А. А. Калмаков, Ю. Я. Кувшинов,
С. С. Романова, С. А. Щелкунов

АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ

Под редакцией
д-ра техн. наук, проф. засл. деят. науки и техники
РСФСР В. Н. Богословского

Допущено
Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности
«Теплогазоснабжение и вентиляция»



Москва
Стройиздат
1986

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ББК 31.38
А 22
УДК [697.3+697.92]:658.52.011.56(075.8)

Рецензенты: кафедра отопления, вентиляции и теплоснабжения ЛИСИ (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. *В. М. Гусев*); кафедра теплотехники и газоснабжения ЛИСИ (зав. кафедрой — канд. техн. наук, проф. *Н. Л. Стаскевич*); канд. техн. наук *С. В. Нефелов*.

А 22 **Автоматика** и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции: Учеб. для вузов / А. А. Калмаков, Ю. Я. Кувшинов, С. С. Романова, С. А. Щелкунов; Под ред. В. Н. Богословского. — М.: Стройиздат, 1986. — 479 с.: ил.

Изложены теоретические, инженерные и методические основы динамики систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата (ТГС и СКМ) как объектов автоматизации. Даны основные понятия автоматического контроля и регулирования, телемеханики и диспетчеризации. Рассмотрены принципы разработки функциональных схем автоматического управления и существующие инженерные решения по автоматизации конкретных систем ТГС и СКМ.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция».

А $\frac{3206000000-281}{047(01)-86}$ 125—85

ББК 31.38+38.762.2
6С9.4

© Стройиздат, 1986

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсивное развитие гражданского и промышленного строительства, совершенствование систем тепло- и газоснабжения (ТГС), повышение требований к микроклимату зданий и сооружений, оснащаемых все более сложными и разнообразными системами кондиционирования микроклимата (СКМ) и системами автоматизированного инженерного оборудования, необходимость экономии топливно-энергетических ресурсов и охраны окружающей среды требуют подготовки инженеров, глубоко знающих технические средства и принципы автоматизации ТГС и СКМ.

В учебнике рассмотрены режимы работы, основы регулирования, автоматизации и управления этих систем, а также современные технические средства автоматики. Сделана попытка совместного рассмотрения технологических вопросов работы ТГС и СКМ, автоматического регулирования и управления этими системами.

Учебник написан в соответствии с учебной программой дисциплины «Автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции», разработанной в МИСИ им. В. В. Куйбышева и утвержденной учебно-методическим управлением по высшему образованию Минвуза СССР в 1984 г.

В основу создания учебника положены курсы лекций, читаемых в течение ряда лет в МИСИ на факультете «Теплогазоснабжение и вентиляция», и результаты научных исследований кафедр отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и автоматики в строительной индустрии, а также некоторые данные отечественных и зарубежных исследований и разработок по вопросам регулирования и автоматизации ТГС и СКМ. При подготовке рукописи использован отечественный и зарубежный материал, опубликованный в периодических изданиях, а также полученный авторами за время научных командировок в США, Англию и Западный Берлин.

Учебник предназначен для студентов строительных вузов, обучающихся по специальности 1208 «Теплогазоснабжение и вентиляция». Он может быть полезен студентам смежных специальностей, например, специальностей 1218 «Техническая эксплуатация зданий, оборудования и автоматических систем», 1220 «Строительство тепловых электростанций», а также аспирантам, инженерам и научным работникам, занимающимся вопросами работы, регулирования, автоматизации и управления систем ТГС и СКМ.

Над учебником работал коллектив кафедр автоматики в строительной индустрии и отопления, вентиляции, кондиционирования

Г. зак. 7526

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

воздуха и строительной теплофизики МИСИ им. В. В. Куйбышева под общим руководством д-ра техн. наук, проф. В. Н. Богословского.

Технологические вопросы режима работы СКМ и ТГС (гл. 1—3) освещены канд. техн. наук, доц. Ю. Я. Кувшиновым; основы автоматического регулирования (гл. 4—6) — канд. техн. наук, доц. А. А. Калмаковым; динамика элементов систем ТГС и СКМ (гл. 7) — Ю. Я. Кувшиновым и С. А. Щелкуновым, технические средства и устройства систем автоматизации (гл. 8—10) — инж. С. С. Романовой; автоматизация и управление ТГС и СКМ (гл. 11—18) — канд. техн. наук, доц. С. А. Щелкуновым.

Авторы выражают признательность коллективам кафедры отопления, вентиляции и теплоснабжения (зав. кафедрой — д-р техн. наук, проф. В. М. Гусев) и кафедры теплотехники и газоснабжения (зав. кафедрой — канд. техн. наук, проф. Н. Л. Стаскевич) Ленинградского инженерно-строительного института, д-ру техн. наук, проф. Б. Н. Юрманову (ЛИСИ) и канд. техн. наук С. В. Нефелову за ценные замечания и конструктивные предложения, сделанные при рецензировании рукописи.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ВВЕДЕНИЕ

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года предусмотрено повышение уровня автоматизации производства примерно в 2 раза, внедрение автоматизированных систем в различные сферы хозяйственной деятельности — в проектирование, управление оборудованием и технологическими процессами. Необходимо обеспечить дальнейшее развитие централизованного теплоснабжения потребителей путем строительства теплоэлектроцентралей и крупных районных котельных, в том числе атомных, снижение удельных расходов топлива и создание энергосберегающих технологий, увеличить изготовление экономичных теплообменников, отопительных приборов, кондиционеров и другого оборудования ТГС и СКМ, автоматизированных отопительных котлов и котельных установок, расширить для этих целей номенклатуру и производство приборов, оборудования и других средств автоматизации.

Все указанные вопросы не могут быть решены без ускорения социально-экономического развития страны на базе научно-технического прогресса. XXVII съездом КПСС поставлены конкретные задачи для скорейшего решения вопросов интенсификации производства, в том числе автоматизации, повышения качества и внедрения ресурсосберегающих технологий.

На теплоснабжение жилых, общественных и производственных зданий расходуется огромное количество топлива. Только отопительные котельные в городах и поселках РСФСР, число которых превышает 65 тыс., ежегодно потребляют свыше 180 млн. т условного топлива. В целом по стране на теплоснабжение зданий расходуется более одной трети энергетических ресурсов.

Уже в течение многих лет ведутся работы по созданию средств автоматизации теплоснабжения. Новый импульс этим работам дали постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР о мерах по сокращению потерь теплоты в зданиях, тепловых сетях и об основных направлениях повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в народном хозяйстве.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Энергетической программой СССР, которая определяет стратегию развития энергетики страны на длительную перспективу, предусматривается дальнейшее повышение уровня централизации теплоснабжения за счет сооружения ТЭЦ и районных, в том числе атомных, тепловых центров.

Особое внимание в Программе обращается на необходимость повышения эффективности теплоснабжения за счет разработки новых совершенных конструкций, оснащения их средствами автоматики. Необходимость комплексной автоматизации энергосистем подтверждается прежде всего тем, что она позволяет на 15—20% сократить расходы энергии. Сроки окупаемости капитальных вложений на устройство таких систем оказываются короче нормативных, и эти вложения значительно меньше затрат на добычу топлива, экономию которого обеспечивает автоматизация. С 1982 г. проводится широкий эксперимент по комплексной автоматизации систем централизованного теплоснабжения и потребителей тепловой энергии в ряде городов нашей страны.

Однако потребление топлива на нужды теплоснабжения неуклонно продолжает увеличиваться. Реальными путями сокращения потреблений энергии в зданиях по-прежнему остаются: повышение качества теплозащиты зданий; совершенствование технологических схем и конструкций систем обеспечения микроклимата; автоматизация систем и оборудования; утилизация вторичных энергоресурсов; использование нетрадиционных источников энергии. Более 50% потребности в теплоте покрывается газовым топливом. Газ — хорошее экологическое топливо, использование которого, кроме того, позволяет полностью автоматизировать топочные процессы в котлах и эффективно эксплуатировать весь комплекс отопительных и производственных систем теплоснабжения. Относительно высокая степень автоматизации достигнута в котельных на твердом и жидком топливе.

В СССР предъявляются самые строгие в мире требования к качеству воздушной среды в закрытых помещениях, обеспечиваемой системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВ и КВ), к реализации мероприятий по охране труда и технике безопасности

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

на производстве, охране окружающей природной среды, в том числе защите атмосферного воздуха, от технологических и вентиляционных выбросов.

В настоящее время сумма ежегодных затрат на системы ОВ и КВ превышает 14 млрд. руб. Для работы систем ОВ и КВ расходуется до 40% твердого и газообразного топлива и до 10% вырабатываемой в стране электроэнергии. Существенная экономия топлива и электроэнергии возможна только при автоматизации процессов в системах теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата.

Отечественный и зарубежный опыт разработки и эксплуатации автоматизированных систем ТГС и СКМ показывает, что непременным условием развития автоматизации является не только совершенствование технических средств автоматики, но и комплексный совместно с ним анализ режимов работы и регулирования самих систем ТГС и СКМ.

В развитии технико-экономических предпосылок внедрения и использования автоматизации ТГС и СКМ и соответственно в развитии технических средств автоматизации можно выделить три характерных периода: начальный этап, этап комплексной автоматизации и этап автоматизированных систем управления.

Для начального этапа характерны избыток дешевой рабочей силы, низкая производительность труда, малая единичная мощность агрегатов и установок. Все это делает экономически целесообразным самое широкое участие человека в процессах управления материальным производством. Поэтому наблюдение за объектом, принятие и исполнение управляющих решений осуществлялись с помощью физического и умственного труда человека. Механизации и автоматизации подлежали только те отдельные процессы и операции, управление которыми человек не мог осуществлять достаточно надежно по своим психофизиологическим данным. Так, механизация исполнения команд (прообраз современного дистанционного управления) применялась только в тех случаях, когда мощность мускульных усилий человека не обеспечивала необходимой надежности и оперативности исполнения. Автоматизация управления затрагивала только стабилизацию параметров повышенной аварийной опас-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ности (таких, как уровень воды и давление пара в котлах, частота вращения паровых турбин и т. д.).

В целом начальный этап был этапом механизации и автоматизации отдельных процессов. Применение автоматизации не носило массового характера, а объем применяемых технических средств был ничтожен и их производство не являлось самостоятельной отраслью. Тем не менее именно на этом этапе сформировались некоторые современные принципы построения низших уровней автоматизации и, в частности, основы современного дистанционного управления с использованием электрических, пневматических и гидравлических двигателей для привода запорно-регулирующей арматуры. Переход к такому управлению вызвал переход от регуляторов прямого действия, использовавших для перемещения регулирующих органов энергию самой регулируемой среды, к более удобным в эксплуатации регуляторам непрямого действия.

Отметим характерную для данного этапа особенность реализации схемы регулирования. Все элементы и блоки, входящие в схему, компонуются в конструктивно едином устройстве — регуляторе. Такие типы компоновки средств регулирования используются на ряде объектов и агрегатов с относительно простыми задачами управления, причем в подобных случаях применяются иногда и регуляторы прямого действия.

Переход ко второму этапу — комплексной автоматизации производства — происходит в условиях роста производительности труда, укрупнения единичных мощностей агрегатов и установок и развития материальной и научно-технической базы автоматизации. Теперь человек-оператор в управлении все больше занимается умственным трудом, выполняя разнообразные логические операции при пусках и остановках объектов, особенно при возникновении всевозможных непредвиденных обстоятельств и предаварийных и аварийных ситуаций, а также оценивая состояние объекта, контролируя и резервируя работу автоматических систем.

На данном этапе формируются основы крупносерийного производства технических средств автоматизации, ориентированного на широкое применение стандартизации, специализации и кооперации. Широкие масштабы

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

производства средств автоматизации и известная специфика их изготовления приводят к постепенному выделению этого производства в самостоятельную отрасль.

Различные элементы, реализующие схему регулирования, не компонуются в едином устройстве, а изготовляются в виде ряда взаимосопрягающих блоков. Для построения регулятора требуются дополнительный монтаж и коммутация блоков. Это выгодно потребителю, так как позволяет разместить различные части оборудования автоматической системы в соответствии с оптимальными условиями работы и удобством эксплуатации и обслуживания, что оказывается выгодным и для производства средств автоматизации. Разделение сложных устройств-регуляторов на отдельные функциональные составляющие — блоки позволяет перейти к агрегатированию выпускаемой продукции. Все расширяющиеся масштабы производства и применения средств автоматизации приводят к необходимости унификации схемных и конструктивных решений выпускаемой продукции.

Отдельные блоки автоматической системы осознанно создаются как вычислительные устройства с жесткой программой и в подавляющем большинстве случаев как аналоговые. Использование аналогового принципа преобразования информации предопределяет применение локальных схем регулирования, где каждый регулирующий контур выполняется конструктивно самостоятельным (каждому контуру — свой регулятор).

Развитие электронной техники и широкое использование электроэнергии и электропривода стимулируют преимущественное развитие на данном этапе электрических средств регулирования (с электрической энергией как в качестве носителя информации, так и для питания исполнительных устройств).

Третий (современный) этап развития автоматизации может быть определен как этап автоматизированных систем управления (АСУ), появление которых совпало с разработкой и распространением вычислительной техники. На данном этапе становится целесообразной автоматизация все более сложных функций управления. Для этого потребовались автоматы высокого уровня, автоматы, способные осуществлять сложные вычислитель

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ные и логические операции преобразования информации. Центральной частью, основой таких автоматов стали программируемые, цифровые вычислительные машины (ЭВМ). Дополненные устройствами связи с объектом управления ЭВМ образуют информационно-управляющий вычислительный комплекс, являющийся технической основой современных АСУ. Однако в большинстве отраслей наряду с управляющими вычислительными машинами для реализации простейших функций управления все еще используются и традиционные аналоговые средства автоматизации.

Распространение современных АСУ во многом определяется состоянием техники отображения информации. Перспективными средствами отображения информации становятся электронно-лучевые индикаторы (дисплеи). Новая техника отображения информации позволяет отказаться от громоздких мнемосхем и резко сократить количество приборов, сигнальных табло и индикаторов на щитах и пультах управления.

Средства автоматического регулирования стареют физически относительно медленно. Большинство устройств автоматики при соблюдении правил эксплуатации и обслуживания имеет срок службы не меньший, чем срок морального износа основного оборудования. В то же время их моральная старость на современном этапе наступает значительно быстрее и, как правило, значительно раньше, чем основного оборудования. Часто все же оказывается целесообразным оставлять морально устаревшие средства автоматизации на тех самых объектах, где они первоначально установлены, и оснащать новейшими средствами новые объекты. Поэтому в современном промышленном производстве наряду с новейшими средствами в эксплуатации находятся иногда и относительно старые устройства автоматизации.

Чтобы определять степень морального износа средств автоматизации, вводится по аналогии с вычислительными машинами классификация технических средств по поколениям. Так, например, к первому поколению электрических средств автоматизации будем относить все средства, базирующиеся на использовании электронно-вакуумной техники; ко второму поколению — все устройства и системы, выполненные на базе полупроводниковой

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

техники, а устройства, базирующиеся на использовании интегральных схем, — к третьему поколению. К этому же поколению отнесем типы средств, построенные с использованием микропроцессорной техники, открывающей новые перспективы для все более широкого использования управляющих вычислительных систем.

Экономика отрасли, производящей средства автоматизации, требует широкой специализации предприятий по изготовлению крупных серий однотипных устройств. В то же время с развитием автоматизации, с появлением новых, все более сложных объектов управления и увеличением объема автоматизируемых функций возрастают требования к функциональному разнообразию устройств автоматизации и разнообразию их технических характеристик и конструктивных особенностей исполнения. Задача уменьшения функционального и конструктивного многообразия при оптимальном удовлетворении запросов автоматизируемых предприятий решается с помощью методов стандартизации.

Решениям по стандартизации всегда предшествуют системные исследования практики автоматизации, типизация имеющихся решений и научное обоснование экономически оптимальных вариантов и возможностей дальнейшего сокращения многообразия применяемых устройств. Принимаемые при этом решения после их практической проверки оформляются обязательными к исполнению государственными стандартами (ГОСТ). Более узкие по сфере применения решения могут оформляться и в виде отраслевых стандартов (ОСТ), а также в виде имеющих еще более ограниченную применимость стандартов предприятий (СТП).

В Советском Союзе производство средств автоматизации промышленного назначения осуществляется в основном на предприятиях Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР в рамках Государственной системы приборов и средств автоматизации промышленного назначения (ГСП).

Государственная система приборов включает все средства автоматизации, отвечающие единым общим техническим требованиям к параметрам и характеристикам точности и надежности средств, к их параметрам и особенностям конструктивного исполнения. Система наибо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

лее важных исходных требований к сигналам — носителям информации сформулирована ГОСТ 12997—76 «ГСП. Общие технические требования». В этом же стандарте указывается на предпочтительность изготовления средств автоматизации в рамках требований ГСП и предпочтительность блочно-модульного принципа их исполнения.

Введение ГСП позволяет расширять и частично модернизировать системы контроля и управления, оставляя без изменения устройства системы, не подлежащие замене, сокращает типоразмеры устройств, что обеспечивает серийность изготовления основных блоков и модулей, а также уменьшает комплект запасных частей. В перспективе ГСП станет по-существу единственной системой средств контроля и управления.

В связи с многообразием необходимых видов приборов и устройств целесообразно появление в рамках ГСП комплексов более узкого профиля, предназначенных для выполнения отдельных инженерных задач. Комплексы обладают широкими функциональными возможностями, позволяющими создавать самые разнообразные по сложности и структуре автоматизированные системы управления технологическими процессами, в том числе в системах ТГС и СКМ.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

РАЗДЕЛ I. СИСТЕМЫ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА КАК ОБЪЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

ГЛАВА 1. УПРАВЛЯЕМАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

Комплекс инженерных систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата предназначен для выработки тепловой энергии, транспортирования горячей воды, пара и газа по тепловым и газовым сетям к зданиям и использования этих энергоносителей для поддержания в них заданных параметров микроклимата, для производственных и хозяйственных нужд. Структурная схема системы теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата (ТГС и КМ) представлена на рис. 1.1.

Принципиально общую систему ТГС и КМ можно разделить на две части: первая состоит из наружных систем централизованного теплоснабжения и газоснабжения, вторая, являясь потребителем энергии, включает в свой состав здание и внутренние инженерные системы обеспечения микроклимата, хозяйственных и производственных нужд.

§ 1.1. Централизованные системы теплоснабжения и газоснабжения

Система централизованного теплоснабжения (СТС) — это комплекс генератора тепла (ТЭЦ или котельная) и тепловых сетей, предназначенный для снабжения теплотой потребителей — систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения.

Режим отпуска теплоты для отдельных видов потребителей различен. Если расход теплоты на отопление в основном зависит от параметров наружного климата, то потребление теплоты на горячее водоснабжение определяется расходом воды, который изменяется в течение суток по дням недели. Теплопотребление на вентиляцию и кондиционироваиие воздуха, в свою очередь, связано как

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

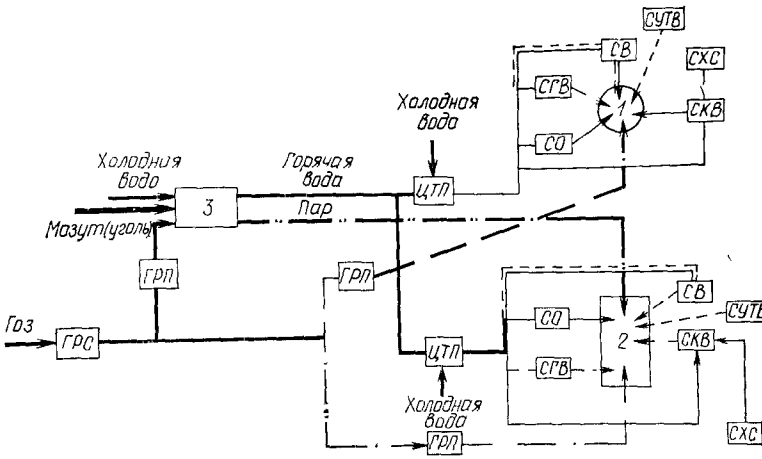


Рис. 1.1. Структурная схема системы теплогазохолодоснабжения и кондиционирования микроклимата

1 — жилые и общественные здания; *2* — промышленные здания; *3* — теплоэлектроцентраль (котельная); ГРС — газорегуляторная станция; ГРП — газорегуляторный пункт; ЦТП — центральный тепловой пункт; СО — система отопления; СГВ — система горячего водоснабжения; СВ — система вентиляции; СУТВ — система утилизации тепла выбросного воздуха; СХС — система холодоснабжения; СКВ — системы кондиционирования воздуха (комфортного и технологического)

с режимом работы потребителей, так и с изменением параметров наружного воздуха.

Надежное и экономичное снабжение теплотой всех категорий потребителей достигается путем управления работой централизованного теплоснабжения. Цель управления — обеспечение потребителей необходимым расходом теплоносителя с заданной температурой, т. е. обеспечение требуемого гидравлического и теплового режима системы. Эта цель достигается поддержанием заданных величин давления P, разности давления ΔP и температуры t в различных точках системы.

Изменение температуры в соответствии с изменением теплопотребления зданий осуществляется на ТЭЦ или в котельной. Теплоноситель от ТЭЦ транспортируется по магистральным тепловым сетям до кварталов и далее по распределительным или квартирным тепловым сетям до зданий или группы зданий. В крупных тепловых сетях, прежде всего в квартальных, где происходит резкое ко-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

лебание перепада давления теплоносителя, гидравлический режим отличается большой неустойчивостью. Для обеспечения нормального гидравлического режима тепловых сетей необходимо перед потребителями поддерживать такой перепад давления теплоносителя, который во всех случаях должен превышать минимальную величину, требуемую для нормальной работы теплопотребляющих установок, теплообменников, смесителей, насосов. При этом потребитель будет получать необходимый расход теплоносителя заданной температуры.

На рис. 1.2 показана принципиальная схема водяной двухтрубной закрытой системы централизованного теплоснабжения с указанием мест поддержания заданных параметров. Непосредственно на теплоприготовительной установке ТЭЦ *I* осуществляется централизованное поддержание температуры сетевой воды в подающем трубопроводе. Температура воды после основного пароводяного нагревателя *2* или теплового водогрейного котла *3* в зависимости от теплопотребления сети составляет 70—150°С. Перед сетевым насосом *1* поддерживается давление, величина которого определяется пьезометрическим графиком сети.

Поскольку путем централизованного управления на ТЭЦ или в котельной невозможно обеспечить необходимый гидравлический и тепловой режим у многочисленных потребителей теплоты, применяют промежуточные ступени поддержания температуры и давления воды — центральные тепловые пункты (ЦТП) *II*.

В ЦТП, как правило, в теплообменниках *7* приготовляется вода с температурой 65°С для горячего водоснабжения нескольких зданий. Для группы зданий с небольшими расходами теплоты при незначительном удалении их от ЦТП помимо горячей воды приготовляют также теплоноситель для систем отопления и вентиляции. Температура теплоносителя после ЦТП 70—150°С поддерживается с помощью насосов смешения *6* или отопительных водоподогревателей. Перепад давления перед ЦТП, обеспечивающий его нормальную работу, составляет 300—400 кПа.

На абонентских вводах *III* при наличии ЦТП без подготовки теплоносителя осуществляется местный режим отпуска теплоты на отопление в элеваторах *8* или тепло-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

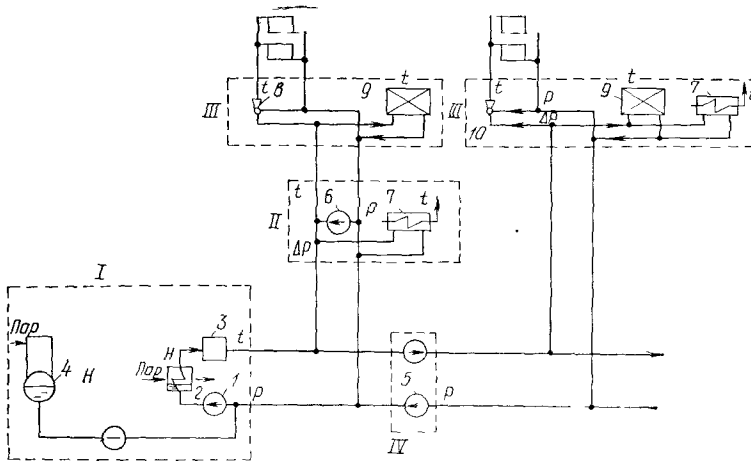


Рис. 1.2. Схема закрытой водяной системы централизованного теплоснабжения
I — теплоприготовительная установка ТЭЦ; *II* — центральный тепловой пункт; *III* — абонентский ввод; *IV* — насосная подстанция

обменниках. Здесь же в калориферах *9* нагревается приточный воздух. При схемах без ЦТП в абонентских вводах *10* обеспечиваются отпуск теплоты на отопление и требуемая температура горячей воды. Перепад давления перед ЦТП без циркуляционных насосов составляет 100—250 кПа.

В тепловых сетях большой протяженности с неблагоприятным рельефом местности возникает необходимость сооружения насосных подстанций, которые обычно являются дополнительной ступенью поддержания требуемого гидравлического режима тепловой сети за подстанцией путем поддержания давления перед насосом *5*.

Для нормальной работы теплоприготовительной установки в ней предусматривают поддержание заданного уровня *H* конденсата в пароводяных нагревателях *2* и деаэраторах подпиточной воды *4*.

Приведенная схема предусматривает изменение отпуска теплоты потребителям вследствие изменения температуры теплоносителя при постоянном расходе. Возможны другие способы изменения отпуска теплоты, когда температура теплоносителя остается постоянной, а изменяется расход теплоносителя или одновременно изменяются и температура и расход.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

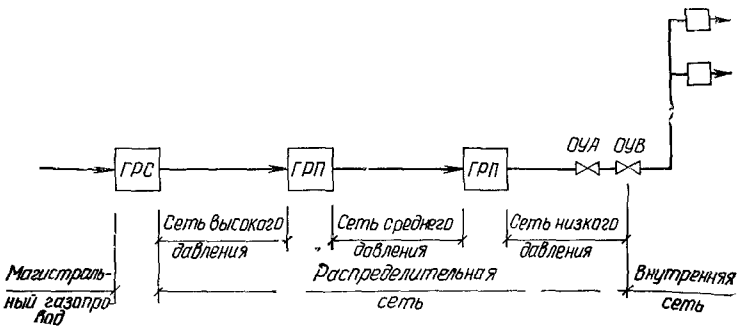


Рис. 1.3. Принципиальная схема городской системы газоснабжения
ГРС — газораспределительная станция; ГРП — газораспределительный пункт; ОУА и ОУВ — отключающие устройства на абонентском вводе и на вводе газопровода в здание

Централизованные городские системы газоснабжения предназначены для снабжения газом генераторов тепла, а также непосредственно жилых, общественных и промышленных зданий.

Все виды городского потребления газа можно сгруппировать следующим образом: а) бытовое потребление в квартирах; б) потребление в коммунальных и общественных предприятиях; в) потребление на отопление и вентиляцию зданий; г) промышленное потребление.

Современная городская система газоснабжения (рис. 1.3) включает газовые сети высокого, среднего и низкого давления, газораспределительные станции (ГРС), газорегуляторные пункты (ГРП) и установки (ГРУ), внутренние домовые сети и заканчивается газовыми горелками. Для повышения надежности газоснабжения газовые сети кольцуют.

Потребление газа изменяется по месяцам года, дням недели и календарным дням, а также по часам суток. Причем каждой из категорий потребителей присущ свой характерный график неравномерности потребления газа во времени, что приводит к переменному гидравлическому режиму газовых сетей. Управление гидравлическим режимом систем газоснабжения ведется путем поддержания постоянного давления в отдельных частях сети независимо от интенсивности потребления газа.

Особенностью распределительных газовых сетей является то, что в них отсутствуют нагнетатели, поэтому на

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

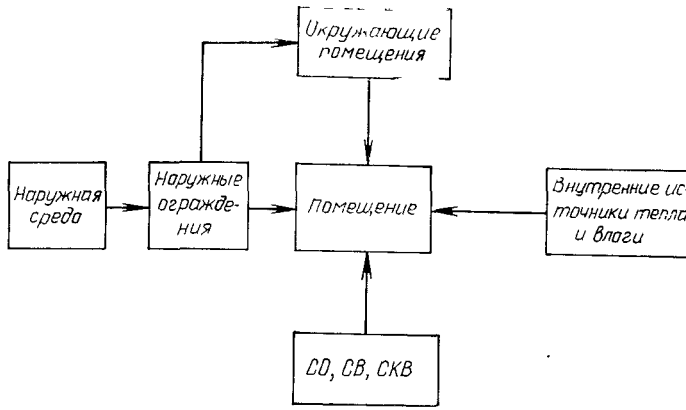


Рис. 1.4. Структурная схема СКМ

входе в сеть газ имеет существенное избыточное давление. Требуемое давление в сети обеспечивается редуцированием в ГРС, ГРП и ГРУ. Кроме того, в ГРС и ГРП предусматривают устройства для отключения подачи газа при недопустимом повышении или понижении давления в сети.

При подборе регулирующих устройств следует учитывать пределы изменения давления газа, которое в сетях высокого давления составляет 0,3—1,2 МПа, среднего давления — 5 кПа — 0,3 МПа, низкого давления — 2—5 кПа, во внутридомовых сетях — менее 2 кПа.

§ 1.2. Система кондиционирования микроклимата

Система кондиционирования микроклимата (СКМ) (рис. 1.4) включает комплекс градостроительных, объемно-планировочных и конструктивных средств, которые в совокупности с системами отопления (СО), вентиляции (СВ), кондиционирования воздуха (СКВ) служат для поддержания в помещениях зданий заданных параметров микроклимата.

Потоки тепла, влаги и воздуха, проходящие через наружные ограждения, оказывают влияние на внутреннюю среду. Помимо потоков, проходящих через наружные ограждения, в помещение поступают потоки тепла, влаги,

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

воздуха от внутренних источников и из соседних помещений, также воздействующие на микроклимат. Изменяющиеся во времени потоки энергии и вещества, передаваемые в помещение от наружной среды и внутренних источников, избыток или недостаток которых приводит к нарушению внутренних условий, являются **возмущающими воздействиями** на микроклимат.

Приведение внутренних условий к заданным осуществляется регулирующими воздействиями на микроклимат. Регулирующими являются потоки тепла, влаги, воздуха, подаваемые в помещение и поглощаемые системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Каждая из систем комплекса имеет определенное назначение.

Система отопления предназначена для поддержания в помещении заданных температурных условий в течение отопительного периода. В ряде случаев системы отопления могут выполнять роль защиты наружных ограждений от выпадения на их поверхности конденсата.

Поддержание температуры воздуха на определенном уровне достигается изменением количества теплоты, передаваемой в помещение отопительными приборами.

Теплоотдача отопительного прибора, Вт, равна:

$$Q = 0{,}278\, G c\, (t_{вх} - t_{вых}) \qquad (1.1)$$

где G — расход теплоносителя, кг/ч; c — удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°С); $t_{вх}$, $t_{вых}$ — температура теплоносителя на входе и на выходе из прибора, °С.

Как видно из формулы (1.1), теплоотдачу отопительного прибора можно регулировать путем изменения расхода G или температуры теплоносителя на входе $t_{вх}$. Кроме того, уменьшение теплового потока, вносимого системой отопления, достигается отключением на определенное время всех приборов или их части (прерывистое отопление).

Максимальная температура теплоносителя в системе определяется допустимой температурой на поверхности отопительного прибора, которая зависит от вида прибора и функционального назначения помещения. Для промышленных зданий температура теплоносителя может достигать 130—150°С, в общественных и жилых зданиях она ограничена 95°С (допускается 105°С), в помещениях с

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

повышенными санитарными требованиями — 85°С, а в случае применения систем панельно-лучистого отопления — 45°С.

В отечественной практике наиболее распространен способ изменения теплопроизводительности СО изменением температуры теплоносителя. Возможность использования переменного расхода теплоносителя в абонентском вводе для системы в целом ограничена опасностью разрегулировки, т. е. перераспределения расхода теплоносителя в отдельных кольцах циркуляции и неравномерной теплоотдачи приборов. Переменный расход теплоносителя наиболее целесообразно использовать непосредственно в отдельных отопительных приборах, что возможно в двухтрубных системах отопления. Индивидуальное регулирование теплоотдачи приборов обеспечивает надежное поддержание заданной температуры воздуха в помещении при наименьших расходах тепловой энергии на его отопление.

Оборудование абонентских вводов, в которых осуществляется поддержание требуемых $t_{вх}$ и G, определяется видом присоединения системы к тепловым сетям (рис. 1.5).

При *непосредственном присоединении* СО (рис. 1.5, *а*), которое применяется в промышленных зданиях или в жилых при наличии ЦТП с узлом приготовления теплоносителя для СО, расход теплоносителя G можно регулировать изменением перепада давления ΔP в подающем и обратном трубопроводах.

В жилых и общественных зданиях широко применяется *элеваторная схема зависимого присоединения* СО (рис. 1.5, *б*). Элеватор служит смесителем воды и побудителем циркуляции в системе. Так как элеватор имеет постоянный коэффициент смешения, при уменьшении потребности здания в теплоте в нем не удается сократить расход сетевой воды. При сохранении ее температуры в переходные периоды года это приводит к перерасходу теплоты системой.

