны также примеры создания автоматизированных систем управления микроклиматом, построенных на базе использования других управляющих систем [87].

Преимущества использования систем с ЭВМ связаны с обработкой больших объемов информации и управлением большим количеством контуров. В системах с ЭВМ возможно дистанционное изменение алгоритма управления и временной программы, которое обычно выполняется изменением уставок или другими программными средствами. Обслуживание такой системы осуществляется высококвалифицированным оператором. При разработке систем с ЭВМ большое внимание уделяется и проблемам обслуживания систем, в том числе диагностике их состояния и локализации неисправностей.

В заключении данного раздела необходимо отметить что автор умышленно не приводит сведения об отечественных устройствах управления. К таковым можно было бы отнести бесконтактные низковольтные комплектные устройства типа БНКУ или устройства универсальные управления программируемой логикой типа УЛП, являющиеся аппаратно-ориентированными устройствами управления. Из программно-ориентированных устройств можно отметить микроЭВМ серии «Электроника» или комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем на микропроцессорной базе— КТС ЛИУС-2. Дело в том, что подобные устройства автоматики в настоящее время переживают период интенсивного развития. Поэтому сведения о них следует получать из специализированных источников информации наиболее позднего времени выпуска.

ГЛАВА 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современные требования к автоматизированным системам вентиляции и кондиционирования воздуха содержат два противоречивых условия: первое — простота и надежность эксплуатации и второе — высокое качество функционирования, например качество стабилизации отдельных выходных переменных, минимум расхода энергии и т. д. Стремление к выполнению этих условий ставит разработчика перед необходимостью отыскания компромиссного технического решения.

Состояние эксплуатации СВ и СКВ во многом зависит от уровня развития, структуры и качества технической реализации средств технологической обработки и перемещения воздуха, а также средств автоматического управления. Правильный выбор структуры системы кондиционирования воздуха и установочной мощности технологического оборудования является лишь частью задачи разработки и проектирования. Наиболее сложной составляющей процесса разработки является выбор режи-

мов функционирования СКВ в годовом цикле работы. Известно, что изменение параметров наружного воздуха от «расчетной температуры — зима» до «расчетной температуры — лето» предопределяет существенную нестационарность и нелинейность отдельных характеристик технологического оборудования, вследствие чего значительно усложняется задача выбора методов и средств автоматического управления режимами работы технологического оборудования систем [88].

Основным принципом технической организации автоматического управления СВ и СКВ является функциональное выделение и соответствующее конструктивное оформление иерархической лестницы подлежащих выполнению задач управления, регулирования и защиты [28].

Следует отметить, что перечисленные функции автоматического управления, по крайней мере двух низших уровней, не являются новыми. Существенно новым для управления промышленными СВ и СКВ является их группировка и обособленно функционально независимое конструктивное оформление. Предлагаемая структура технической реализации управления СВ и СКВ позволяет решить ряд вопросов, связанных с повышением эксплуатационных и надежностных характеристик автоматизированной системы, а также с последовательным вводом в действие и комплектацией средствами автоматического управления.

Всякая промышленная СКВ должна быть снабжена элементами и устройствами автоматического пуска и останова, а также устройствами защиты от аварийных режимов. Этот уровень автоматизации СКВ подлежит обязательному выполнению и не может быть заменен (это касается защиты) ручным управлением с помощью оператора. Для защиты оборудования от аварийных режимов должны применяться наиболее надежные элементы автоматики, обладающие минимальной интенсивностью потока отказов. Поскольку при обеспечении защиты оборудования исключена возможность ее резервирования в форме ручного управления, допустимо применение поэлементного функционального резервирования средств автоматической защиты. При этом следует иметь в виду, что работа автоматизированной СКВ без аварийных ситуаций возможна только в том случае, когда оборудование и средства автоматической защиты могут выполнять заданные функции в течение требуе-

мого интервала времени при определенном техническом обслуживании и условиях эксплуатации.

Техническая реализация функций второго уровня управления СКВ (уровня стабилизации режимов работы оборудования) может решаться по-другому, так как в этом случае возможна, а в большинстве случаев и действенна форма резервирования в виде предусмотренной огранизации ручного управления. Действительно, если имеется отказ в работе локального контура автоматической стабилизации температуры воздуха на выходе из калорифера, то правомерно использование органов ручного управления автоматическими клапанами или ручных вентилей на трубопроводе теплоносителя.

При оценке надежности эксплуатации средств автоматического управления второго уровня следует иметь в виду, что ущерб, возникающий вследствие отказа функции, зависит главным образом не от числа отказов (которые на первом уровне управления носят достаточно опасный характер), а от продолжительности интервалов времени, в течение которых прекращается выполнение функций стабилизации. Поэтому для выполнения этих функций следует использовать элементы, обладающие возможно наиболее высоким коэффициентом готовности.

Техническая реализация функций третьего иерархического уровня управления СКВ в настоящее время не получила должного развития. Однако актуальность проблемы оптимизации управления работой систем, например по критериям минимума расхода тепловой и электрической энергии, безусловна. Известно, что изменение гидравлической мощности вентиляторов и насосов имеет характер кубической зависимости от изменения расхода перемещаемых воздуха или теплоносителя. Известно также, что применяются электрические (в отличие от механических) средства изменения режимов работы вентиляторов и насосов, например тиристорные устройства управления частотой вращения трехфазных асинхронных двигателей типа ТПЧ или ТСУ [81, 82].

Решение задач третьего уровня управления связано с обработкой информации и формированием управляющих воздействий путем решения дискретных логических функций или проведения ряда определенных вычислений. Реализация подобных задач связана с необходимостью использования элементов вычислительной тех-

ники, логических устройств. Эти элементы и устройства отличаются от традиционных средств реализации первых двух уровней, к которым относятся локальные регуляторы одной переменной, регуляторы прямого действия и т. д. Конструктивные элементные различия, главным образом уровень сложности выполняемых функций, делают целесообразным выделение третьего уровня управления СКВ.

Предлагаемая структура технической реализации автоматического управления системами промышленной вентиляции позволяет более рационально решить задачи дистанционного управления. Очевидно, что вынесению на центральный пульт управления системами подлежат сигналы первого уровня управления и сигналы и команды, необходимые для выполнения функций третьего уровня. При этом функциональные задачи третьего уровня управления могут решаться только на центральном пульте. Вынесение промежуточной информации о работе систем второго уровня управления на центральный пульт нецелесообразно хотя бы из-за необходимости увеличения емкости линий связи и перегрузки информацией оператора, работающего на центральном пульте.

Конструктивно автономное оформление трех уровней управления СКВ позволяет решить проблему организации профилактики и ремонта средств автоматического управления, выбора необходимого регламента обслуживания того или иного уровня, обеспечения необходимого объема запасных частей элементов и устройств автоматики.

Трехуровневая структура технической реализации управления и регулирования работой промышленных СКВ позволяет организовать эксплуатацию систем в зависимости от специфики предприятия и его служб эксплуатации. Следует иметь в виду, что многоуровневая иерархическая структура управления СКВ предусматривает выполнение функциональных задач низшим уровнем независимо от более высших. Это качество дает возможность организации управления СКВ с различной степенью его развития. В зависимости от условий эксплуатации или возможностей капитальных вложений система автоматического управления может быть реализована только с устройствами пуска, останова и приборами и устройствами предаварийной защиты, т. е. только с устройствами низшего уровня управления.

Остальные функции управления при этом в той или иной мере осуществляются обслуживающим персоналом вручную. Первый уровень управления может быть дополнен вторым уровнем, т. е. приборами и устройствами автоматической стабилизации, при этом функции выбора и переключения технологических режимов, автоматически осуществляемые приборами и устройствами третьего уровня, при их отсутствии осуществляются вручную.

4.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИТОЧНЫХ КАМЕР

Наиболее распространенным способом регулирования теплопроизводительности приточных камер является изменение расхода теплоносителя. Кроме того, применяется способ автоматического регулирования температуры воздуха на выходе из приточной камеры путем изменения расхода воздуха. При раздельном применении этих способов не обеспечивается максимально допустимое использование энергии теплоносителя. С целью повышения экономичности и быстродействия процесса регулирования можно применять совокупный способ изменения теплопроизводительности калориферной установки*. При этом способе система автоматического управления приточной камерой предусматривает: выбор способа управления приточной камерой (местное, кнопками по месту, автоматическое со щита автоматизации, а также зимнего или летнего режима работы); регулирование температуры приточного воздуха путем воздействия на исполнительный механизм клапана на теплоносителе; автоматическое изменение соотношения расходов воздуха через калориферы и обводной канал; защиту калориферов от замерзания в режиме работы приточной камеры и в режиме резервной стоянки; автоматическое отключение вентилятора при срабатывании защиты от замерзания в режиме работы; автоматическое подключение контура регулирования и открытие приемного клапана наружного воздуха при включении вентилятора; сигнализацию опасности замерзания калориферов; сигнализацию нормальной работы приточной камеры в автоматическом режиме и подготовки к пуску.

---

* А. с. 732630 (СССР). Способ автоматического регулирования температуры воздуха на выходе калорифера С. В. Нефелов, А. А. Духин, Е. А. Руденко и др. — Заявл. 12.10.78, № 2676927/026, опубл. в БИ, 1980, № 17.

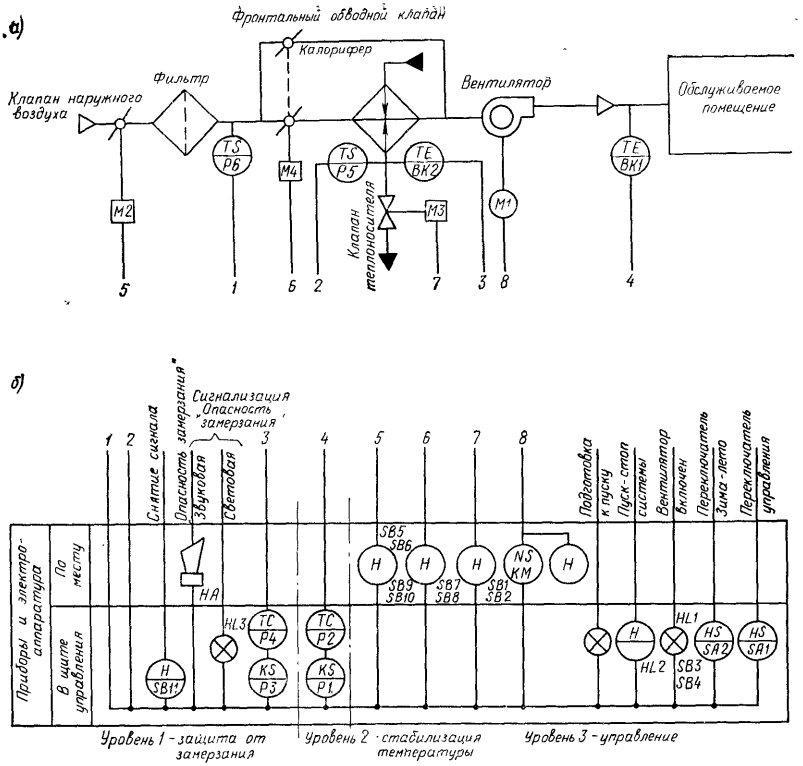


Рис. 4.1. Функциональная схема управления приточной камерой

Схема автоматического управления приточной камерой показана на рис. 4.1. Выбор способа управления производится поворотом переключателя *SA1* в положение «ручное» или «автоматическое», а выбор режима работы — переключателя *SA2* в положение «зимний» или «летний».