В последнее время делаются попытки внедрения элеваторов с регулируемым соплом, т. е. с переменным выходным сечением сопла, что позволит в определенных пределах изменять коэффициент смешения и расширит область применения элеваторов.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

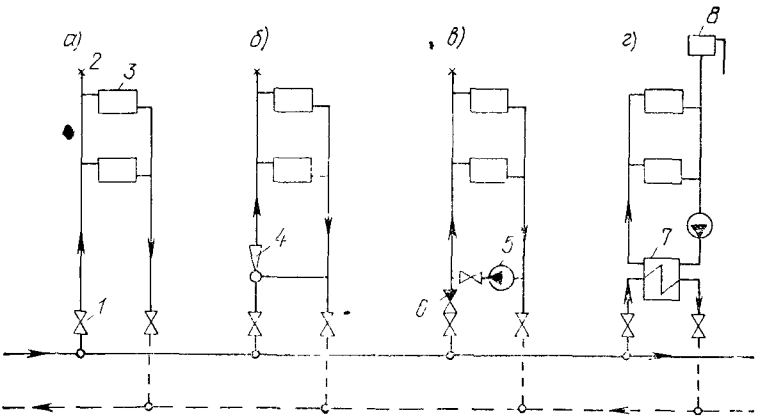


Рис. 1.5. Схемы присоединения системы отопления к тепловым сетям
1 — задвижка; *2* — воздушный кран; *3* — отопительный прибор; *4* — элеватор; *5* — насос; *6* — обратный клапан; *7* — водонагреватель; *8* — расширительный бак

В тех случаях когда применение элеваторов нецелесообразно, а также при недостаточном перепаде давления на вводе используют смесительные насосы (рис. 1.5, *в*). Эта схема является наиболее гибкой, так как обеспечивает изменение расхода теплоносителя в широких пределах. Ее применение сдерживается отсутствием малошумных бесфундаментных смесительных насосов.

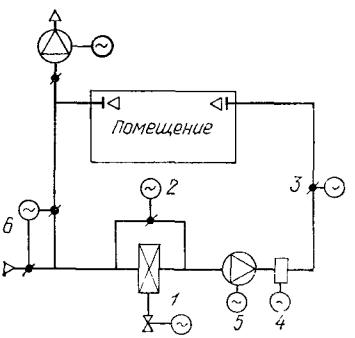


Рис. 1.6. Фуикциональная схема системы вентиляцин

Наиболее надежной и энергетически эффективной является схема *независимого присоединения системы* к тепловым сетям через водоводяной теплообменник (рис. 1.5, *г*). При такой схеме гидравлический режим системы отопления не связан с гидравлическим режимом тепловых сетей. Появляется возможность изменения температуры и расхода теплоносителя в широких пределах,

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

что в сочетании с индивидуальным изменением теплоотдачи отопительных приборов позволяет обеспечивать требуемые внутренние температурные условия при минимальном расходе энергии зданием.

Системы вентиляции предназначены для создания в помещении необходимого воздухообмена с целью обеспечения санитарно-гигиенических условий или исходя из технологических требований. СВ удаляют из помещения вредные вещества и подают в него свежий наружный воздух.

Воздухообмен в помещении, м³/ч, из условия разбавления того или иного вида вредных веществ должен быть

$$L = \frac{W}{k_в - k_н}, \qquad (1.2)$$

где W — избыточное количество тех или иных вредных веществ в рабочей зоне помещения; $k_в$, $k_н$ — содержание вредных веществ в единице объема соответственно внутреннего и наружного воздуха.

В помещении может выделяться одновременно несколько видов вредных веществ (избыточная теплота, влага, пары, газы, аэрозоли), поэтому воздухообмен в помещении принимается наибольший из определенных по формуле (1.2) значений.

Из (1.2) следует, что

$$k_в = k_н + \frac{W}{L},$$

т. е. величина $k_в$ целиком определяется содержанием вредных веществ в наружном воздухе $k_н$ и величиной L. Так как величина $k_н$ в большинстве случаев является неуправляемой, то поддержание заданного $k_в$ с помощью системы вентиляции достигается изменением L. Приточные СВ обычно оборудуются калориферами, поэтому в холодное время года поддержание требуемой температуры воздуха в помещении $t_в$ возможно путем изменения температуры приточного воздуха $t_{пр}$.

На рис. 1.6 приведена функциональная схема общеобменной приточно-вытяжной вентиляции.

В общем случае в СВ температура $t_{пр}$ поддерживается регулированием теплопроизводительности калорифера *1* или перепуском части воздуха в байпас *2*. В рециркуляционных СВ поддержание $t_{пр}$ на определенном

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

уровне возможно путем изменения соотношения количества смешиваемого наружного и внутреннего воздуха в узле *6*.

Регулирование расхода приточного воздуха возможно изменением характеристики вентиляционной сети *3* и характеристики вентилятора *5* при изменении частоты вращения и с помощью направляющего аппарата *4*. В помещениях, обслуживаемых несколькими вентиляционными установками, расход воздуха можно сократить, отключив часть установок.

Работа систем вентиляции с переменным расходом воздуха оказывается особенно эффективной с энергетической точки зрения при малой доле наружного воздуха в общем объеме приточного воздуха, причем наибольшую экономию электроэнергии при сокращении расхода воздуха можно получить путем изменения частоты вращения вентилятора.

Системы кондиционирования воздуха предназначены для поддержания в помещениях оптимальных температуры и влажности воздуха исходя из комфортных или технологических требований к параметрам внутреннего воздуха.

Заданные температуру и влажность воздуха можно обеспечить путем поддержания на определенном уровне температуры $t_{пр}$ и влагосодержания $d_{пр}$ приточного воздуха. При изменении $t_{пр}$ и $d_{пр}$ в широких пределах установки кондиционирования воздуха оборудуют (рис. 1.7) теплообменниками первого *1* и второго *3* подогрева, воздухоохладителями и оросительными камерами *2*. В этих целях используются также первая *4* и вторая *5* рециркуляции, обвод *6* воздухоохладителей или оросительной камеры.

Заданная температура приточного воздуха обеспечивается в результате нагрева в калориферах первого и второго подогрева, охлаждения в поверхностных воздухоохладителях и оросительных камерах, а также при смешении в смесительных камерах.

Необходимое влагосодержание приточного воздуха поддерживается путем смешения наружного и рециркуляционного (обработанного или необработанного) в результате пароувлажнения и испарения мелкодисперсно

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

распыленной воды непосредственно в помещении, а также влагообмена в оросительной камере.

Теплохолодопроизводительность СКВ можно регулировать изменением расхода приточного воздуха.

Теплоснабжение калориферов первого подогрева в СКВ (как и калориферов систем приточной вентиляции) осуществляется, как правило, сетевой водой, поэтому регулирование их теплопроизводительности возможно путем изменения как температуры, так и расхода теплоносителя.

Воздух, обрабатываемый в теплообменниках кондиционеров, перемещается со скоростью 1,5—6 м/с (в большинстве случаев около 3 м/с), при этом разность температуры воздуха на выходе из калориферов первого подогрева и на входе в них достигает 50°С.

Нецелесообразно присоединять калориферы второго (местного или зонального) подогрева в СКВ к тепловым сетям, так как потребление теплоты этими калориферами не зависит непосредственно от температуры наружного воздуха, т. е. не связано с режимом отпуска теплоты в теплосети.

Тепловую мощность калориферов второго подогрева можно регулировать, изменяя расход теплоносителя при постоянной температуре. Для обеспечения постоянной температуры воды используют смесительные устройства, в которых вода из тепловой сети с температурой 150—70°С смешивается с обратной водой из калориферов, имеющей, как правило, температуру 40—50°С.

Калориферы второго подогрева можно присоединять к обратной магистрали или к теплофикационной сети по независимой схеме.

Системы холодоснабжения предназначены для снабжения холодом воздухоохладителей и оросительных камер СКВ. Системы холодоснабжения включают источник холода, трубопроводы, баки-аккумуляторы. Для холодоснабжения СКВ применяют прямое и косвенное испарительное охлаждение, артезианскую воду, лед.

Наиболее распространенными источниками холода являются холодильные машины: поршневые, компрессионные, абсорбционные и пароэжекторные. В качестве

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

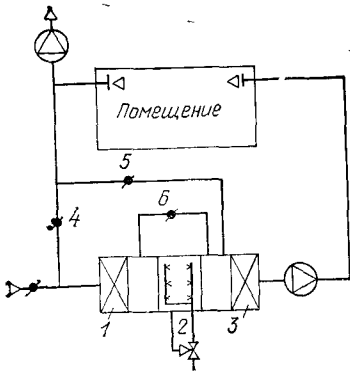


Рис. 1.7. Функциональная схема центральной системы кондиционирования воздуха

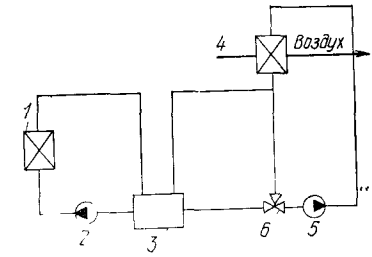


Рис. 1.8. Принципиальная схема системы холодоснабжения центрального кондиционера

хладоагента в поршневых и компрессионных холодильных машинах, как правило, используется хладон.

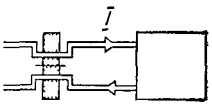
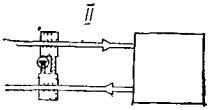
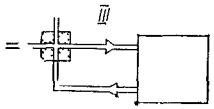
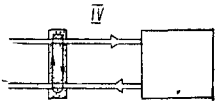
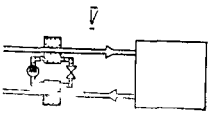
Непосредственное охлаждение воздуха в испарителе холодильной установки осуществляется в местных автономных кондиционерах холодопроизводительностью до 60 кВт. Центральные СКВ обслуживают холодильные станции из двух или более холодильных машин, в испарителях которых охлаждается вода.

Принципиальная схема системы холодоснабжения приведена на рис. 1.8. Охлажденная в испарителе *1* холодильной установки вода подается насосом *2* в бак *3*. Питание холодной водой воздухоохладителя или оросительной камеры осуществляется из бака *3* с помощью насоса *5* через смесительное устройство *6*. Перепад температуры воды на входе и на выходе из охлаждающего устройства обычно составляет 3°С. Снижение температуры воздуха в теплообменнике *4* составляет 10—15°С. Холодопроизводительность оросительных камер регулируется изменением начальной температуры воды путем изменения соотношения расхода холодной воды из бака *3* и из теплообменника *4* в смесительном устройстве *6*. Холодопроизводительность поверхностных воздухоохладителей можно также регулировать, изменяя расход холодной воды.

Системы утилизации теплоты вытяжного воздуха в последнее время широко применяют в общественных и

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 1.1. СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВЫБРОСНОГО ВОЗДУХА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Схемы утилизации	Тип утилизатора	Способ снижения теплопроизводительности
	Вращающийся регенеративный теплообменник с пористой насадкой для утилизации теплоты, холода и влаги	Изменением частоты вращения, байпасированием наружного или вытяжного воздуха
	Теплообменники с промежуточным теплоносителем для утилизации теплоты	Изменением расхода промежуточного теплоносителя или байпасированием части воздуха либо промежуточного теплоносителя
	Воздухо воздушный рекуперативный теплообменник для утилизации теплоты	Байпасированием части воздуха или перекрытием части сечения пластинчатого теплообменника
	Теплообменник с тепловыми трубками (неподвижными или поворачивающимися)	Байпасированием части воздуха или изменением угла наклона тепловых трубок
	Теплонасосная установка	Байпасирование части воздуха

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

промышленных зданиях. Они предназначены для улавливания низкопотенциального тепла, холода и влаги выбросного воздуха и предварительного нагрева, увлажнения или осушки приточного воздуха, что позволяет снизить нагрузку на основные теплообменники и экономить энергетические ресурсы.

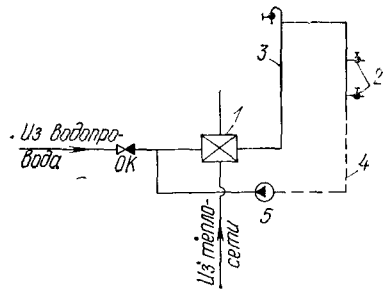


Рис. 1.9. Принципиальная схема системы горячего водоснабжения

В настоящее время существует множество способов утилизации теплоты вытяжного воздуха, имеющих различную эффективность и область применения. Основные, наиболее распространенные способы приведены в табл. 1.1.

В процессе утилизации теплота от удаляемого вытяжного воздуха передается наружному приточному воздуху. Причем этот процесс может осуществляться в одном теплообменнике или аппарате (схемы *I*, *III*, *IV*) или в разных, соединенных между собой контуром циркуляции рабочей жидкости (схемы *II*, *V*).

Наибольшая эффективность утилизации теплоты обеспечивается при низких температурах наружного воздуха. С повышением температуры наружного воздуха количество утилизированной теплоты уменьшается, а температура приточного воздуха после утилизатора возрастает. Начиная с некоторой температуры наружного воздуха возникает необходимость в снижении теплопроизводительности СУТВ, что достигается различными способами (см. табл. 1.1).

Поверхность теплообмена в контуре вытяжного воздуха в течение значительного периода имеет температуру ниже температуры точки росы, что приводит к конденсации влаги, а при отрицательных температурах — к инееобразованию, которое может в конечном итоге привести к полному выводу теплообменников из работы. В связи с этим нормальное функционирование утилизаторов невозможно без устройств, предотвращающих замерзание влаги на их поверхностях. Для предотвращения

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

замерзания используют предварительный подогрев наружного воздуха либо предусматривают обвод теплообменников в контуре наружного воздуха.

Системы горячего водоснабжения обеспечивают потребителей горячей водой для бытовых и хозяйственных нужд. Температура горячей воды в точках водоразбора в зависимости от вида потребителя и системы составляет 50—80°С.

Наибольшее распространение получила циркуляционная СГВ (рис. 1.9). В таких системах вода нагревается в теплообменнике *1* и поступает к водоразборным кранам *2* по трубопроводам *3*. При отсутствии водоразбора осуществляется циркуляция воды через теплообменник *1* по циркуляционному трубопроводу *4* с помощью насоса *5* или вследствие гравитационных сил. В зависимости от назначения систем циркуляция воды может осуществляться круглосуточно или периодически перед началом водоразбора.

Для выравнивания потребления горячей воды, которое характеризуется значительной неравномерностью, используют баки-аккумуляторы.

Задача управления СГВ — обеспечить у потребителя заданную температуру воды при переменном потреблении ее, что достигается изменением расхода сетевой воды, проходящей через теплообменник *1*. При выборе режима работы теплообменника следует учитывать также переменную температуру сетевой воды.

ГЛАВА 2. ПРОЦЕССЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ МИКРОКЛИМАТ ПОМЕЩЕНИЯ

§ 2.1. Параметры микроклимата помещений

Параметрами микроклимата, поддержание которых обеспечивается системой кондиционирования микроклимата, являются температура воздуха $t_в$, радиационная температура помещения t_R, влагосодержание $d_в$ или относительная влажность воздуха $\varphi_в$, подвижность воздуха $v_в$ и концентрация в воздухе вредных веществ (паров, газов, аэрозолей).

Параметры микроклимата устанавливаются в зависимости от санитарно-гигиенических (комфортных) или

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

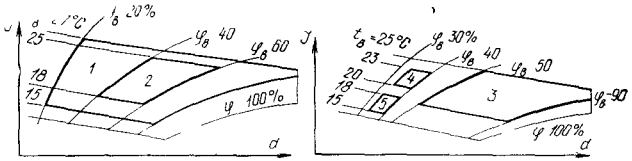


Рис. 2.1. Области сочетания температуры и влажности воздуха, оптимальные по технологическим требованиям для производств бумажной и полиграфической промышленности (*1*), точного машиностроения (*2*), текстильной промышленности (*3*), электротехнической промышленности (*4*) и химической промышленности (*5*)

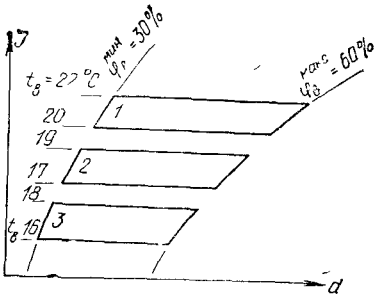


Рис. 2.2. Области сочетания температуры и влажности воздуха, оптимальные по санитарно-гигиеническим требованиям в холодное время года для легкой работы (*1*), средней тяжести (*2*) и тяжелой работы (*3*)

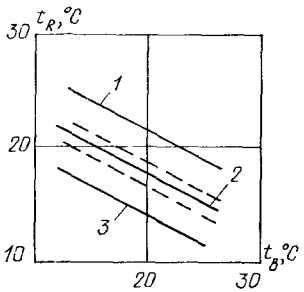


Рис. 2.4. Комфортное сочетание температуры воздуха и радиационной температуры в холодное время года для легкой работы (*1*), средней тяжести (*2*) и тяжелой работы (*3*)

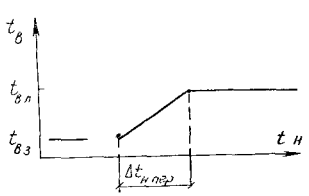


Рис. 2.3. Изменение температуры внутреннего воздуха в течение года

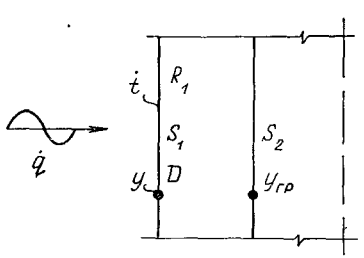


Рис. 2.5. К определению показателя теплоусвоения поверхности

технологических требований к условиям внутренней среды. При назначении параметров по технологическим требованиям учитывается многообразие их связей с технологическим процессом. Для большинства производств основными параметрами, влияющими на качество про-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

дукции, оказываются температура и влажность воздуха. На рис. 2.1 в I — d-диаграмме показаны области сочетания $t_в$ и $\varphi_в$, оптимальные по технологическим требованиям.

Следует иметь в виду, что отклонение температуры и влажности воздуха от оптимальных по-разному влияет на качество продукции в различных технологических процессах. Так, влажность текстильных материалов оказывает существенное влияние на прочность и другие показатели качества пряжи и изделии, причем отклонение относительной влажности воздуха на 5% может повлиять на влажность, например, хлопковых волокон сильнее, чем изменение температуры воздуха на 10°С. Относительная влажность воздуха, которая определяется температурой и влагосодержанием, в ряде случаев может поддерживаться одновременным изменением $t_в$ и $d_в$ таким образом, чтобы $\varphi_в$ оставалась неизменной.

В других производствах технологические требования ограничивают отклонение температуры. Как, например, в станко- и машиностроении уровень температуры часто не имеет существенного значения, а важно соблюдать ее отклонение. Отклонение от оптимальной по технологическим требованиям температуры воздуха обычно допускается $\pm(0{,}1—0{,}5)$°С, а относительной влажности $\pm(2—5)$ %.

Параметры микроклимата, обеспечивающие комфортное самочувствие человека, подразделяют в зависимости от назначения здания на оптимальные и допустимые. Области сочетания оптимальной температуры и влажности воздуха, удовлетворяющие санитарно-гигиеническим требованиям, приведены на рис. 2.2.

В отличие от параметров, назначаемых по технологическим требованиям, параметры, обеспечивающие комфортность тепловой обстановки, различны для разных периодов года. Прежде всего это относится к температурным условиям. Переход от зимних к летним (или наоборот) значениям температуры воздуха может происходить скачкообразно в определенное время переходной части года. С точки зрения энергопотребления системами более экономичным может оказаться плавное изменение температуры (рис. 2.3). Температура воздуха в этом случае в интервале изменений наружной темпера-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

туры $\Delta t_н$ изменяется произвольно, не выходя за пределы расчетных летнего $t_{в\,л}$ и зимнего $t_{в\,з}$ значений.

Отклонения $t_в$ и $\varphi_в$ от оптимальных по санитарно-гигиеническим требованиям допускаются большими, чем по технологическим: для $t_в$ $\pm(1—1{,}5)$°С, для $\varphi_в$ $\pm5—10\%$.

Допустимые отклонения температуры воздуха могут быть с разным знаком. При поддержании параметров микроклимата по технологическим требованиям направление отклонения их, очевидно, не имеет значения, так как они поддерживаются практически на одном уровне круглый год.

При обеспечении комфортных условий необходимо учитывать знак отклонения. Так, в холодное время года в качестве расчетного следует рассматривать отклонение температуры воздуха в сторону ее снижения (со знаком минус), а в теплое время года — в сторону превышения (со знаком плюс). Это обусловлено как ощущением человеком теплового комфорта в разные периоды года, так и необходимостью ограничения энергопотребления системами.

В помещениях, где обеспечиваются комфортные внутренние условия, поддержание заданных сочетаний $t_в$ и $\varphi_в$, показанных на рис. 2 3, оказывается недостаточным. Это связано с тем, что на теплоощущение человеком в определенной мере влияет радиационная температура t_R, которую принято определять как средневзвешенную по коэффициентам облученности

$$t_R = \Sigma\, \varphi_{ч-i}\, \tau_i, \qquad (2.1)$$

где $\varphi_{ч-i}$ — коэффициенты облученности с человека на отдельные поверхности с температурой τ_i при положении человека в середине помещения.

В расчетах t_R допускается принимать равной осредненной температуре поверхностей в помещении. На рис. 2 4 сплошными линиями показаны сочетания $t_в$ и t_R, соответствующие комфортному самочувствию человека в холодное время года.

Физическая сущность процессов, формирующих параметры микроклимата, различна. Этим объясняются неодинаковые возможности системы кондиционирования микроклимата по стабилизации разных параметров, обу-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

словленные прежде всего инерционностью процесса их изменения во времени.

Интенсивность и величина изменения $t_в$ зависят от природы и интенсивности возмущающего и регулирующего теплового потока и теплоинерционных свойств помещения. Так, при подаче в помещение «чисто» конвективного потока теплоты изменение $t_в$ будет малоинерционным. Поступление «чисто» лучистого потока теплоты с той же интенсивностью приведет к меньшему изменению $t_в$ по величине с существенным запаздыванием по времени, так как лучистое тепло сначала воспринимается поверхностями и лишь затем передается воздуху.

Радиационная температура помещения изменяется всегда значительно медленнее, чем $t_в$, и на меньшую величину за счет теплоаккумуляционных свойств ограждений. Следует иметь в виду, что t_R как производная температуры поверхностей является в большинстве случаев неуправляемой. Это затрудняет прямое поддержание заданного значения t_R в помещениях, не оборудованных специальными системами радиационного отопления — охлаждения.

Наиболее изменчивые параметры микроклимата — влажность и концентрация вредных веществ в воздухе. Изменение этих параметров в вентилируемых помещениях зависит от скорости молекулярной диффузии или перемешивания. Процессы сорбции и десорбции влаги и газов поверхностями ограждений помещений и оборудования и аккумуляции их объемом воздуха помещения, имеющие при изменении параметров слабо выраженный нестационарный характер, малоинерционны, поэтому влажность воздуха и концентрация газов изменяются быстро. Отмеченные особенности формирования того или иного параметра микроклимата в значительной степени влияют на быстроту доведения его до заданного значения с помощью СКМ.

Помимо вынужденных колебаний параметров, связанных с возмущающими воздействиями, возможно целенаправленное их изменение во времени в течение суток.

Как показали исследования последних лет, изменение параметров воздуха с определенной частотой благоприятно воспринимается человеком — снижает утомляемость и повышает производительность труда. Такая концепция

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

получила название «динамического микроклимата», под которым понимается периодическое колебание параметров воздуха в помещении около их средних значений.

Наиболее предпочтительным можно считать колебание температуры воздуха около оптимального уровня с амплитудой 2—3° и периодом 40—120 мин. Благоприятно воспринимаемое колебание подвижности воздуха имеет амплитуду 0.2—0,5 м/с с периодом 10—20 мин (в теплое время года).

При сменном режиме работы поддержание комфортных, а в ряде случаев и технологических параметров микроклимата помещений можно обеспечивать лишь в рабочее время суток. В нерабочее время параметры могут изменяться произвольно, не отклоняясь от предельно допустимых значений. В этом случае перед началом рабочего времени суток предусматривается работа системы в форсированном режиме для доведения параметров до заданного уровня.

Формирование параметров микроклимата определяется многими факторами: аэродинамикой приточных вентиляционных струй, наличием нагретых и охлажденных поверхностей, расположением источников и стоков теплоты и др.

В помещениях большого объема (промышленных, зрелищных, спортивных) со значительными выделениями теплоты температура воздуха изменяется по высоте. В таких помещениях выделяют зону постоянного пребывания людей, обычно высотой 2 м от пола, которая называется обслуживаемой (рабочей). Системы кондиционирования микроклимата предназначены для обеспечения заданных параметров лишь в рабочей зоне.

При неравномерном расположении по площади помещения достаточно мощных источников теплоты возможна значительная неравномерность температуры воздуха в плане. В помещениях с развитой площадью поверхности остекления параметры микроклимата в приоконной зоне отличаются от параметров в глубине помещения. В связи с распределенностью параметров микроклимата в плане и по высоте помещения требуется обоснованный выбор мест расположения датчиков параметров, которые должны давать объективную оценку о их состоянии.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 2.2. Тепловой режим помещения

Параметры микроклимата помещений формируются в условиях теплового, влажностного и воздушного режимов здания. Физические процессы, лежащие в основе формирования микроклимата в помещении, являются главным объектом управления.

Разработка способов и технических средств управления микроклиматом невозможна без соответствующих обоснований, которые, в свою очередь, должны базироваться на описании физических процессов.

С точки зрения обеспечения тепловых условий в помещении, определяющим является его тепловой режим. Физическая сущность и математическое описание теплового режима помещения изложены в соответствующих учебниках и монографиях.

При решении задачи автоматизации СКМ возникает необходимость рассчитывать изменение во времени $t_в$ и t_R в двух случаях: во-первых, при определении тепловой нагрузки на СО, СВ и СКВ с целью выявления режима их работы, т. е. изменения в течение суток и года требуемой тепловой мощности этих систем. Изменение температурных условий при этом рассматривается, как правило, с суточным периодом; во-вторых, изменение температуры воздуха и радиационной температуры помещения анализируется при кратковременных тепловых воздействиях с целью оценки динамических тепловых свойств помещений как объектов регулирования.

Наличие в помещении источников и стоков теплоты вызывает обмен теплом между отдельными элементами помещения. В обмене теплом участвуют: воздух основного (не занятого струйными течениями) объема помещения; поверхности, обращенные в помещение; объемы струй воздуха; внешние среды (наружный воздух, теплохладоноситель в приборах системы отопления — охлаждения).

Существуют следующие виды теплообмена: конвективный, который возникает между воздухом и поверхностями ограждений, оборудования и приборов систем отопления — охлаждения; лучистый, протекающий между отдельными поверхностями; струйный,

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

происходящий в результате турбулентного перемешивания неизотермических струй с воздухом основного объема помещения.

Внутренние поверхности наружных ограждений передают теплоту наружному воздуху, в основном в результате теплопроводности через толщу ограждений и теплообменом, а поверхности приборов — теплохладоносителю систем. Поверхности внутренних ограждений таким же образом передают теплоту в соседние помещения, если в них поддерживаются другие температурные условия.

Задача расчета теплового режима помещения — определить температуру поверхностей и воздуха в помещении решением системы уравнений теплового баланса. Изменение во времени тепловых воздействий на помещение обусловливает нестационарность протекающих в нем тепловых процессов. Источники и стоки теплоты в помещении обычно действуют периодически, что определяет периодический характер изменения температуры поверхностей и воздуха в помещении. Температурные колебания в помещении при периодических тепловых воздействиях можно рассчитать с помощью теории теплоустойчивости, которая строится на решении уравнения одномерной нестационарной теплопроводности в гиперболических функциях комплексной переменной. Относительно колебания температуры на поверхности ограждения $\dot{t}$ решение сводится к виду

$$\dot{t} = \frac{\dot{q}}{\dot{y}}, \tag{2.2}$$

где $\dot{q}$ — гармонически изменяющаяся во времени плотность теплового потока, проходящего через поверхность ограждения; $\dot{y}$ — показатель теплоусвоения поверхности, равный для многослойного ограждения

$$\dot{y} = S\sqrt{\imath}\,\frac{\operatorname{th} R S\sqrt{\imath} + \dot{y}_{\text{гр}}/S\sqrt{\imath}}{1 + \dot{y}_{\text{гр}} \operatorname{th} R S\sqrt{\imath}/S\sqrt{\imath}}, \tag{2.3}$$

S — коэффициент теплоусвоения материала поверхностного слоя, Вт/(м²·К); R — сопротивление теплопроводности поверхностного слоя ограждения; $\dot{y}_{\text{гр}}$ — показатель теплоусвоения поверхности слоя, следующего за поверхностным.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Как видно из (2.3), показатель теплоусвоения является комплексным числом и характеризуется модулем y (коэффициент теплоусвоения поверхности) и аргументом ε_y (запаздывание колебания температуры относительно колебания теплового потока).

Комплексные числа приводятся в общей форме к виду $a+bi$, позволяющему определить модуль

$$y = \sqrt{a_y^2 + b_y^2} \tag{2.4}$$

и аргумент

$$\varepsilon_y = \operatorname{arctg} \frac{b_y}{a_y}. \tag{2.5}$$

Для гармонически изменяющейся во времени плотности теплового потока с амплитудой A_q уравнение (2.2) имеет вид

$$t = t_0 + A_t \cos\left(\frac{2\pi}{T} z + \varepsilon_y\right); \quad A_t = \frac{A_q}{y}, \tag{2.6}$$

где t_0 — средняя за период температура, соответствующая величине, определенной по закону стационарной теплопередачи; A_t — амплитуда колебания температуры на поверхности; T — период колебания теплового потока.

Уравнение (2.2) можно преобразовать к виду

$$\dot{t} = \dot{q}\,\dot{R}_y \tag{2.7}$$

с использованием показателя сопротивления теплоусвоению $\dot{R}_y$, который, будучи обратной величиной показателю теплоусвоения y, является также комплексным числом и характеризуется модулем R и аргументом ε_R.

Использование показателя сопротивления теплоусвоению позволяет представить уравнение (2.6) в виде

$$t = t_0 + A_q R_y \cos\left(\frac{2\pi}{T} z + \varepsilon_R\right), \tag{2.8}$$

который преобразуется к более удобному для дальнейшего использования виду

$$t = t_0 + \frac{A_q}{S\sqrt{2}}\left(a \cos\frac{2\pi}{T} z - b \sin\frac{2\pi}{T} z\right). \tag{2.9}$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При определении радиационной температуры помещения t_R или средневзвешенной по площадям температуры поверхностей в помещении выражение (2.9) позволяет применить правило сложения синусоидальных величин. В этом случае изменение радиационной температуры помещения при гармоническом тепловом воздействии на помещение с амплитудой A_Q будет также гармоническим:

$$t_R = t_{R.0} + A_Q R_{y.\text{п}} \cos\left(\frac{2\pi}{T} z + \varepsilon_{R.\text{п}}\right). \qquad (2.10)$$

Сопротивление теплоусвоению помещения, определенное по правилу сложения синусоидальных величин, равно

$$R_{y.\text{п}} = \frac{1}{\Sigma F_i \sqrt{2}} \sqrt{\left(\Sigma \frac{a_i f_i}{S_i}\right)^2 + \left(\Sigma \frac{b_i f_i}{S_i}\right)^2}, \qquad (2.11)$$

а аргумент сопротивления теплоусвоению

$$\varepsilon_{R.\text{п}} = \operatorname{arctg} \frac{\Sigma b_i f_i / S_i}{\Sigma a_i f_i / S_i}, \qquad (2.12)$$

где a_i и b_i — коэффициенты действительной и мнимой частей показателя $\dot{R}_y$ i-го ограждения; f_i — относительная площадь поверхности i-го ограждения (оборудования)

$$f_i = F_i / \Sigma F_i, \qquad (2.13)$$

F_i — площадь i-й поверхности ограждения или оборудования.

Значения действительной и мнимой частей показателя R_y определяются по (2.3) с помощью правил алгебраических действий над комплексными числами.

Рассмотрим значения a и b для ограждения, первый поверхностный (со стороны теплового воздействия) слой которого имеет переменный показатель тепловой инерции $D = R_1 S_1$, а второй является массивным (рис. 2.5), т. е. для второго слоя $y_2 = y_{\text{гр}} = S_2\sqrt{i}$. После преобразования (2.3) получим:

$$a = \frac{e^{D\sqrt{2}} \bar{S} - \left(\bar{S} e^{D\sqrt{2}}\right)^{-1} - 2\sin D\sqrt{2}}{e^{D\sqrt{2}} S + \left(\bar{S} e^{D\sqrt{2}}\right)^{-1} - 2\cos D\sqrt{2}}; \qquad (2.14)$$

$$b = \frac{-e^{D\sqrt{2}} \bar{S} + \left(\bar{S} e^{D\sqrt{2}}\right)^{-1} - 2\sin D\sqrt{2}}{e^{D\sqrt{2}} \bar{S} + \left(\bar{S} e^{D\sqrt{2}}\right)^{-1} - 2\cos D\sqrt{2}}, \qquad (2.15)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

где

$$\overline{S} = \frac{1 + S_2/S_1}{1 - S_2/S_1}. \qquad (2.16)$$

Принятый случай расположения слоев в ограждении может характеризовать бо́льшую часть реальных конструкций в помещении. Так, при $S_2=0$ ($\overline{S}=1$) из (2.3) следует, что $\dot{R}_y=(S_1\sqrt{i}\,thD\sqrt{i})^{-1}$. Этот случай соответствует однослойной симметричной конструкции, например перегородке, междуэтажному перекрытию. При $S_2=S_1$ $(\overline{S}\to\infty)$, $\dot{R}_y=\dfrac{1}{S_1\sqrt{i}}$, $a=1$ и $b=-1$.

В этом случае ограждение имеет массивный поверхностный слой, как это бывает, например, в однослойных наружных стенах. Для безынерционных ограждений (окна, воздушные прослойки) $S_1=0$ и $\overline{S}\to-1$. Если принять $D=R'S$ (R' — сопротивление теплопередаче ограждения за вычетом сопротивления теплообмену на поверхности, на которую воздействует тепловой поток), то при $S\to0$ по (2.3) получим $a=\sqrt{2}R'$ и $b\to0$. При этом $R_y=R'$, что хорошо согласуется с известным выводом, в соответствии с которым для окон $y=1/R'$.

Значения a и b для разных сочетаний D и S_2/S_1 приведены в табл. 2.1.

Из (2.11) следует, что модуль показателя теплоусвоения помещения равен

$$y_n = \frac{1}{R_{y.n}} = \frac{\Sigma F_i \sqrt{2}}{\sqrt{(\Sigma a_i f_i/S_i)^2 + (\Sigma b_i f_i/S_i)^2}}. \qquad (2.17)$$

Если допустить, что в помещении поверхностные слои всех ограждений и оборудования являются массивными, т. е. для них $a_i=1$ и $b_i=-1$, $y_i=S_i$, то (2.17) преобразуется к виду

$$y_n = \frac{\Sigma F_i}{\Sigma f_i/S_i} = \Sigma F_i S_i. \qquad (2.18)$$

В этом случае

$$\varphi_{y\,n} = \operatorname{arctg}(-1) \approx -\frac{\pi}{4}. \qquad (2.19)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 2.1. ЗНАЧЕНИЯ a и b

S_2/S_1	Значения a (верхняя строка) и b (нижняя строка) при показателе тепловой инерции поверхностного слоя ограждения $D=R_i S_i$							
	0,2	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6	3
0	0,094 —7,071	0,283 —2,364	0,468 —1,445	0,644 —1,093	0,797 —0,952	0,912 —0,917	0,982 —0,932	1,012 —0,961
0,1	1,406 —4,919	0,533 —2,127	0,581 —1,385	0,707 —1,083	0,832 —0,962	0,928 —0,932	0,985 —0,944	1,01 —0,968
0,3	1,58 —2,756	0,803 —1,727	0,742 —1,272	0,806 —1,062	0,887 —0,976	0,952 —0,955	0,99 —0,963	1,007 —0,979
0,5	1,372 —1,885	0,92 —1,435	0,849 —1,176	0,879 —1,042	0,929 —0,985	0,97 —0,972	0,994 —0,977	1,004 —0,987
0,7	1,191 —1,386	0,973 —1,223	0,924 —1,096	0,936 —1,024	0,962 —0,992	0,984 —0,985	0,997 —0,988	1,002 —0,943
0,9	1,055 —1,103	0,995 —1,064	0,978 —1,029	0,981 —1,007	0,989 —0,998	0,995 —0,995	0,999 —0,996	1 —0,998
1,1	0,956 —0,914	1,003 —0,943	1,019 —0,973	1,017 —0,993	1,01 —1,002	1,004 —1,004	1,001 —1,003	1 —1
1,3	0,872 —0,781	0,003 —0,848	1,05 —0,926	1,047 —0,98	1,029 —1,005	1,012 —1,011	1,002 —1,009	1 —1
1,5	0,809 —0,681	1,001 —0,771	1,075 —0,886	1,073 —1,008	1,044 —1,008	1,019 —1,017	1,004 —1,014	1 —1
1,9	0,715 —0,542	0,99 —0,656	1,111 —0,821	1,113 —0,95	1,069 —1,012	1,029 —1,027	1,005 —1,022	1 —1
5	0,464 —0,211	0,923 —0,336	1,17 —0,607	1,241 —0,88	1,153 —1,024	1,063 —1,059	1,012 —1,047	1 —1
10	0,376 —0,107	0,885 —0,222	1,229 —0,515	1,284 —0,845	1,189 —1,029	1,078 —1,073	1,014 —1,058	1 —1
	0,283 0	0,834 —0,1	1,252 —0,406	1,358 —0,8	1,235 —1,034	1,096 —1,09	1,017 —1,071	1 —1

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

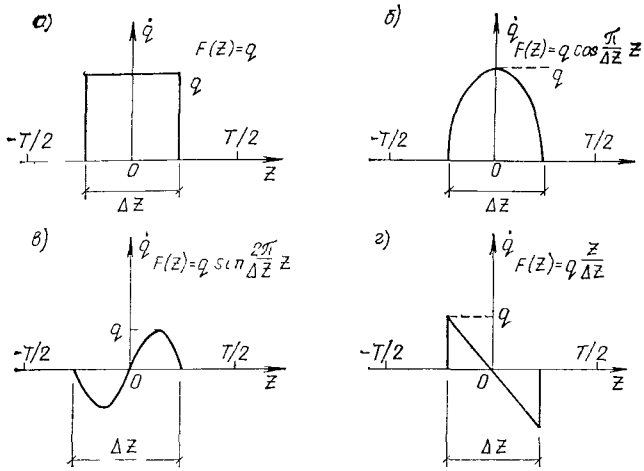


Рис. 2.6. Прерывистые тепловые воздействия на помещение прямоугольное (*а*), полукосинусоидальное (*б*), синусоидальное (*в*) и треугольное (*г*)

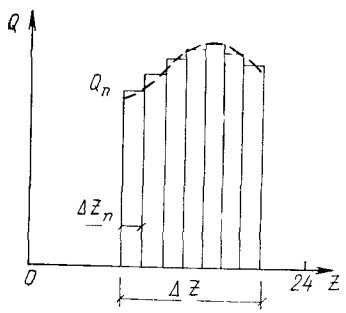


Рис. 2.7. Представление произвольно заданной функции изменения во времени теплового потока в виде суммы прерывистых воздействий $Q_п$ — величина элементарного прерывистого теплового потока продолжительностью $\Delta Z_п$

Полученные формулы обычно используют при упрощенных расчетах температурных колебаний, причем в (2.18) вместо S_i подставляют значения y_i.

Допущение о массивности поверхностных слоев всех ограждений помещения, приводящее к выражениям (2.18) и (2.19), позволяет достаточно просто определять изменения температуры на поверхности ограждения при негармонических тепловых воздействиях, к которым относятся прерывистые, действующие только в течение части периода, а в остальной части периода равные нулю (рис. 2 6).

Представление тепловых воздействий в виде прерывистых удобно использовать при расчете теплового ре-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

жима помещения. Пользуясь набором единичных прерывистых воздействий и принципом суперпозиции, можно любое по форме изменения во времени тепловое воздействие на помещение представить в виде суммы единичных (рис. 2.7).

Для расчета изменения температуры поверхностей при прерывистых тепловых воздействиях А. М. Шкловером были предложены коэффициенты прерывистости Ω. Отклонение температуры поверхности от среднего за период значения определяется по формуле

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{q}{y_i}\,\Omega, \qquad (2.20)$$

где q — максимальная интенсивность прерывистого теплового потока, Вт/м²; Ω — коэффициент прерывистости, изменяющийся во времени.

Коэффициент прерывистости определяется путем разложения функции прерывистого теплового воздействия $F(z)$ в ряд Фурье. Для каждого члена ряда справедлива закономерность отклонения температуры от среднего за период значения по (2.6) или (2.8). Подставив коэффициенты ряда Фурье A_k в формулу (2.6), в которой принято $y=S$ и $\varepsilon_y=-\pi/4$, получим формулу для члена тригонометрического ряда

$$\Delta t_k = \frac{q}{S\sqrt{k}}\,A_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}\,kz - \frac{\pi}{4}\right) = \frac{q}{S}\,\Omega_k. \qquad (2.21)$$

Суммирование ряда из Ω_k в пределах от $k=1$ до $k=\infty$ позволяет получить числовое значение коэффициента прерывистости Ω. А. М. Шкловером были рассчитаны коэффициенты прерывистости для прямоугольного по форме изменения теплового воздействия на ограждение.

В табл. 2.2 приведены формулы расчета коэффициентов прерывистости как для прямоугольного, так и для других по форме изменения тепловых воздействий с периодом $T=24$ ч.

По приведенным в табл. 2.2 формулам можно рассчитать значения коэффициентов прерывистости для массивных поверхностных слоев ограждений. Принцип определения коэффициентов прерывистости с учетом конкретных теплоинерционных свойств поверхностей

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 2.2. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕРЫВИСТОСТИ

Вид воздействия	Формулы для расчета коэффициента прерывистости
Прямоугольное (см. рис 2 6,*а*)	$\frac{2}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k\sqrt{k}}\sin\frac{\pi}{12}k\frac{\Delta z}{2}\cos\left(\frac{\pi}{12}kz-\frac{\pi}{4}\right)$
Полукосинусоидальное (см. рис. 2 6,*б*)	$\frac{\Delta z}{6\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{k}}\frac{1}{1-\left(k\frac{\Delta z}{12}\right)^2}\cos\frac{\pi}{12}k\frac{\Delta z}{2}\times$ $\times\cos\left(\frac{\pi}{12}kz-\frac{\pi}{4}\right)$
Синусоидальное (см. рис. 2 6,*в*)	$\frac{\Delta z}{12\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{k}}\frac{1}{1-\left(k\frac{\Delta z}{12}\right)^2}\sin\frac{\pi}{12}k\times$ $\times\frac{\Delta z}{2}\cos\left(\frac{\pi}{12}kz-\frac{\pi}{4}\right)$
Треугольное (см. рис. 2.6,*г*)	$\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{k}}\left[\frac{2}{(\pi k)^2}-\frac{\sin\pi k}{\pi k}-2\frac{\cos\pi k}{(\pi k)^2}\right]\times$ $\times\cos\left(\frac{\pi}{12}kz-\frac{\pi}{4}\right)+\sum_{k=1}^{\infty}\left[\frac{1}{\pi k}+\right.$ $\left.+\frac{\cos\pi k}{\pi k}-2\frac{\sin\pi k}{(\pi k)^2}\right]\sin\left(\frac{\pi}{12}kz-\frac{\pi}{4}\right)$

ограждений (при $a\neq 1$ и $b\neq -1$) остается таким же, как и изложенный выше. При этом в качестве исходной используется формула (2.9), в которую подставляют значения a и b по (2.14) и (2.15).

Следует иметь в виду, что конкретные теплоинерционные свойства поверхностей отдельных ограждений мало сказываются на колебаниях радиационной температуры помещения, что объясняется сглаживанием

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

отдельных температурных разностей при их осреднении по площадям ограждений. Это обстоятельство позволяет при практических расчетах использовать формулы (2.18) и (2.19) и определять изменение радиационной температуры помещения по формуле

$$t_R = t_{R\,0} + \frac{Q}{y_п}\ \Omega, \qquad (2\ 22)$$

где $y_п$ — модуль показателя теплоусвоения помещения, Вт/°С, который с учетом теплоусвоения поверхностями оборудования принимается равным

$$y_п = \Sigma\, y_i\, F_i + \frac{\pi}{T}\ \frac{G_{об}\, c_{об}}{3{,}6}, \qquad (2\ 23)$$

$G_{об}$ — масса оборудования, кг, $c_{об}$ — удельная теплоемкость оборудования, кДж/(кг·°С)

При расчете радиационной температуры помещения t_R с использованием $У_п$ или $R_{у.п}$ не учитывается лучистый теплообмен между поверхностями, который будет действовать в сторону уменьшения разности температуры между отдельными поверхностями.

Закономерность изменения температуры воздуха в помещении определяется из уравнения баланса конвективного тепла. При гармоническом изменении конвективного теплового потока на поверхности i-го ограждения $\dot{q}_{к\,i}$ колебание температуры воздуха равно

$$\dot{t} = \dot{q}_{к\,i} / \dot{B}_i, \qquad (2.24)$$

где B_i — показатель теплопоглощения поверхностью ограждений

$$\dot{B}_i = \frac{1}{1/y_i + 1/\alpha_{к\,i}}, \qquad (2\ 25)$$

$\alpha_{к\,i}$ — коэффициент конвективного теплообмена на поверхности, Вт/(м²·°С).

Помимо поверхностей ограждений конвективное тепло поглощается поверхностями оборудования, воздухом объема помещения и вентиляционным воздухом.

Суммарное колебание температуры воздуха определяется суммированием частных

$$\dot{t}_в = \Sigma\, \dot{t}_{в\,i} = \frac{\dot{Q}_к}{\dot{P}_{пом}}. \qquad (2.26)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Теплопоглощение помещением складывается из частных

$$\dot{P}_{\text{пом}} = \dot{P}_{\text{огр}} + \dot{P}_{\text{об}} + \dot{P}_{\text{воз}} + \dot{P}_{\text{вент}}, \qquad (2.27)$$

где $\dot{P}_{\text{об}}$, $\dot{P}_{\text{воз}}$, $\dot{P}_{\text{вент}}$ — показатели теплопоглощения поверхностями оборудования, воздухом помещения и вентиляционным воздухом.

Показатель теплопоглощения ограждениями равен

$$\dot{P}_{\text{огр}} \approx \Sigma F_i \dot{B}_i. \qquad (2.28)$$

Показатель теплопоглощения оборудованием $\dot{P}_{\text{об}}$ определяется аналогично (2.28).

При гармонических колебаниях температуры воздуха общее теплопоглощение воздухом и в результате воздухообмена равно

$$\dot{P}_{\text{в}} = P_{\text{воз}} + \dot{P}_{\text{вент}} = 278 V (c\rho) \left(\frac{2\pi}{T} i + n \right), \qquad (2.29)$$

где V — объем воздуха в помещении, м^3; $(c\rho)$ — объемная удельная теплоемкость воздуха, кДж/(м^3·°С); n — кратность воздухообмена в помещении.

Величина $\dot{P}_{\text{в}}$ является комплексным числом и характеризуется модулем

$$P_{\text{в}} = 278 V (c\rho) \sqrt{\left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 + n^2}$$

и аргументом

$$\xi_{P_b} = \operatorname{arctg} \frac{2\pi}{Tn}.$$

В табл. 2.3 приведены значения $P_{\text{в}}/V(c\rho)$ и $\varepsilon_{P_{\text{в}}}$ при разной кратности воздухообмена и суточном периоде $T = 24$ ч.

ТАБЛИЦА 2.3. МОДУЛЬ $P_{\text{в}}$ И АРГУМЕНТ $\varepsilon_{P_{\text{в}}}$ ТЕПЛОПОГЛОЩЕНИЯ ВОЗДУХОМ

Кратность воздухообмена	$P_{\text{в}}/V(c\rho)$	$\varepsilon_{P_{\text{в}}}$, ч	Кратность воздухообмена	$P_{\text{в}}/V(c\rho)$	$\varepsilon_{P_{\text{в}}}$, ч
1	1,034	0,26	5	5,007	0,01
2	2,017	0,065	7	7,005	0,005
3	3,011	0,029	10	10,003	0,003

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Как видно из табл. 2.3, относительная величина модуля теплопоглощения воздухом при суточном периоде практически равна кратности воздухообмена n, а аргумент близок к нулю, что обычно позволяет в расчетах пренебрегать теплопоглощением воздуха. При малых периодах влияние теплоемкости воздуха объема помещения возрастает, что может оказаться существенным при рассмотрении кратковременных процессов изменения температуры воздуха, в частности при анализе динамических тепловых свойств помещения в процессе регулирования $t_в$, которые характеризуются его частотными характеристиками.

Для нахождения закономерности изменения с суточным периодом температуры воздуха при прерывистых тепловых воздействиях следует составить уравнение баланса конвективного тепла в помещении, которое для произвольного момента времени имеет вид

$$Q_к + \Lambda\,(t_в - t_R) = 0, \qquad (2.30)$$

где $Q_к$ — суммарное поступление конвективного тепла в рабочую зону помещения, Вт; Λ — показатель конвективного теплообмена в помещении, Вт/°С.

$$\Lambda = \Sigma\,\alpha_{к.i}\,F_i + \alpha_{к.об}\,F_{об}, \qquad (2.31)$$

$\alpha_{к.об}$, $F_{об}$ — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°С), и площадь теплообменивающейся поверхности оборудования, м², в помещении.

Из (2.30) следует, что

$$t_в = t_R + \frac{Q_к}{\Lambda}, \qquad (2.32)$$

т. е. во время перерыва воздействия ($Q_к = 0$) температура внутреннего воздуха равна радиационной температуре.

Приведенные закономерности нестационарного теплообмена помещения позволяют определять как динамические свойства помещения (см. § 7.1), так и тепловую нагрузку на системы (см. § 2.3). Такая возможность объясняется тем, что основной показатель в теории теплоустойчивости y [уравнение (2.3)] является функцией комплексного переменного и может быть рассчитан при любом периоде колебаний. Это, в свою очередь, позволяет определить температурные колебания в помещении при любой частоте.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

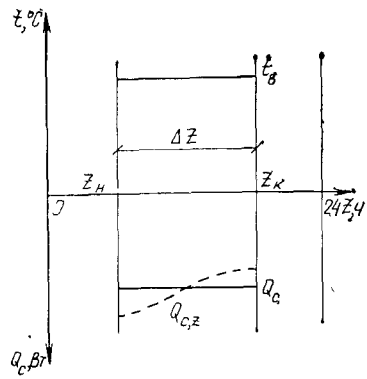


Рис. 2.8. К определению средней за рабочую часть суток тепловой нагрузки на систему

§ 2.3. Тепловая нагрузка на системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха

Под тепловой нагрузкой на систему* понимается та часть суммы тепловых потоков, поступивших в помещение извне и от внутренних источников, которую система должна нейтрализовать, чтобы обеспечить в течение рабочей части суток заданную температуру внутреннего воздуха.

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в различных зданиях действуют круглые сутки или часть суток. Продолжительность работы систем при этом, как правило, совпадает с продолжительностью смены или времени пребывания в помещении людей, т. е. с рабочей частью суток, в течение которой обеспечивается поддержание заданной (рабочей) температуры воздуха.

Температура воздуха в течение рабочей части суток может поддерживаться постоянной (рис. 2.8) или изменяться в определенных пределах. В последнем случае под рабочей температурой понимается среднее ее значение за рабочую часть суток. Для обеспечения постоянства температуры воздуха должна изменяться в течение рабочей части суток и тепловая нагрузка на систему. Для произвольного часа рабочей части суток z тепловую нагрузку $Q_{c\,z}$, Вт, можно представить в виде

$$Q_{c.z} = Q_c + \Delta Q_{c.z},$$

где Q_c — средняя за рабочую часть суток тепловая нагрузка; $\Delta Q_{c.z}$ — отклонение от средней за рабочую часть суток тепловой нагрузки.

Для нахождения **средней за рабочую часть суток тепловой нагрузки** на систему составим уравнение суточного теплового баланса помещения

* Имеется в виду тепловая нагрузка по явному теплу.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\Sigma k_o F_o (t_{нар.0} - t_{п.0}) + Q_c m + \Sigma Q_{j.0} = 0, \quad (2.33)$$

где k_o, F_o — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С), и площадь, м², наружного ограждения; $t_{нар,o}$ — среднесуточная условная температура наружной среды, °С; $Q_{j,o}$ — среднесуточные значения тепловых потоков, поступающих в помещение через наружные ограждения и от внутренних источников, Вт; m — относительная продолжительность рабочей части суток

$$m = \Delta z/24, \quad (2.34)$$

Δz — продолжительность рабочей части суток, ч (см. рис. 2.8).

Величина $t_{п.0}$ в уравнении (2.33) — среднесуточная температура помещения.

$$t_{п.0} = \frac{t_{в.0} + t_{R.0}}{2}, \quad (2.35)$$

где $t_{в.0}$ — среднесуточная температура внутреннего воздуха; $t_{R.0}$ — среднесуточная радиационная температура помещения.

С учетом соотношения (2.32), справедливого для среднесуточных значений его составляющих, и равенства (2.33) получим

$$t_{п.0} = t_{в.0} - \frac{Q_c m \rho_c + \Sigma Q_{j.0} \rho_j}{2\Lambda}, \quad (2.36)$$

где ρ_c, ρ_j — доли конвективной части составляющих тепловых потоков, передаваемых в помещение системой и поступающих в помещение через наружные ограждения и от внутренних источников.

Рабочую температуру внутреннего воздуха $t_в$ представим в виде суммы

$$t_в = t_{в.0} + \Delta t_{в.m}, \quad (2.37)$$

где $\Delta t_{в.m}$ — среднее за рабочую часть суток отклонение температуры воздуха от среднесуточной.

Из (2.32) с учетом (2.36) и (2.37) следует, что

$$\Delta t_{в.m} = \Delta t_{R.m} + \frac{Q_c}{\Lambda}(1 - m) + \Sigma \frac{(Q_{j.m} - Q_{j.0})\rho_j}{\Lambda}, \quad (2.38)$$

где $\Delta t_{R.m}$ — среднее за рабочую часть суток отклонение радиационной температуры помещения от среднесуточной; $Q_{j.m}$ — средние за рабочую часть суток величины тепловых потоков, поступающих в помещение.

Тепловые потоки, поступающие в помещение (в том числе и вносимый системой при сменной работе), имеют в основном прерывистый характер изменения во времени.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Величину $\Delta t_{R.m}$ для прерывистых тепловых воздействий определяют с учетом формулы (2.22)

$$\Delta t_{R.m} = \frac{Q_c}{y_п} \overline{\Omega}_c + \Sigma \frac{Q_j}{y_п} \overline{\Omega}_j, \qquad (2.39)$$

где $\overline{\Omega}_c$, $\overline{\Omega}_j$ — средние за рабочую часть суток коэффициенты прерывистости для тепловых потоков от системы и возмущающих тепловых воздействий; Q_j — максимальное суточное значение теплового потока, поступающего в помещение, Вт.

Подставив формулы (2.35) — (2.39) в уравнение баланса (2.33), определим среднюю за рабочую часть суток тепловую нагрузку

$$Q_c = \Sigma Q_j \eta_j, \qquad (2.40)$$

где η_j — коэффициент нагрузки;

$$\eta_j = \frac{\overline{Q}_{j.0} + \frac{\overline{\Omega}_j}{\overline{y}_п} + (\overline{Q}_{j.m} - 0{,}5\,\overline{Q}_{j.0}) \frac{\rho_j}{\overline{\Lambda}_п}}{m + \frac{\Omega_c}{\overline{y}_п} + (1 - 0{,}5\,m) \frac{\rho_c}{\overline{\Lambda}_п}}, \qquad (2.41)$$

$\overline{Q}_{j.0}$ — относительная среднесуточная величина теплового потока

$$\overline{Q}_{j.0} = \frac{Q_{j.0}}{Q_j}; \qquad (2.42)$$

$Q_{j.m}$ — относительная средняя за рабочую часть суток величина теплового потока

$$\overline{Q}_{j.m} = \frac{Q_{j.m}}{Q_j}; \qquad (2.43)$$

$\overline{y}_п$ — относительный показатель теплоусвоения помещения

$$\overline{y}_п = \frac{y_п}{\Sigma k_0 F_0}, \qquad (2.44)$$

$y_п$ — показатель теплоусвоения помещения, определяемый по формуле (2.23);

$\Lambda_п$ — относительный показатель конвективного теплообмена в помещении

$$\overline{\Lambda}_п = \frac{\Lambda_п}{\Sigma k_0 F_0}, \qquad (2.45)$$

$\Lambda_п$ — показатель конвективного теплообмена помещения, определяемый по формуле (2.31).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Средние за рабочую часть суток коэффициенты прерывистости $\overline{\Omega}_c$ и $\overline{\Omega}_j$ равны:

$$\overline{\Omega} = \frac{\Omega_к - \Omega_н}{\Delta z}. \qquad (2.46)$$

Коэффициенты $\Omega_к$ и $\Omega_н$ определяются по прил. 1 для времени конца $z_к$ и начала $z_н$ рабочей части суток (см. рис. 2.8).

Составляющими тепловой нагрузки являются трансмиссионный тепловой поток, проходящий через наружные ограждения (иногда внутренние); теплопоступления от прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающие через заполнения световых проемов; потоки теплоты с инфильтрационным воздухом, а также теплопоступления (потери) от внутренних источников. В ряде случаев дополнительной составляющей тепловой нагрузки для одной из систем является тепловой поток, вносимый в помещение другой системой, например тепловыделения от системы отопления, которые следует учитывать при расчете нагрузки на СКВ в холодное время года.

Методы расчета тепловых потоков, проходящих через наружные ограждения, изложены в нормативной и справочной литературе, а также в соответствующих учебниках. Поэтому здесь ограничимся лишь некоторыми комментариями относительно расчета составляющих тепловой нагрузки, которые необходимы для правильного использования приведенных формул.

Наружные ограждения с точки зрения передачи потоков теплоты делятся на две части: массивные непрозрачные (наружные стены, чердачные перекрытия, бесчердачные покрытия, перекрытия над неотапливаемыми подвалами, полы) и немассивные лучепрозрачные (окна, витрины).

В толще массивных наружных ограждений колебания наружной температуры затухают по величине и во времени, причем для обычных ограждений затухание температуры достаточно велико, поэтому даже в теплое время года колебанием температуры на внутренней поверхности массивных ограждений, а следовательно, и колебанием теплового потока, проходящего через них, можно пренебречь. Это позволяет считать величину трансмиссионного теплового потока, проходящего через

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

массивные ограждения, равной среднесуточной величине, которая определяется по законам стационарной теплопередачи.

Немассивные ограждения являются безынерционными и передают тепловой поток без искажения по величине и во времени.

Поглощенную остеклением теплоту солнечной радиации учитывают при расчете теплопоступлений от солнечной радиации, проникающей через окна. Поэтому при расчете трансмиссионного теплового потока через окна вместо условной температуры наружной среды используют температуру наружного воздуха. Изменение температуры наружного воздуха в течение суток близко к гармоническому с максимумом в 15 ч истинного времени. Следовательно, трансмиссионный тепловой поток через окна можно характеризовать среднесуточной величиной и амплитудой теплового потока, которые определяются по законам стационарной теплопередачи.

Характер изменения в течение суток теплопоступлений от солнечной радиации определяется закономерностью суточного хода интенсивности прямой S и рассеянной D солнечной радиации. Достаточно точно изменение во времени тепловых потоков от прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающих в помещение, описывается половиной косинусоиды в пределах времени действия радиации Δz (см. рис. 2.6, *б*). Поэтому при расчете тепловой нагрузки от солнечной радиации достаточно знать максимальные теплопоступления Q_S и Q_D, продолжительность теплопоступлений Δz_S и Δz_D и время максимума $z_{S\,м}$ и $z_{D.м}$.

Тепловой поток, поступающий в помещение с инфильтрационным воздухом, изменяется незначительно, и его можно считать постоянным в течение суток. Тепловые потоки, поступающие в помещение от внутренних источников, имеют прерывистый характер изменения в течение суток. В общем случае произвольно заданную кривую изменения теплопоступлений можно разбить на элементарные интервалы (см. рис. 2.7) и рассматривать как сумму элементарных прерывистых тепловых воздействий продолжительностью $\Delta z_п$.

Ежечасные значения тепловой нагрузки на систему определяют по формуле

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$Q_{c\,z} = Q_c \left[1 - \frac{\overline{\Lambda}_и}{\overline{y}_п\,\rho_c}\,(\overline{\Omega}_{c\,z} - \overline{Q}_c)\right] - \Sigma\,(Q_{j\,z} - Q_{j.m})\,\frac{\rho_j}{\rho_c} - \frac{\overline{\Lambda}_п}{\overline{y}_п\,\rho_c}\,\Sigma\,Q_j\,(\overline{\Omega}_{j\,z} - \overline{\Omega}_j), \qquad (2.47)$$

где $Q_{j\,z}$ — среднечасовое значение теплового потока, $\overline{\Omega}_{c\,z}$ и $\overline{\Omega}_{j\,z}$ — среднечасовые значения коэффициентов прерывистости, определяемые по формуле

$$\overline{\Omega}_z = \Omega_{z+1} - \Omega_z, \qquad (2.48)$$

Ω_z и Ω_{z+1} — коэффициенты, определяемые соответственно для начала и конца расчетного часа (см прил. I)

Формула (2.41) приведена в общем виде. При ее конкретизации для различных систем и потоков теплоты, составляющих тепловую нагрузку, принимают: для систем, действующих круглые сутки, $m=1$ и $\overline{\Omega}_c=0$; для постоянных в течение суток тепловых потоков $\overline{Q}_{j\,0}=Q_{j\,m}=1$ и $\overline{\Omega}_j=0$; для потоков теплоты солнечной радиации, которые являются чисто лучистыми, $\rho_j=0$; для чисто конвективных потоков теплоты $\rho_j=1$; для воздушных систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха $\rho_c=1$.

В прил. II приведен пример расчета тепловой нагрузки на системы с конкретными указаниями по определению отдельных составляющих рассмотренных зависимостей.

ГЛАВА 3. РЕЖИМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ТЕЧЕНИЕ ГОДА

Режим работы систем, обеспечивающих поддержание в помещениях микроклимата, носит циклический характер, что обусловлено сменой времени суток и года.

Переменный режим работы и потребления энергии системами зависит от изменения во времени тепловой нагрузки на системы и параметров наружного воздуха. Так как тепловая нагрузка на системы для большинства помещений в значительной мере определяется тепловыми потоками, проходящими через наружные ограждения, то для анализа круглогодичного режима работы систем необходимо иметь данные об изменении параметров наружного климата в течение года.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 3.1. Годовое изменение параметров наружного климата и тепловой нагрузки на СО, СВ и СКВ

Основной причиной изменения во времени климатических параметров является колебание с суточным и годовым периодами теплопритока от солнца. Вместе с тем в приземном слое на формирование климатических параметров и их изменение воздействует большое число факторов, имеющих случайный характер. Поэтому для раскрытия закономерностей динамики климатических параметров используют результаты статистической обработки изменений метеорологических элементов

Принципиально возможны два способа представления изменения во времени климатических параметров.

В первом случае изменение того или иного параметра представляется в виде суточного или годового хода (рис 3 1), который раскрывается в табличной форме (например, в виде среднемесячных почасовых значений для каждого месяца года) или описывается аналитически с помощью тригонометрического ряда.

В последние годы, особенно за рубежом, значительное распространение получило описание суточного и годового хода комплекса параметров наружного климата в виде «представительного года». Такая форма описания наружного климата используется при расчете режима работы систем на ЭВМ. При этом в память ЭВМ закладываются массивы с ежечасными значениями основных климатических параметров для всех 365 суток года. Значения параметров принимаются с учетом их возможных сочетаний в пределах одного месяца (например, при средней облачности или в безоблачные дни).

Во втором случае изменение параметров наружного климата во времени представляют в виде функций распределения.

На рис 3 2 представлена функция распределения температуры наружного воздуха, показывающая число суток стояния значений температуры выше или ниже заданного.

Подобные функции распределения обычно получают на основе статистической обработки метеорологических данных и могут быть заданы в табличной форме, в виде графиков или аппроксимированы аналитическими зави-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

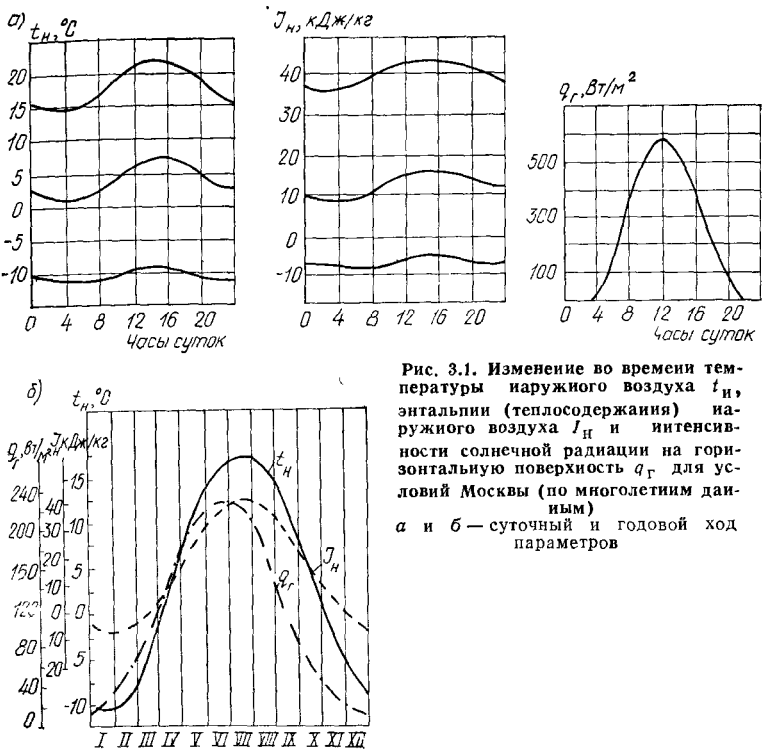


Рис. 3.1. Изменение во времени температуры наружного воздуха $t_н$, энтальпии (теплосодержания) наружного воздуха $J_н$ и интенсивности солнечной радиации на горизонтальную поверхность $q_г$ для условий Москвы (по многолетним данным)

а и *б* — суточный и годовой ход параметров

симостями. Функции распределения можно построить по числовым данным параметров безотносительно времени суток и года. Большие возможности для анализа режима работы систем представляют функции распределения параметров, полученные для отдельных часов суток и месяцев года.