Ручное местное управление электродвигателем приточного вентилятора *M1* производится кнопками *SB1* «Стоп» и *SB2* «Пуск» через магнитный пускатель КМ; исполнительным механизмом *M2* приемного клапана наружного воздуха кнопками *SB5* «Открытие» и *SB6* «Закрытие» через промежуточные реле и собственные конечные выключатели; исполнительным механизмом *M3* клапана на теплоносителе кнопками *SB7* «Открытие» и *SB8* «Закрытие» через промежуточное реле и собственные конечные выключатели и исполнительным

механизмом *M4* фронтально-обводного клапана кнопками *SB9*, *SB10*.

Включение-выключение электродвигателя *M1* вентилятора сигнализируется лампой *HL1* зеленого цвета «Вентилятор включен», установленной на щите автоматизации.

Включение и выключение приточной камеры в автоматическом режиме работы производится кнопками *SB3* «Стоп» и *SB4* «Пуск», расположенными на щите автоматизации, через промежуточные реле. При этом перед включением вентилятора промежуточные реле обеспечивают принудительное открытие клапана на теплоносителе, а после включения вентилятора промежуточное реле подключает контур регулирования температуры приточного воздуха и защиту от замерзания, а также открывает приемный клапан наружного воздуха.

Поддержание температуры приточного воздуха производится регулятором температуры *P2* с термисторным датчиком *BK1*, установленным в приточном воздуховоде; управляющий сигнал через релейно-импульсный прерыватель *P1* подается на исполнительный механизм *M3* клапана на теплоносителе.

Изменение соотношений расходов воздуха через калориферы и обводной канал производится по сигналам регулятора температуры *P4* с датчиком *BK2*, установленным на трубопроводе теплоносителя. Управляющие сигналы через релейно-импульсный прерыватель *P3* подаются на исполнительный механизм *M4* фронтально-обводного клапана.

Защита калориферной установки от замерзания обеспечивается датчиком-реле температуры теплоносителя *P5*, чувствительный элемент которого установлен на трубопроводе теплоносителя сразу за первой по ходу воздуха секцией подогрева калориферной установки, и датчиком-реле температуры воздуха *P6*, чувствительный элемент которого установлен в воздуховоде между приемным клапаном наружного воздуха и калориферной установкой. В случае опасности замерзания через промежуточное реле производится отключение электродвигателя *M1* приточного вентилятора, открытие клапана на трубопроводе теплоносителя и включение сигнализации, а также закрытие приемного клапана наружного воздуха. Возникновение опасности замерзания сигнализируется

лампой *HL3* красного цвета «Опасность замерзания» и звуковым сигналом *HA*.

Подготовка к пуску вентилятора после нажатия кнопки *SB4* сигнализируется лампой *HL2* белого цвета (только для зимнего режима).

В системах промышленной вентиляции широко распространена практика использования группы приточных камер, работающих в режиме поддержания одинаковой температуры приточного воздуха. Известны два основных способа регулирования теплопроизводительности группы приточных камер: 1) изменение расхода теплоносителя и 2) изменение температуры теплоносителя при неизменных расходах теплообменивающих сред.

Первый способ регулирования позволяет простыми средствами поддерживать заданную теплопроизводительность ПК при минимальном количестве теплоносителя и обеспечивать гидродинамическую стабилизацию системы. Однако при его использовании необходимо принимать особые меры по защите теплообменников от замерзания, что особенно опасно при наличии запаса по величине площади поверхности нагрева. В зарубежной практике широко применяется второй способ регулирования теплопроизводительности. Несмотря на то что в отечественной практике этот способ не нашел достаточного распространения по ряду причин, он завоевывает все бóльшую популярность, так как позволяет минимальными средствами автоматически решать проблемы защиты от замерзания. Кроме того, при его использовании исключаются перерасходы тепла на воздушное отопление и вентиляцию помещений, т. е. уменьшаются суммарные за отопительный период расходы поступающего от ТЭЦ теплоносителя [89].

Системой автоматического управления группой приточных камер предусматривается регулирование теплопроизводительности калориферных установок изменением температуры подаваемого теплоносителя при постоянном расходе воздуха и теплоносителя через них путем подмешивания части теплоносителя из обратной линии в подающую.

На рис. 4.2 представлена упрощенная функциональная схема управления группой приточных камер. Группа калориферных установок приточных камер $ПК_1$—$ПК_n$, соединенных по теплоносителю параллельно, связана трубопроводами с узлом подготовки теплоносителя,

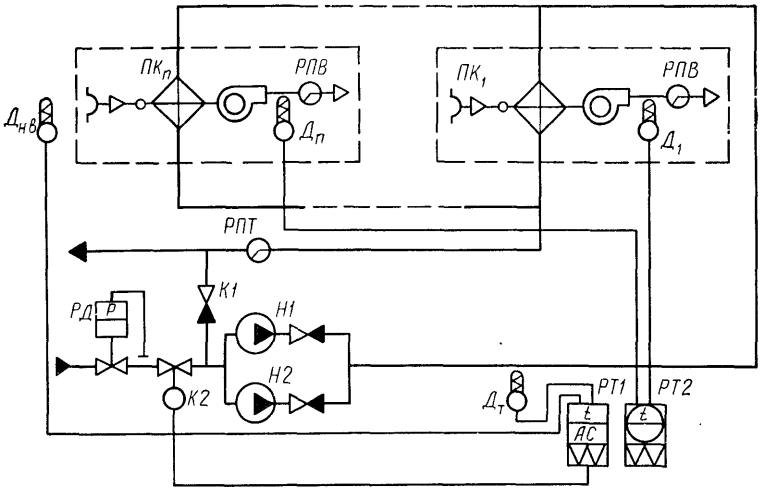


Рис. 4.2. Функциональная схема управления группой приточных камер

состоящим из насосов *Н1* и *Н2* (один резервный), обратного клапана *К1*, регулирующего клапана *К2* и регулятора давления *РД*. На обратном трубопроводе перед узлом подготовки установлено реле протока теплоносителя *РПТ*.

Исполнительный механизм клапана *К2* электрически связан с регулятором *РТ1*, на входы которого подсоединены датчик $Д_т$ температуры теплоносителя в подающей линии на выходе из узла подготовки и датчик $Д_{н.в}$ температуры наружного воздуха. На схеме представлены также элементы сигнальной аппаратуры: сигнализатор температуры приточного воздуха *РТ2* с датчиками $Д_1$—$Д_n$ и реле протока воздуха *РПВ*, установленные в каждой приточной камере. Сигнализатор *РТ2* конструктивно выполнен в виде регулирующего многоточечного моста типа КСМ, выходные контакты которого, так же, как и контакты *РПВ*, замыкают цепи световой и звуковой сигнализации.

Разработанная система обеспечивает управление группой приточных камер в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме управления система позволяет: запустить и остановить двигатель вентилятора любой приточной камеры $ПК_1$ — $ПК_n$; запустить в соответствующем направлении и остановить исполнительные

механизмы как регулирующего клапана *К2*, так и любого воздушного клапана.

В режиме автоматического управления система позволяет осуществить: программный запуск и выключение приточных камер $ПК_1 — ПК_n$ автоматическое поддержание заданной температуры воздуха на выходе из приточных камер; контроль температуры теплоносителя на выходе из калорифера, температуры и скорости воздуха на выходе из приточных камер с сигнализацией аварийного режима.

Включение системы и выбор режима «Ручной Автомат» производятся с дистанционного щита.

В режиме ручного управления при переводе переключателя выбора насоса в положение 0 управление двигателя насосов производится установленными по месту кнопками «Пуск» и «Останов». Так же по месту установлены кнопки ручного управления электродвигателями вентиляторов и исполнительных механизмов клапана *К2* и воздушных приемных клапанов.

В режиме автоматического управления при переводе переключателей режима работы в положение «Автомат» и выборе насоса кнопкой, расположенной на дистанционном щите, производится программный запуск группы приточных камер. Одновременно зажигается сигнальная лампа, свидетельствующая о включении автоматического управления. Вначале включается выбранный циркуляционный насос и открывается регулирующий клапан *К2*. После 5-минутного прогрева калориферов автоматически включаются электродвигатели вентиляторов и открываются воздушные приемные клапаны. После полного открытия воздушных клапанов срабатывают концевые микропереключатели, подключая к работе цепи сигнализации и контроля приточных камер. При отсутствии или понижении расхода теплоносителя срабатывает реле *РПТ* и обесточивает промежуточное реле, которое, в свою очередь, размыкает контакты для питания магнитных пускателей электродвигателей вентиляторов.

Выключение системы автоматического управления производится также с дистанционного щита. При этом обесточиваются магнитные пускатели насоса и электродвигателей вентиляторов, закрываются воздушные приемные клапаны и клапан *К2* на трубопроводе теплоносителя.

4.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

В настоящее время отдельные СКВ комплектуются специальными увлажняющими устройствами. Такими устройствами являются увлажнители с форсуночным или роторным разбрызгиванием воды, а также электропаровые увлажнители. Однако эти увлажнители непригодны для СКВ, обслуживающих, например, помещения и аппаратуру ЭВМ. Для подобных систем разработан специальный терморадиационный увлажнитель воздуха [90].

Функциональная схема управления аппаратом для местного доувлажнения воздуха приведена на рис. 4.3. Аппарат работает следующим образом. Подаваемая в аппарат вода при включенных электронагревателях *Н1—Н3* превращается в пар, который эжектируется из аппарата в воздуховод. Для интенсификации процесса испарения аппарат может быть снабжен турбулизатором *Т* с приводным электродвигателем *М*. Количество подаваемой в аппарат воды регулируется с помощью поплавкового регулятора уровня воды *Н* в нижней ванне аппарата и контролируется электрическим контактным датчиком-реле уровня *ДУ*, состоящим из кинематических передач от поплавка и микропереключателя. Регулирование паропроизводительности аппарата предусмотрено путем изменения мощности электрического

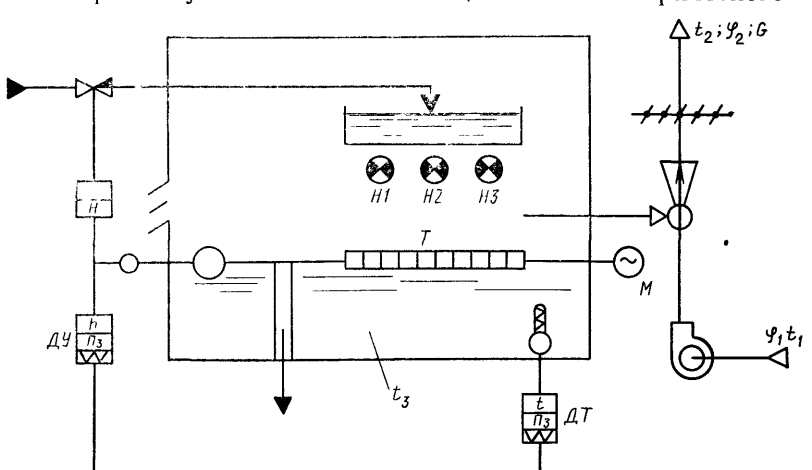


Рис. 4.3. Функциональная схема управления устройствами увлажнения

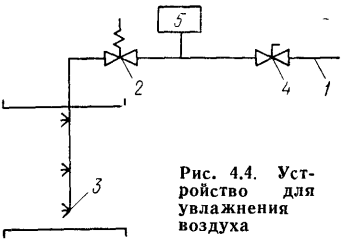


Рис. 4.4. Устройство для увлажнения воздуха

нагрева. С целью ограничения температуры нагрева жидкости в нижнюю водяную ванну погружен термобаллон (чувствительный элемент) электрического контактного датчика-реле температуры *ДТ*. Аппарат может быть снабжен любым позиционным регулятором относительной влажности, например типа А-281. Все коммутирующие и защитные устройства автоматики вмонтированы в конструкцию аппарата.