Климатические параметры наблюдаются раздельно, а действуют на формирование тепловой нагрузки на системы совместно. Изменение во времени комплекса параметров можно анализировать с помощью двухмерных функций распределения. Аналитическое описание таких функций затруднительно, поэтому результаты статистической обработки первичного метеорологического материала представляют в графической форме.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

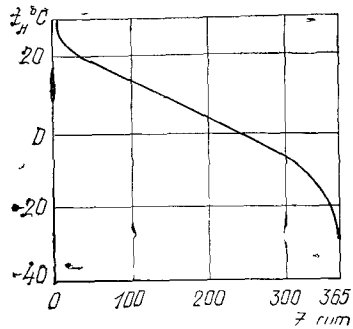


Рис. 3.2. Вероятная продолжительность стояния температуры наружного воздуха (функция распределения) в Москве

Примером такого представления изменения во времени комплекса климатических параметров служит t — φ-диаграмма Л. Б. Успенской (рис. 3.3), предназначенная для определения продолжительности стояния в году сочетаний температуры и относительной влажности наружного воздуха. На диаграмме нанесена сетка $t_н$ и $\varphi_н$ и показаны изолинии продолжительности стояния m. Среднегодовая продолжительность Δz периодов с состоянием наружного воздуха, обусловленным тем или иным сочетанием $t_н$ и $\varphi_н$, определяется по диаграмме суммированием числовых значений m для всех участков, которые ограничены заданными линиями $t_н$ и $\varphi_н$, t — φ-диаграмма может быть построена на поле I — d-диаграммы. Такое представление сочетаний параметров наружного климата оказывается удобным для анализа режимов работы тепломассообменных аппаратов систем кондиционирования воздуха.

Следует иметь в виду, что использование t — φ-диаграммы для анализа суточного режима работы систем оказывается затруднительным из-за необходимости иметь очень большой набор t — φ-диаграмм (для разных городов и часов суток).

Изменение в течение года параметров наружного климата вызывает колебание составляющих тепловой нагрузки на системы с периодом $T = 365$ сут. На рис. 3.4 показаны кривые годового хода тепловых потоков, проходящих через наружные ограждения, которые получены по среднемесячным многолетним значениям наружных климатических параметров.

Расчет годового изменения тепловой нагрузки на систему отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха необходим для выявления режима их работы в течение года. Результаты расчета годового хода тепло-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

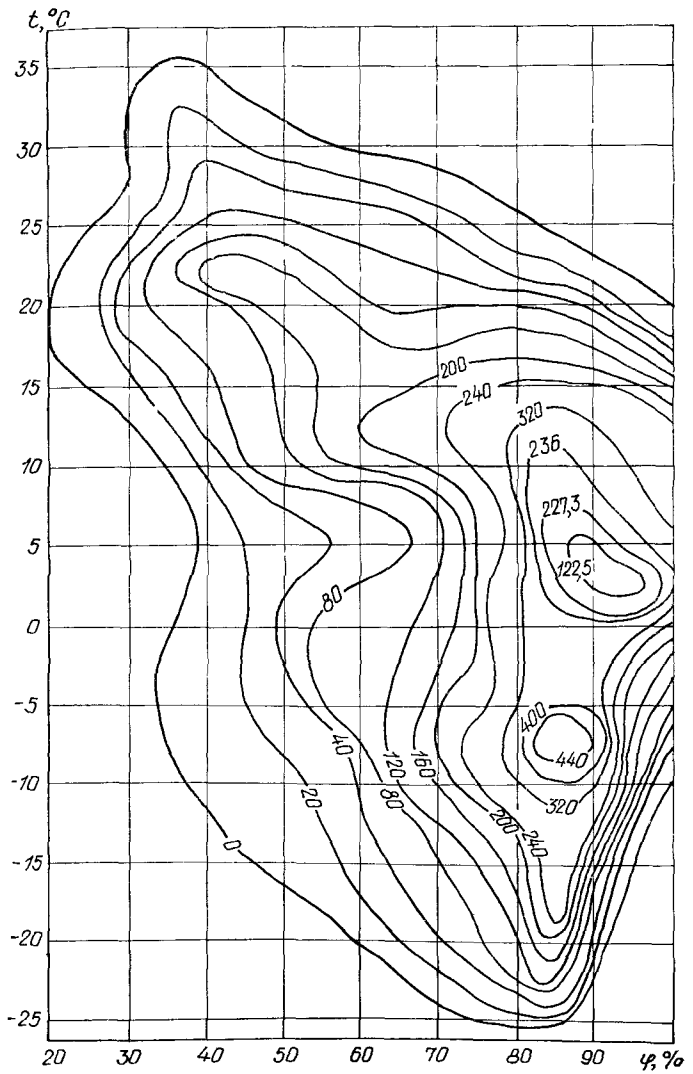


Рис. 3.3. Диаграмма t—φ для условий Москвы

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

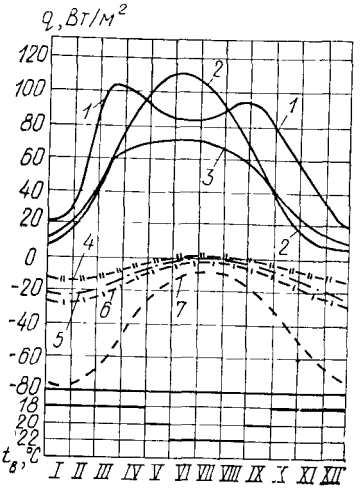


Рис. 3.4. Годовой ход удельных тепловых потоков через наружные ограждения в условиях Москвы
1, 2, 3 — от солнечной радиации через двойное окно со спаренными переплетами соответственно южной, восточной и юго-восточной ориентации; *4* — от инфильтрации через двойное окно; *5, 6, 7* — трансмиссионного потока соответственно через наружную стену, бесчердачное покрытие и двойное окно

ются неизменными или незначительно.

вой нагрузки позволяют проанализировать влияние отдельных составляющих нагрузки на потребление энергии системами и выбрать наиболее экономичный режим работы систем с учетом их совместного действия (например, системы кондиционирования воздуха или вентиляции и системы отопления в холодное время года).

При расчете годового изменения тепловой нагрузки на системы (прил. III) определяют нагрузку для каждого месяца года в пределах времени действия системы. Рассмотренный в § 2.3 метод позволяет проводить такой расчет достаточно просто, так как для большинства тепловых потоков, составляющих нагрузку, коэффициенты нагрузки остаизменяются во времени года

§ 3.2. Режим работы центральных систем водяного отопления

Тепловая нагрузка на систему отопления определяет требуемое количество теплоты, которое система должна подать в помещение для поддержания в нем заданной температуры воздуха. Системы водяного отопления зданий работают, как правило, круглосуточно. Средняя за время работы тепловая нагрузка на систему является среднесуточной и определяется средними за сутки величинами тепловых потоков

$$Q_{с.0} = \Sigma Q_{j.0} \eta_j. \qquad (3.1)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Коэффициенты нагрузки рассчитывают с учетом (2.41) по формуле

$$\eta_j = \frac{1 + 0{,}5\,\rho_j/\overline{\Lambda}_{\text{п}}}{1 + 0{,}5\,\rho_{\text{с}}/\overline{\Lambda}_{\text{п}}}. \qquad (3.2)$$

Ежечасные значения тепловой нагрузки в соответствии с формулой (2.47) равны:

$$Q_{\text{с.о}.z} = Q_{\text{с.о}}\left(1 - \frac{\overline{\Lambda}_{\text{п}}}{\overline{y}_{\text{п}}\,\rho_{\text{с}}}\,\overline{\Omega}_{\text{с}.z}\right) - \Sigma\,(Q_{j.z} - Q_{j.0})\,\frac{\rho_j}{\rho_{\text{с}}} - \frac{\overline{\Lambda}_{\text{п}}}{\overline{y}_{\text{п}}\,\rho_{\text{с}}}\,\Sigma\,Q_j\,\overline{\Omega}_{j.z}. \qquad (3.3)$$

Поддержание во времени суток и года температурных условий в помещении обеспечивается изменением теплопроизводительности системы; при этом расход теплоты системой будет наименьшим, если изменение ее теплопроизводительности будет строго соответствовать величине тепловой нагрузки. Степень соответствия теплопроизводительности системы отопления требуемой величине в течение отопительного периода зависит от способа изменения расхода теплоты на отопление.

Наибольшее распространение в настоящее время нашел простой способ регулирования отпуска теплоты за счет изменения температуры теплоносителя на выходе из генератора (ТЭЦ или районной котельной). Температура теплоносителя изменяется в зависимости от температуры наружного воздуха по отопительному графику (рис. 3.5), который составлен в результате совместного решения уравнений теплопотерь помещения и теплоотдачи отопительного прибора.

Отопительный график строится применительно к одному виду отопительных приборов (как правило, радиаторов). Вместе с тем, как видно из формулы (3.2), тепловая нагрузка определяется долей конвективной теплоотдачи $\rho_{\text{с}}$, которая для разных видов приборов различна. Несоответствие теплоотдачи отопительных приборов тепловой нагрузке при центральном отпуске теплоты усугубляется разными коэффициентами теплопередачи различных приборов.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

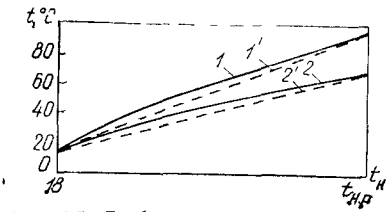


Рис. 3.5. График изменения температуры воды в местных системах отопления при качественном центральном регулировании отпуска теплоты

1, 2 — температура воды соответственно в подающем и обратном трубопроводах, *1', 2'* — линеаризация отопительного графика

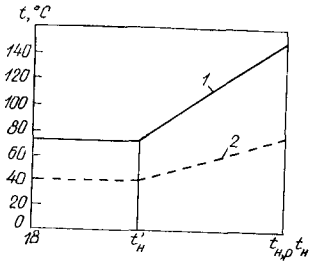


Рис. 3.6. Отопительно-бытовой график изменения температуры воды в подающем (*1*) и обратном трубопроводе тепловой сети (*2*)

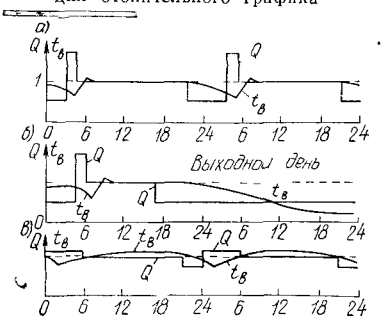


Рис. 3.7. Примерные графики программного регулирования отпуска теплоты, предусматривающие снижение отпуска теплоты жилым зданиям в ночные часы (*а*), общественным зданиям в нерабочее время (выходной день) (*б*), на отопление в периоды максимального потребления горячей воды (*в*)

Отопительный график не учитывает комплексного воздействия на тепловую нагрузку направления и скорости ветра, солнечной радиации, внутренних тепловыделений, в результате чего снижаются надежность и экономичность поддержания температуры в различных зданиях и даже в различных помещениях одного здания.

В переходные периоды года для нормальной работы теплообменников горячего водоснабжения температура воды в подающем трубопроводе тепловой сети не должна быть ниже 70°С, что требует корректировки отопительного графика, осуществляемой при некоторой температуре $t'_н$ (рис. 3.6). При $t_н > t'_н$ температура воды в подающем и обратном трубопроводах остается неизменной. Скорректированный график называют отопительно-бытовым.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При отсутствии отопления пропусками и сохранении постоянного расхода сетевой воды через отопительный теплообменник в период, когда $t_н > t'_и$, системы отопления получают избыточное количество теплоты.

Для повышения надежности и экономичности центрального отпуска теплоты проводилось совершенствование графика. В частности, в работах акад. Л. А. Мелентьева и И. И. Мичуриной обосновано предложение изменять температуру теплоносителя не только по температуре наружного воздуха, но и по скорости ветра. Для учета влияния нагрузки горячего водоснабжения предлагались (Е. Я. Соколовым, С. Ф. Копьевым, Н. К. Громовым и др.) так называемые повышенные температурные графики.

Дальнейшее совершенствование центрального регулирования связано с использованием режима количественно-качественного отпуска теплоты. Такой режим, разработанный В. К. Дюскиным в АКХ им. К. Д. Памфилова, был внедрен на тепловых сетях Ленэнерго.

Одним из направлений повышения экономической эффективности центрального регулирования является переход на программный отпуск теплоты — сокращение отпуска теплоты от источника теплоснабжения в ночное время. По данным С. А. Чистовича, уменьшение по заданной программе отпуска теплоты в жилые здания в ночные часы обеспечивает экономию топлива до 5—7%. При сокращении отпуска теплоты учреждениям в нерабочее время затраты топлива на отопление этих зданий снижаются на 15—20%.

Примерный график программного регулирования отпуска теплоты жилым и общественным зданиям показан на рис. 3.7. Сложность центрального программного регулирования состоит в том, что не совпадают режимы отпуска теплоты на отопление жилых и общественных зданий.

В табл. 3.1 приведен возможный режим программного отпуска теплоты, разработанный в ЛНИИ АКХ им. К. Д. Памфилова.

Для повышения надежности и экономичности снабжения теплотой систем отопления центральный режим

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 3.1. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РЕЖИМОВ СУТОЧНОГО ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ ЖИЛЫМ ЗДАНИЯМ

Режим	Границы режима, часы суток		Продолжительность режима, ч
	начало	конец	
Переходный режим с нормального на сокращенный отпуск теплоты	21	22	1
Режим с сокращенным отпуском теплоты	22	4	6
Переходный режим с сокращенного на максимальный отпуск теплоты	4	5	1
Режим с максимальным отпуском теплоты	5	7	2
Переходный режим с максимального на нормальный отпуск теплоты	7	8	1

отпуска теплоты дополняется регулированием в промежуточных ступенях — районной, групповой и местной.

Одно из направлений районирования сетей — создание центрально-регулировочных пунктов, с помощью которых происходит разделение тепловых сетей на магистральные и распределительные. На контрольно-регулировочные пункты возлагаются следующие основные задачи: управление температурным и гидравлическим режимом в распределительных тепловых сетях, отключение или перевод сетей на специальный режим в аварийных ситуациях.

Групповое регулирование осуществляется в центральных тепловых пунктах (ЦТП). Раздельный отпуск теплоты на отопление и горячее водоснабжение в ЦТП повышает экономичность теплоснабжения, особенно при применении уточненного температурного графика, учитывающего особенности присоединенных к тепловому пункту зданий. Уточнение графика может быть достигнуто корректировкой по отклонению температуры внутреннего воздуха в обслуживаемых зданиях. Такая корректировка особенно эффективна в переходные месяцы года.

Результаты измерения расхода теплоты на отопление в ЦТП, обслуживающем группу 16-этажных жилых домов в Москве, приведены в табл. 3.2. Как видим, регулирование по уточненному графику позволило сэкономить за период измерений 15,7% теплоты.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОТЫ НА ОТОПЛЕНИЕ

Период испытаний	Средняя температура воздуха, °С		Количество теплоты, 10^6 КДж		
	наружного	в квартирах	при отсутствии регулирования	при регулировании по уточненному графику (измерение)	экономия
Февраль	—8,8	21,3	12 238	11 042	1196
Март	—1,5	21,5	9 190	7 975	1215
Апрель	2,8	21,1—22	7 293	5 545	1748
1—2 Мая	14	21,9	486	66	420
Итого			29 207	24 628	4579

Непосредственно на вводе в здание осуществляется местное позонное изменение теплопроизводительности всей системы отопления здания или отдельных ее частей. Деление систем на зоны может быть вертикальным (по фасадным) или горизонтальным (поэтажным). Зонирование системы позволяет учитывать неравномерность распределения теплопоступлений от солнечной радиации и теплопотерь от инфильтрации по разным фасадам здания.

Наибольшее распространение получило пофасадное деление систем отопления. На рис. 3.8, *а* показана схема позонного разделения системы на ветви при зависимом присоединении системы к тепловым сетям. Более надежной является схема с независимым присоединением ветвей (рис. 3.8, *б*).

Стремление к удешевлению пофасадного зонирования систем привело к разработке схем присоединения ветвей системы с осуществлением циркуляции теплоносителя в них одним общим насосом (рис. 3.8, *в, г*). Вместе с тем при зависимом присоединении ветвей (см. рис. 3.8,*г*) значительно уменьшается диапазон изменения теплопроизводительности по сравнению со схемами раздельного регулирования.

Режим отпуска теплоты на отопление при пофасадном присоединении системы в большой степени прибли-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

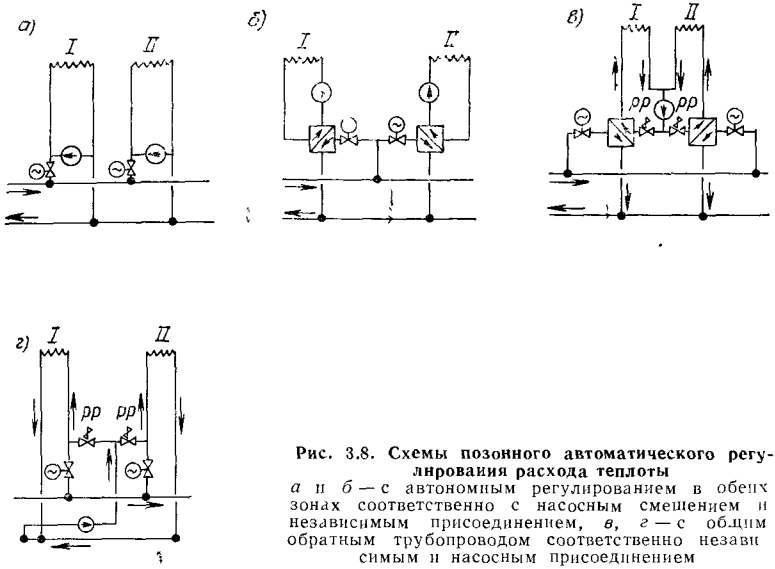


Рис. 3.8. Схемы позонного автоматического регулирования расхода теплоты
а и *б* — с автономным регулированием в обеих зонах соответственно с насосным смешением и независимым присоединением, *в*, *г* — с общим обратным трубопроводом соответственно независимым и насосным присоединением

жается к режиму тепловой нагрузки на систему и позволяет сократить расход теплоты на отопление по сравнению с регулированием системы по централизованному графику. Об этом свидетельствуют результаты натурных обследований систем. На рис. 3.9 показан режим отпуска теплоты на отопление юго-восточного фасада 16-этажного жилого дома в Москве при действии солнечной радиации. При появлении солнца температура воздуха в квартирах повышается примерно на 1°. Теплоотдача системы отопления при этом снижается в 2,5 раза по сравнению с теплоотдачей при центральном регулировании изменением температуры теплоносителя. Суточный расход теплоты сокращается на 25%.

Наиболее экономичным и надежным способом обеспечения температурных условий в помещении является индивидуальное изменение теплопроизводительности приборов систем отопления. При таком способе учитываются специфические условия различных помещений, обеспечивается поддержание в помещениях температурных условий в соответствии с требованиями находящихся в них людей, устраняются перетопы в помещении, обуслов-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

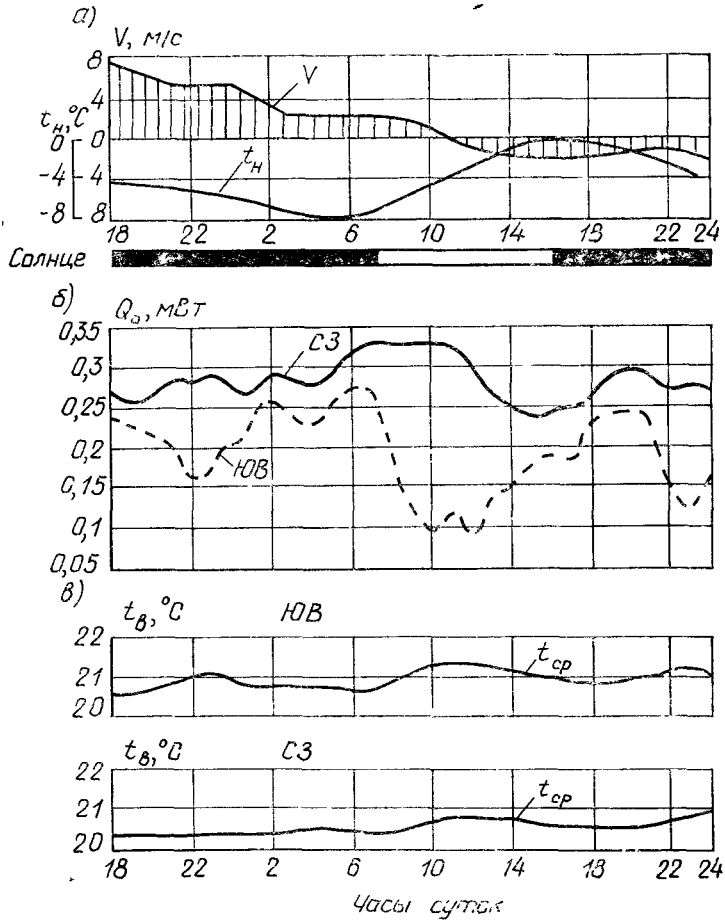


Рис. 3.9. Режимы работы системы отопления с пофасадным регулированием при действии солнечной радиации

а — изменение температуры наружного воздуха $t_н$, направления и скорости ветра v, *б* — изменение расхода теплоты на отопление помещений юго-восточного и северо западного фасадов, *в* — изменение средней температуры внутреннего воздуха в квартирах юго-восточного и северо западного фасадов

ленные внутренними тепловыделениями и прочими переменными факторами, которые не могут быть учтены при центральном и местном изменении тепловой мощности систем.

Теплопроизводительность системы при индивидуаль-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ном регулировании соответствует тепловой нагрузке на систему, среднесуточная величина которой с учетом формулы (3.1) равна:

$$Q_{с.0} = Q_{тр}\,\eta_{тр} + Q_{и}\,\eta_{и} + Q_S\,\eta_S + Q_D\,\eta_D + Q_{в}\,\eta_{в}. \quad (3.4)$$

Коэффициенты нагрузки для отдельных потоков теплоты определим по формуле (3.2):

1) для трансмиссионного потока теплоты $Q_{тр}$

$$\eta_{тр} = \frac{1 + 0{,}5\,\rho_{тр}/\bar{\Lambda}_{п}}{1 + 0{,}5\,\rho_{с}/\bar{\Lambda}_{п}}, \quad (3.5)$$

где $\rho_{гр}=0{,}45$ для холодного времени года и $\rho_{тр}=0{,}3$ для теплого времени года; $\rho_{с}$ принимают равной для воздушных систем 1, конвекторных систем 0 85, для панельно лучистых 0,4 и для радиаторных систем отопления 0,25,

2) для потока теплоты с инфильтрующимся воздухом $Q_{п}$

$$\eta_{и} = -\frac{1 + 0{,}5/\bar{\Lambda}_{п}}{1 + 0{,}5\,\rho_{с}/\Lambda_{п}}; \quad (3.6)$$

3) для потоков теплоты от прямой или рассеянной солнечной радиации Q_{s} *и* Q_D

$$\eta_{S,D} = -\frac{1}{1 + 0{,}5\,\rho_{с}/\Lambda_{п}}; \quad (3.7)$$

4) для потока теплоты от внутренних источников $Q_{в}$

$$\eta_{в} = -\frac{1 + 0{,}5\,\rho_{в}/\bar{\Lambda}_{п}}{1 + 0{,}5\,\rho_{с}/\bar{\Lambda}_{п}}. \quad (3\ 8)$$

Пример расчета тепловой нагрузки на дежурную систему отопления, работающую совместно с системой кондиционирования воздуха, приведен в прил. III

О высокой надежности и экономичности индивидуального регулирования отопительных приборов свидетельствуют результаты измерения температуры воздуха в 4-этажном жилом доме, оборудованном однотрубной системой отопления с замыкающими участками (табл 3 3). Включение индивидуальных терморегуляторов позволило резко снизить (почти на 3°) температуру воздуха в помещениях, а следовательно, устранить перетоп помещения.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 3.3. СРЕДНЕСУТОЧНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Режим работы терморегулятора	Среднесуточная температура наружного воздуха $t_н$, °С	Температура воздуха в помещении $t_в$, °С				Среднее значение $t_в$ °С
Отключен	1 6 —0 4 1,8	22,8 22,2 22,8	23,4 22,9 22,7	23,7 23,5 24,7	23,0 23,5 23,0	23 1
Включен	1,9 0,1 2,1	20,9 20,6 21,5	19,4 18,6 20,4	20,5 20,4 20,9	20,2 19,5 20,7	20 3

§ 3.3. Режим работы систем кондиционирования воздуха и приточной вентиляции

Необходимая теплохолодопроизводительность системы кондиционирования воздуха, соответствующая тепловой нагрузке на систему, достигается обеспечением требуемых параметров приточного воздуха (воздуха на выходе из кондиционера) путем выбора и поддержания того или иного режима работы аппаратов и устройств, входящих в состав технологического оборудования системы Требуемые параметры приточного воздуха можно обеспечить тепловлажностной обработкой его в кондиционере в различной последовательности. При этом расход энергоресурсов системой будет различным. Задача управления СКВ состоит в том, чтобы выбрать такую последовательность режимов работы элементов системы, при которой годовой расход теплоты, холода, электроэнергии и воды был бы наименьшим

Различные установки кондиционирования воздуха имеют определенный набор устройств для тепловлажностной обработки воздуха и обладают разными возможностями с точки зрения энергопотребления.

В СКВ с кондиционерами, снабженными форсуночными камерами орошения, требуемое влагосодержание приточного воздуха часто обеспечивается путем фиксации температуры точки росы воздуха на выходе из оросительной камеры. При таком методе обеспечения пара-

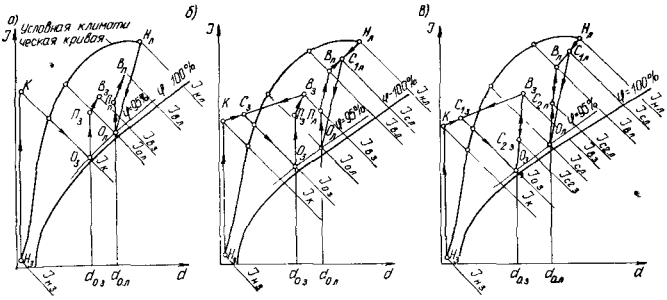
Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

метров приточного воздуха, получившем название метода «точки росы», в кондиционере можно выделить два взаимосвязанных контура регулирования теплохолодопроизводительности аппаратов: первый предназначен для стабилизации температуры воздуха на выходе из камеры орошения, второй — температуры приточного воздуха. Необходимость изменения теплохолодопроизводительности теплообменников первого контура связана с изменением параметров наружного воздуха. Изменение тепловлажностной нагрузки на систему требует регулирования производительности теплообменников, входящих во второй контур.

Рассмотрим режимы круглогодичной работы основных **центральных систем кондиционирования воздуха,** регулируемых по методу точки росы. При таком способе регулирования границы режимов работы элементов системы могут быть однозначно определены изоэнтальпами, поэтому изменение параметров наружного воздуха в течение года, необходимое для анализа режимов работы СКВ, представим в виде некоторой линии (климатической) на поле $I-d$-диаграммы, которая может быть построена, например, по данным повторяемости $t_н$ и $I_н$. Процессы обработки воздуха в центральной прямоточной СКВ в $I-d$-диаграмме показаны на рис. 3.10, *а*.

В теплый период года наружный воздух охлаждается и осушается до состояния, соответствующего точке $О_л$, а затем подогревается (при необходимости) в калориферах второй ступени подогрева до состояния, соответствующего точке $П_л$ и поступает в помещение. Наружный воздух охлаждается до тех пор, пока его энтальпия больше $I_{о.л}$. При дальнейшем понижении энтальпии наружного воздуха холодильная установка системы отключается и оросительная камера работает в режиме адиабатического увлажнения. В это время года параметры внутреннего воздуха изменяются от величины, соответствующей точке $В_л$, до величины, соответствующей точке $В_з$, вместе с изменением параметров наружного воздуха (см. рис. 2.3). При понижении энтальпии наружного воздуха до $I_{о.л}$ (точка *2*) включаются калориферы первой ступени подогрева и система переходит на зимний режим работы.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/



3.10. Режим работы центральных систем кондиционирования воздуха: прямоточной (*а*), с первой рециркуляцией (*б*), с первой и второй рециркуляцией (*в*)

Н — параметры наружного воздуха; *В* — параметры внутреннего воздуха, *О* — параметры воздуха на выходе из охладительной камеры; П — параметры приточного воздуха; *К* — параметры воздуха на выходе из калориферов первого подогрева; C_1 и C_2 — параметры смеси наружного и внутреннего воздуха соответственно первой и второй рециркуляции

На рис. 3.10, *б* представлен процесс круглогодичной обработки воздуха в системе с первой рециркуляцией. Рециркуляция воздуха применяется в связи с необходимостью ограничения перепада температуры внутреннего и приточного воздуха при воздухообмене в помещении, превышающем необходимый по санитарным нормам. В системе с рециркуляцией вентилятор круглый год подает объем воздуха, превышающий минимально необходимый, что приводит к перерасходу электроэнергии.

В теплое время года смесь наружного и внутреннего воздуха (точка $C_{1,л}$) подается в охладительную камеру, где охлаждается и осушается, а затем подвергается подогреву во второй ступени. Смесь воздуха целесообразно охлаждать до тех пор, пока энтальпия наружного воздуха больше энтальпии внутреннего (уходящего) воздуха.

При дальнейшем понижении $I_н$ система работает как прямоточная. Когда энтальпия наружного воздуха достигает значения, равного $I_{о.л}$, в оросительную камеру начинает поступать смесь наружного и рециркуляционного воздуха, причем доля наружного воздуха уменьшается с уменьшением его энтальпии до минимальной величины. Начиная с момента времени, когда $I_и = I_к$, включается в работу первая ступень подогрева.

Процессы обработки воздуха с первой и второй ре-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

циркуляцией в $I-d$-диаграмме представлены на рис. 3,10, *в*. Доля внутреннего воздуха второй рециркуляции от общего количества воздуха принимается исходя из расчетных летних условий и остается постоянной. Применение второй рециркуляции позволяет сократить расход теплоты на второй подогрев, но не исключает второй подогрев вообще. Вторая ступень подогрева включается при уменьшении тепловлажностного соотношения в помещении и тепловой нагрузки на систему относительно расчетного летнего значения.

Таким образом, для центральных СКВ, регулируемых по методу точки росы, можно выделить последовательность режимов обработки воздуха, приведенную в табл. 3.4.

ТАБЛИЦА 3.4. РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА В ЦЕНТРАЛЬНЫХ СКВ

Режимы обработки	Граничные значения энтальпии наружного воздуха в СКВ	
	прямоточной	с рециркуляцией
1. Охлаждение смеси наружного и рециркуляционного воздуха		$I_{в.л} < I_н < I_{н.л}$
2. Охлаждение наружного воздуха	$I_{о.л} < I_н > I_{н.л}$	$I_{о.л} < I_н < I_{в.л}$
3. Адиабатическое увлажнение наружного воздуха	$I_{о.з} < I_н < I_{о.л}$	$I_{о.з} < I_н < I_{о.л}$
4. Адиабатическое увлажнение смеси наружного и рециркуляционного воздуха		$I_к < I_и \leqslant I_{о.л}$
5. Первый подогрев наружного воздуха	$I_{н.з} < I_н < I_{о.з}$	$I_{н.з} < I_н < I_к$

Указанная последовательность режимов работы теплообменников относится к первому контуру регулирования. Теплопроизводительность теплообменников первого подогрева и холодопроизводительность охладительной камеры прямо пропорциональны разности эн-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

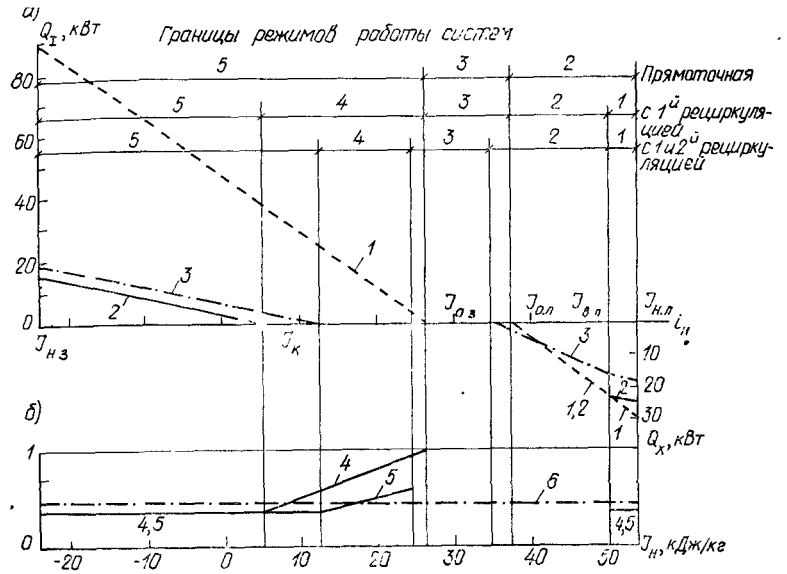


Рис. 3.11. Диаграмма регулирования центральных систем кондиционирования воздуха

а — изменение расхода теплоты на первый подогрев и холода в системах: прямоточной (*1*), с первой (*2*) и с первой и второй рециркуляцией (*3*); *б* — изменение доли наружного воздуха в системах: прямоточной и с первой рециркуляцией (*4*), с первой и второй рециркуляцией (*5*) и со второй рециркуляцией (*6*)

тальпии воздуха после калорифера $I_к$ и наружного $I_н$, а также наружного и после охладительной камеры I_0.