Выше был описан способ поддержания относительной влажности воздуха на выходе из форсуночной камеры орошения, основанный на широтно-импульсной характеристике двухпозиционного изменения подачи воды в дождевое пространство. Недостатком этого способа является некоторый перерасход электроэнергии на перекачку воды. Для уменьшения затрат электроэнергии на перекачку воды рекомендуется использование дополнительной емкости и запорного обратного клапана*. На рис. 4.4 изображено предлагаемое устройство для увлажнения воздуха. Устройство содержит последовательно установленные на водонапорном трубопроводе *1* регулирующий двухпозиционный клапан *2*, соединенный с управляющим устройством и датчиком относительной влажности. На трубопроводе перед регулирующим клапаном и форсунками (распылителями) *3* установлен запорный обратный клапан *4*. Между клапанами *2* и *4* к трубопроводу подсоединена емкость *5*.

При открытом двухпозиционном клапане *2* вода движется по водонапорному трубопроводу к распылителям *3* под действием номинального давления. После быстрого закрытия двухпозиционного клапана *2* по команде датчика относительной влажности вода продолжает какое-то время двигаться по инерции, и ее давление перед двухпозиционным клапаном повышается. Повышенное давление заставляет сжиматься упругую среду, например воздух, которая находится в емкости *5*. Это приводит к превращению кинетической энергии гидравли-

* А. с. 616491 (СССР). Устройство для увлажнения воздуха / С. В. Нефелов, И. Г. Сенатов, В. И. Синицын, Ю. В. Фролов. — Заявл. 24.02.77, № 2455812, опубл. в БИ, 1978, № 27.

ческого удара в потенциальную энергию сжатия упругой среды, а также к накоплению какого-то количества воды в емкости *5*. Обратный клапан *4* при повышении перед ним давления закрывается, в результате чего обеспечивается сохранение повышенного давления на участке трубопровода между двухпозиционным *2* и обратным *4* клапанами на весь период закрытия двухпозиционного клапана. После открытия клапана *2* вода, находящаяся в трубопроводе на участке между клапанами *2* и *4* и в емкости *5*, поступает в распылители под повышенным давлением, что обусловливает большую интенсивность ее распыления. По мере истечения воды из распылителей ее давление после обратного клапана уменьшается и он открывается. После открытия обратного клапана вода продолжает поступать в распылители под действием номинального давления.

При использовании предлагаемого устройства уменьшаются затраты электроэнергии на подачу воды в форсунки. При обычных для практики регулирования режима работы переключениях двухпозиционного клапана экономия энергии на перекачку воды может достигать по предварительным расчетам 10—12%. При этом положительный эффект тем выше, чем чаще происходит переключение в системе подачи воды.

4.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ УТИЛИЗАЦИИ ВЫБРОСНОГО ТЕПЛА

Одним из путей снижения энергозатрат в системах вентиляции и кондиционирования воздуха является утилизация тепла или холода, содержащегося в воздухе, удаляемом из обслуживаемых помещений [51, 91, 92]. В настоящее время для утилизации тепла или холода выбросного воздуха рекомендуются воздухо-воздушные пластинчатые теплообменники [91].

Пластинчатые теплообменники представляют собой кассету с набором пластин (гладких или гофрированных), образующих каналы, в которых в одном направлении проходит удаляемый теплый вытяжной воздух, а в другом (через соседний ряд каналов) — приточный холодный воздух. Для предотвращения перетекания воздуха из одного канала в другой предусмотрены герметизирующие прокладки, закрывающие вход в каналы теплого или холодного потока. Теплообмен между потоками происходит через поверхность пластин.

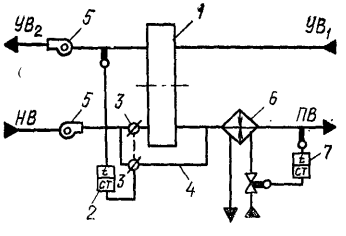


Рис. 4.5. Функциональная схема автоматического управления пластинчатым теплообменником

При рассмотрении схем автоматизации теплообменника-утилизатора как автономного объекта регулирования функции управления им сводятся к стабилизации температуры приточного воздуха путем регулирования теплопроизводительности воздухонагревателя и защите пластин теплообменника от инееобразования путем обвода холодного воздуха. В зависимости от характера тепловлажностных нагрузок помещения, а также типа воздухонагревателя (водяной, паровой, электрический) могут быть разработаны различные схемы управления.

На рис. 4.5 представлен вариант функциональной схемы управления агрегатом-утилизатором с водяным воздухонагревателем для помещений со стабильными параметрами удаляемого воздуха. Удаляемый из помещения воздух ($УВ_1$), проходя через теплообменник-утилизатор *1*, охлаждается, отдавая тепловую энергию приточному воздуху.

С понижением температуры теплообменной поверхности в канале удаляемого воздуха ($УВ_2$) до температуры точки росы возникает опасность обмерзания пластин теплообменника, вследствие чего снижается эффективность теплообмена и повышается аэродинамическое сопротивление воздушного канала. При этом срабатывает регулятор защиты *2*, настроенный на критическое значение температуры при определенной влажности удаляемого воздуха. Защитный регулятор *2* открывает фронтально-обводной клапан *3*, пропуская часть холодного воздуха в обход теплообменника по каналу *4*, что приводит к повышению температуры теплообменной поверхности и прекращению инееобразования. Воздушные заслонки *3* возвращаются в прежнее положение и весь поток холодного наружного воздуха (*НВ*) опять направляется через утилизатор. В теплое время года защитный регулятор *4* может быть отключен.

Если теплообменник-утилизатор является одним из аппаратов кондиционера, то в схеме управления можно ограничиться только схемой защиты от обмерзания. Но в случае, когда утилизатор представляет собой авто-

номный объект, так называемый агрегат-утилизатор с приточно-вытяжными вентиляторами *5* и воздухонагревателем *6*, в схеме управления необходимо предусмотреть схему стабилизации температуры приточного воздуха (*ПВ*). Регулирование температуры приточного воздуха осуществляется изменением расхода теплоносителя с помощью регулятора *7*.

По мнению ряда специалистов, весьма перспективны аппараты, совмещающие различные функции обработки и перемещения воздуха в одной конструкции [92]. Это относится к тепловому утилизатору-вентилятору (ТУВ) на базе тепловых труб.

Система микроклимата на базе ТУВ предназначена для поддержания параметров воздушной среды обслуживаемого помещения в заданных пределах в холодный и переходный период года и в допустимых пределах летом. В системе с помощью теплового утилизатора-вентилятора приточный воздух нагревается за счет тепла удаляемого воздуха. Использование тепла удаляемого воздуха позволяет значительно сократить расход тепловой энергии по сравнению с ее расходом в традиционной системе вентиляции.

Под руководством проф. О. Я. Кокорина при участии автора, И. О. Кокорина, А. А. Духина и Н. И. Сергеева на базе ТУВ-II была разработана опытно-промышленная система микроклимата, которая действует в настоящее время (рис. 4.6).

Эта система микроклимата включает следующее технологическое оборудование:

тепловой утилизатор-вентилятор ТУВ-II, предназначенный для перемещения потоков приточного и удаляемого воздуха и для нагрева холодного наружного воздуха за счет тепла удаляемого. ТУВ-II имеет расчетную производительность по воздушным потокам: приточный $L_{\text{х}}=2440$ м^3/ч и удаляемый $L_{\text{у}}=2050$ м^3/ч, а также характеризуется расчетным коэффициентом использования начального перепада температур $E_t=(t_{\text{н}_2}-t_{\text{н}_1})/t_{\text{у}_1}-t_{\text{н}_1})=0{,}4$;

осевой вентилятор ОВ-7, предназначенный для подачи наружного воздуха летом и для увеличения количества удаляемого воздуха при низких температурах наружного воздуха;

электронагреватель ЕК3—ЕК10, состоящий из четы-

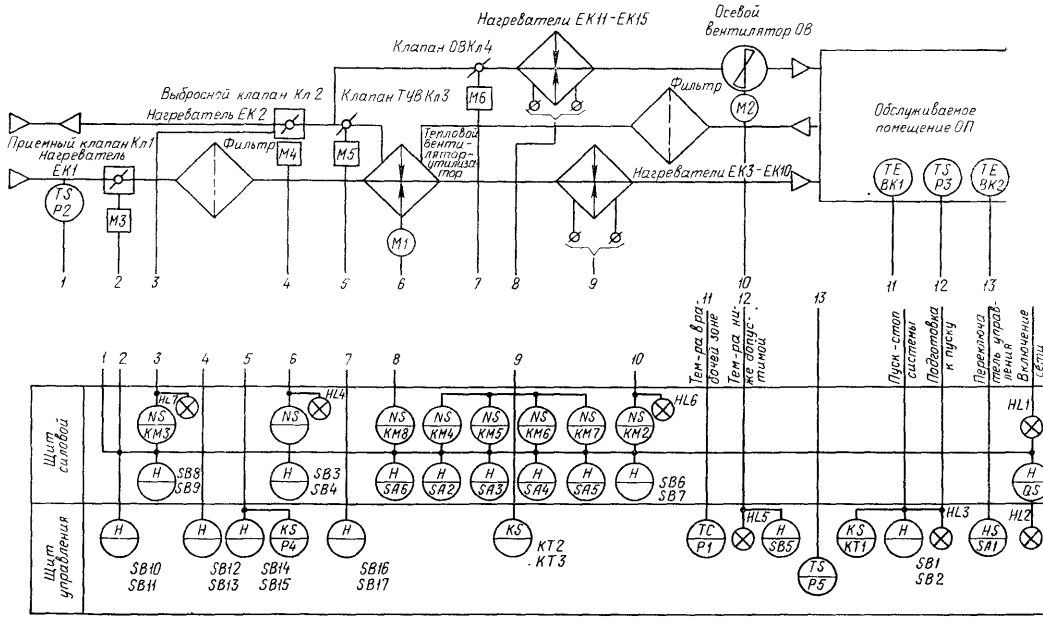


Рис. 4.6. Функциональная схема управления системой микроклимата на базе ТУВ

рех секций мощностью 2 кВт каждая и служащий для догрева приточного воздуха;

электронагреватель ЕК11—ЕК15 мощностью 5 кВт, служащий для нагрева возвратного воздуха;

воздушные клапаны *Кл1—Кл4*;

фильтры наружного и удаляемого воздуха.

В зависимости от значений тепловлажностного баланса помещения при различных температурах наружного воздуха и с учетом заданных пределов температуры и влажности воздуха в помещении работу систем микроклимата в течение года можно разделить на четыре режима. Каждому из режимов соответствует в пространстве $I-d$-диаграммы определенная область параметров наружного климата (рис. 4.7).

Режим работы при низких температурах наружного воздуха соответствует области *1*. Минимальное количество наружного воздуха состояния $Н_{11}$ нагревается в ТУВ до состояния $Н_{21}$, затем догревается в электронагревателе до требуемой температуры притока $П_{11}$ и подается в помещение. Увеличенное количество удаляемого воздуха состояния $У_{11}$ охлаждается и осушается в ТУВ до состояния $У_{21}$, затем нагревается в электронагревателе до состояния $П'_{11}$ и подается в верхнюю зону помещения.

Режим полной утилизации соответствует области *2*. Расчетное количество наружного воздуха состояния $Н_{12}$ нагревается в ТУВ до состояния $Н_{22}$ и при необходимости догревается в электронагревателе до требуемой температуры притока $П_{12}$ и подается в помещение. Линия, соответствующая температуре наружного воздуха $t=-12°С$, служит границей, выше которой необходимость догрева в электронагревателе отпадает. Расчетное количество удаляемого воздуха состояния $У_{12}$ охлаждается и осушается в ТУВ до состояния $У_{22}$ и выбрасывается наружу.

Режим регулируемой утилизации соответствует области *3*. Расчетное количество наружного воздуха. $Н_{13}$ нагревается в ТУВ до состояния $Н_{23}$ и подается в помещение. Расчетная теплопроизводительность ТУВ уменьшена в соответствии с необходимой температурой притока за счет сокращения количества удаляемого воздуха, который охлаждается и осушается в ТУВ от состояния $У_{13}$ до состояния $У_{23}$ и выбрасывается наружу.

Режим вентиляции соответствует области *4*. Наружный воздух состояния $Н_{14}$ в необходимом количестве по-

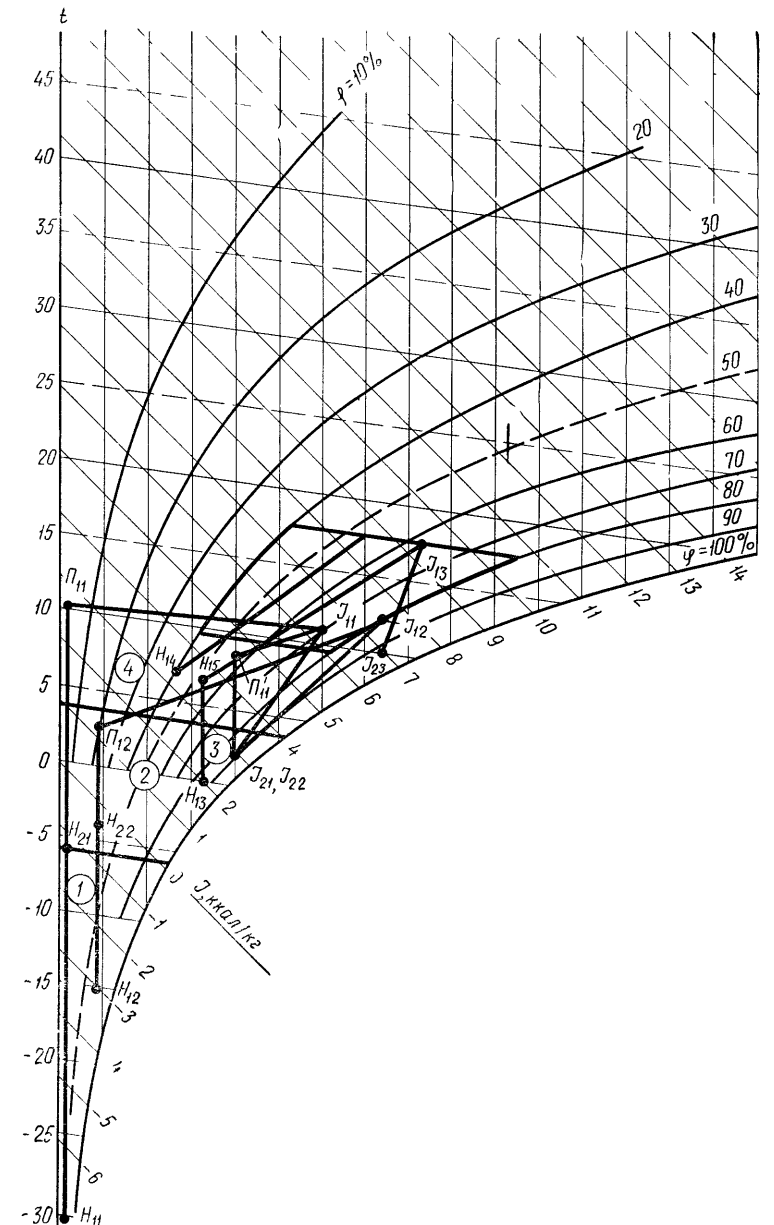


Рис. 4.7. Области параметров наружного климата различных режимов работы системы

дается без обработки в помещение. Вытяжка осуществляется через существующие вытяжные шахты.

Система автоматического управления микроклиматом предназначена для того, чтобы на основании информации о значениях температуры наружного воздуха и воздуха в рабочей зоне, а также о положении регулирующих органов вырабатывать управляющие воздействия в соответствии с алгоритмом функционирования системы микроклимата. Основными элементами САУ микроклиматом являются:

датчики температуры воздуха в рабочей зоне помещения и датчики температуры наружного воздуха в комплекте с позиционными регуляторами;

датчики положения регулирующих органов, в качестве которых используются концевые выключатели соответствующих исполнительных механизмов;

электрические исполнительные механизмы;

регулирующие органы — воздушные клапаны;

управляющее устройство, реализованное на релейных элементах.

САУ обеспечивает управление микроклиматом обслуживаемого помещения как в ручном, так и в автоматическом режиме. В ручном режиме, предназначенном для наладки и опробования системы, САУ позволяет осуществить: включение питания для перемещения в соответствующем направлении и включение для остановки исполнительных механизмов воздушных клапанов; включение нужного количества секций электронагревателей ЕК3—ЕК10 при работающем электронагревателе ТУВ-II; включение электронагревателей ЕК11—ЕК15 при работающем электродвигателе осевого вентилятора; включение электронагревателей ЕК1, ЕК2 обогрева воздушных клапанов *Кл1, Кл2.*

В автоматическом режиме САУ позволяет осуществить:

программный запуск и включение системы микроклимата;

аварийную остановку системы при понижении температуры воздуха в помещении ниже допустимой и блокировку пуска системы до тех пор, пока температура не станет выше минимально допустимой;

автоматическое поддержание температуры воздуха в рабочей зоне в заданных пределах в зимний и переходный период года и в допустимых пределах в течение теплого периода;

автоматический выбор режима работы и переход на другой режим в зависимости от значений температуры наружного воздуха и воздуха в рабочей зоне помещения.

Трехпозиционный регулятор *Р1* (см. рис. 4.6) предназначен для поддержания температуры воздуха в рабочей зоне на нижнем уровне. Датчик *ВК1* регулятора *Р1* установлен в представительной точке помещения и настроен на температуру 10°С.

Трехпозиционный регулятор *Р5* предназначен для поддержания температуры воздуха в рабочей зоне на верхнем уровне. Датчик *ВК2* регулятора *Р5* установлен в представительной точке помещения и настроен на температуру 18°С.

Датчик-реле температуры наружного воздуха *Р2* установлен в приточном воздуховоде до приемного клапана *Кл1* и настроен на температуру — 20°С. Датчик-реле *Р3* установлен в представительной точке помещения и настроен на температуру 5°С.

При запуске системы микроклимата в автоматическом режиме в течение 4 мин осуществляется прогрев утепленных клапанов *Кл1* и *Кл2*, затем запускается ТУВ и полностью открываются клапаны *Кл1* и *Кл2*. Расчетное количество наружного воздуха нагревается в ТУВ и подается в рабочую зону помещения. Если температура воздуха в рабочей зоне становится ниже 10°С, по команде регулятора *Р1* последовательно включаются секции электронагревателя ЕК3 — ЕК10 для догрева приточного воздуха. Выключение секций электронагревателя осуществляется по команде регулятора *Р1*, когда температура превышает 10°С.

Ступенчатое включение и выключение электронагревателя достигается при использовании двух трехпрограммных реле времени типа ВС-10. Такая схема существенно улучшает качество стабилизации температуры воздуха в рабочей зоне. Удаляемый воздух охлаждается и осушается в ТУВ и полностью выбрасывается.

Система микроклимата работает в режиме полной утилизации, что соответствует 2-й области параметров наружного воздуха.

Как только температура наружного воздуха станет ниже 20°С, система микроклимата по команде регулятора *Р2* переходит на режим работы при низких температурах наружного воздуха, соответствующих 1-й области.

При этом клапан *Кл1* прикрывается для пропуска минимального количества наружного воздуха, выбросной клапан *Кл2* закрывается, а клапан *Кл4* открывается, включается осевой вентилятор ОВ-7 и электронагреватель ЕК11 — ЕК15.

Минимальное количество наружного воздуха обрабатывается в ТУВ и при необходимости догревается в электронагревателе ЕК3 — ЕК10. Увеличенное количество удаляемого воздуха после охлаждения и осушки в ТУВ догревается в электронагревателе ЕК11 — ЕК15 и подается в верхнюю зону помещения. Как только температура наружного воздуха становится выше — 20°С, сигнал от регулятора *Р2* пропадает и система возвращается на режим полной утилизации. При этом открываются клапан *Кл1* и клапан *Кл2*, а клапан *Кл4* закрывается и выключаются осевой вентилятор ОВ-7 и электронагреватель ЕК11 — ЕК15.

Снижение теплопоступлений в помещение при отрицательных температурах наружного воздуха может вызвать значительное падение температуры воздуха в помещении. Как только температура в рабочей зоне становится ниже 5°С, по команде регулятора *Р3* осуществляется аварийная остановка системы и блокировка повторного запуска до тех пор, пока температура не поднимется выше 5°С.

При дальнейшем повышении температуры наружного воздуха надобность в работе электронагревателя ЕК3 — ЕК10 отпадает. Переход на режим регулируемой утилизации осуществляется по команде регулятора *Р5*, когда температура в помещении превысит 18°С, при этом подается команда на закрытие клапана *Кл3*. Количество удаляемого воздуха, проходящего через ТУВ, уменьшается, вследствие чего снижается степень нагрева приточного воздуха. Команда исполнительному механизму *М5* клапана *Кл3* подается через релейно-импульсный прерыватель *Р4*, что позволяет улучшить качество стабилизации температуры воздуха в рабочей зоне помещения, так как время полного хода исполнительного механизма увеличивается до 30 мин. При промежуточном положении клапана *Кл3* система работает в режиме регулируемой утилизации, что соответствует 3-й области параметров наружного воздуха.

С увеличением температуры наружного воздуха клапан *Кл3* полностью закроется. По команде концевого

выключателя исполнительного механизма *М5* система переходит в режим вентиляции, что соответствует параметрам наружного воздуха в 4-й области. При этом клапан *Кл1* закрывается, ТУВ выключается, осевой вентилятор включается и открывается клапан *Кл4*.

Необработанный наружный воздух подается в верхнюю зону помещения.

При понижении температуры воздуха в рабочей зоне до 18°С по команде регулятора *Р5* система переходит на режим регулируемой утилизации. При этом клапан *Кл1* открывается, ТУВ включается, осевой вентилятор выключается и закрывается клапан *Кл4*.

4.5. АВТОМАТИЗАЦИЯ АВТОНОМНЫХ КОНДИЦИОНЕРОВ

Отечественная промышленность выпускает автономные кондиционеры типа КТА, КТ, КСИ, УВК и КВ, снабженные встроенной системой автоматики [94, 95].

Кондиционер автономный КТА2-5 предназначен для круглогодичного технологического комфортного кондиционирования воздуха и осуществляет охлаждение, нагрев, частичное осушение, увлажнение и очистку воздуха от пыли в служебных, административных и промышленных помещениях. Кондиционер состоит из двух блоков: воздухообрабатывающего и конденсаторного, соединенных между собой трубопроводами и кабелем. Кондиционер выпускается в двух исполнениях: КТА2-5-01 без приборов для регулирования влажности воздуха и КТА2-5-02 с приборами для регулирования влажности воздуха.

Схема автоматизации предусматривает работу кондиционера в трех режимах: охлаждение воздуха (без увлажнения); нагрев воздуха с увлажнением; вентиляция воздуха.

Выбор режима осуществляется переключателем, установленным на пульте управления кондиционером. Пуск кондиционера в работу производится кнопкой, при этом срабатывает пускатель и выключается электродвигатель *М1* приточного вентилятора. При работе кондиционера в режиме «охлаждение» датчик температуры через соответствующие пускатели включает электродвигатель вентилятора конденсатора и электродвигатель компрессора при температуре выше заданной и отклю-

чает при температуре ниже заданной. При работе кондиционера в режиме «отопление» датчик температуры через промежуточное реле управляет электромагнитным вентилем, подающим горячую воду в калорифер· открывает вентиль при температуре ниже заданной и закрывает при температуре выше заданной. В режиме «отопление» одновременно с нагревом воздуха происходит его увлажнение: при срабатывании пускателя его замыкающий контакт замыкает цепь питания, которая включает электродвигатели увлажнителя.