На рис. 3.11, *а* представлена диаграмма изменения теплохолодопроизводительности в первом контуре регулирования СКВ, тепловая нагрузка на которую была рассчитана в прил. II и III.

Годовое изменение основных показателей СКВ приведено на рис. 3.12. На рис. 3.11, *б* показан режим изменения долей наружного и внутреннего второй рециркуляции воздуха от общего количества приточного воздуха.

Как видно из рис. 3.11, *а*, применение первой рециркуляции позволяет существенно сократить расход теплоты на первый подогрев и несколько сократить расход холода по сравнению с прямоточной системой. При ис-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

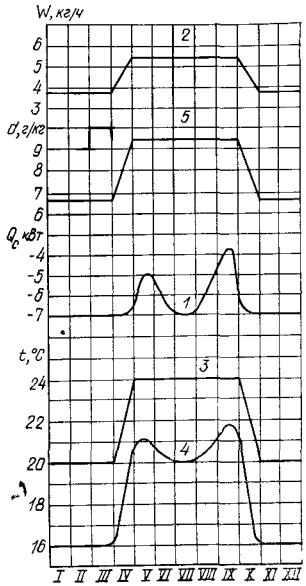


Рис. 3.12. Годовое изменение тепловой и влажностной нагрузки на систему кондиционирования воздуха
1 — средняя за время работы тепловая нагрузка на систему по явному теплу, *2* — влагоизбытки в помещении, *3* — температура внутреннего воздуха, *4* — температура приточного воздуха, *5* — влагосодержание приточного воздуха

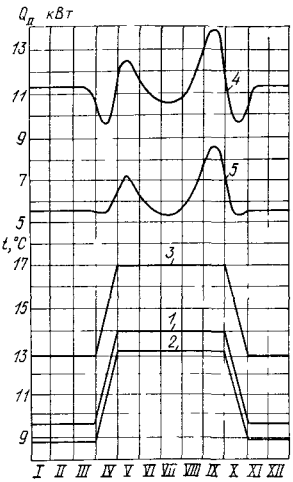


Рис. 3.13 Годовое изменение тепловой нагрузки на второй подогрев в центральной СКВ
1 — температура воздуха на выходе из оросительной камеры в системе прямоточной и с первой рециркуляцией *2* — то же, в системе со второй рециркуляцией *3* — температура смеси внутреннего воздуха и на выходе из оросительной камеры в системе со второй рециркуляцией, *4* — тепловая нагрузка на второй подогрев в системе прямоточной и с первой рециркуляцией, *5* — то же, в системе со второй рециркуляцией

пользовании второй рециркуляции уменьшается потребление холода системой.

Рассмотрим режим работы калориферов второго подогрева, составляющих второй контур регулирования в центральных СКВ, на том же примере системы. Тепловая нагрузка на калорифер второго подогрева пропорциональна разности температуры приточного воздуха и воздуха на входе в калорифер первого подогрева. Годовое изменение тепловой нагрузки на калориферы второго подогрева, полученное по данным рис. 3 12, показано на рис. 3.13. Как видим, применение второй рециркуляции позволяет почти в 2 раза сократить расход

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

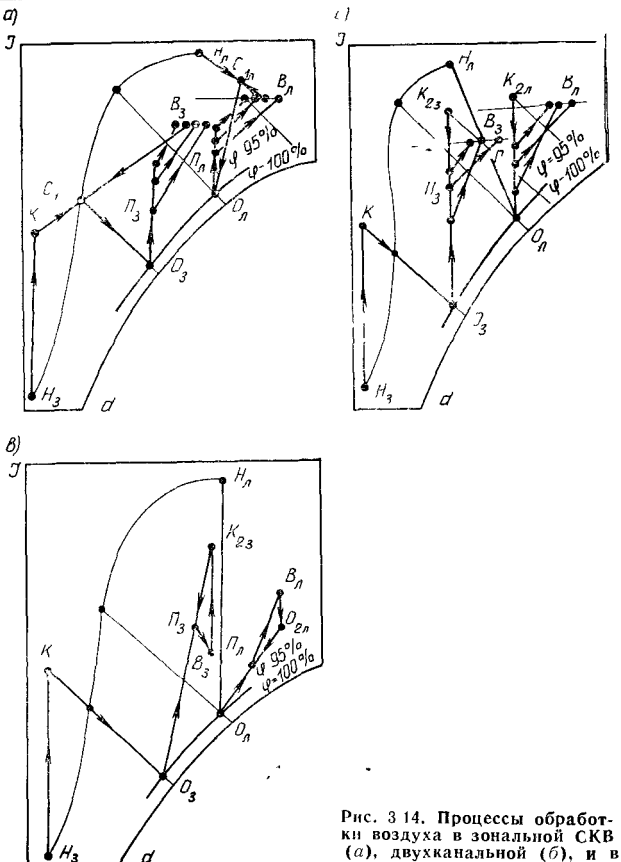


Рис. 3 14. Процессы обработки воздуха в зональной СКВ (*а*), двухканальной (*б*), и в СКВ с доводчиком (*в*)

теплоты на второй подогрев. Характер изменения тепловой нагрузки на второй подогрев в основном повторяет характер годового хода температуры приточного воздуха, причем максимальная нагрузка приходится на сентябрь, что свидетельствует о необходимости рассмотрения годового режима тепловой нагрузки на систему для обоснованного выбора установочной мощности элементов СКВ.

Рассмотренные центральные СКВ предназначены в основном для поддержания параметров воздуха в одном помещении или ряде однотипных помещений. В зданиях

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

с большим числом разнотипных по тепловому режиму помещений используют разновидности центральных и комбинированных (местно-центральные) СКВ.

Разновидностью центральных СКВ являются системы с **зональными подогревателями.** Второй подогрев в этой системе вынесен за пределы кондиционера и состоит из ряда теплообменников, обслуживающих отдельные зоны. Так как параметры воздуха на выходе из кондиционера (точка *О* на рис. 3.14, *а*) одинаковы для всех зон, то в разных помещениях обеспечивается разная влажность воздуха.

В СКВ с зональными подогревателями вторая рециркуляция применяется редко. Режим работы калориферов первого подогрева и охладительной камеры в системе аналогичен режиму работы в системе с первой рециркуляцией, причем граница первого режима (охлаждение смеси наружного и рециркуляционого воздуха) определяется изоэнтальпой, соответствующей точке $С_{1л}$. Энтальпия воздуха в точке $С_{1л}$ определяется как средневзешенная по расходам и энтальпии внутреннего воздуха, забираемого на рециркуляцию из каждого помещения.

Режим работы зональных подогревателей зависит от режима тепловой нагрузки на СКВ в каждой зоне (помещении). При этом осуществляется индивидуальное регулирование производительности теплообменников.

Другой разновидностью центральных СКВ является **двухканальная система,** в которой горячий и холодный воздух по двум параллельным каналам подается в кондиционируемое помещение. Температура приточного воздуха для каждого помещения обеспечивается в результате смешивания горячего и холодного воздуха в необходимой пропорции.

Процессы обработки воздуха в прямоточной двухканальной СКВ показаны на рис. 3.14, *б*. По эффекту действия и с точки зрения режимов регулирования кондиционера рассматриваемая система аналогична зональной СКВ.

В административных, гостиничных и других зданиях широкое распространение получили **комбинированные местно-центральные системы с кондиционерами-доводчиками.** Система состоит из центрального кондиционера, обрабатывающего минимальное количество наружного

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

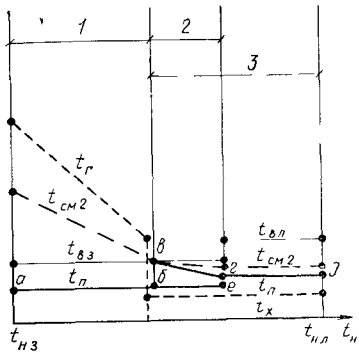


Рис. 3.15. Диаграмма изменения параметров в системе с кондиционерами-доводчиками

$t_г$ — температура горячей воды, $t_п$ — температура первичного воздуха; $t_{см2}$ — температура смеси первичного и подогретого в теплообменнике вторичного воздуха, $t_в$ — температура воздуха в помещении, $t_х$ — температура холодной воды, подаваемой к теплообменникам

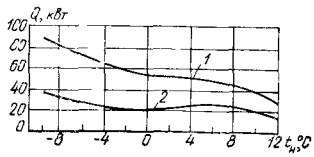


Рис. 3.17. Изменение расхода теплоты на нагрев воздуха в прямоточной (*1*) и в рециркуляционной (*2*) СВ

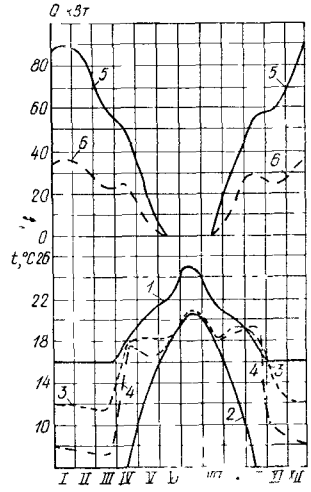


Рис. 3.16. Годовой режим работы приточной системы вентиляции

1 и *2* — средняя за время работы СВ температура соответственно внутреннего и наружного воздуха *3* и *4* — средняя температура приточного воздуха в прямоточной СВ и смеси наружного и внутреннего рециркуляционного воздуха *5* и *6* — расход теплоты прямоточной и рециркуляционной системами

воздуха, и местных доводчиков, осуществляющих нагрев или охлаждение рециркуляционного воздуха и смешение его с первичным — наружным. Система с доводчиками выполняет как функции отопления в холодное время года, так и функции кондиционирования воздуха круглый год. Процессы обработки воздуха в системе представлены на рис. 3.14,*в*. Доводчики присоединяют к источникам теплоты и холода по двух-, трех- или четырехтрубной схеме.

Рассмотрим режим работы теплообменников, который может быть осуществлен при любом из трех способов присоединения. На рис. 3.15 приведены диаграмма

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

режимов изменения температуры теплоносителя в доводчиках при изменении $t_в$. Температура горячей воды $t_г$ изменяется по линейному закону, температура холодной воды остается постоянной. Температура первичного воздуха при двухтрубной схеме системы, переключаемой посезонно на снабжение горячей или холодной водой, изменяется по ломаной линии *абвгд*, а для трех- и четырехтрубной схемы — по ломаной *абегд*.

Участок *в — г* соответствует периоду, который начинается в момент подачи холодной воды в теплообменники доводчиков, работающих по двухтрубной схеме. В этот период работает калорифер второго подогрева центрального кондиционера и помещения с положительной тепловой нагрузкой будут подогреваться первичным воздухом, а помещения с избытками теплоты будут охлаждаться холодной водой. Такой режим связан с перерасходом теплоты и холода.

При трех- и четырехтрубных схемах снабжения холодом и теплотой калориферы второго подогрева в центральных кондиционерах не требуются и перерасход теплоты и холода в системе не происходит.

Системы приточной вентиляции оборудуются калориферами, работающими в холодное время года. В зависимости от назначения СВ и обслуживаемого ею помещения возможны различные режимы работы калориферов.

На рис. 3.16 показано изменение в течение года температуры наружного, внутреннего и приточного воздуха ($L_0 = 12{,}2$ тыс. м^3/ч) для прямоточной и рециркуляционной систем. Как видим, продолжительность работы калориферов, соответствующая времени, когда $t_н < t_{пр}$, охватывает все месяцы года, кроме летних.

На рис. 3.17 приведена диаграмма изменения расхода теплоты системами вентиляции. Рециркуляция внутреннего воздуха, составляющая 50% общего объема, в рассматриваемом случае обеспечивает экономию 58% теплоты за год по сравнению с прямоточной системой.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 3.4. Режим работы систем кондиционирования воздуха с минимальным расходом энергии

Рассмотренные в § 3.3 режимы работы элементов СКВ в течение года основаны на регулировании по методу точки росы. При таком регулировании теплота на второй подогрев расходуется в том случае, когда энтальпия наружного воздуха превышает энтальпию приточного. В теплое время года второй подогрев воздуха является дополнительной нагрузкой для охладительной камеры. При совпадении параметров наружного и приточного воздуха не требуется никакой тепловлажностной обработки, но при регулировании по методу точки росы она проводится. Таким образом, использование метода точки росы связано с перерасходом энергии.

Во многих случаях расходы теплоты, холода и электроэнергии на кондиционирование воздуха в центральных СКВ можно сократить, если проводить его обработку в определенном порядке. Следует иметь в виду, что процесс кондиционирования воздуха неизбежно связан с расходом энергии, который зависит от ряда исходных условий (параметров наружного и внутреннего воздуха, тепловой, влажностной нагрузки на систему и их динамики и др.) и может быть разным для одной и той же системы.

В качестве критерия для оценки энергетической эффективности той или иной последовательности режимов работы элементов СКВ обычно принимают минимально неизбежный в данных условиях расход энергии. А. А. Рымкевичем разработана термодинамическая модель СКВ, состоящая из совокупности расчетных термодинамических схем и уравнений, которые для определенных исходных данных обеспечивают вычисление минимально неизбежных расходов теплоты, холода, воды и воздуха.

Рассмотрим основные принципы графического построения термодинамической модели в $I - d$-диаграмме. Область возможных сочетаний температуры и относительной влажности наружного воздуха разбивают на ряд зон. В пределах каждой из этих зон существует режим обработки наружного воздуха, обеспечивающий минимальный расход энергии.

В основу построения положена схема, предназначен-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

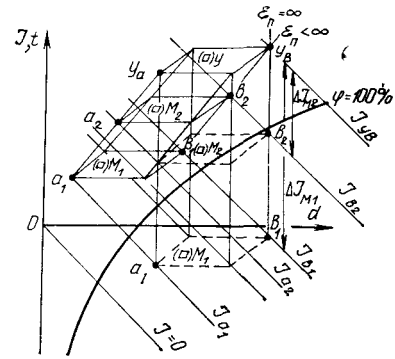


Рис. 3.18. Исходная схема, показывающая положение многоугольников M при одинаковых тепловых и разных влажностных нагрузках на СКВ (сплошные линии соответствуют $\varepsilon_{\text{п}} < \infty$, пунктирные $\varepsilon_{\text{п}} = \infty$)

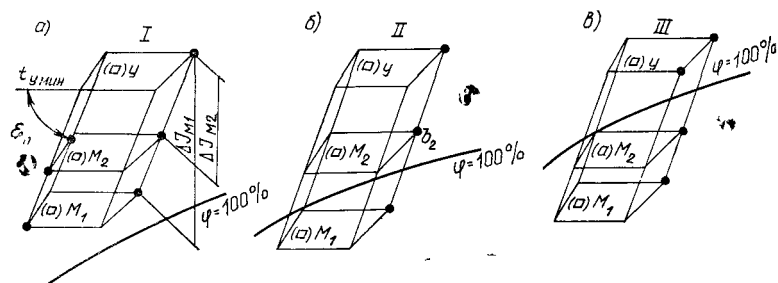


Рис. 3.19. Классификация тепловлажностных нагрузок по местоположению многоугольников M на исходной расчетной схеме

ная для обобщения исходных условий. Исходная схема (рис. 3.18) состоит из трех многоугольников, нанесенных на поле $I-d$-диаграммы. Многоугольник Y характеризует область допустимых параметров в помещении. Многоугольник M_1 имеет те же размеры и форму, что и многоугольник Y, но расположен ниже последнего вдоль линии тепловлажностного отношения в помещении ε на разность энтальпии ΔI_{M_1}, равную:

$$\Delta I_{M_1} = I_{Y_{\text{в}}} - I_{\text{в}_1} = I_{Y_a} - I_{a_1} = \ldots = \frac{Q_{\text{с}}}{G_{\text{н.мин}}},$$

где $Q_{\text{с}}$ — тепловая нагрузка на СКВ (по полному теплу); $G_{\text{н.мин}}$ — минимальное количество наружного воздуха.

Многоугольник M_2 аналогичен многоугольнику M_1 с той лишь разницей, что он отстоит от многоугольника Y на разность энтальпий ΔI_{M_2}, равную:

$$\Delta I_{M_2} = I_{Y_{\text{в}}} - I_{\text{в}_2} = I_{Y_a} - I_{a_2} = \ldots = \frac{Q_{\text{с}}}{G_{\text{н.макс}}},$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

где $G_{н\,макс}$ — максимальное количество наружного воздуха (в пределе — расчетный воздухообмен помещения).

Многоугольники M_1 и M_2 ограничивают область возможных сочетаний параметров приточного воздуха. Многоугольники M могут быть расположены выше и ниже линии $\varphi = 100\%$.

Все построения в $I-d$-диаграмме, выполняемые ниже линии $\varphi = 100\%$, являются только вспомогательными, фиксирующими положения соответствующих изоэнтальпий в рабочей части диаграммы выше $\varphi = 100\%$.

На рис. 3.18 показан случай, когда положение многоугольников M изменяется в зависимости от тепловлажностного отношения ε, несмотря на то, что $Q_с/G_{н\,мин}$ и $Q_с/G_{н\,макс}$ для двух сравниваемых вариантов имеют одинаковые значения. Могут быть и другие случаи, когда при одинаковом значении ε многоугольники M располагаются выше или ниже линии $\varphi = 100\%$ из-за различных величин $Q_с/G_{н\,мин}$ и $Q_с/G_{н.макс}$. Положение многоугольников влияет на размещение и границы расчетных зон в термодинамической модели, так как они являются исходными для построения модели.

Тепловая и влажностная нагрузки на систему, определяющие положение многоугольников, характеризуются широким диапазоном их значений в разных помещениях. Три принятых к рассмотрению отношения $Q_с/G_{н\,мин}$, $Q_с/G_{н.макс}$ и $\varepsilon_п = Q_с/W$ позволяют обобщить и систематизировать исходные данные, несмотря на их разнообразие по величине и возможному сочетанию. В частности, систематизация этих отношений для СКВ общего назначения приводит к разделению всех возможных сочетаний тепловой и влажностной нагрузок на три класса. Под классами тепловлажностных нагрузок понимаются такие их сочетания с расходом наружного воздуха, которые в конечном итоге обусловливают одинаковые требования и схемы их автоматического управления.

I класс тепловлажностных нагрузок (рис. 3.19, *а*) соответствует положению многоугольников M_1 и M_2 выше линии $\varphi = 100\%$; пределы тепловлажностного отношения ε для этого класса нагрузок показаны на рисунке стрелками. Они принимаются равными от бесконечности до значения, соответствующего изолинии $t_{у.мин}$.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

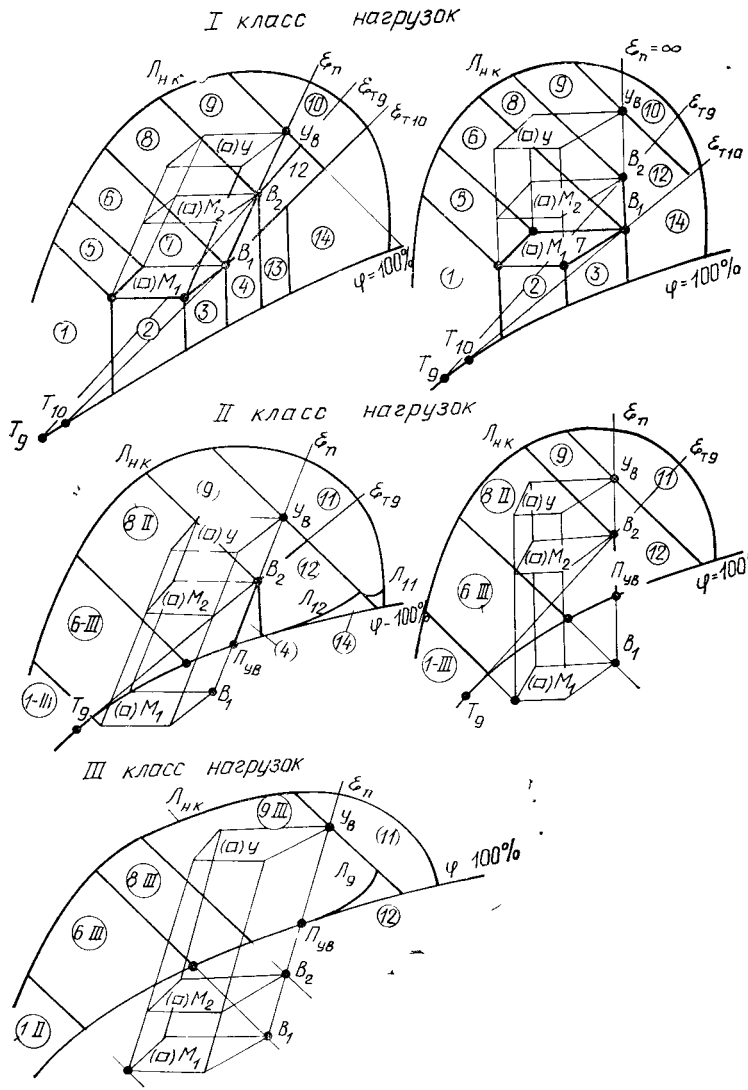


Рис. 3.20. Расчетные схемы термодинамической модели СКВ

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

II класс тепловлажностных нагрузок (рис. 3.19, *б*) соответствует случаю, когда многоугольник M_1 расположен ниже линии $\varphi = 100\ \%$, а многоугольник M_2 или его вершина B_2 — выше ее.

III класс тепловлажностных нагрузок (рис. 3.19, *в*) характеризуется расположением многоугольников M_1 и M_2 ниже линии стопроцентного насыщения воздуха.

Для каждого из классов тепловлажностных нагрузок может быть построена графически гермодинамическая модель системы. Для построения модели на поле $I - d$-диаграммы наносят линию $Л_{н\,к}$ (рис. 3.20), ограничивающую область возможных сочетаний параметров наружного воздуха для данного географического пункта (граничная линия $t - \varphi$-диаграммы на рис. 3.3). Затем на $I - d$-диаграмме строят исходную схему, соответствующую рассматриваемому классу нагрузок.

Характерные граничные точки и линии исходной схемы определяют границы зон параметров наружного воздуха. Зоны характеризуются определенными процессами обработки наружного воздуха, параметры которого находятся внутри границ зоны. Можно выделить четыре группы зон: первая группа связана с неизбежным потреблением теплоты (зоны *1*, *2*, *3*, *4*); для второй группы (зоны *5*, *6*, *7*, *8*) потребление теплоты и холода равно нулю, так как достаточно использования адиабатического увлажнения и смешения потоков воздуха; для зон третьей группы неизбежно потребление искусственного холода (зоны *9*, *10*, *11*, *12*); четвертая группа связана с обязательным потреблением и теплоты и холода (зоны *13*, *14*).

Как видно из рис. 3.20, число зон для разных классов нагрузок меняется. Наибольшее число зон соответствует первому классу нагрузок при $\varepsilon_п < \infty$. Для других классов некоторые зоны исчезают или, оставаясь и сохраняя основные признаки, приобретают некоторые дополнительные особенности, поэтому к общему порядковому номеру зоны прибавляется римская цифра, характеризующая класс нагрузки.

Аналогичный принцип зонирования параметров наружного воздуха положен в основу метода оптимальных

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 35 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

Номер участка (см. рис. 3.21), в пределах которого расположена точка, характеризующая состояние наружного воздуха	Оптимальная последовательность тепловлажностной обработки воздуха в кондиционере
I	Смесь уходящего воздуха (точка $У_3$) и санитарной нормы наружного воздуха подогревается в калорифере первого подогрева до энтальпии, $I_{0мин}$, изоэнтальпически увлажняется и далее подогревается в калорифере второго подогрева (до точки $П_3$)
II	Часть смеси уходящего воздуха (точка $У_3$) и санитарной нормы наружного воздуха изоэнтальпически увлажняется, после чего весь обрабатываемый воздух подогревается в калорифере (до точки $П_3$)
III	Часть смеси наружного и уходящего воздуха (точка $У_3$), имеющей энтальпию $I_{н\,мин}$ изоэнтальпически увлажняется, после чего смешивается с необработанной частью смеси
IV	Часть наружного воздуха изоэнтальпически увлажняется, после чего смешивается с необработанной частью наружного воздуха в такой пропорции, когда конечное состояние смеси воздуха характеризуется точкой на ломаной линии $П_3П_4П_1$
V	Наружный воздух подается в помещение без тепловлажностной обработки
VI	Наружный воздух смешивается с уходящим в такой пропорции, когда параметры смеси характеризуются точкой на ломаной
VII	Смесь уходящего воздуха и санитарной нормы наружного воздуха подогревается в калорифере до состояния, характеризуемого точкой на ломаной $П_1П_2П_3$
VIII	Смесь наружного и уходящего воздуха (точка $У_1$) подогревается в калорифере (точка $П_1$)
IX	Часть наружного воздуха охлаждается (точка $К$), после чего весь обрабатываемый воздух подогревается в калорифере (точка $П_1$)
X	Часть наружного воздуха охлаждается, после чего смешивается с необработанным наружным воздухом в такой пропорции, что состояние смеси соответствует точке $П_1$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Продолжение табл 3.5

Номер участка (см рис 3.21), в пределах которого расположена точка, характеризующая состояние наружного воздуха	Оптимальная последовательность тепловлажностной обработки воздуха в кондиционере
XI	Часть смеси уходящего (точка $У_1$) воздуха и санитарной нормы наружного воздуха охлаждается (точка $К$), после чего смешивается с необработанной частью смеси и подогревается в калорифере (точка $П_1$)
XII	Последовательность обработки воздуха в кондиционере та же, что для участка $Х$, только вместо наружного воздуха используется смесь уходящего воздуха (точка $У_1$) и санитарной нормы наружного воздуха

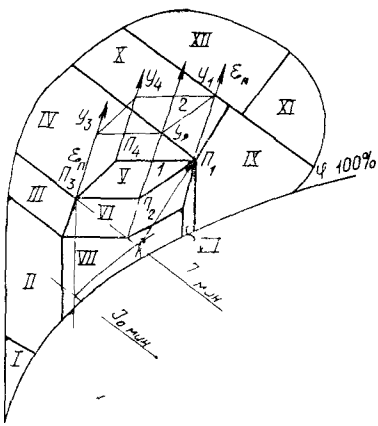


Рис. 3.21 Границы зон параметров наружного воздуха при регулировании СКВ по методу оптимальных режимов
1 и *2* — области сочетаний параметров приточного и уходящего воздуха

режимов регулирования кондиционеров, разработанного А. Я. Креслинем. Под оптимальным режимом понимается такая последовательность тепловлажностной обработки воздуха в кондиционере, при которой расход энергии приближается к минимально неизбежному. При регулировании по оптимальному режиму можно выделить 12 зон параметров наружного воздуха (рис. 3.21), для которых присуща та или иная оптимальная последовательность обработки воздуха.

Приведенные в табл. 3.5 технологические процессы обработки воздуха выбирают в зависимости от положения на $I-d$-диаграмме точки, характеризующей в данный момент состояние наружного воздуха. В рассматриваемом методе широко используются байпас оросительной камеры, адиабатическое увлажнение, рециркуляция внутреннего воздуха, позволяющие сократить расход теплоты и холода системой. При этом может быть достигнута экономия холода более 50% и теплоты более 80% по сравнению с регулированием по методу точки росы.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

РАЗДЕЛ II. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ

§ 4.1. Основные понятия. Классификация систем автоматического регулирования

Автоматическое регулирование — это осуществление какого-либо процесса без непосредственного участия человека, с помощью соответствующих систем автоматики. Под автоматикой в данном случае понимают технические средства, входящие в эти системы. Под автоматикой понимают также отрасль науки и техники, связанную с разработкой принципов построения систем автоматического регулирования и автоматически действующих технических средств.

В любой системе автоматического регулирования находится объект управления, отличительной особенностью которого является наличие в нем управляемого процесса. Управляемый процесс характеризуется одной или несколькими физическими величинами, называемыми регулируемыми параметрами.

Задача системы автоматического регулирования заключается в целенаправленном воздействии на объект управления в том случае, когда проходящий в нем процесс отклоняется от заданного. **Система автоматического регулирования** в принципе представляет собой совокупность объекта управления и автоматического регулятора. Воздействие на объект управления осуществляет непосредственно автоматический регулятор, который обычно состоит из определенных по функциональной значимости элементов (рис. 4.1): датчика *1*, преобразующе-усилительного устройства *2*, суммирующего устройства *3*, измерительно-показывающего устройства *4*, усилительного устройства *5*, исполнительного устройства *6*, регулирующего органа *7*.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

В состав некоторых автоматических регуляторов не входят такие элементы, как преобразующе-усилительное, измерительно-показывающее или усилительное, так как в ряде случаев энергия, необходимая для работы автоматического регулятора, потребляется им не со стороны, а непосредственно от самого объекта управления. Элементный состав автоматического регулятора определяется также рядом других факторов, таких, как промышленная ориентация, универсальность применения, конкретность применения и т. д.

Многообразие систем автоматического регулирования (САР) требует их классификации. В зависимости от различного рода свойств, присущих САР, они различаются:

а) *по виду регулируемого параметра* — САР температуры, давления, уровня влажности и т. д.;

б) *по принципу действия* — САР непрерывного, релейного и импульсного действия;

в) *по характеру алгоритма функционирования* (задания) — САР стабилизирующие, программные, следящие;

г) *по виду используемой энергии рабочей среды в регуляторе и исполнительном элементе* — САР электрические, пневматические, гидравлические и т. д.;

д) *по динамическим свойствам* — САР быстродействующие, медленнодействующие, статические, астатические и т. п.

Из всех перечисленных свойств САР наиболее важными являются те, которые определяют их динамические свойства. Поскольку система автоматического регулирования состоит из ряда взаимосвязанных элементов (звеньев), то ее динамические свойства будут прежде всего определяться динамическими свойствами этих элементов.

Разделение САР на отдельные элементы целесообразно по целому ряду причин. Это позволяет более экономично осуществлять разработку (синтез) системы автоматического регулирования и ее анализ. Существуют два подхода к разделению САР на отдельные элементы. Один из них позволяет определить функциональную сущность отдельных элементов САР, и

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

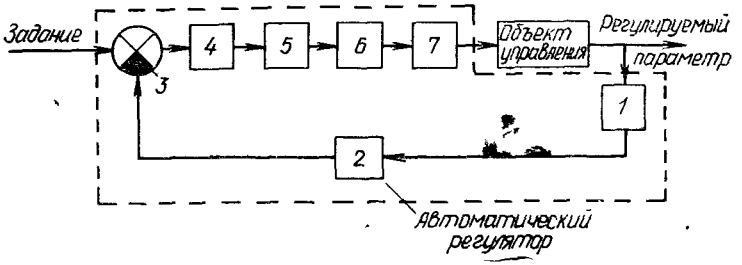


Рис. 4.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования
1 — датчик, *2* — усилительно-преобразующее устройство; *3* — сумматор (измерительный элемент), *4* — усилитель, *5* — усилительно-преобразующее устройство; *6* — исполнительный механизм; *7* — регулирующий орган

тогда представляется возможность построить функциональную схему САР, как, например, на рис. 4.1. Другой подход связан с разделением САР на отдельные элементы, каждый из которых представляет собой математическую модель определенного динамического процесса, происходящего как бы внутри этого элемента. Следует особо отметить, что в виде математической модели представляется именно тот процесс, который для данной САР является определяющим. При этом уравнение динамики должно быть не выше 2-го порядка. Такое ограничение на порядок уравнения динамики указывает на необходимость деления САР на элементарные динамические звенья, движение которых можно свести к уравнениям с производной не выше 2-го порядка.

Выражение САР через взаимосвязанные элементарные динамические звенья позволяет получить ее динамические свойства путем несложных операций по замене одних звеньев другими. При анализе работы промышленных САР такие операции могут осуществляться путем соответствующей настройки самих автоматических регуляторов, конструкции которых обычно позволяют производить указанные действия.

Иначе обстоит дело с объектами автоматического регулирования, которые являются составной частью САР. Объект автоматического регулирования может быть выражен через одно элементарное динамическое

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

звено, а также через несколько взаимосвязанных элементарных динамических звеньев. Разбивка объекта автоматического регулирования на элементарные динамические звенья должна быть целесообразной с точки зрения удобства анализа и синтеза САР.