Пусковая и защитная электроаппаратура расположена на щите управления, а аппаратура управления и сигнализация — на пульте управления. Щит и пульт управления встроены в кондиционер.

Схема автоматизации кондиционера КТА1-2 предусматривает: управление электродвигателями приточного вентилятора и компрессора; работу кондиционера в трех режимах: «холод», «вентиляция», «тепло»; регулирование температуры и влажности воздуха в кондиционируемом помещении; регулирование количества хладона, подаваемого в воздухоохладитель; защиту компрессора от аварийного повышения давления нагнетания и понижения давления всасывания; сигнализацию включения вентилятора.

Пуск кондиционера в работу осуществляется переключателем. При этом включается электродвигатель вентилятора и загорается сигнальная лампа.

Выбор режима работы («холод», «вентиляция», «тепло») осуществляется соответствующим переключателем. В режиме «тепло» предусмотрено включение электрического воздухонагревателя или водяного воздухонагревателя.

Поддержание температуры и влажности воздуха предусматривается датчиком температуры и регулятором относительной влажности.

При установке соответствующего переключателя в положение «холод» датчик температуры через промежуточное реле и пускатель управляет работой компрессора: включает при температуре выше заданной и отключает при температуре ниже заданной. При установке одного переключателя в положение «тепло» и другого в положение «водяной воздухонагреватель» датчик температуры через промежуточное реле управляет работой вентиля, который открывает или прекращает доступ горячей воды

в водяной воздухонагреватель. При включении одного переключателя в положение «тепло» а другого в положение «электрический воздухонагреватель» датчик температуры через промежуточное реле и пускатель включает и отключает электронагреватель.

Регулирование относительной влажности осуществляется датчиком влажности совместно с регулятором *В3* и предусмотрено во всех режимах. Если относительная влажность воздуха в помещении меньше установленной на регуляторе, то последний срабатывает и подает питание в цепь катушки, которая включает электронагреватель увлажнителя. При достижении в помещении относительной влажности, равной установленной на регуляторе, пускатель обесточивается и отключает электронагреватель увлажнителя.

Микропереключатель, на который воздействует поплавковый клапан, отключает пускатель и электродвигатель увлажнителя при отсутствии воды в бачке увлажнителя. Работа компрессора, электронагревателя, водяного воздухонагревателя и узла регулирования относительной влажности сблокирована с работой вентилятора. Защиту компрессора от повышения или понижения давления обеспечивает реле давления. В случае чрезмерного повышения и понижения давления реле разрывает цепь питания пускателя, при этом отключаются компрессор и вентилятор. Терморегулирующий вентиль предназначен для автоматического регулирования подачи жидкого хладона-12 в воздухоохладитель в таком количестве, при котором обеспечивается выход паров хладона из воздухоохладителя с заранее заданным перегревом, независимо от тепловой нагрузки на воздухоохладитель. Водорегулирующий вентиль предназначен для автоматического регулирования подачи воды в конденсатор в зависимости от давления конденсации.

При увеличении давления хладона на линии нагнетания вентиль открывается и увеличивает подачу воды в конденсатор, при понижении давления — уменьшает. Вся пусковая и защитная электроаппаратура расположена на щите управления, а аппаратура управления и сигнализации — на панели управления. Щит и панель управления встроены в кондиционер. Датчик температуры и датчик относительной влажности устанавливаются в помещении, регулятор относительной влажности — вне кондиционера.

Кондиционер автономный типа КТА1-10 предназначен для круглогодичного технологического и комфортного кондиционирования воздуха в помещениях производственных и общественных зданий. В кондиционере осуществляется очистка воздуха от пыли, его охлаждение, нагрев и увлажнение. Кондиционер может применяться в системах кондиционирования воздуха крупных диспетчерских пунктов, центральных постов управления, лабораторных помещений, а также комфортного кондиционирования залов заседаний, приемных и т. д. Схема автоматизации кондиционера предусматривает:

управление электродвигателем приточного вентилятора;

работу кондиционера в трех режимах: «холод», «вентиляция», «тепло»;

регулирование температуры и влажности воздуха в кондиционируемом помещении;

регулирование количества хладона, подаваемого в воздухоохладитель;

защиту компрессора от аварийного повышения давления нагнетания и понижения давления всасывания;

сигнализацию включения вентилятора.

Выбор режима работы осуществляется соответствующим переключателем, выбор типа водяного или электрического воздухонагревателя — другим переключателем.

Кондиционер включается в работу переключателем, при этом срабатывает магнитный пускатель, который своими замыкающими контактами включает электродвигатели вентилятора и подает питание в цепь управления кондиционером. При включении соответствующего переключателя в положение «холод» датчик температуры через промежуточное реле и пускатель управляет работой электродвигателя компрессора. Одновременно с компрессором включаются вентили.

При включении одного переключателя в положение «тепло» и другого в положение «водяной воздухонагреватель» датчик температуры через промежуточное реле управляет работой вентиля, который открывает или прекращает доступ горячей воды в водяной воздухонагреватель. При включении одного переключателя в положение «тепло» и другого в положение «электрический воздухонагреватель» датчик температуры через промежуточное реле и пускатель управляет работой электродвигателя

Регулятор относительной влажности работает во всех режимах. При влажности меньше заданной он через пускатель включает электроподогреватель увлажнительного устройства. Микропереключатель, на который воздействует поплавковый клапан, отключает пускатель и электронагреватель увлажнителя при отсутствии воды в бачке увлажнителя. При срабатывании реле давления и тепловых реле (аварийные режимы) кондиционер отключается.

Вся пусковая и защитная электроаппаратура расположена на щите управления, а аппаратура управления и сигнализации — на панелях управления, которые встроены в кондиционер. Датчик температуры и датчик относительной влажности устанавливаются в помещении, регулятор относительной влажности — вне кондиционера.

Автономный кондиционер типа КТА1-25 предназначен для круглогодичного технологического и комфортного кондиционирования воздуха в помещениях производственных и общественных зданий. Кондиционер может также применяться для охлаждения электронно-вычислительных машин и машинных залов ЭВМ. Кондиционер при температуре окружающего воздуха 10—35°С работает продолжительное время, а при температуре 5—40°С — кратковременно.

Схема автоматизации предусматривает: управление электродвигателями приточного вентилятора и компрессора; работу кондиционера в трех режимах: «холод», «вентиляция», «тепло»; регулирование температуры и влажности воздуха в кондиционируемом помещении; регулирование количества хладона, подаваемого в воздухоохладитель; защиту компрессора от аварийного повышения давления нагнетания и понижения давления всасывания; сигнализацию включения вентилятора.

Кондиционер включается в работу специальным переключателем. При этом срабатывает пускатель, который своими замыкающими контактами включает электродвигатель вентилятора и загорается сигнальная лампа. Выбор режима работы кондиционера («холод», «вентиляция», «тепло») осуществляется другим переключателем. При установке этого переключателя в положение «холод» датчик температуры через промежуточное реле и пускатель управляет работой электродвигателя компрессора: включает компрессор при температуре выше заданной и отключает при температуре ниже заданной.

Одновременно с включением и отключением компрессора соответственно открываются или закрываются вентили. При установке переключателя в положение «тепло» датчик температуры через реле и пускатель управляет работой электродвигателя: при температуре выше заданной электродвигатели отключаются, при температуре ниже заданной включаются.

Регулирование относительной влажности воздуха осуществляется выносным регулятором влажности. Если относительная влажность воздуха в помещении меньше установленной на регуляторе, то последний срабатывает и подает питание в цепь катушки пускателя, который включает электродвигатель увлажнителя. При достижении в помещении относительной влажности, равной установленной на регуляторе, последний срабатывает и своим контактом разрывает цепь питания катушки пускателя. Пускатель отключает электронагреватель увлажнителя. Микропереключатель, на который воздействует поплавковый клапан, отключает пускатель и электронагреватель увлажнителя при отсутствии воды в бачке увлажнителя. Работа компрессора, электронагревателя и узла регулирования относительной влажности сблокирована с работой вентилятора.

Защита компрессора от повышения или понижения давления обеспечивается реле давления, контакт которого включен в цепь питания катушки пускателя двигателя вентилятора. В случае чрезмерного повышения или понижения давления реле разрывает цепь питания пускателя, который отключает компрессор и вентилятор.

Вся пусковая и защитная электроаппаратура расположена на щите управления, а аппаратура управления и сигнализации — на панели управления. Щит и панель управления встроены в кондиционер. Датчик температуры и датчик относительной влажности устанавливаются в помещении, регулятор влажности — вне кондиционера.

Автономный кондиционер типа КСИ предназначен для охлаждения, вентиляции и очистки от пыли воздуха в помещениях постов управления и комнатах отдыха. Схема автоматизации предусматривает: управление электродвигателями приточного вентилятора и компрессора; работу компрессора в двух режимах — ручном и автоматическом; регулирование температуры воздуха в помещении; защиту компрессора от аварийного повышения давления нагнетания и понижения давления всасыва-

ния; регулирование количества хладона, подаваемого в воздухоохладитель; сигнализацию включения вентилятора.

Пуск кондиционера в работу производится кнопкой специального управления, при этом включается вентилятор и подготавливается цепь управления компрессором. Выбор режима управления компрессором осуществляется переключателем. В автоматическом режиме управление компрессором осуществляется с помощью датчика температуры, который включает и отключает компрессор в зависимости от температуры воздуха в помещении. Соленоидный вентиль открывается с пуском компрессора, обеспечивая доступ жидкого фреона к терморегулирующему вентилю. Во время остановки компрессора соленоидный вентиль предотвращает перетекание жидкого фреона из теплообменника в воздухоохладитель, тем самым исключая возможность возникновения гидравлического удара в компрессоре при повторных автоматических пусках. На линии подачи воды в конденсатор установлен водорегулирующий вентиль, который регулирует подачу охлаждающей воды в зависимости от давления конденсации, обеспечивая поддержание температуры конденсации в заданных пределах. Терморегулирующий вентиль автоматически регулирует подачу фреона в воздухоохладитель, устраняя опасность попадания жидкого фреона в компрессор. Для защиты компрессора от аварийного повышения давления нагнетания и понижения давления всасывания служит реле давления.

Аппаратура управления и сигнализации кондиционера размещена на блоке управления, силовая аппаратура — на силовом щите. Блок управления и силовой щит устанавливаются внутри кондиционера. Датчик температуры устанавливается внутри кондиционера в канале рециркуляционного воздуха.

Автономный кондиционер типа УКВ предназначен для создания комфортных гигиенических условий в операционных помещениях объемом не более 175 м^3. Кондиционер работает на 100% наружного воздуха и обеспечивает в помещении заданные температуру и влажность воздуха.

При температуре воздуха в кондиционируемом помещении ниже заданного значения контакт соответствующего датчика температуры замыкается и контактами промежуточного реле замыкает цепь питания пускателя,

когорый подает напряжение на электронагреватели. При повышении температуры воздуха в кондиционируемом помещении контакт другого датчика температуры замыкается, при этом включается цепь питания компрессора.

Относительную влажность воздуха в кондиционируемом помещении поддерживает автоматический регулятор влажности: включает соленоидный вентиль при относительной влажности ниже заданного значения, а при относительной влажности в помещении выше заданного значения одновременно включает компрессор и соленоидный вентиль.

Терморегулирующее реле, отрегулированное на 40—50°С, установлено на расстоянии 15—20 мм от нагревательных элементов электрокалорифера и служит для отключения нагрева при температуре выше заданной. Реле давления предназначено для защиты компрессора от аварийного повышения давления нагнетания и понижения давления всасывания. Электрический фильтр имеет автономное питание от агрегата питания, подключенного к сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

Датчики температуры и влажности размещены на блоке датчиков, устанавливаемом в обслуживаемом помещении. Аппаратура управления и сигнализации, пусковая и защитная аппаратура установлены в блоке автоматики. Блок автоматики установлен на стене помещения на высоте 1,5—1,6 м от пола.

4.6. ТИПОВЫЕ РЕШЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЦЕНТРАЛЬНЫХ НЕАВТОНОМНЫХ КОНДИЦИОНЕРОВ

В 1980—1981 гг. были разработаны типовые проектные решения «Автоматизация, управление и силовое электрооборудование центральных кондиционеров». Раздел «Автоматизация» разработан специалистами ГПИ Сантехпроект под руководством канд. техн. наук В. М. Рубчинского и инж. В. И. Фингера [96], раздел «Управление и силовое электрооборудование» — специалистами ГПИ Электропроект [97]. Использование при проектировании настоящих типовых решений исключает необходимость разработки функциональных схем авто-

матизации и принципиальных схем регулирования. Кроме того, при этом исключается необходимость разработки задания на изготовление щитов регулирования и управления, а также значительно сокращается объем согласований. На заводе-изготовителе упрощается производство щитов управления и регулирования, а на объектах облегчается монтаж, наладка и эксплуатация в результате использования унифицированных схем и конструктивных компоновок.

Проектные материалы состоят из ряда альбомов, содержащих общие данные, пояснительные записки, технологические схемы обработки воздуха, схемы регулирования и управления, перечень приборов и средств автоматизации, их размещение, размещение аппаратуры управления и силового электрооборудования. Типовые решения снабжены рекомендациями по составлению заданий на проектирование, а также содержат указания по привязке.

В состав раздела «Автоматизация» входят 13 альбомов Альбом 0 содержит рекомендации по применению Альбомы I—XII содержат материалы по автоматизации различных компоновок центральных кондиционеров: альбом I — Прямоточный кондиционер с одной секцией воздухогревателя первого подогрева и воздухонагревателем второго подогрева; альбом II — Прямоточный кондиционер с одной секцией воздухонагревателя первого подогрева и двумя доводчиками; альбом III — Прямоточный кондиционер с двумя секциями воздухонагревателя первого подогрева и воздухонагревателем второго подогрева; альбом IV — Прямоточный кондиционер с двумя секциями воздухонагревателя первого подогрева и двумя доводчиками; альбом V — Прямоточный кондиционер с двумя секциями воздухонагревателя первого подогрева и тремя доводчиками; альбом VI — Прямоточный кондиционер с двумя секциями воздухонагревателя первого подогрева и четырьмя доводчиками; альбом VII — Кондиционер с рециркуляцией и воздухонагревателем второго подогрева; альбом VIII — Кондиционер с рециркуляцией и двумя доводчиками; альбом IX — Кондиционер с рециркуляцией и воздухонагревателем первого подогрева и воздухонагревателем второго подогрева; альбом X — Кондиционер с рециркуляцией, воздухонагревателем первого подогрева и двумя доводчиками; альбом XI — Кондиционер с рециркуляцией, воздухонагревателем первого по-

догрева и тремя доводчиками; альбом XII — Кондиционер с рециркуляцией, воздухонагревателем первого подогрева и четырьмя доводчиками.

В состав раздела «Управление и силовое электрооборудование» входят пять альбомов. Альбом 0 содержит рекомендации по применению. Остальные четыре альбома содержат материалы по электрическим схемам различных компоновок кондиционеров: альбом I — Кондиционер с одним приточным вентилятором; альбом II — Кондиционер с одним приточным и одним рециркуляционным вентиляторами; альбом III — Кондиционер с двумя приточными (рабочим и резервным) вентиляторами; альбом IV — Кондиционер с двумя приточными (рабочим и резервным) и двумя рециркуляционными (рабочим и резервным) вентиляторами.

4.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ НЕАВТОНОМНЫХ КОНДИЦИОНЕРОВ НА БАЗЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ УЗЛОВ

Для облегчения разработки проектов автоматизации центральных кондиционеров инж. Б. Г. Шпизом была предложена методика проектирования, основанная на использовании типовых унифицированных узлов [98]. Технологическую схему обработки воздуха в кондиционере автор представляет в виде набора элементов, характеризующих тот или иной процесс тепломассообмена или перемещения воздуха. При этом каждый из элементов может быть выполнен в виде различных вариантов. Сочетание технологических агрегатов в соответствующем варианте характеризует технологическую схему управляемой части системы. Структура управляемой части представляется в виде пяти последовательных подсистем, что позволяет ввести ее пятизначное обозначение или кодирование. Каждый разряд пятизначного числа (кода) соответствует определенному технологическому агрегату управляемой части системы.

На основе изучения традиционных технологических схем СКВ, содержащих камеры смешения, калориферы первого и второго подогрева и форсуночные камеры орошения, выделено около 50 наиболее часто встречаемых вариантов структур. Все варианты структур управляемой части СКВ характеризуются заводской готовностью В

составе вариантов имеются три основные модели кондиционера и дополнительные проектные решения по схеме вентиляционной сети, а также подварианты размещения калориферов второго подогрева Очевидно, что большое число возможных сочетаний технологических агрегатов или вариантов структур управляемой части СКВ усложняет создание типовых решений Задача упрощается при типизации отдельных функциональных узлов автоматизации.

В полном объеме автоматизации управления центральными неавтономными кондиционерами выделяются четыре группы задач стабилизация, блокировка, управление и коррекция Для выполнения этих задач предлагаются различные варианты функциональных узлов автоматизации.

В качестве основного контура стабилизации рассматривается узел регулирования температуры и даются варианты использования различных средств автоматики

Под устройствами блокировки автор понимает средства автоматики, обеспечивающие нормальную работу кондиционера в режиме дистанционного управления В данном случае приводятся варианты схем связи между стабилизирующими регуляторами и электрооборудованием вентиляторов, насосов, фильтров, а также исполнительными устройствами и параметрами наружного воздуха Одной из разновидностей блокировки («блокировки управления 5БУ») является схема защиты от замерзания В методике приводятся различные варианты функциональных схем защиты от замерзания, а также перечень рекомендуемой аппаратуры.

В качестве задач автоматической коррекции рассматриваются случаи изменения температуры воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения в зависимости от температуры наружного воздуха, а также изменения заданного значения температуры точки росы в зависимости от требуемого значения относительной влажности воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения

На основе рассмотрения элементов функциональных схем типовых и характерных узлов инж Б Г Шпиз предлагает к использованию различные варианты схем автоматизации кондиционеров Автором рассматриваются технологические схемы автоматизации, а также приводятся рекомендации по выбору мест установки датчиков температуры

4.8. АВТОМАТИЗАЦИЯ СКВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩУЮ ТЕХНОЛОГИЮ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

Отличительной чертой СКВ, обеспечивающих энергосберегающую технологию обработки воздуха, является развитая система программно-параметрического управления. Группой специалистов во главе с д-ром техн. наук А. Я. Креслинем и канд. техн. наук Э. Э. Дзелзитисом подобные технические решения были предложены к реализации в системе кондиционирования воздуха*, обслуживающей цехи текстильного предприятия [99].

Система представляет собой центральный кондиционер, включающий воздухонагреватели первого и второго подогрева, узел первой рециркуляции и камеру орошения с обводным воздуховодом.

Для реализации энергосберегающих режимов технологии кондиционирования микроклимата в данной системе было предложено отказаться от обязательного состояния обрабатываемого воздуха — точки росы. Кроме того, при реконструкции системы было предусмотрено последовательное воздействие регулятора температуры на воздухонагреватели первого и второго подогрева, т. е. после полного открытия воздухонагревателя второго подогрева регулирующее воздействие переносится на воздухонагреватель первого подогрева. Воздействие регулятора относительной влажности подается на воздушный клапан обвода камеры орошения. Перечисленные мероприятия позволяют поддерживать параметры воздуха в цехе гребнечесального отделения шерсти при неполной загрузке технологического оборудования и в выходные дни.

Функциональнная схема СКВ для реализации энергосберегающей технологии представлена на рис. 4.8. Рассматриваемая СКВ содержит: воздухонагреватели первого *1* и второго *4* подогрева, камеру орошения *2* с обводным воздуховодом *3*, воздушные клапаны рециркуляции *5* и обводного воздуховода *7*, регулирующие клапаны на обратных трубопроводах теплоносителя *9* и *10*, трехходовой клапан на трубопроводе холодоносителя *13*, электрические исполнительные механизмы *6*, *8*, *11*, *12* и *14*, регуляторы температуры *18* и относительной влажности *19*

* А с 691645 (СССР) Система кондиционирования воздуха / Э Э Дзелзитис А Я Креслинь С В Нефелов и др — Заявл 24 6 77, № 2499011 опубл в БИ, 1979, № 38

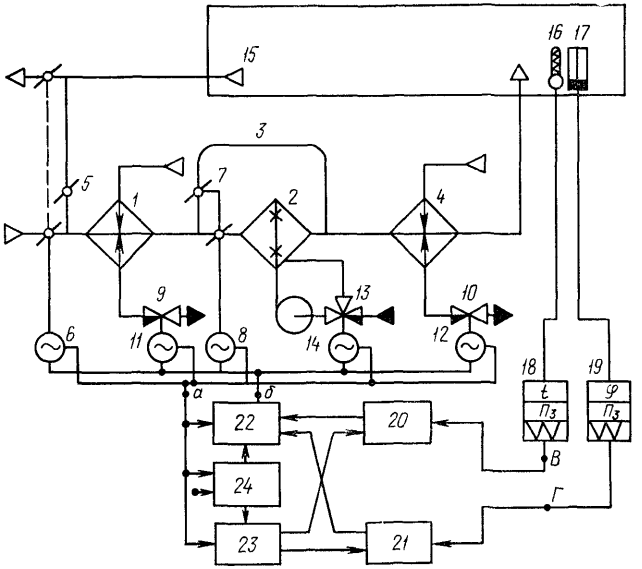


Рис 4.8. Функциональная схема СКВ, реализующей энергосберегающую технологию тепловлажностной обработки воздуха

кондиционируемого помещения *15* с датчиками *16* и *17* соответственно. Для возможности реализации последовательного воздействия на различные регулирующие органы система дополнена коммутатором *22*, для снижения скорости электрических исполнительных механизмов — импульсными прерывателями в контуре регулирования температуры *20* и в контуре регулирования относительной влажности *21*. Для перестройки цепочек формирования импульсов воздействия на исполнительные механизмы в соответствии с динамическими характеристиками контура регулирования и идентификации режимов обработки воздуха система содержит дешифратор *23*.

Исходной информацией для работы системы является энергопотребление в секциях кондиционера, которое характеризуется положением регулирующих органов. Информация поступает на входы коммутатора и дешифратора в виде комбинации двоичного цифрового кода. На основе этой информации коммутатор подключает выходы регуляторов (через соответствующие импульсные прерыватели) к предусмотренным программой исполнительным механизмам, а дешифратор вырабатывает на одном из выходов (число выходов соответствует

числу режимов обработки воздуха с отличающимися динамическими характеристиками для каждого импульсного прерывателя) логический сигнал, который используется для настройки импульсных прерывателей и также для визуальной индикации режимов (на рис. 4.8 показаны только общие функциональные связи между дешифраторами *23* и импульсными прерывателями *20* и *21* без выделения отдельных выходов дешифратора). Программа работы системы закладывается конструктивно при монтаже коммутатора и дешифратора, которые являются составными частями общего логического устройства управления (ЛУУ), реализованного на базе интегральных микросхем серии К-155 (синтезированные алгоритмы управления реализуемы также на микропрограммных устройствах управления).