Если динамические свойства регулятора могут изменяться вследствие его настройки, то объект автоматического регулирования как динамическое звено или набор их в процессе работы САР остается обычно неизменным. И только в процессе проектирования объекта автоматического регулирования имеется возможность, изменяя конструкцию объекта, активно воздействовать на его динамические свойства в нужном направлении. Именно на стадии проектирования объекта наиболее эффективно можно использовать его математическую модель в виде ориентированного поля элементарных динамических звеньев. При этом исследование объекта автоматического регулирования можно производить как с помощью аналоговой, так и цифровой вычислительной машины.

Необходимо иметь в виду, что соединение между собой отдельных элементарных динамических звеньев должно происходить по правилу: совместимость соединенных между собой в любой последовательности элементарных динамических звеньев возможна только при физической однородности величин, образующих каналы связи этих звеньев.

На рис. 4.2 показана структурная схема объекта регулирования. В данном случае объект автоматического регулирования представляет собой фрагмент поля динамических звеньев, который в процессе проектирования САР может изменяться в зависимости от поставленных задач. Математическая модель объекта в виде структурной схемы позволяет оперативно осуществлять его исследование с помощью электронно-вычислительного устройства с целью установления заданных динамических свойств и, таким образом, целенаправленного изменения его конструкции.

Следовательно, конструктивные решения объектов управления в целом или отдельных их элементов должны вырабатываться исходя не только из задач обеспече-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

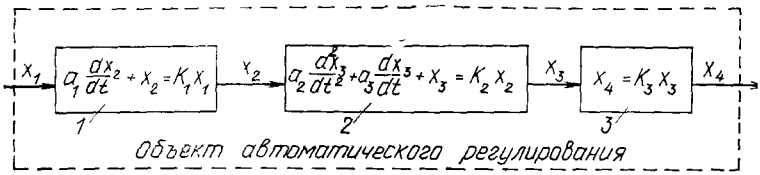


Рис. 4.2. Представление объекта регулирования в виде элементарных динамических звеньев

1, 2, 3 — элементарные динамические звенья; x_1 — величина входа в объект; x_4 — величина выхода из объекта; x_2 — величина выхода звена *1* и входа звена *2*; x_3 — величина выхода звена *2* и входа звена *3*, a_1, a_2, a_3, k_1, k_2, k_3 — постоянные коэффициенты

ния той или иной технологии процесса, но и с учетом их управляемости с помощью средств автоматики.

Игнорирование подобного подхода приводит к созданию машин, аппаратов и процессов, автоматическое управление которыми может оказаться в принципе невозможным, и в конечном счете к неоправданным затратам средств и труда.

В технических системах автоматического регулирования каждый элемент автоматического регулятора выполняет определенные функции.

Датчик — чувствительный элемент — предназначен для восприятия САР физической величины, выбранной как регулируемый параметр в объекте регулирования. В некоторых случаях в датчике конструктивно объединены чувствительный элемент с преобразующе-усилительным устройством. Это обычно вызвано необходимостью преобразования в информационном канале сигнала одной физической природы в сигнал другой с последующим его усилением с целью сокращения до минимума потери в каналах связи информации и обеспечения возможности последующему функциональному элементу устойчиво воспринимать направленный от датчика сигнал.

Преобразующе-усилительное устройство предназначено для выполнения указанных функций и обычно находится по каналу прохождения сигнала после датчика или чувствительного элемента. Однако в некоторых случаях преобразующе-усилительное устройство может

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

находиться и на других участках контура системы автоматического регулирования.

После соответствующего усиления сигнал сравнивается с однородным по физической сущности сигналом, который представляет собой сигнал-задание и формируется в зависимости от заданных САР функциональных задач. Эти задачи могут предусматривать обеспечение САР стабилизации регулируемого параметра, его программного изменения или слежения за изменением какой-либо физической величины, не функционирующей в данном контуре регулирования. Элемент САР, который выполняет вышеуказанные функции, называют **измерительным**, или **суммирующим.** Устройство, с помощью которого формируется сигнал-задание, называется **задатчиком.**

В том случае когда сигнал-задание и сигнал, пришедший от датчика, не равны между собой, образуется так называемый **сигнал рассогласования,** который и является как бы источником последующего действия регулятора. Это действие формируется по заранее заданным законам регулирования, сущность которых будет рассмотрена далее.

Сигнал рассогласования после соответствующей обработки и последующего усиления направляется на исполнительное устройство, которое через регулирующий орган непосредственно воздействует на поток среды или энергии, направляемой в объект регулирования. Это воздействие будет происходить до тех пор, пока сигнал рассогласования не исчезнет или будет находиться в заданных допустимых пределах.

Поскольку выбор систем автоматического регулирования по алгоритму функционирования связан с обеспечением заданного технологического процесса в объекте регулирования, целесообразно более детально рассмотреть принцип их действия, учитывая, что они получили наибольшее распространение при автоматизации систем кондиционирования микроклимата, тепло- и газоснабжения и т. д.

Системы автоматического регулирования могут быть замкнутыми по цепи передачи сигналов и разомкнутыми.

В **замкнутых** САР в процессе функционирова-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

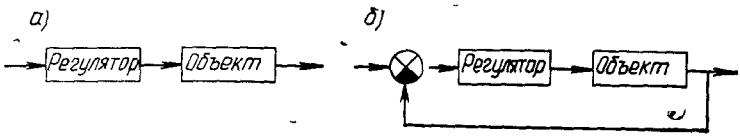


Рис. 4.3. Функциональные схемы разомкнутой (*а*) и замкнутой (*б*) САР

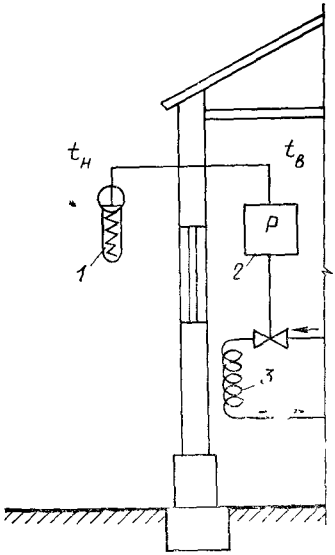


Рис. 4.4. Система автоматического регулирования температуры воздуха $t_в$ в помещении в зависимости от температуры наружного воздуха $t_н$

1 — датчик температуры, *2* — регулятор; *3* — теплообменник

ния непрерывно или через определенные промежутки времени на суммирующее устройство поступают сигналы, определяющие величину регулируемого параметра, а в **разомкнутых** САР такая информация отсутствует. Таким образом, разомкнутая САР не контролирует поведение объекта управления, поэтому подобные системы не случайно называют **безрефлексными,** в то время как замкнутые САР называют рефлексными, поскольку они непрерывно реагируют на поведение объекта управления (рис. 4.3).

Примером разомкнутых САР могут быть системы, которые обеспечивают работу турникетов на станциях метрополитена, автоматов по продаже газированной воды, бутербродов и т. д. К этим системам можно отнести также САР, предназначенные для обеспечения, например, заданного теплового режима в помещении в зависимости от температуры наружного воздуха (рис. 4.4).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Замкнутые автоматические системы могут иметь одну или более замкнутых цепей воздействия. В теории автоматического регулирования замкнутые цепи воздействия называют **контурами регулирования.**

В одноконтурной системе автоматического регулирования имеется одна замкнутая цепь воздействия (рис. 4.5,*а*). В многоконтурной системе имеется более одной замкнутой цепи воздействия (рис. 4.5, *б*). При наличии одного регулируемого объекта и нескольких автоматических регуляторов регулирующее воздействие осуществляется по изменению одного регулируемого параметра на несколько потоков сред и энергии.

Рассматривая контуры регулирования, необходимо ввести такие понятия, как системы автоматического несвязанного и связанного регулирования.

В САР **несвязанного регулирования** (рис. 4.6, *а*) имеются два самостоятельных контура регулирования, в которых находятся два автономно действующих автоматических регулятора. На практике довольно часто регулируемые параметры связаны между собой в объеме одного регулируемого объекта. При этих условиях изменение одного из регулируемых параметров приводит в действие автоматический регулятор, предназначенный для воздействия на объект управления с целью приведения регулируемого параметра к заданному значению. Действие этого регулятора вызывает изменение всех других регулируемых параметров данного объекта. Во избежание нарушения работы регулируемого объекта автоматические регуляторы связывают между собой через контуры регулирования. В многоконтурной системе **связанного автоматического регулирования** (рис. 4.6, *б*) количество контуров пропорционально количеству выбранных параметров регулирования. Такие САР применяют при создании комфортных условий в жилых, детских, больничных и зрелищных помещениях, а также в производственных зданиях, к которым предъявляются повышенные санитарно-гигиенические требования. Очевидно, там, где требуется регулировать такие взаимосвязанные параметры, как температура, влажность, подвижность воздуха, заданный тепловой режим, можно

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

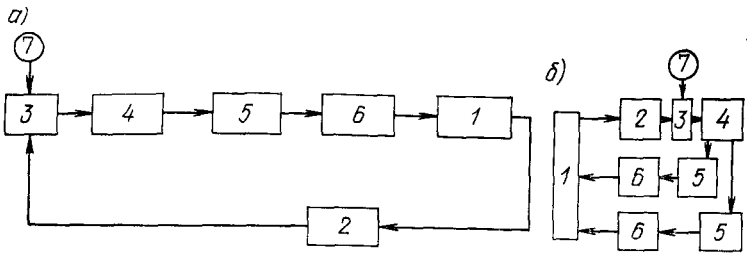


Рис. 4.5. Функциональная схема одноконтурной (*а*) и многоконтурной (*б*) систем автоматического регулирования
1 — объект; *2* — датчик; *3* — измерительный элемент; *4* — регулятор; *5* — исполнительный механизм; *6* — регулирующий орган; *7* — задающее устройство

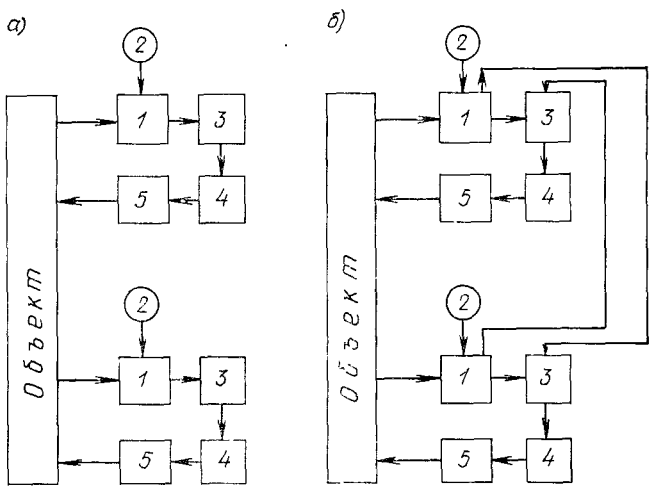


Рис. 4.6. Многоконтурные системы несвязанного (*а*) и связанного автоматического регулирования (*б*)
1 — измерительный элемент; *2* — задающее устройство; *3* — регулятор; *4* — исполнительный механизм, *5* — регулирующий орган

обеспечить только с помощью многоконтурной системы связанного автоматического регулирования.

Техническая реализация многоконтурных систем связанного автоматического регулирования значительно упрощается в связи с возможностью применения в качестве интегрального по функциональным возможностям микропроцессорного устройства. Современные микропроцессоры позволяют на базе одного устройства осущест-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

влять взаимосвязанное автоматическое регулирование по десяткам, а в ряде случаев — сотням технологических параметров.

Наиболее сложными при реализации этой задачи являются разработка алгоритма заданного режима автоматического управления и дальнейшее программное обеспечение микропроцессора с целью его использования как многорегуляторного устройства. Следует отметить, что применение микропроцессоров в промышленных системах автоматического регулирования возможно только при наличии технического **интерфейса**, т. е. определенной по электротехническим требованиям связи датчиков и исполнительных устройств с микропроцессором. В связи с этим предъявляются определенные требования к характеристикам серийно выпускаемых промышленностью датчиков и исполнительных устройств, а также к каналам связи, обеспечивающим прохождение информации, направленной как к микропроцессору, так и от него.

§ 4.2. Системы автоматического регулирования прямого и непрямого действия

Системы прямого действия. В системе автоматического регулирования прямого действия воздействие измерительного элемента на регулирующий элемент осуществляется непосредственно без привлечения добавочного источника энергии.

На рис. 4.7 представлена система автоматического регулирования уровня воды в баке. В этой системе измерительный элемент (поплавок *2*) непосредственно через рычаг *ABC* воздействует на регулирующий элемент (заслонку *3*).

На рис. 4.8 избражена система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя. Регулируемый параметр — частота вращения вала двигателя, внешнее возмущающее воздействие — момент нагрузки $M_н$, приложенный к валу двигателя, настройка — натяжение пружины *П* центробежного механизма *2*.

При увеличении момента нагрузки $M_н$ на валу сверх номинального значения частота вращения вала двигателя *1* уменьшается, и грузы центробежного механизма

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

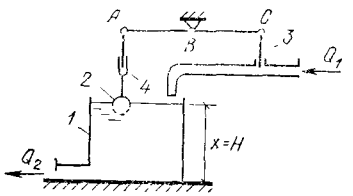


Рис. 4.7. Система автоматического регулирования уровня воды в баке прямого действия

1 — бак (регулируемый объект); *2* — поплавок (измерительный элемент); *3* — заслонка (регулирующий элемент); *4* — задатчик (настройка регулятора путем смещения поплавка *2* вдоль стержня), *H* — высота уровня воды (регулируемый параметр); Q_1 — приток воды в бак; Q_2 — расход воды из бака

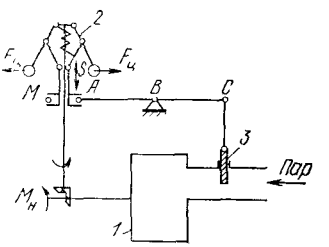


Рис. 4.8. Система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя прямого действия

1 — двигатель (регулируемый объект); *2* — центробежный механизм (измерительный элемент); *3* — заслонка (регулирующий элемент)

2, на которые действуют силы $F_ц$, сходятся. При этом муфта *M* центробежного механизма *2* опускается, что приводит к перемещению заслонки *3* вверх. Это вызывает увеличение подачи пара в двигатель *1*, вследствие чего частота вращения вала двигателя *1* увеличивается, приближаясь к заданному значению. В данной системе автоматического регулирования измерительный элемент (центробежный механизм *2*) непосредственно через рычаг *ABC* воздействует на регулирующий элемент (заслонку *3*).

Таким образом, в системах автоматического регулирования прямого действия энергия, необходимая для процесса регулирования, поступает только вследствие отклонения регулируемого параметра.

Системы автоматического регулирования прямого действия могут быть осуществлены только тогда, когда сигнал, создаваемый измерительным элементом, достаточен для непосредственного воздействия на регулирующий элемент.

Регуляторы прямого действия, применяемые в системах автоматического регулирования, отличаются простотой конструкции, они надежны в работе, не требуют источника вспомогательной энергии, что обусловливает их широкое применение в разных областях техники.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Однако эти регуляторы обладают пониженной чувствительностью, малой точностью регулирования, небольшим коэффициентом усиления и ограниченными мощностями на выходе; кроме того, они не могут, как правило, включаться в общую схему *АСУ*.

Системы непрямого действия. В системах автоматического регулирования непрямого действия измерительный элемент воздействует на регулирующий элемент не непосредственно, а через специальные усиливающие элементы, питаемые добавочным источником энергии. Эти элементы вводятся для усиления сигналов, подаваемых измерительным элементом к регулирующему элементу, за счет постороннего источника энергии.

Система автоматического регулирования уровня воды в баке непрямого действия представлена на рис. 4.9. Здесь регулируемый параметр — высота уровня воды H в баке *1*, внешнее возмущающее воздействие (нагрузка) — расход воды Q_2 из бака *1*, настройка — смещение поплавка *2* вдоль его стержня. Вид энергии добавочного источника питания — электрический ток.

На рис. 4.10 изображена система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя.

Регулируемый параметр — частота вращения вала теплового двигателя *1*, внешнее возмущающее воздействие — момент нагрузки $M_н$, приложенный к валу теплового двигателя *1*, настройка — натяжение пружины $П$ центробежного механизма *2*. Вид энергии добавочного источника питания — гидравлическая энергия, т. е. поток жидкости под давлением.

Для всех указанных систем, совершенно различных по своей физической природе, применима одна и та же элементная схема. В них измерительный элемент *2* (поплавок, центробежный механизм) воспринимает нежелательное отклонение регулируемого параметра (уровня воды, частоты вращения) и перемещает в соответствующую сторону усилительный (преобразующий) элемент *3* (ползунок потенциометра, поршни золотника). Вследствие этого подается питание на исполнительный элемент *4* (электрический или гидравлический двигатель), который перемещает регулирующий элемент *5*. Регулирующий элемент *5* воздействует на регулируемый объект

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

так, чтобы устранить нежелательное отклонение регулируемого параметра от заданного значения.

Таким образом, в системах автоматического регулирования непрямого действия энергия, необходимая для процесса регулирования, поступает не только вследствие отклонения регулируемого парамегра, но и от добавочного источника питания.

Конструктивное исполнение регуляторов непрямого действия, применяемых в системах автоматического регулирования, более сложное, чем регуляторов прямого действия. Однако они позволяют получать в системах ав-

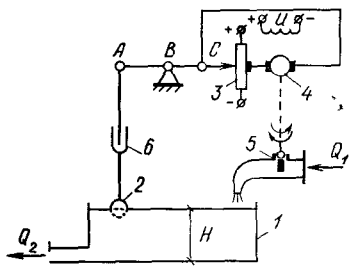


Рис. 4.9. Система автоматического регулирования уровня воды в баке непрямого действия
1 — бак (регулируемый объект); *2* — поплавок (измерительный элемент); *3* — потенциометр (преобразующий элемент); *4* — электродвигатель (исполнительный элемент); *5* — заслонка (регулирующий элемент); *6* — задатчик

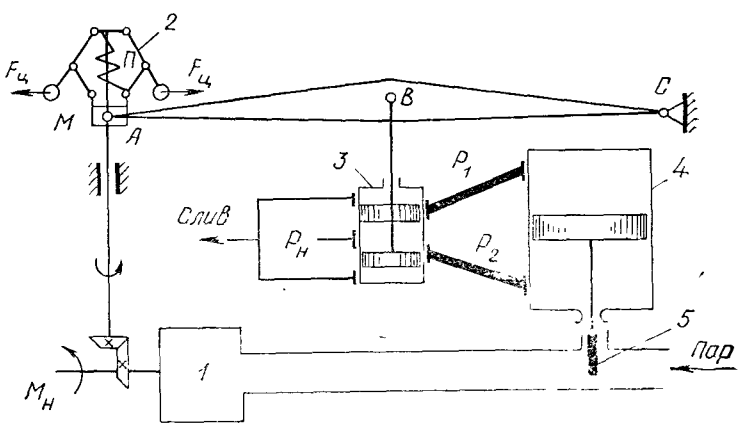


Рис. 4.10. Система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя непрямого действия
1 — тепловой двигатель (регулируемый объект), *2* — центробежный механизм (измерительный элемент); *3* — золотник (преобразующий элемент); *4* — гидравлический двигатель (исполнительный элемент); *5* — заслонка (регулирующий элемент)

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

томатического регулирования достаточно большой коэффициент усиления, удовлетворяющий практическим требованиям чувствительности и точности регулирования.

Сигнал измерительного элемента в регуляторах непрямого действия может быть значительно меньшим, что обеспечивает более точное регулирование.

§ 4.3. Непрерывные и прерывистые системы автоматического регулирования

Непрерывные системы. Непрерывной называется такая система автоматического регулирования, в которой непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует непрерывное изменение механических, электрических или других величин во всех элементах системы. Следовательно, в ней осуществляется постоянная, непрерывная функциональная связь между элементами.

Примерами могут быть ранее рассмотренные автоматические системы регулирования воды в баке (рис. 4.7, 4.9), регулирования частоты вращения выходного вала теплового двигателя (рис. 4.8 и 4.10) и др.

В системах автоматического регулирования уровня воды в баке любым изменениям уровня воды соответствует перемещение измерительного элемента — поплавка, который воздействует на регулирующий элемент — заслонку. При непрерывном изменении уровня воды регулирующий элемент (заслонка) непрерывно воздействует на регулируемый объект — бак так, что уровень воды поддерживается постоянным. Отсюда видна непрерывность воздействия одного элемента системы на другой.

Таким образом, системы непрерывного регулирования характеризуются тем, что в процессе регулирования структура всех связей в системе остается неизменной и сигналы на выходе каждого элемента являются непрерывными функциями воздействия во времени. Подавляющее большинство подобных систем автоматического регулирования относится к классу так называемых линейных систем, т. е. систем, характеризуемых линейными дифференциальными уравнениями. Они получили широкое распространение во всех областях техники.

Прерывистые системы. Прерывистой называется такая система автоматического регулирования, в которой

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

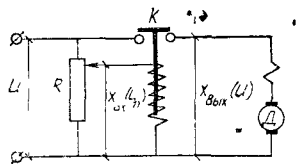


Рис. 4.11. Схема включения электродвигателя

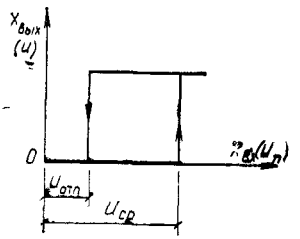


Рис. 4.12. Статическая характеристика релейного элемента (электромагнитного реле)

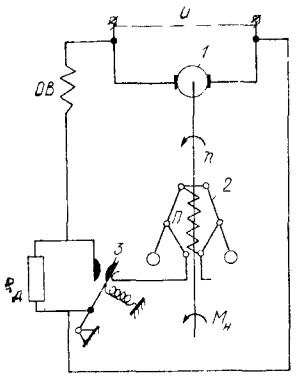


Рис. 4.13. Система автоматического регулирования частоты вращения вала электродвигателя
1 — регулируемый объект (электродвигатель), *2* — измерительный элемент (центробежный механизм), *3* — регулирующий механизм (выключатель)

непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует прерывистое изменение воздействий (сигналов) хотя бы в одном из элементов системы. Прерывистые системы можно разделить на две основные группы: релейные и импульсные.

1. *Релейные системы.* Релейной считается такая система автоматического регулирования, в которой среди основных элементов имеется хотя бы один релейный.

Релейным называется такой элемент системы, в котором непрерывному изменению входной величины соответствует скачкообразное изменение выходной величины, появляющееся лишь при вполне определенных значениях входной величины.

В качестве примера релейного элемента рассмотрим работу электромагнитного реле (контактора), включенного в цепь по схеме, изображенной на рис. 4.11. Входной величиной $x_{вх}$ будем считать напряжение в управляющей

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

цепи обмотки реле, выходной величиной $x_{вых}$ — напряжение в управляемой цепи, т. е. напряжение, подаваемое на электродвигатель после замыкания контактов K реле. Статическая характеристика электромагнитного реле как релейного элемента показана на рис. 4.12, где $U_{ср}$ и $U_{отп}$ — соответственно напряжение срабатывания и отпускания реле. Как видим, непрерывному изменению входной величины соответствует скачкообразное появление выходной величины. Однако следует иметь в виду, что в системы автоматического регулирования могут быть включены различные реле вспомогательного назначения, скачкообразность изменения выходных величин которых не влияет на характер процесса изменения регулируемого параметра. Такие системы должны быть отнесены к непрерывным.

В качестве примера релейной системы рассмотрим систему регулирования частоты вращения вала электродвигателя постоянного тока (рис. 4.13). Регулируемый параметр — частота вращения n вала электродвигателя, внешнее возмущающее воздействие — момент нагрузки $M_н$, приложенный к валу электродвигателя, настройка — натяжение пружины $П$ центробежного механизма *2*.

В данной системе постоянство частоты вращения вала электродвигателя обеспечивается за счет изменения магнитного потока обмотки возбуждения. С этой целью в цепь обмотки возбуждения последовательно включено добавочное сопротивление $R_д$, которое может быть зашунтировано выключателем *3*.

Принцип работы системы заключается в следующем. При уменьшении $M_н$ частота вращения вала увеличивается, грузы расходятся и замыкают выключатель *3*, который шунтирует $R_д$. При этом магнитный поток возбуждения увеличивается, что приводит к уменьшению частоты n. Как только частота вращения вала достигнет заданного значения, выключатель *3* введет добавочное сопротивление $R_д$ в цепь обмотки возбуждения. Как видим, измерительный элемент *2* (центробежный механизм) непрерывно реагирует на изменение частоты вращения вала электродвигателя. Он производит непрерывное воздействие на последующий элемент — выключатель *3* (регулирующий элемент). Однако выключатель *3* прерывно включает и выключает $R_д$ в цепь обмотки возбуж-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

дения. Таким образом, регулирующий элемент является прерывным элементом релейного характера, т. е. производит скачкообразное изменение силы тока возбуждения, а следовательно, и магнитного потока возбуждения. Формула для определения частоты вращения вала электродвигателя с параллельным возбуждением имеет вид:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{r_a}{K_e \Phi} I_a = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{r_a}{K' \Phi^2} M;$$

$$M = K_м \Phi I_a, \qquad (4.1)$$

где M — вращающий момент вала электродвигателя; I_a — сила тока в обмотке якоря, А; $K_м$, K', K_e — коэффициенты пропорциональности $K' = K_e K_м$; Φ — магнитный поток, Вб; n — частота вращения вала, об/мин; r_a — сопротивление обмотки якоря, Ом.

Так как r_a мало, то $n \approx U/K_e\Phi$, т. е. частота вращения вала управляется потоком Φ.

Релейный элемент в данном случае может занимать лишь положения: «включено» или «выключено». Очевидно, что такого рода элемент при работе системы будет находиться в непрекращающемся колебательном режиме. При этом частота вращения вала будет иметь некоторые осредненные значения в допустимых пределах.

Рассмотрим систему автоматического регулирования температуры теплового двигателя (рис. 4.14). Регулируемый параметр — температура регулируемого объекта. При температуре объекта, равной заданному значению, биметаллическая пластинка устанавливается на изоляционный промежуток полукольца. В этой системе частота вращения вала двигателя постоянна и является нерегулируемой величиной.

Таким образом, в отличие от ранее рассмотренных непрерывных систем в данной системе имеется нарушение непрерывности перемещения в преобразующем элементе — реле *3*.

На рис. 4.15 приведены следующие параметры системы автоматического регулирования температуры теплового двигателя:

$x = f(t)$ — характер перемещения во времени биметаллической пластинки;

$u = f(t)$ — изменение напряжения питания электродвигателя во времени;

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

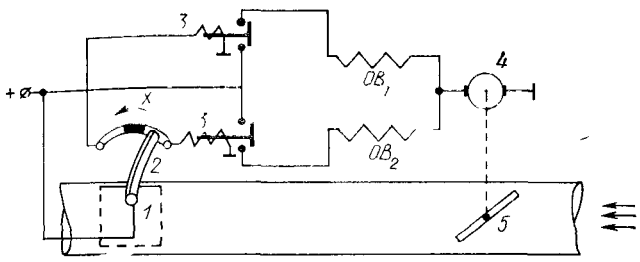


Рис. 4.14. Система автоматического регулирования температуры теплового двигателя

1 — теплообменник (регулируемый объект); *2* — биметаллическая пластинка (измерительный элемент); *3* — реле (преобразующий элемент); *4* — электродвигатель (исполнительный элемент); *5* — шторки радиатора (регулирующий элемент); регулируемый параметр — температура регулируемого объекта

$n=f(t)$ — зависимость частоты вращения вала электродвигателя во времени;

$z=f(t)$ — функциональная зависимость перемещения шторок во времени при их скорости, равной const.

В процессе восстановления требуемой температуры теплового двигателя в системе имеет место затухание колебания перемещения шторок радиатора.

2. *Импульсные системы.* Импульсной называется такая система автоматического регулирования, которая в своем составе имеет хотя бы один импульсный элемент. Импульсный элемент преобразует непрерывное входное воздействие в ряд кратковременных импульсов с определенным периодом их чередования. Таким образом, в импульсной системе место релейного элемента занимает импульсный элемент.

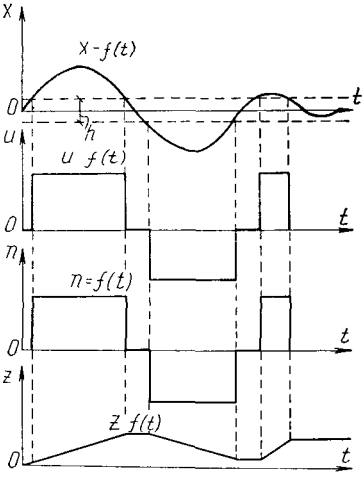


Рис. 4.15. Зависимости $x=f(t)$, $u=f(t)$, $n=f(t)$, $z=f(t)$ системы автоматического регулирования температуры теплового двигателя (h — зона нечувствительности измерительного элемента)

Импульсная САР температуры теплового двигателя показана на рис. 4.16, *а*. Принцип работы системы за-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

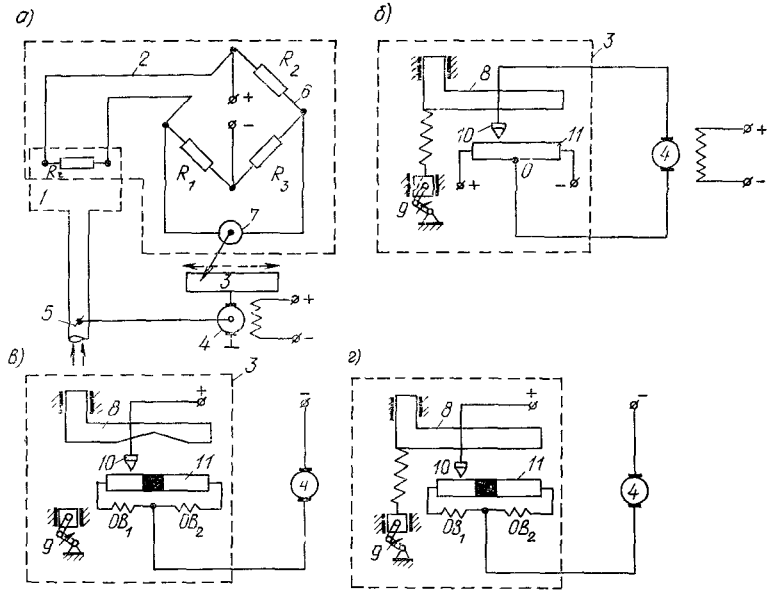


Рис. 4.16. Импульсная система автоматического регулирования температуры теплового двигателя (*а*) и схемы работы импульсного элемента с плоской дужкой (*б*), со скошенной (*в*) и с плоской дужкой с постоянными по амплитуде импульсами (*г*)

1 — регулируемый объект (тепловой двигатель); *2* — измерительный элемент (электрический мост с гальваиометром); *3* — преобразующий импульсный элемент; *4* — исполнительный элемент (электродвигатель); *5* — регулирующий элемент (шторки радиатора); *6* — мост, *7* — гальванометр; *8* — *падающая дужка*, *9* — привод; *10* — контактное приспособление; *11* — потенциометр

ключается в следующем. При изменении регулируемого параметра — температуры изменяется сопротивление R_t. Вследствие этого нарушается равновесие электрического моста и через гальванометр, включенный в диагональ моста *6*, начнет поступать ток, что приведет к перемещению стрелки гальванометра *7*. Стрелка воздействует на импульсный элемент *3*, который вырабатывает и подает импульсы питания на электродвигатель *4*, вследствие чего происходит перемещение шторки радиатора. Как видим, непрерывность нарушается в импульсном элементе, так как отклонение стрелки гальванометра (входной сигнал импульсного элемента), пропорциональное силе тока, проходящего через диагональ моста, при-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

водит к образованию на выходе импульсов тока (выходной сигнал).

Рассмотрим примеры импульсных элементов.

Импульсный элемент представляет собой электрокинематическую систему, состоящую из падающей дужки *8* (рис. 4.16,*б*), которая перемещается вверх — вниз с помощью специального привода *9*. Привод *9* совершает вращательное движение с заранее заданной угловой скоростью ω. Снизу дужки *8* имеется контактное приспособление *10*, связанное со стрелкой гальванометра. При перемещении дужки *8* вниз контакт *10* соприкасается с сопротивлением потенциометра *11*. Вследствие этого замыкается цепь питания обмотки электродвигателя *4*.

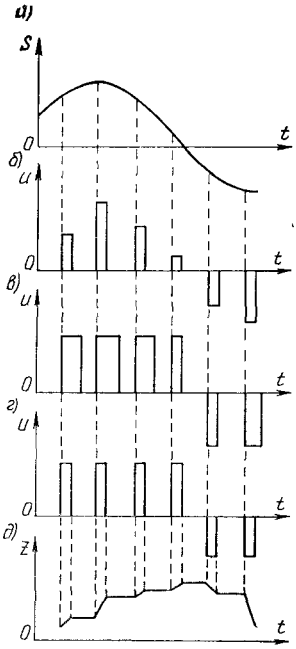


Рис. 4.17. Графики работы импульсного элемента

Принцип работы импульсного элемента заключается в следующем. Падающая дужка *8*, приводимая в движение приводом *9*, совершает колебания с заранее заданной, определенной частотой ω. При перемещении падающей дужки *8* в крайнее нижнее положение контакт *10* стрелки гальванометра на короткие промежутки времени соприкасается с сопротивлением потенциометра *11*, с которого снимается питание на электродвигатель *4*. Величина и полярность напряжения питания электродвигателя *4* зависят от положения контакта *10* относительно точки О в момент его прикосновения с сопротивлением потенциометра *11*, а время импульса напряжения зависит от времени замыкания контакта *10* с сопротивлением *11*. Время соприкосновения контакта *10* с сопротивлением *11* является величиной постоянной и не зависит от положения контакта *10* относительно точки *О*. Следовательно, длительность импульсов напряжения, снимаемого с потен-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

циометра *11*, является величиной постоянной. Величина же импульсов изменяется в зависимости от входной величины S в соответствующий момент времени, т. е. от положения контакта *10* относительно точки O.