Для изменения реализуемого алгоритма управления необходимо производить выбор программы работы (выполнить перестройку логической схемы устройства управления), что обеспечивается включением между выходами исполнительных механизмов и входами коммутатора и дешифратора блока программного управления (блок *24* на рис. 4.8). Функции блока программного управления задаются алгоритмом управления совместно с функциями коммутатора и дешифратора. В системе был предусмотрен контроль температуры холодоносителя и переход системы от выполнения алгоритма управления круглогодичной системы к алгоритму управления зимней рециркуляционной системы, что позволяет обеспечить точное поддержание одного параметра в условиях, когда холодоноситель отсутствует или его температура превышает заданное значение.

Ввод СКВ в режим энергосберегающей технологии тепловлажностной обработки воздуха проводился с помощью схем, реализованных на базе электромагнитных реле (эти схемы не предусматривали перестройку системы на реализацию других алгоритмов управления) с последующей заменой их устройствами, реализованными на интегральных микросхемах.

Для регулирования температуры в цехе использовался регулятор РТ-3К с пределом регулирования от 0 до 40°С, регистрация температуры велась самопишущим уравновешенным мостом переменного тока типа КСМ-2-003 с платиновым термометром сопротивления градуировки 22. Для регулирования относительной влажности

использовались кварцевые регуляторы типа В4-536У с датчиками ДОВП-1; для регистрации относительной влажности — устройства с подогревными гигрометрами ГП-225, которые одновременно проходили промышленно-экспериментальные испытания, в комплекте с автоматическими потенциометрами типа КСП и многоточечный влагомер ВВ4-01.

Для внедрения энергосберегающей технологии обработки воздуха на Огрском трикотажном комбинате было реализовано два варианта регулирования влагосодержания за камерой орошения: 1) на кондиционерах КТ-40 — с помощью обвода камеры орошения; 2) на кондиционерах КТ-250 — путем изменения числа работающих форсунок при отключении отдельных рядов.

С целью определения соответствия теоретических предложений результатам эксплуатации на комбинате велись автоматические измерения температуры и относительной влажности наружного воздуха термометром сопротивления ТСП и первичным преобразователем влажности гигрометром ГП-225 (ППВ-П) с записью на вторичных приборах типа КСМ2-043 и КСП-4 и фиксация положений регулирующих органов кондиционеров, соответствующих режимам тепловлажностной обработки воздуха.

Исследования, проведенные на промышленно-экспериментальном объекте, подтвердили совпадение теоретических расчетов режимов тепловлажностной обработки воздуха с наблюдаемыми при эксплуатации системы, а также выполнение разработанными средствами автоматизации заданных алгоритмов управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор считает необходимым еще раз сформулировать отдельные положения, проходящие красной нитью через все содержание книги.

Современные системы кондиционирования воздуха в подавляющем большинстве являются автоматизированными. Различен уровень их автоматизации, который определяется содержанием реализуемого алгоритма управления и составом используемых технических средств. Может, например, быть автоматизированная СКВ, в которой выполняются операции пуска, останова и защиты оборудования от аварийных ситуаций, а также стабилизация температуры воздуха в обслуживаемом помещении в широких пределах. Подобная система реализуется на основе использования традиционных релейных схем и простых регуляторов температуры. А может быть автоматизированная СКВ, в которой, помимо перечисленных операций, осуществляется стабилизация переменных значений температуры и влажности воздуха в обслуживаемом помещении в узких пределах, а также выполняется сложная программа переключения режимов работы оборудования. Подобная система реализуется на основе использования, например, программируемых средств управления периодическими процессами и сложных регуляторов температуры и влажности воздуха с несколькими входами и пропорционально-интегральным законом регулирования.

Следует иметь в виду, что системы кондиционирования воздуха в условиях непрерывной работы в суточном или годовом цикле могут обеспечить цель и требования к функционированию (поддержание заданных параметров воздуха в обслуживаемом помещении), при условии необходимого качества (минимум расхода энергии) только в управляемых режимах работы. Управление этими режимами работы в большинстве случаев не может осуществляться вручную оператором.

Таким образом объясняется необходимость автоматизации систем кондиционирования воздуха. В свою очередь, необходимость правильного выбора уровня автоматизации предопределяет необходимость тщательного исследования автоматизированных управляемых СКВ. При этом в качестве автоматического управления системой кондиционирования воздуха следует рассматривать выполнение следующих задач:

пуска, останова и защиты оборудования от аварийных ситуаций;

стабилизации заданных выходных или промежуточных переменных состояния;

выбора и переключения режимов работы оборудования, т. е. реализация принципа переменности структуры системы.

В книге неоднократно использовались слова «система в целом». Это является следствием непрерывных и намеренных попыток поставить понятие системы в целом на порядок выше понятия ее собственных элементов. При этом под системой в целом понимается множест-

во связанных сложными связями и взаимодействующих элементов, представляющих собой не простое суммирование, а особое соединение, придающее всей системе в целом новые качества, отсутствующие у каждого из них.

В настоящей работе главным является подход к рассмотрению СКВ в целом, основанный на изучении ее свойств и особенностей как управляемой. Поэтому задача оптимизации управления системами кондиционирования воздуха формулируется для решения в двух направлениях: динамическая оптимизация — достижение целей управления и статическая оптимизация — достижение выбранного критерия эффективности.

По мнению автора и других специалистов, вопросы технико-экономической эффективности создания автоматизированных СКВ в настоящее время являются наименее изученными [100]. Поэтому их исследование не нашло достойного отражения в рамках настоящей работы. Технико-экономические аспекты создания автоматизированных СКВ должны, по всей вероятности, базироваться на методах аналитического системного проектирования, решение подобной задачи может стать предметом отдельной большой работы.

По мнению автора, дальнейшие работы в области создания автоматизированных систем кондиционирования воздуха должны быть направлены:

на разработку и исследование математических моделей управляемых систем кондиционирования воздуха различных типов, структур и классов;

на исследование управляемости, наблюдаемости и устойчивости функционирования многозональных систем кондиционирования воздуха, а также систем с применением новых тепломассообменных аппаратов и устройств термодинамической обратной связи;

на исследование возможностей целесообразного применения новых средств автоматического управления и вычислительной техники, а также возможностей расширения номенклатуры изделий элементов и агрегатов СКВ, производимых и поставляемых комплектно со средствами автоматического управления, имея в виду в первую очередь изготовление агрегатированных установок кондиционирования воздуха;

на разработку и создание основ автоматизированного проектирования систем кондиционирования воздуха широкого круга типов и классов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Отопление* и вентиляция. Часть II. Под ред. В. Н. Богословского. М., Стройиздат, 1976.

2. *Воронов А. А.* Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. М., Наука, 1979.

3. *Богословский В. Н.* Тепловой режим зданий. М., Стройиздат, 1979.

4. *Богословский В. Н.* Строительная физика. М., Стройиздат, 1982.

5. *Участкин П. В.* Вентиляция, кондиционирование воздуха и отопление на предприятиях легкой промышленности. М., Легкая индустрия, 1980.

6. *Кокорин О. Я.* Установки кондиционирования воздуха. М., Машиностроение, 1978.

7. *Баркалов Б. В., Карпис Е. Е.* Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. М., Стройиздат, 1983.

8. *Рымкевич А. А., Халамейзер М. Б.* Управление системами кондиционирования воздуха. М., Машиностроение, 1977.

9. *Техническая* кибернетика. Серия инженерных монографий. Теория автоматического регулирования. Под. ред. В. В. Солодовникова. М., Машиностроение, кн. 1—3, 1967—1969.

10. *Бородин Ю. И., Плотников В. Н.* Расчет систем автоматического регулирования (САР). — Автоматика и телемеханика, т. XXII, № 4, 1961.

11. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М., Наука, 1966.

12. *Рымкевич А. А.* Математическая (термодинамическая) модель систем кондиционирования воздуха. Л., ЛТИХП, 1979.

13. *Коган Б. Я.* Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. М., Физматгиз, 1963.

14. *Стефани Е. П.* Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М., Госэнергоиздат, 1960.

15. *Дудников Е. Г.* Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М, Энергия, 1967.

16. *Нефелов С. В.* Исследование оптимальных методов регулирования в установках кондиционирования воздуха. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., МВТУ, 1972.

17. *Харафас Д. Н.* Системы и моделирование. М., 1967.

18. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. М., Мир, 1975.

19. *Шевяков А. А., Яковлева А. А.* Инженерные методы расче-

та динамики теплообменных аппаратов. М., Машиностроение, 1968.
20. *Кроу К., Гамилец А.* и др. Математическое моделирование химических производств. М., Мир, 1973.
21. *Кафаров В. В., Петров В. Л., Мешалкин В. П.* Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М., Химия, 1974.
22. *Попырин Л. С.* Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М., Энергия, 1978.
23. *Эльтерман В. М.* Вентиляция химических производств. М., Химия, 1971.
24. *Нефелов С. В.* Методика моделирования САР производительности калорифера на аналоговой машине МН-7. — Тр. ин-та/НИИСТ, 1970, № 3.
25. *Дзелзитис Э. Э.* Математическая модель процессов управления многофункциональной системы кондиционирования воздуха. — В кн.: Вентиляция и кондиционирование воздуха. Рига, РПИ, 1981.
26. *Сизов А. М.* Вероятностная форма представления климатологической информации в расчетах систем кондиционирования микроклимата (СКМ). Рига, РПИ, 1978.
27. *Успенская Л. Б.* Математическая статистика в вентиляционной технике. М., Стройиздат, 1980.
28. *Нефелов С. В.* Управление системами кондиционирования воздуха. М., ВНИИИС, деп. № 2502, 1981.
29. *Аксельрод С. И.* Исследование релейно-импульсных систем автоматического регулирования температуры в установках кондиционирования воздуха. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., ИЭУМ, 1976.
30. *Аксельрод С. И.* Методика расчета кондиционируемого помещения как объекта регулирования. — В кн.: Проектирование и расчет систем кондиционирования воздуха промышленных, общественных и жилых зданий. М., Стройиздат, 1973.
31. *Богословский В. Н., Щелкунов С. А.* Применение теории теплоустойчивости для расчетов режимов регулирования систем кондиционирования микроклимата. — Тр. ин-та/МИСИ, 1970, № 68.
32. *Щелкунов С. А.* Определение статических и динамических характеристик тепловых процессов в кондиционируемых помещениях с использованием теориии теплоустойчивости. — Тр. ин-та/МИСИ, 1970, № 68.
33. *Первозванский А. А., Гайцгори В. Г.* Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. М., Наука, 1979.
34. *Участкин П. В.* Экспериментальные и теоретические исследования процессов кондиционирования воздуха. Автореф. дис. на соиск учен. степ. д-ра техн. наук. Л., ВВИТКУ, 1967.
35. *Сенатов И. Г.* Санитарная техника в общественном питании. М., Экономика, 1973.
36. *Бромлей М. Ф.* Гидравлические машины и холодильные установки. М., Стройиздат, 1971.
37. *Калинушкин М. П.* Вентиляторные установки. М., Высшая школа, 1979.
38. *Вахвахов Г. Г.* Работа вентиляторов в сети. М., Стройиздат, 1975.
39. *Поз М. Я., Красновская А. А.* Методика расчета автоматизированных калориферных установок. Материалы семинара. Калориферные установки. М., ДНТП, 1980.

40. *Тойхерт Л.* Исследование динамики теплообмена в воздухонагревательных установках. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 1977.

41. *Рымкевич А. А.* Зависимости для расчета теплообменников систем кондиционирования воздуха. — В кн.: Проблемы создания микроклимата в зданиях научно-исследовательских институтов. М., Наука, 1978.

42. *Зусманович Л. М.* Оросительные камеры установок искусственного климата. М., Машиностроение, 1967.

43. *Степанов А. В.* Исследование процессов регулирования тепловлажностной обработки воздуха в камере орошения кондиционеров. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Л., ЛИТЛП, 1975.

44. *Боровков В С, Майрановский Ф. Г.* Аэрогидродинамика систем вентиляции и кондиционирования воздуха. М., Стройиздат, 1978.

45. *Емельянов А. И.* и др. Практические расчеты в автоматике. М., Машиностроение, 1967.

46. *Круг Е. К., Минина О. М.* Электрические регуляторы промышленной автоматики. М. — Л., Госэнергоиздат, 1962.

47. *Рекомендации* по выбору параметров настройки релейно-импульсных регуляторов автоматизированных систем вентиляции и кондиционирования воздуха при помощи номограмм. АЗ-727. М., ГПИ Сантехпроект, 1976.

48. *Рымкевич А. А.* Принципы системного подхода к оценке и выбору основных элементов систем кондиционирования воздуха. Л., ЛТИХП, 1980.

49. *Сотников А. Г.* Системы кондиционирования воздуха с количественным регулированием. Л., Стройиздат, 1976.

50. *Креслинь А. Я.* Оптимальные алгоритмы функционирования систем кондиционирования воздуха. — В кн.: Вентиляция и кондиционирование воздуха. Рига, РПИ, 1981.

51. *Кокорин О. Я.* Нагрев приточного воздуха теплом вытяжного воздуха в теплообменниках-утилизаторах из тепловых трубок. — Водоснабжение и санитарная техника, 1981, № 11.

52. *Шински Ф.* Управление процессами по критерию экономии энергии. М., Мир, 1981.

53. *Справочник* по системотехнике. Под ред. Р. Маклоа. М., Советское радио, 1970.

54. *Кувшинов Ю. Я.* Круглогодичный тепловой режим зданий и расход энергии системами кондиционирования микроклимата. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., МИСИ, 1973.

55. *Теория* систем с переменной структурой. Под. ред. С. В. Емельянова. М., Наука, 1970.

56. *Емельянов С. В., Костылева Н. Е.* и др. Системное проектирование средств автоматизации. М., Машиностроение, 1978.

57. *Казамаров А. А., Палаткин А. М., Роднянский А. О.* Динамика двухмерных систем автоматического регулирования. М., Наука, 1967.

58. *Эрриот П.* Регулирование производственных процессов. М., Энергия, 1967.

59. *Полубояринов А. Г., Иордан Г. Г.* и др. Развитие средств контроля и регулирования технологических процессов. — Приборы и системы управления, 1981, № 10.

60. *Шубладзе А. М., Уланов А. Г.* и др. Адаптивные промышленные регуляторы. — Приборы и системы управления, 1981, № 7.
61. *Духин А. А.* О применении управляющих вычислительных комплексов при эксплуатации систем промышленной вентиляции. Материалы семинара. Эксплуатация систем промышленной вентиляции. М., ДНТП, 1981.
62. *Общеотраслевые* руководящие методические материалы по созданию и применению автоматизированных систем управления технологическими процессами в отраслях промышленности (ОРММ-2 АСУТП). М., ГКНТ, 1981.
63. *Емельянов С. В.* Система автоматического управления с переменной структурой. М., Наука, 1967.
64. *Оппельт В.* Основы техники автоматического регулирования. М. — Л., Энергия, 1960.
65. *Рубчинский В. М., Тугалукова Т. А.* Устройство контроля, регулирования и управления климатическими установками. М., ЦНИИТЭИприборостроение, 1981.
66. *Рухадзе В. А., Царьков В. А.* и др. Современное состояние и перспективы развития Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации. М., ЦНИИТЭИприборостроение, 1975.
67. *Отраслевой* каталог. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Т. 4, вып. 3. Агрегатный комплекс электрических средств регулирования в микроэлектронном исполнении АКЭСР. М., ЦНИИТЭИприборостроение, 1980.
68. *Отраслевой* каталог. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Т. 6, вып. 2. Электрические исполнительные механизмы. М., ЦНИИТЭИприборостроение, 1981.
69. *Отраслевой* каталог. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Т. 3, вып. 1. Электрическая унифицированная система приборов автоматического регулирования «Каскад». М., ЦНИИТЭИприборостроение, 1979.
70. *Отраслевой* каталог. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Т. 4, вып. 2. Комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС). Средства управления с переменной структурой (СУПС). М., ЦНИИТЭИприборостроение, 1980.
71. *Отраслевой* каталог. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Т. 4, вып. 5. Комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем на базе микросхем с повышенной степенью интеграции и микропроцессоров (КТС ЛИУС-2). Технические средства. М ЦНИИТЭИприборостроение, 1981.
72. *Draabe I.* Industrie — Luftbefeuchter — Bauformen, Auswahlkriterien, Wartung. — Klima Kalte Hevrung, 1980, N 4, с. 153—156.
73. *Осипов А. М.* Технологическое нормирование параметров микроклимата в прядильных залах текстильных предприятий. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Иваново, 1977.
74. *Гриднев А. С.* Исследование и разработка устройств для определения динамических характеристик гигрометрических первичных преобразователей. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 1979.
75. *Литвинов А. М.* Автоматический контроль тепловлагосодержания газообразных сред. Киев, Знание, 1980.
76. *Нефелов С. В., Тестоедов Ю. И.* и др. Измеритель расхода

воздуха. — В кн.: Проблемы совершенствования и развития оборудования для кондиционирования воздуха и вентиляции. Харьков ВНИИкондиционер, 1979.

77. *Hall I.* Flow monitoring aids energy management. «Instrum and Contr. Syst», 1979, 52, N 2, с. 29—34.

78. *Жирнов А. И., Алексеев В. Л.* и др. Всережимный комплекс средств автоматического регулирования. — Теплоэнергетика, 1981 № 10.

79. *Экономия* энергии с помощью преобразователя частоты фирмы Strömberg (Финляндия). Материалы симпозиума. М., Strömberg, 1980.

80. *Ведомость* электродвигателей для комплектации выпускаемых в 1981 г. вентиляторов санитарно-технических систем ТП-81 Вып. 2. М., ГПИ Сантехпроект, 1981.

81. Электротехнический справочник. Т. 3. М., Энергия, 1976

82. *Нефелов С. В., Духин А. А., Швец С. А., Бродский Ю. А* Аппаратная реализация количественного способа управления параметрами микроклимата помещений. Реф. сб. сер. V, вып. 12 (116) М., ЦИНИС, 1976.

83. *Bennett C. E., Lorhert C F.* Evaluating control for batch processing. «Instrum. Technol.», 1979, 26, N 7, с. 58—59.

84. *Егорова А. С.* Современные средства регулирования технологических процессов на микропроцессорах. М., ЦНИИТЭИприборостроение, 1981.

85. *Krigman A.* «Snstrumentation: Where Are We going?» Instrumentation Technology, 1979, N 1, с. 22—27.

86. *Hodgson R.* Mikroprozessoreinsatz bei der Temperaturregelung mit Klimaanlagen», «Stenerungstechnik», 1979, с. 63—66.

87. *Stoecker. W. F.* Computer applications for supermarkets «Heat. (Pip) Air Condition», 1980, 52, N 8, с. 55—60.

88. *Таутиев Х. Д.* Исследование регулирования процессов кондиционирования воздуха в производстве синтетических волокон Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 1976 МИСИ.

89. *Лазуркин Б. И., Стребейко Э. М., Тестоедов Ю. И.* Система автоматического управления группой приточных камер с однородной нагрузкой. Материалы семинара. Калориферные установки. М., ДНТП, 1980.

90. *Икингрин И. Н., Чухман Г. И.* Терморадиационный увлажнитель воздуха для автономных кондиционеров. — Холодильная техника, 1978, № 4.

91. *Иванихина Л. В., Нехаева Е. И., Соловьев А. Ю.* Пластинчатые теплоутилизирующие воздухо-воздушные теплообменники. Материалы семинара. Калориферные установки. М., ДНТП, 1980.

92. *Дицин В. А., Розенштейн И. Л., Щекин И. Р.* Современное оборудование для утилизации тепла и холода в системах кондиционирования воздуха и вентиляции. Обзорная информация. М., ЦНИИТЭстроймаш, 1981.

93. *Нефелов С. В., Кокорин И. О., Разгулов В. А.* Тепловой утилизатор-вентилятор для нагрева холодного воздуха. Материалы семинара. Калориферные установки. М., ДНТП, 1980.

94. *Рубчинский В М., Шкробатов В. П.* Электрооборудование кондиционеров общего назначения. М., Энергия, 1978.

95. *Схемы* автоматизации автономных и неавтономных кондиционеров. МБ-18. М., ГПИ Сантехпроект, 1980.

96. *Автоматизация,* управление и силовое электрооборудование центральных кондиционеров КТЦ 31,5 — КТЦ 80. Автоматизация. Типовые проектные решения. М., ЦИТП, 1981.

97. *Автоматизация,* управление и силовое электрооборудование центральных кондиционеров типа КТЦ 31,5 — КТЦ 80. Управление и силовое электрооборудование. Типовые проектные решения. М., ЦИТП, 1981.

98. *Шпиз Б. Г.* Современные системы автоматизации центральных кондиционеров. Обзорная информация. М., ЦНИИТЭстроймаш, 1979.

99. *Дзелзитис Э. Э., Вилцапс А. А.* Опыт внедрения энергосберегающей технологии обработки воздуха на системах кондиционирования Огрского трикотажного комбината. — В кн.: Вентиляция и кондиционирование воздуха. Рига, 1982, вып. 14.

100. *Богуславский Л. Д.* Экономическая эффективность оптимизации уровня теплозащиты зданий. М., Стройиздат, 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Основные условные обозначения 3
Предисловие 4
Введение 6
Глава 1. **Теоретические основы автоматического управления системами кондиционирования воздуха** 10
1.1 Процессы, переменные состояния и структура систем кондиционирования воздуха 10
1.2. Локальные системы автоматического регулирования 22
1.3. Исследование систем автоматического регулирования 40
1.4. Математическое описание систем и объектов управления 57
1.5. Устойчивость и качество регулирования 82
1.6. Алгоритмы функционирования систем кондиционирования воздуха 94
1.7. Алгоритмы управления системами кондиционирования воздуха 116
Глава 2. **Методы совершенствования автоматического управления системами вентиляции и кондиционирования воздуха** 134
2.1. Требования к управлению на основе общих принципов оптимизации. Критерии оптимизации управления 134
2.2. Использование принципа управления СКВ с переменной структурой 149
2.3. Схема каскадного регулирования 162
2.4. Системы связанного регулирования 170
2.5. Совместное использование принципа построения систем с переменной структурой и схем каскадного и связного регулирования 186
2.6. Техническое обеспечение управления СКВ 192
2.7. Алгоритм разработки автоматизированной СКВ . . . 199
Глава 3. **Технические средства автоматизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха** 203
3.1. Система промышленных приборов и средств автоматизации 203
3.2. Технические средства измерения температуры . . . 212
3.3. Технические средства измерения влажности 229
3.4. Технические средства измерения расхода 239
3.5. Регуляторы переменных, представляемых в форме унифицированного сигнала . . . 252
3.6. Устройства управления частотой вращения асинхронных электрических деталей . . . 268
3.7. Программируемые устройства 276
Глава 4. **Технические решения автоматизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха** 285
4.1. Общие сведения 285
4.2. Автоматизация приточных камер 289
4.3. Автоматизация управления процессами тепломассообмена 295
4.4. Автоматизация устройств утилизации выбросного тепла 297
4.5. Автоматизация автономных кондиционеров 306
4.6. Типовые решения автоматизации центральных неавтономных кондиционеров . . 313
4.7. Автоматизация центральных неавтономных кондиционеров на базе унифицированных узлов 315
4.8. Автоматизация СКВ, обеспечивающих энергосберегающую технологию обработки воздуха 317
Заключение 321
Список литературы 323