Таким образом, для работы импульсного элемента можно записать:

$$U = KS; \quad \tau = \text{const}. \tag{4.2}$$

где U — напряжение; S — смещение подвижного контакта относительно средней неподвижной точки O; K — коэффициент пропорциональности; τ — продолжительность импульса.

Предположим, что зависимость входной величины $S = f(t)$ импульсного элемента имеет вид, показанный на рис. 4.17, *а*. Для элементов, приведенных на рис. 4.16, *б*—*г*, зависимости даны на рис. 4.17, *б*, *в*, *г*. Если в рассматриваемой нами импульсной системе (см. рис. 4.16) импульсный элемент выполнен в таком виде, как изображен на рис. 4.16, *б*, то закон $z(t)$ перемещения регулирующего элемента (шторки радиатора) может быть представлен графически так, как показано на рис. 4.17, *д*. Это справедливо в предположении, что в течение кратковременных импульсов регулирующий элемент движется, а в интервале между ними он неподвижен. Наклон участков движения определяется частотой вращения электродвигателя и передаточным числом редуктора. В действительности эта кривая будет несколько искажена за счет инерционности обмотки возбуждения электродвигателя и движущихся частей.

§ 4.4. Статические и астатические системы автоматического регулирования

Различают два вида автоматического регулирования: статическое и астатическое. В основу такого различия положена характеристика зависимости между значением регулируемого параметра и величиной внешнего возмущающего воздействия (нагрузкой) на регулируемый объект. Она показывает точность поддержания заданного значения регулируемого параметра только в установившихся режимах при различных нагрузках на регулируемый объект.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

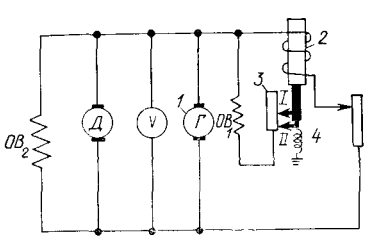


Рис. 4.18. Система автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока

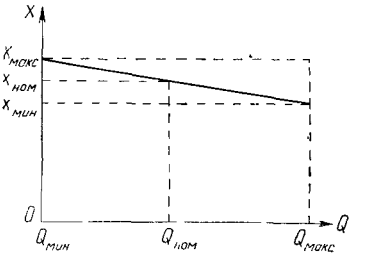


Рис. 4.19. Характеристика статического регулирования

В общем виде функциональная зависимость данных характеристик записывается так:

$$x = f(Q), \qquad (4.3)$$

где x — установившееся значение регулируемого параметра; Q — установившееся значение нагрузки (внешнего возмущающего воздействия).

Статические системы автоматического регулирования. Примером такой системы является система автоматического регулирования уровня воды в баке (рис. 4.7). При постоянном расходе воды Q_2 в единицу времени как поплавок, так и заслонка *3* неподвижны. Расход воды Q_2 равен количеству поступающей воды Q_1. При увеличении расхода воды Q_2 уровень воды в баке понижается, поплавок *2* опускается и перемещает заслонку *3* вверх, увеличивая открытие допуска воды Q_1. Вследствие этого поступление воды Q_1 в единицу времени увеличивается, и уровень воды в баке повышается. Равновесие в системе наступает тогда, когда поступление воды Q_1 будет равно ее новому расходу.

Следовательно, чем больше расход воды, тем больше должна быть приоткрыта заслонка *3* и тем ниже в состоянии равновесия будет находиться поплавок *2*. При уменьшении расхода воды заслонка *3* опускается, и поплавок *2* в состоянии равновесия будет находиться выше, чем он находился до уменьшения расхода воды Q_2.

Статическая система автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока показана на рис. 4.18. Принцип работы системы заключается в следующем. При напряжении генератора *1*, равном заданному значению, ползунок реостата *3*, допустим, находит-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ся в положении *I*. При уменьшении напряжения генератора, нагруженного электродвигателем *Д*, втягивающее усилие, создаваемое током в витках обмотки электромагнита *2*, подключенного к зажимам генератора, уменьшится. Под воздействием пружины *4* якорь электромагнита переместится вниз, что вызовет перемещение ползунка реостата *3* в положение *II*. Сопротивление цепи обмотки возбуждения уменьшится, сила тока возбуждения возрастет, магнитный поток увеличится, что обеспечит восстановление напряжения.

Как видим, различным установившимся значениям силы тока нагрузки соответствуют различные установившиеся значения силы тока возбуждения, которые обеспечиваются различными установившимися положениями движка реостата *3*. Однако для того, чтобы движок реостата *3* занимал различные установившиеся положения, в системе необходимы различные установившиеся значения тяговой силы электромагнита. В свою очередь, тяговая сила электромагнита пропорциональна приложенному напряжению. Вследствие этого каждому установившемуся значению силы тока нагрузки соответствует определенное установившееся значение напряжения генератора, т. е. при различных установившихся значениях силы тока нагрузки напряжение генератора будет различным.

Таким образом, можно сформулировать следующие характерные свойства систем статического регулирования. Различным установившимся значениям внешних возмущающих воздействий на регулируемый объект соответствуют различные установившиеся значения регулируемого параметра или, иначе говоря, равновесие системы при статическом регулировании имеет место при различных значениях регулируемого параметра, лежащих в заданных заранее пределах.

Характеристика статического регулирования имеет вид

$$x = x_0 + KQ. \tag{4.4}$$

Характеристикой статического регулирования называется зависимость регулируемого параметра от нагрузки при различных установившихся режимах (рис. 4.19). При изменении нагрузки $Q_{мин}$ до максимального значе-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ния $Q_{макс}$ регулируемый параметр может изменяться от $x_{макс}$ до $x_{мин}$. Одно из значений регулируемого параметра x в этом интервале, которому соответствует номинальное значение нагрузки $Q_{ном}$, принимают за номинальное значение $x_{ном}$. Иногда $x_{ном}$ принимают равным среднему арифметическому значению

$$x_{ном} = \frac{x_{макс} + x_{мин}}{2}. \qquad (4.5)$$

Разность между каким-либо установившимся значением регулируемого параметра x и его номинальным значением $x_{ном}$ называют *абсолютной статической ошибкой:*

$$\Delta x = x - x_{ном}. \qquad (4.6)$$

Отношение абсолютной статической ошибки к номинальному значению $x_{ном}$ называют *относительной статической ошибкой:*

$$\frac{\Delta x}{x_{ном}} = \frac{x - x_{ном}}{x_{ном}}.$$

Относительную ширину зоны $\frac{x_{макс} - x_{мин}}{x_{ном}}$ называют *неравномерностью системы регулирования* δ:

$$\delta = \frac{x_{макс} - x_{мин}}{x_{ном}}. \qquad (4.7)$$

Неравномерность системы считается положительной, когда установившиеся значения регулируемого параметра уменьшаются с возрастанием нагрузки, и отрицательной, когда при возрастании нагрузки регулируемый параметр возрастает. Чем меньше неравномерность регулирования, тем лучше система, и наоборот.

Астатические системы автоматического регулирования. Астатической называется такая система автоматического регулирования, в которой при различных по величине внешних возмущающих воздействиях на регулируемый объект отклонение регулируемого параметра от заданного значения по окончании переходного процесса становится равным нулю. Следовательно, величина ре-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

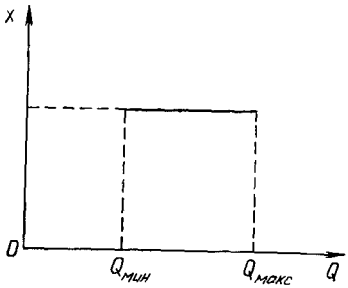


Рис. 4 20. Характеристика астатического регулирования

гулируемого параметра не зависит от изменения нагрузки на регулируемый объект.

Астатическая система автоматического регулирования уровня воды в баке показана на рис. 4.9. При постоянном расходе воды Q_2 из бака *1* в единицу времени как поплавок *2*, так и заслонка *5* неподвижны, так как питание на электродвигатель *4* не подается и в данном случае $Q_2 = Q_1$. При увеличении расхода воды Q_2 уровень ее в баке понижается, поплавок *2* опускается и перемещает вверх ползунок потенциометра *3*, электродвигатель получает питание и, вращаясь, приоткрывает заслонку *5*, благодаря чему увеличивается доступ воды Q_1 в бак *1*. Электродвигатель *4* будет вращаться и передвигать заслонку *5* вверх до тех пор, пока ползунок потенциометра *3* не займет нейтрального положения. В этом случае поплавок *2* займет положение, соответствующее заданному значению уровня воды в баке.

Итак, в установившемся режиме при различных расходах воды Q_2 из бака поплавок *2* всегда будет занимать одно определенное положение, соответствующее заданному значению уровня воды в баке, а заслонка *5* при различных установившихся значениях расхода воды из бака будет занимать соответственно различные положения.

На основании рассмотрения работы системы регулирования уровня воды в баке можно сформулировать следующие характерные свойства астатических систем автоматического регулирования (рис. 4.20). Различным установившимся значениям внешних возмущающих воздействий на регулируемый объект соответствует постоянное значение регулируемого параметра, равное заданному значению, или, иначе говоря, равновесие системы имеет место при единственном заданном значении регулируемого параметра.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Регулирующий элемент в конце процесса регулирования может находиться в любом положении, обеспечивающем равновесие системы регулирования.

Астатические системы автоматического регулирования более точно поддерживают заданное значение регулируемого параметра, но по сравнению с системами статического регулирования имеют более сложное конструктивное исполнение.

ГЛАВА 5. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

§ 5.1. Типы звеньев и их характеристики

Всякое автоматическое устройство состоит из отдельных элементов, выполняющих самостоятельные функции. Следовательно, элементы автоматического устройства можно подразделить по их функциональному назначению.

Для каждого из этих элементов можно установить математическую зависимость между рядом физических величин, характеризующих протекание процесса регулирования в этом элементе. Наименьшее и чаще всего встречающееся число таких физических величин в элементе два. Например, в центробежном механизме (измерительный элемент) изменение частоты вращения вала вызывает определенное перемещение муфты. Очевидно, что в центробежном механизме, где имеется определенная функциональная зависимость между частотой вращения вала и перемещением муфты, изменение одной величины происходит под действием другой.

Происходящие в большинстве элементов преобразования одной величины в другую имеют только одно направление. В центробежном механизме изменение частоты вращения вала приводит к изменению перемещения муфты, но перемещение муфты какой-либо внешней силой не вызовет изменения частоты вращения вала. Следовательно, элементы по происходящим в них преобразованиям обладают, как правило, свойствами направленности. Таким образом, в элементах происходят преобразования одних физических величин в другие в определенном направлении.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

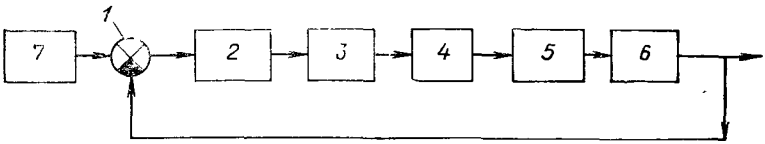


Рис. 5.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока

1 — суммирующий элемент; *2* — усилительно-преобразующий элемент; *3* — усилитель мощности; *4* — исполнительный элемент, *5* — регулирующий орган; *6* — объект регулирования; *7* — задающий элемент

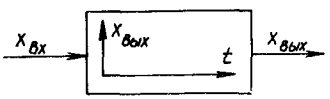


Рис. 5.2. Изображение звена на структурной схеме

Преобразуемые физические величины различают между собой так: одну из них считают причиной, а вторую — следствием. Физическая величина, которая является причиной изменения другой физической величины, называется **входной** $x_{вх}$, а физическая величина, которая является ее следствием, называется **выходной** $x_{вых}$.

Перечисленные свойства элементов — разделение их по функциональному назначению и направленность преобразований в них — позволяют изображать элементные функциональные схемы систем автоматического регулирования и показывать на схемах стрелками направления происходящих преобразований и воздействия одного элемента на другой (рис. 5.1).

Кроме того, всякое автоматическое устройство по характеру происходящих в нем переходных процессов можно представить состоящим из простейших составных частей — звеньев, отражающих динамические свойства данного автоматического устройства. Это позволяет изображать структурные схемы автоматических устройств.

Схема, отражающая состав звеньев (их число и вид), характер связей между ними и их динамические свойства, называется **структурной схемой.**

Простейшая составная часть структурной схемы автоматического устройства или системы автоматического регулирования, отражающая их динамические свойства, называется звеном структурной схемы (или просто звеном). Каждое звено на структурной схеме изображается

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

в виде четырехугольника, слева от которого стрелкой указывается направление входной величины (рис. 5.2), а справа — выходной. Внутри четырехугольника в некоторых случаях изображается вид изменения выходной величины в зависимости от времени, т. е. вид переходного процесса при подаче на вход скачкообразного возмущения.

§ 5.2. Статические характеристики звеньев

Статической характеристикой звена называется зависимость между входной и выходной величинами в различных установившихся состояниях данного звена. Математически установившееся состояние равновесия звена, связь между входной и выходной величинами можно записать в виде

$$x_{\text{вых}} = f(x_{\text{вх}}). \tag{5.1}$$

Данное уравнение является уравнением статики или статической характеристикой звена. Обычно статическая характеристика звена изображается графически (рис. 5.3,*а*). Статическая характеристика $U=f(I_{\text{в}})$ генератора нелинейная, следовательно, генератор является нелинейным звеном.

Статическая характеристика электродвигателя постоянного тока (рис. 5.3, *б*) криволинейная, однако на участке a_1a она линейна. Поэтому если при переходном процессе системы используется только прямолинейный участок a_1a, тогда это звено является линейным. Если же при переходном процессе системы используется вся характеристика b_1a_1oab, тогда рассматриваемое звено представляется как нелинейное.

Таким образом, на основании вида рабочего участка статических характеристик все звенья подразделяются на линейные и нелинейные.

Звено называется **линейным**, если его статическая характеристика выражается линейной функцией. Уравнение линейной функции имеет вид

$$x_{\text{вых}} = a + K x_{\text{вх}}, \tag{5.2}$$

где a — постояниая величиина, имеющая размерность $x_{\text{вых}}$; K — постоянная величина, имеющая размерность $\Delta x_{\text{вых}}/\Delta x_{\text{вх}}$.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

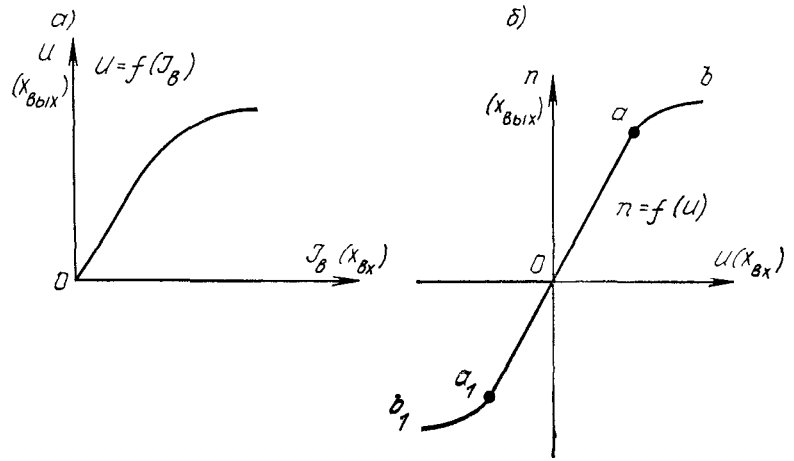


Рис. 5.3. Статическая характеристика генератора (*а*) и электродвигателя (*б*) постоянного тока ($I_в$ — ток возбуждения)

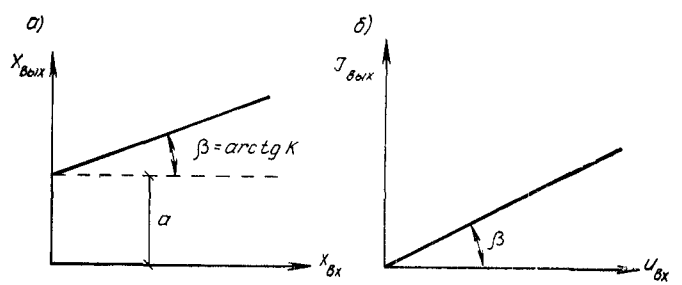


Рис. 5.4. Статические характеристики линейных звеньев $x_{вых}=a+Kx_{вх}$ (*а*) и $I_{вых}=K'U_{вх}$ (*б*)

Величина K показывает, во сколько раз изменяется установившееся значение входной величины при передаче ее через данное звено на его выход (рис. 5.4, *а*):

$$K = x_{вых}/x_{вх}. \qquad (5.3)$$

Обычно величину K называют **передаточным числом, или коэффициентом усиления.** Оба термина отражают одно и то же понятие и применяются в соответствии с той технической задачей, которую выполняет данное

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

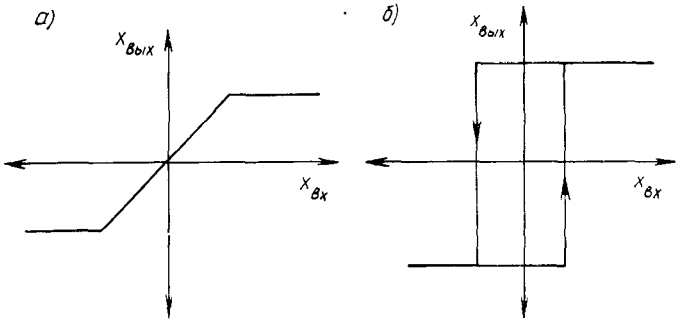


Рис. 5.5. Статические характеристики нелинейного звена с ограничением изменением выходной величины (*а*) и релейного устройства, имеющего зазор, сухое трение, гистерезис и т. п. (*б*)

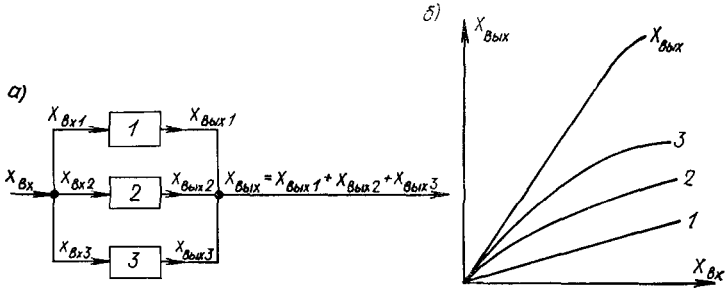


Рис. 5.6. Параллельное соединение звеньев (*а*) и их статические характеристики (*б*)

звено. Таким образом, величина K определяет наклон *линейной* статической характеристики звена.

Примером линейного звена может быть электрическая цепь с постоянным сопротивлением, для которой справедлив закон $U=RI$. Если считать, что напряжение является входной величиной, а сила тока — выходной, то уравнение звена будет иметь вид (рис. 5.4,*б*)

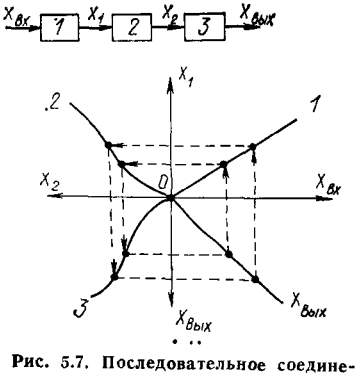


Рис. 5.7. Последовательное соединение звеньев

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$I_{вых} = \frac{1}{R} U_{вх} = K U_{вх}. \qquad (5.4)$$

Другим примером линейного звена может служить рычаг.

Звено называется **нелинейным,** если его статическая характеристика выражается нелинейной функцией. Вид статических характеристик нелинейных звеньев весьма разнообразен (рис. 5.5).

Звенья систем автоматического регулирования могут иметь как параллельное, так и последовательное соединение между собой.

При **параллельном соединении звеньев** входная величина является общей для всех звеньев, а выходная равна алгебраической сумме выходных величин звеньев. Для получения статической характеристики параллельно соединенных звеньев необходимо построить их в одном и том же масштабе для каждого звена и просуммировать их ординаты (рис. 5.6).

При **последовательном соединении звеньев** выходная величина каждого предыдущего звена является входной величиной для последующего звена. Для получения статической характеристики, например, трех последовательно соединенных звеньев необходимо построить их в одном и том же масштабе соответственно в I, II и III квадрантах. В IV квадранте получим результирующую (рис. 5.7).

§ 5.3. Операционные методы в задачах автоматического регулирования

Для решения линейных дифференциальных уравнений в теории автоматического управления в основном используют методы операционного исчисления.

Основной принцип операционного исчисления заключается в том, что исходные функции какого-то вещественного переменного t, входящие в состав уравнений, сопоставляются с помощью универсального интегрального преобразования с функциями другого, но уже комплексного переменного p. При проведении подобного преобразования исходные функции именуются **оригиналами,** а сопоставляемые функции — **изображениями.**

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Смысл преобразования «оригинал — изображение» состоит в том, что операциям дифференцирования и интегрирования оригиналов соответствуют простые алгебраические операции в области изображений. Причем операции дифференцирования оригиналов соответствует умножение их изображений на некоторый оператор p, а операции интегрирования оригиналов — деление их изображений на этот оператор. По полученному таким образом с помощью простых алгебраических действий изображению можно найти оригинал. При этом используют ряд простых правил и специальный каталог изображений.

Рассмотрим сущность интегрального преобразования, лежащего в основе операционного исчисления.

Пусть $f(t)$ — функция вещественного переменного t, удовлетворяющая следующим условиям:

1) функция $f(t)$ непрерывна или кусочно непрерывна на всем интервале изменения переменного t;

2) функция $f(t)$ определена только для положительных значений t и принимается равной нулю при всех отрицательных значениях аргумента;

3) модуль функции $f(t)$ растет медленнее, чем некоторая экспоненциальная функция

$$|f(t)| < Me^{s_0 t},$$

где M, s_0 — произвольные, не зависящие от t числа.

При соблюдении перечисленных условий для функции $f(t)$ существует интеграл $L[f(t)]$, называемый **интегралом Лапласа:**

$$L[f(t)] = \int_0^\infty e^{-pt} f(t)\, dt. \tag{5.5}$$

В операционном исчислении вместо непосредственного использования интеграла Лапласа принимается **интегральное преобразование Карсона**

$$F(p) = p\, L[f(t)] = p \int_0^\infty e^{-pt} f(t)\, dt. \tag{5.6}$$

Функция $F(p)$ называется изображением для оригинала $f(t)$.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Рассмотрим пример нахождения изображения $F(p)$ для оригинала $f(t)=e^{-\alpha t}$.

Интеграл Лапласа по (5.5) равен:

$$L[f(t)]=\int_0^\infty e^{-pt}e^{-\alpha t}dt=-\frac{1}{p+\alpha}e^{-(p+\alpha)t}\Big|_0^\infty=\frac{1}{p+\alpha}.$$

Изображение $F(p)$ по интегральному преобразованию Карсона (5.6) имеет вид

$$F(p)=pL[f(t)]=\frac{p}{p+\alpha}.$$

Существуют специальные таблицы интегральных преобразований. В табл. 5.1 приведены некоторые наиболее часто встречающиеся преобразования Карсона.

ТАБЛИЦА 5.1. НЕКОТОРЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КАРСОНА

Оригинал	Изображение	Оригинал	Изображение
$A=\text{const}$	A	t^n	$\frac{n!}{p^n}$
$x(t)$	$x(p)$	$\frac{t^n}{n!}e^{-\lambda t}$	$\frac{p}{(p+\lambda)^{n+1}}$
$e^{\alpha t}$	$\frac{p}{p-\alpha}$	$\sin\omega t$	$\frac{\omega p}{p^2+\omega^2}$
$e^{-\alpha t}$	$\frac{p}{p+\alpha}$	$\cos\omega t$	$\frac{p^2}{p^2+\omega^2}$
$\frac{1}{\alpha}(1-e^{-\alpha t})$	$\frac{1}{p+\alpha}$	$t\sin\omega t$	$\frac{2\omega p^2}{p^2+\omega^2}$
$\frac{1}{\alpha}(e^{\alpha t}-1)$	$\frac{1}{p-\alpha}$	$t\cos\omega t$	$\frac{p(p^2-\omega^2)}{(p^2+\omega^2)^2}$

Как оригиналы, так и их изображения в основном являются достаточно сложными, поэтому даже при наличии табличных данных для нахождения оригиналов по их изображениям и наоборот приходится прибегать к следующим четырем правилам операционного исчисления.

1. Изображение суммы конечного числа оригиналов равно сумме их изображений, т. е. если

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} f_i(t) \mid i = 1, 2, \ldots, n \mid$$

и для каждого оригинала $f_i(t)$ имеется изображение $F_i(p)$, то

$$F(p) = \sum_{i=1}^{n} F_i(p). \qquad (5.7)$$

2 Если известно изображение $F(p)$ оригинала $f(t)$ и имеется постоянная величина $\alpha > 0$, то изображение оригинала $f(\alpha t)$ имеет вид $F\left(\frac{p}{\alpha}\right)$.

3. Дифференцирование оригинала. Если оригинал $f(t)$ имеет изображение $F(p)$, то можно показать, что дифференцированию оригинала $f'(t)$ соответствует умножение его изображения на число p, являющееся оператором, т. е. $pF(p)$.

4. Интегрирование оригинала. Аналогично правилу 3 можно показать, что интегрированию оригинала $\int_0^t f(t)dt$ соответствует деление его изображения на оператор p, т. е. $F(p)/p$. В сложных случаях интегральных преобразований пользуются теоремами операционного исчисления.

При синтезе и анализе систем автоматического регулирования удобно пользоваться передаточными функциями. Передаточная функция регулятора, объекта регулирования, любого звена САР и самой САР представляется в форме преобразования Лапласа и получается в результате интегрального преобразования Лапласа уравнения динамики рассматриваемого звена или системы.

Передаточной функцией $W(p)$ называется отношение изображения выходной величины x_2 к изображению входной величины x_1, записанное в операторной форме при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)}. \qquad (5.8)$$

Получение передаточной функции можно рассмотреть на примере, связанном с выводом уравнения динамики

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

объекта регулирования, в качестве которого выбрано кондиционируемое производственное помещение.

Для данного объекта, рассматриваемого как динамическое звено, прежде всего следует определить входную величину (регулирующее воздействие) и выходную величину (регулируемый параметр). Если в качестве регулирующего воздействия считать температуру приточного воздуха t_1, а регулируемым параметром — температуру воздуха в помещении t_2, то тогда уравнение динамики объекта должно определить их взаимосвязь в функции времени τ.

Для удобства вывода уравнения динамики объекта введем следующие обозначения:

G — количество приточного воздуха, подаваемого в помещение, кг/ч; I_1, d_1 — энтальпия (теплосодержание) и влагосодержание прнточного воздуха; I_2, d_2 — энтальпия и влагосодержание в помещенни (в точке установки датчиков); $t_н$ — температура наружного воздуха; q — тепловая характернстнка помещення, т. е. теплота, теряемая через ограждения в 1 ч при $t_2 - t_н = 1$ °С; $M_1 = c_{в.в} G_п$ — теплота, аккумулируемая воздухом помещения прн измененнн температуры t_2 на 1°С; $c_{в\,в} = c_в + d/1000 c_п$ — удельная теплоемкость влажного воздуха (здесь $c_в$ и $c_п$ соответственно теплоемкость сухого воздуха и пара); M_2 — теплота, аккумулируемая поверхностями ограждений помещения и находящихся в нем машин и оборудования при изменении температуры t_2 на 1°С; $G_п$ — масса воздуха, заполняющего помещение; Q — тепловыделения в помещении.

Для облегчения вывода уравнения динамики объекта целесообразно принять следующие допущения: температура воздуха по всему объему помещения составляет t_2, а влагосодержание приточного воздуха существенно не отличается от влагосодержания воздуха в помещении, т. е. $d_1 \approx d_2$.

Уравнение теплового баланса для стационарного режима объекта с учетом принятых допущений можно представить так:

$$G(I_{1,0} - I_{2,0}) + Q - q(t_{2,0} - t_н) = 0. \qquad (5.9)$$

Если дать приращение $t_{1,0}$ до $t_{1,0} + \Delta t_1$ и соответственно $J_{1,0}$ до $J_{1,0} + \Delta J_1$, в объекте начнется переходный процесс, и уравнение динамики объекта примет вид

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$G(J_{1,0}+\Delta J_1-J_{2,0}-\Delta J_2)+Q-q(t_{2,0}+\Delta t_2-t_н)=$$
$$=(M_1+M_2)\frac{d\Delta t_2}{d\tau}. \quad (5.10)$$

Вычитая из (5.10) уравнение (5.9), получим уравнение переходного процесса

$$G(\Delta J_1-\Delta J_2)-q\Delta t_2=(M_1+M_2)\frac{d\Delta t_2}{d\tau}. \quad (5.11)$$

Так как энтальпия влажного воздуха

$$J=\left(c_в+\frac{d}{1000}c_п\right)t+0{,}595d=c_{в.в}t+0{,}595d, \quad (5.12)$$

то при $d=\text{const}$

$$\Delta J=c_{в.в}\Delta t. \quad (5.13)$$

Подставляя значение ΔJ в уравнение (5.11) и после соответствующих преобразований произведя его нормализацию, уравнение переходного процесса представим как

$$\frac{M_1+M_2}{Gc_{в.в}+q}\frac{d\Delta t_2}{d\tau}+\Delta t_2=\frac{Gc_{в.в}}{Gc_{в.в}+q}\Delta t_1. \quad (5.14)$$

Поскольку постоянный коэффициент при первой производной в уравнении (5.14) $\frac{M_1+M_2}{Gc_{в.в}+q}$ имеет размерность времени в первой степени, то можно сделать вывод о том, что оно отражает в математической форме рассматриваемый физический процесс в объекте в функции времени.

Введя безразмерные величины

$$\psi=\frac{\Delta t_2}{t_{2н}} \text{ и } \theta=\frac{\Delta t_1}{t_{1н}},$$

где $t_{2,н}$ и $t_{1,н}$ — номинальные значения температуры,

и обозначив постоянную времени переходного процесса в объекте

$$T_о=\frac{M_1+M_2}{Gc_{в.в}+q},$$

а коэффициент усиления

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$K_0 = \frac{G c_{в\,в}}{G c_{в\,в} + q},$$

получим уравнение динамики объекта

$$T_0 \frac{d\psi}{d\tau} + \psi = K_0 \theta. \qquad (5.15)$$

Согласно уравнению (5.15), объект характеризуется как апериодическое динамическое звено первого порядка. Переходный процесс в рассматриваемом объекте может быть представлен в виде передаточной функции. Для этого необходимо уравнение (5.15) выразить в операторной форме. Так как оператор $p = d/dt$, уравнение динамики объекта примет вид

$$(T_0 p + 1)\,\psi = K_0 \theta. \qquad (5.16)$$

Тогда передаточная функция объекта, согласно ранее данному определению, будет выражена

$$W_0(p) = \frac{\psi(p)}{\theta(p)} = \frac{K_0}{T_0 p + 1}. \qquad (5.17)$$

Обычно это выражение записывается следующим образом:

$$W_0(p) = \frac{K_0}{T_0 p + 1}. \qquad (5.17а)$$

Передаточная функция элементарного динамического звена как неделимой части какой-либо системы характеризуется, как правило, тем, что входящий в нее оператор p возводится не более чем во вторую степень.

Передаточные функции, представляющие математический портрет сложной динамической системы, могут иметь такой вид, при котором получение с их помощью количественных значений переходных процессов возможно только путем расчетов на цифровых ЭВМ.

§ 5.4. Переходные и частотные характеристики звеньев

Графическая зависимость, показывающая изменение во времени выходной величины x_2 звена вследствие того, что входная величина x_1 приобрела новые значения, называется **переходной, или временной характеристикой.**

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Переходные характеристики определяются путем аналитического решения уравнения динамики звена относительно выходной величины x_2 или экспериментально. Для определения переходных характеристик в качестве временных функций входной величины x_1 используют так называемые стандартные единичные сигналы.

Наиболее распространенным единичным сигналом является единичный скачок $\sigma(t)$ (рис. 5.8, *а*), аналитическое выражение которого записывается с помощью функции Хевисайда

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t < 0 \\ 1 \text{ при } t \geqslant 0. \end{cases} \tag{5.18}$$

Изображение единичного скачка в оперативной форме можно найти по формуле

$$\sigma(p) = p\int_0^\infty e^{-pt}\,\sigma(t)\,dt = p\int_0^\infty e^{-pt}\,dt = -e^{-pt}\Big|_0^\infty = 1. \tag{5.19}$$

Вторым стандартным единичным сигналом является единичный импульс, представляющий собой импульс бесконечно большой величины и бесконечно малой длительности (рис. 5.8, *б*). Аналитическое выражение единичного импульса дается с помощью функции Дирака

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t_0 < t < t_0 \\ \infty \text{ при } t = t_0. \end{cases} \tag{5.20}$$

Функция Дирака должна также удовлетворять условию, что интеграл от нее, распространенный на сколь угодно малый отрезок, содержащий начало координат, равен единице:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)\,dt = 1. \tag{5.21}$$

Изображение функции Дирака в операторной форме имеет вид

$$\delta(t) \leftarrow\!\div\!\rightarrow p \cdot 1 = p. \tag{5.21а}$$

Во многих системах для отдельных звеньев вывод исходных уравнений динамики оказывается затруднительным. В этих случаях для заведомо линеаризуемых звеньев зависимости между входной и выходной величинами

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

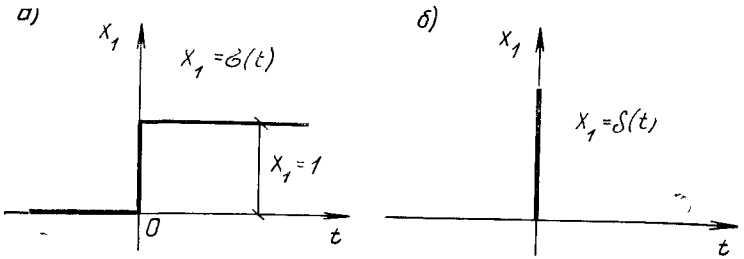


Рис. 5.8. График единичного скачка (*а*) и единичного импульса (*б*)

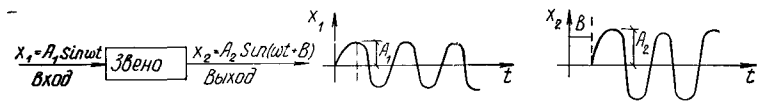


Рис. 5.9. К определению частотных характеристик звеньев

могут быть найдены экспериментальным путем. Динамические свойства звеньев определяются в данном случае с помощью так называемых частотных характеристик.

Для получения частотных характеристик на вход звена подаются синусоидальные колебания с определенной амплитудой. На выходе звена для разных частот колебаний фиксируются отношение амплитуд выходной и входной величин и сдвиг частот по фазе.

Пусть, например, на вход звена подаются колебания с амплитудой A_1 и фазой φ_1 (рис. 5.9)

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1).$$

На выходе звена возникают синусоидальные колебания, но с иной амплитудой A_2 и фазой φ_2:

$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Для разных частот колебаний на входе определяются усиление амплитуды, т. е. отношение A_2/A_1, и сдвиг по фазе $B = \varphi_1 - \varphi_2$. График, изображающий зависимость усиления амплитуды от частоты, носит название **амплитудной частотной характеристики** (рис. 5.10, *а*). При $\omega = 0$ усиление амплитуды A равно значению статического коэффициента усиления звена.

Зависимость сдвига по фазе B от частоты называется **фазовой частотной характеристикой** (рис. 5.10, *б*). Если

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

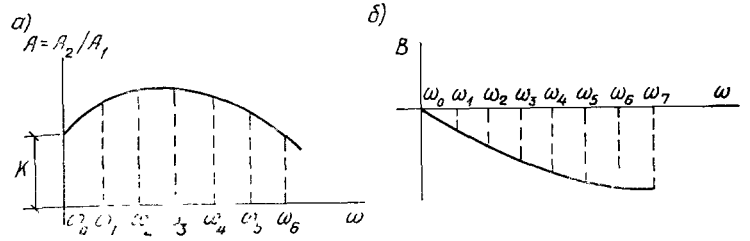


Рис. 5.10. Зависимость усиления амплитуды A ($а$) и сдвига по фазе B ($б$) от частоты ω

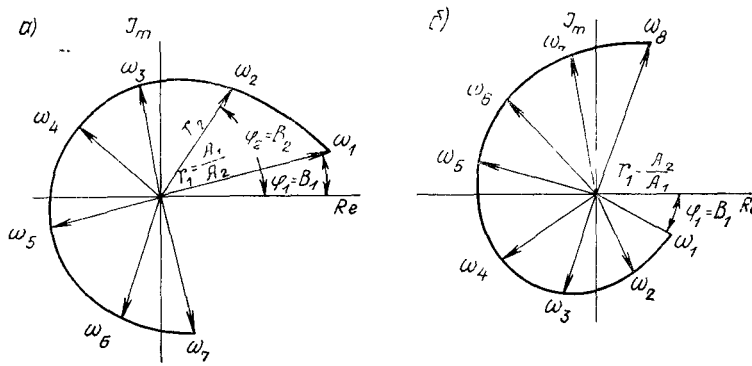


Рис. 5.11. Амплитудно-фазовые частотные характеристики I рода ($а$) и II рода ($б$)

фаза B имеет отрицательное значение, то это соответствует отставанию выходных колебаний.

Обе частотные характеристики могут быть объединены в одном графике, называемом **амплитудно-фазовой частотной характеристикой звена.**

Амплитудно-фазовая частотная характеристика для определенных частот ω строится в векторной форме. Если модулем вектора является отношение $r = A_1/A_2$, а аргументом — угол $\varphi = B$, отсчитываемый от оси абсцисс против часовой стрелки, то, соединив концы векторов, можно получить амплитудно-фазовую частотную характеристику I рода (рис. 5.11, $а$). В том случае когда $r = A_2/A_1$ и угол $\varphi = B$ отсчитывается от оси абсцисс по ча-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

совой стрелке, получают характеристику II рода (рис. 5.11, *б*).

Для перехода от временных характеристик к частотным пользуются еще одной динамической характеристикой — комплексным коэффициентом усиления. **Комплексным коэффициентом усиления** K называется комплексное число, модуль которого равен коэффициенту усиления $A=A_2/A_1$, а аргумент равен разности фаз B

$$K = A(\cos B + j \sin B)$$

или в показательной форме

$$K = A e^{jB}. \qquad (5.22)$$

Для звена с воздействием на входе $x_1 = A_1 e^{j\omega t}$ и на выходе $x_2 = A_2 e^{j(\omega t + B)}$ с учетом отношения $A=A_2/A_1$ и выражения (5.22) получим:

$$x_2 = A A_1 e^{j\omega t} e^{jB} = K x_1, \qquad (5.23)$$

т. е. выходная величина равна входной, умноженной на комплексный коэффициент усиления.

В теории автоматического регулирования доказывается, что комплексный коэффициент усиления может быть получен непосредственно из уравнения динамики звена путем подстановки в передаточную функцию звена вместо оператора P величины $j\omega$, т. е.

$$K = W(j\omega).$$

Зная передаточную функцию $W(j\omega)$, можно по формуле (5.22) определить усиление амплитуды A и сдвиг по фазе B для рассматриваемого звена.

§ 5.5. Динамические характеристики звеньев

Звенья, входящие в состав системы автоматического регулирования, могут иметь различные конструктивные исполнения, различные схемы и физические принципы действия, различные назначения и т. п. С точки зрения динамических свойств, важное значение имеет классификация звеньев по видам происходящих в них переходных процессов. В основу такой классификации положена зависимость между входной и выходной величинами в переходном процессе, которая называется **динамической характеристикой звена.**

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

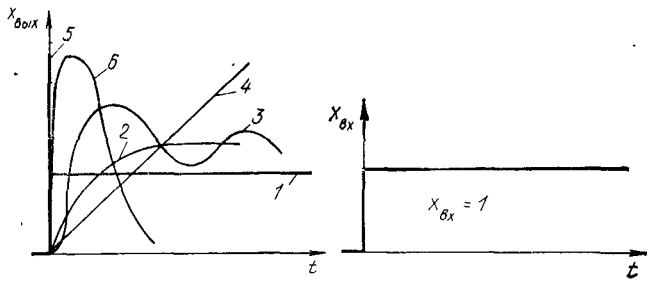


Рис. 5.12. Реакция различных звеньев (кривые *1—6*) на типовое воздействие (единичный скачок)

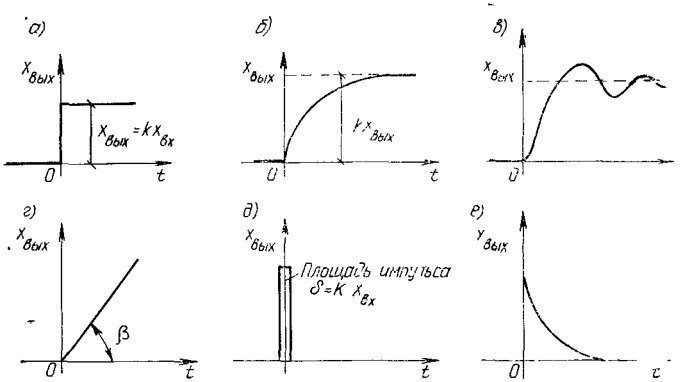


Рис. 5.13. Характеры протекания переходных процессов для звеньев *а* — пропорционального; *б* — апериодического; *в* — колебательного; *г* — интегрирующего; *д* — идеального дифференцирующего; *е* — реального дифференцирующего

Если произвести классификацию звеньев по этому признаку, то их конструктивное многообразие будет сведено к небольшому числу.

Математическое уравнение звена в переходном процессе определяет значение выходной величины в зависимости от входной и времени

$$x_{вых} = f(x_{вх}, t). \qquad (5.24)$$

Данное уравнение является уравнением динамики или динамической характеристикой звена.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Переходный процесс в звене может наступить при изменении входной величины или при появлении возмущающего воздействия. В теории автоматического регулирования в качестве типового воздействия на звено принимают мгновенный скачок входной величины от одного постоянного значения к другому. Кроме того, типовые воздействия в виде скачка обычно берут единичными (см. рис. 5.8, *а*). Если входная величина подается в виде единичного скачка, то изменение выходной величины в зависимости от времени при переходном процессе будет иметь тот или иной вид (рис. 5.12).

В зависимости от характера протекания переходного процесса при нулевых начальных условиях выходной величины различают шесть основных типов звеньев: пропорциональные (кривая *1*), апериодические (кривая *2*), колебательные (кривая *3*), интегрирующие (кривая *4*), дифференцирующие идеальные (кривая *5*) и дифференцирующие реальные (кривая *6*).

Звено, в котором величина на выходе пропорциональна величине на входе, называется **пропорциональным** (иначе его называют усилительным, безынерционным, идеальным или безъемкостным). Для него скачкообразное изменение входной величины мгновенно передается на выход звена, причем выходная величина с течением времени не изменяется.

Зависимость между входной и выходной величинами характеризуется выражением

$$x_{\text{вых}} = K x_{\text{вх}}, \qquad (5.25)$$

которое совпадает с выражением статической характеристики (K — коэффициент усиления или передаточное число звена).

Характер протекания переходного процесса для пропорционального звена изображен на рис. 5.13, *а*.

К пропорциональным относятся звенья, выполненные в виде рычага, механической передачи, электронного усилителя, а также преобразователи механического перемещения в электрическое напряжение с помощью потенциометра или реостата.

Звено, в котором при скачкообразном изменении величины на входе величина на выходе апериодически (по

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

закону экспоненты) стремится к новому установившемуся значению, называется **устойчивым апериодическим звеном** (иначе его называют инерционным, статическим, одноемкостным).

Зависимость между входной и выходной величинами в этом звене определяется выражением

$$x_{вых} = K\, x_{вх}\,(1 - e^{-t/T}), \qquad (5.26)$$

где T — так называемая постоянная времени звена, характеризующая его инерционность.

Графически эта зависимость имеет вид нарастающей экспоненты (рис. 5.13, *б*).

К апериодическим можно отнести звенья, выполняемые в виде магнитного усилителя, термопары, различных тепловых аппаратов.

Звено, в котором при скачкообразном изменении величины на входе величина на выходе стремится к новому установившемуся значению, совершая затухающие колебания, называется **устойчивым колебательным** (иначе его называют двухъемкостным).

Характер протекания переходного процесса для колебательного звена изображен на рис. 5.13, *в*.

К колебательным могут быть отнесены механические звенья, обладающие массой, упругостью и вязким трением (демпфированием); например, центробежный механизм, масса, подвешенная на пружине и имеющая успокоительное устройство, а также электрические колебательные контуры, состоящие из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

Звено, в котором скорость изменения величины на выходе пропорциональна величине на входе, называется **интегрирующим** (иначе его называют астатическим, нейтральным).

Характер переходного процесса такого звена описывается уравнением

$$x_{вых} = K\, x_{вх}\, t. \qquad (5.27)$$

Если на вход интегрирующего звена подать постоянное возмущение ($x_{вх} = \text{const}$), то на выходе звена получим выходную величину, возрастающую линейно с течением времени.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Характер протекания переходного процесса для интегрирующего звена изображен на рис. 5.13, *г*.

К интегрирующим звеньям можно отнести гидравлический двигатель, у которого массой подвижных частей и силами трения можно пренебречь, входом считать скорость подачи жидкости в цилиндр, выходом — перемещение поршня; электродвигатель, у которого можно пренебречь электромеханической постоянной времени, входом считать напряжение питания, а выходом — угол поворота вала электродвигателя.

Звено, в котором величина на выходе пропорциональна скорости изменения величины на входе, называется **идеальным дифференцирующим** (иногда его называют импульсным звеном) (рис. 5.13, *д*). При единичном скачкообразном воздействии такое звено дает на выходе мгновенный импульс. Как при $t<0$, так и при $t>0$ выходная величина равна нулю. Только в момент изменения (скачка) входной величины выходная величина не равна нулю, поэтому выходная величина будет иметь вид мгновенного импульса.

Звено, в котором величина на выходе изменяется по закону убывающей экспоненты, называется **реальным дифференцирующим** (иногда его называют импульсным звеном второго порядка).

Характер переходного процесса такого звена описывается уравнением (рис. 5.13, *е*)

$$x_{\text{вых}} = K x_{\text{вх}} e^{-t/T}. \qquad (5.28)$$

При работе автоматических устройств реальное дифференцирующее звено может еще иметь составляющие, пропорциональные величине на входе.

К реальным дифференцирующим звеньям могут быть отнесены: успокоитель с пружиной в механических системах (рис. 5.14, *а*); в электрических цепях — элементы, состоящие из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений (рис. 5.14, *б*, *в*).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 5.6. Структурная схема систем автоматического регулирования

Схема, отражающая состав звеньев (их число и вид), характер связей между ними и динамические свойства автоматической системы и служащая для исследования этих свойств, называется **структурной схемой автоматической системы.**

Простейшая составная часть структурной схемы автоматической системы, отображающая ее динамические свойства, называется **звеном** структурной схемы.

Структурные схемы строятся на основании элементных схем. При построении необходимо сначала установить, каким звеньям соответствует данный элемент, а затем соединить звенья между собой в соответствии с соединением элементов.

Рассмотрим пример построения структурной схемы системы автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока (рис. 5.15, *а*).

Для построения структурной схемы системы прежде всего необходимо выяснить, каким звеньям соответствует каждый элемент. **Регулируемый объект** (генератор *1*) будем считать звеном, входной величиной которого является сила тока в цепи обмотки возбуждения, выходной величиной — напряжение. Возмущающим воздействием может быть ток нагрузки или частота вращения генератора, или то и другое, вместе взятое. Генератор при этих условиях может характеризоваться как апериодическое звено (рис. 5.15, *б*).

Измерительный элемент удобно разбить на две части: электрическую и механическую. Электрическая часть включает цепь обмотки электромагнита *2*, а также реостат настройки *5* регулятора (рис. 5.15, *в*). Это будет отдельное звено. Входная величина его — напряжение U генератора, а выходная величина — сила тока $I_э$, протекающего по цепи обмотки электромагнита. Это звено — апериодическое. Механическая часть (рис. 5.15, *г*) включает сердечник электромагнита *2*, скрепленный с ползунком реостата *3* и пружиной *4*. Входной величиной является сила тока $I_э$, а выходной — перемещение ползунка реостата *3*. Это звено является устойчивым колебательным.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

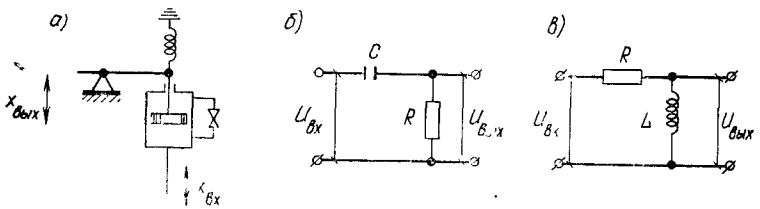


Рис. 5.14. Реальные дифференцирующие звенья
а — механическое, *б*, *в* — электрические

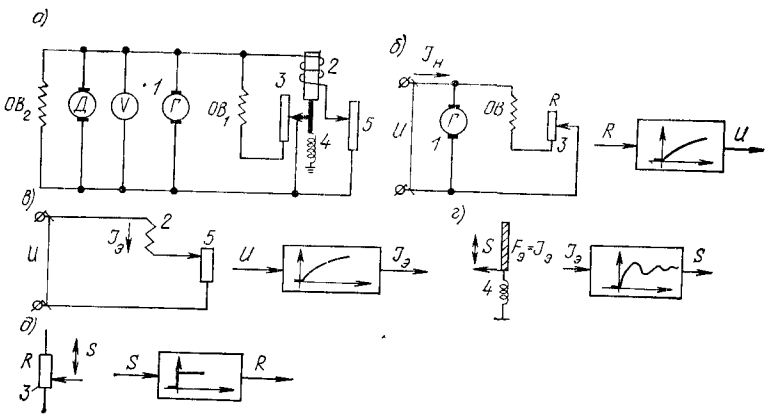


Рис. 5.15. Система автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока (*а*), электрическая схема подключения генератора (*б*), электрическая схема измерительного элемента (*в*), механическая часть измерительного элемента (*г*) и регулирующий элемент (*д*)

1 — генератор; *2* — электромагнит; *3* — реостат в цепи обмотки возбуждения генератора; *4* — пружина; *5* — реостат настройки регулятора

Регулирующий элемент (реостат *3*) представляет собой пропорциональное звено, входной величиной которого служит перемещение S ползунка, а выходной — сопротивление R, изменяющее возбуждение (рис. 5.15, *д*).

На основании этого построена структурная схема системы автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока (рис. 5.16,*а*), состоящая из четырех элементарных динамических звеньев.

Рассмотрим другой пример составления структурной схемы.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

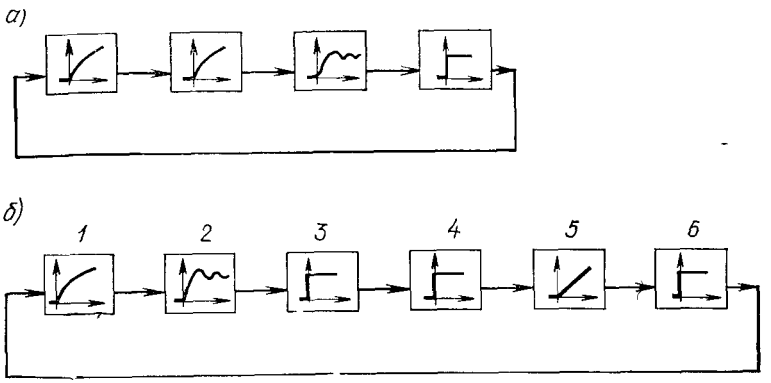


Рис. 5.16. Структурные схемы систем автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока (*а*) и частоты вращения вала теплового двигателя (*б*)

Система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя (см. рис. 4.10) состоит из следующих звеньев (рис. 5.16, *б*).

Регулируемый объект (тепловой двигатель *1*) является апериодическим звеном, входной величиной которого служит поступление пара, а выходной — частота вращения вала n.

Измерительный элемент (центробежный механизм *2*) — колебательное звено. Входная величина его — частота вращения вала, а выходная — перемещение S муфты M.

Рычаг АВС — пропорциональное звено (3).

Преобразующий элемент (золотник *4*) — пропорциональное звено. Выходная величина его — перемещение поршней золотника S, а входная — давление P жидкости, поступающей в полость гидравлического двигателя *4*.

Исполнительный элемент (гидравлический двигатель *5*) — интегрирующее звено, входной величиной которого служит давление P поступающей в полость жидкости, а выходной — перемещение S поршня.

Регулирующий элемент (заслонка *6*) — пропорциональное звено. Входная величина — перемещение заслонки, а выходная — изменение подачи пара к тепловому двигателю.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 5.7. Устойчивость систем автоматического регулирования

Практическая пригодность системы автоматического регулирования, в первую очередь, определяется ее устойчивостью и приемлемым качеством процесса регулирования.

Режим работы регулируемого объекта должен соответствовать предъявляемым техническим требованиям. Чтобы обеспечить автоматическое поддержание нужного режима работы, регулируемый объект снабжается регулятором. Совокупность регулируемого объекта и регулятора, как уже отмечалось, представляет собой систему автоматического регулирования.

На регулируемый объект воздействуют различные возмущающие факторы (возмущения), которые бывают как внутренними, так и внешними (увеличение нагрузки на генератор, изменение нагрузки на валу электродвигателя и т. д.). Возмущающие факторы, воздействуя на объект, изменяют режим его работы. При нарушении режима работы регулируемого объекта регулятор оказывает такие воздействия на объект, при которых восстанавливается нарушенный режим работы (конечно, с той или иной точностью), т. е. происходит процесс регулирования.

Рассмотрим процесс регулирования теплового двигателя с помощью предлагаемой системы (см. рис. 4.8). Статическая характеристика процесса регулирования этой системы представлена на рис. 5.17, *а*.

Статическая характеристика системы автоматического регулирования обычно задается условиями эксплуатации. Например, точке A статической характеристики соответствует установившийся режим работы теплового двигателя, характеризующийся постоянной частотой вращения вала n_1 при постоянной нагрузке $M_{н1}$, а точке B — установившийся режим работы, характеризующийся частотой вращения вала n_2 и нагрузкой $M_{н2}$ и т. д. Кроме указанных физических величин (n и $M_н$) в процессе установившегося режима работы системы в различных звеньях действуют и другие физические величины, которые определяют установившийся режим работы отдельных звеньев системы.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

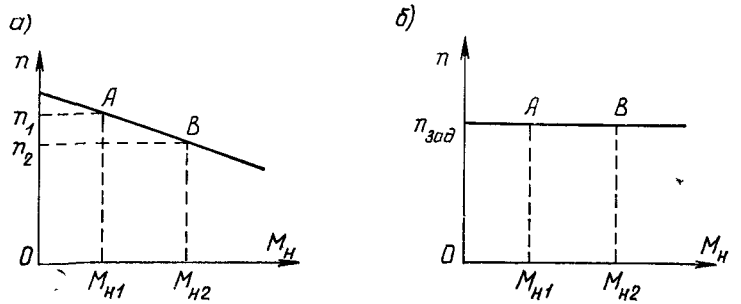


Рис. 5.17. Статическая характеристика статической (*а*) и астатической системы (*б*)

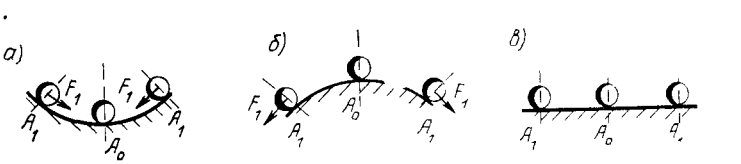


Рис. 5.18. Три вида равновесных состояний
а — устойчивое; *б* — неустойчивое, *в* — безразличное

Все физические величины, характеризующие звенья системы, в процессе установившегося режима неизменны и взаимоуравновешены, ибо в противном случае установившийся режим работы существовать не может. Установившийся режим работы системы автоматического регулирования есть состояние равновесия системы, при котором обязательно взаимное равновесие всех физических величин (механических сил, моментов, напряжений, силы тока, давлений и т. д.), возникающих в звеньях системы и участвующих в процессе регулирования. Изучение равновесных установившихся режимов работы систем автоматического регулирования связано со статикой регулирования.

Из статической характеристики (рис. 5.17,*а*) видно, что установившихся режимов работы для данного случая может быть бесчисленное множество: каждому значению нагрузки $M_н$ соответствует свой установившийся режим работы системы, характеризующийся определенной и постоянной частотой вращения вала теплового

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

двигателя. Этот вывод справедлив для любой системы, обладающей статическим регулированием.

Рассмотрим систему регулирования частоты вращения вала теплового двигателя непрямого действия (см. рис. 4.10). В контур регулирования данной системы введено астатическое звено, которым является гидравлический двигатель *4*, обладающий тем свойством, что при перекрытых трубопроводах P_1 и P_2 его поршень неподвижен, а при подаче жидкости в один из его трубопроводов поршень непрерывно движется. При отсутствии воздействия на поршень последний находится в состоянии безразличного равновесия.

Данная система является системой астатического регулирования. Статическая характеристика процесса регулирования в этой системе приведена на рис. 5.17, *б*. Как видим, при всех установившихся режимах работы системы, соответствующих различным значениям нагрузки на валу теплового двигателя (при неизменной настройке регулятора), частота вращения вала равна заданному значению $n_{зад}$. Каждый из установившихся режимов работы системы представляет собой равновесное состояние.

Состояния статического равновесия систем автоматического регулирования могут быть различными. Различают три вида равновесных состояний установившихся режимов работы (рис. 5.18): устойчивое, неустойчивое и безразличное.

Возможные виды равновесных состояний рассмотрим сначала на поведении шарика, расположенного в различных точках поверхности: а) сила F, возвращающая шарик в исходное положение равновесия, возникает при отклонении шарика в любом положении; б) при всяком малом отклонении возникает сила F, которая стремится еще больше отклонить шарик от равновесного положения; в) новых равновесных состояний шарик может иметь бесчисленное множество.

Соображения о различных видах равновесия, рассмотренные на примерах с шариком, можно распространить и на системы автоматического регулирования.

На устойчивость системы в установившемся режиме работы оказывают влияние как собственная устойчивость регулируемого объекта, так и устойчивость регулятора.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

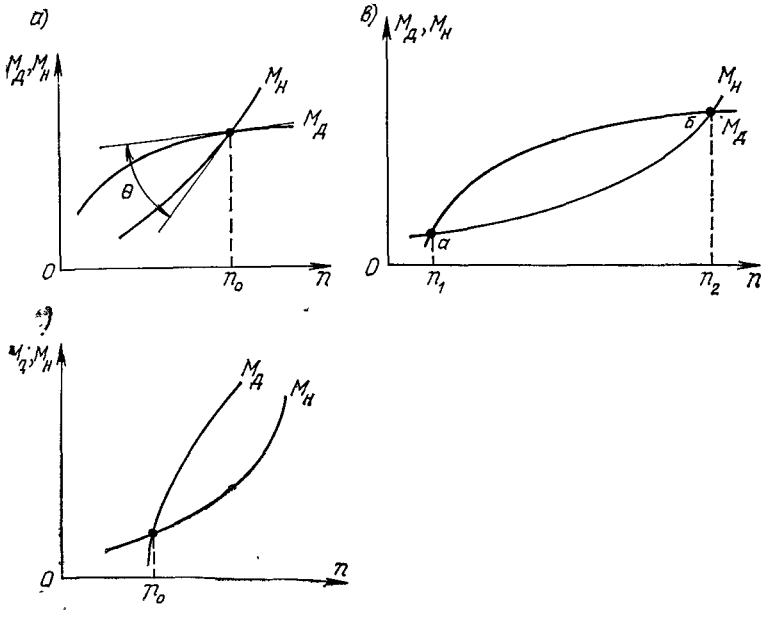


Рис. 5.19. Статические характеристики теплового двигателя

Регулируемый объект считается собственно устойчивым или, как говорят, обладает свойством самовыравнивания, если он может устойчиво работать на заданном режиме при отсоединенном регуляторе, т. е. при неизменном положении регулирующего элемента. Представление о собственной устойчивости регулируемого объекта можно составить на примере теплового двигателя (см. рис. 4.8). Для этого прежде всего необходимо знать статические характеристики изменения движущего момента теплового двигателя $M_д$ и момента сопротивления $M_н$ в функции от частоты вращения n вала, причем характеристика $M_д = f(n)$ получается при неизменном положении заслонки (рис. 5.19).

По виду статических характеристик (рис. 5.19,*а*) можно сделать вывод о том, что вблизи заданной частоты вращения тепловой двигатель является устойчивым объектом и в принципе может устойчиво работать без регулятора. Действительно, при отклонении частоты вращения вала n в сторону увеличения по сравнению с

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

n_0 появляется момент сопротивления $M_н$, превышающий движущий момент $M_д$, что приводит к уменьшению величины n до значения n_0. Если $n<n_0$, тогда $M_д>M_н$ и опять n стремится к n_0.

При этом, чем больше угол θ между касательными к характеристикам в точке их пересечения, тем больше собственная устойчивость теплового двигателя как регулируемого объекта.

Однако, несмотря на то, что регулируемый объект обладает устойчивостью, при присоединении регулятора уменьшаются возможные отклонения регулируемого параметра от заданного значения в установившемся режиме работы.

Приведенные на рис. 5.19, *б* статические характеристики показывают, что при малейшем отклонении частоты вращения вала от заданного n_0 в сторону ее увеличения она будет все более и более возрастать или все более уменьшаться. При таком виде характеристик тепловой двигатель является неустойчивым объектом. Работа теплового двигателя без регулятора невозможна.

Из рис. 5.19, *в* видно, что в области точки *б* (n_2) тепловой двигатель работает устойчиво, а за пределами области точки *а* (n_1) — неустойчиво. Устойчивый и неустойчивый режимы работы распространяются также и на автоматические регуляторы.

Рассмотрим равновесные состояния центробежного регулятора частоты вращения теплового двигателя (рис. 5.20).

Шпиндель регулятора, связанный посредством редуктора с валом теплового двигателя, вращается с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Вместе со шпинделем вращаются подвешенные на шарнирах грузы. Под действием центробежной силы $F_ц$ грузы стремятся разойтись, шары поднимают муфту M. Расхождению грузов препятствуют, с одной стороны, вес грузов и муфты, с другой — сила сжатия пружины $F_{пр}$ Условимся считать перемещения S муфты M вверх положительными, а вниз отрицательными.

Пусть муфта M перемещается вверх от положения S_2. В данном случае, поскольку $F_{пр}>F_ц$, муфта M возвратится в положение S_2. Если муфта M из положения

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

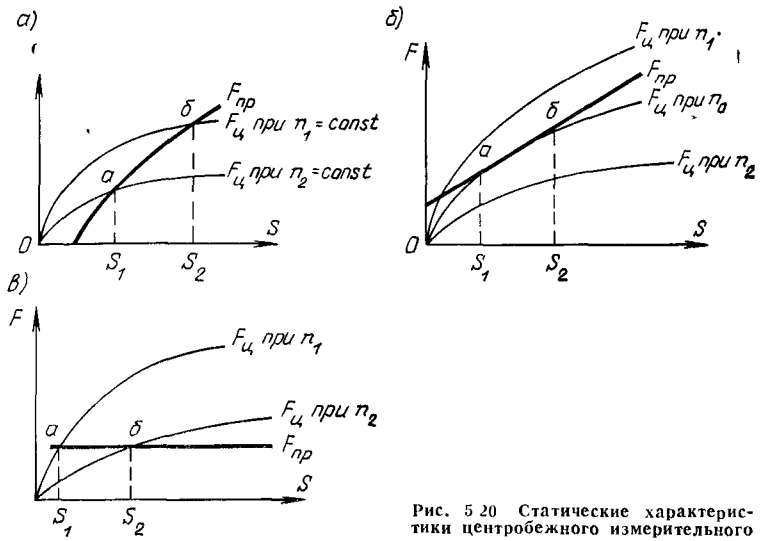


Рис. 5 20 Статические характеристики центробежного измерительного элемента

S_2 переместится вниз, то за счет того, что $F_ц > F_{пр}$, она будет стремиться занять положение S_2.

Рассуждая аналогичным образом, можно утверждать, что регулятор будет устойчиво работать и в области точки *а* Таким образом, при малейшем нарушении равновесного (путем перемещения муфты M) состояния измерительного элемента регулятора последний вновь возвращается к нему. Следовательно, состояние равновесия устойчивое (как для точки *а*, так и для точки *б*) и при n_1, и при n_2.

Показанная на рис. 5 20, *б* характеристика пружины $F_{пр} = f_1(S)$ в интервале S_1—S_2 совпадает с характеристикой центробежной силы $F_ц = f_2(S)$, полученной для частоты вращения n_0. В этом интервале муфта может занимать любое положение, так как $F_{пр} = F_ц$

При малейшем отклонении частоты вращения n от значения $n_0 (n = n_0)$ центробежная сила либо будет преобладать над силой пружины, либо будет меньше, и муфта M поднимется до упора вверх в первом случае или опустится вниз — во втором Равновесное состояние возможно лишь при частоте вращения $n = n_0$, причем

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

это равновесие безразличное. Из рис. 5.20, *в* видно, что регулятор как в точке *а*, так и в точке *б* находится в неустойчивом состоянии равновесия.

В системах автоматического регулирования применяются регуляторы, обладающие только устойчивыми установившимися режимами работы. Установившийся режим работы системы автоматического регулирования является устойчивым в том случае, если она, будучи выведенной из состояния равновесия, вновь возвращается к нему после устранения возмущающего воздействия. Равновесие в установившемся режиме работы не может полностью характеризовать систему автоматического регулирования.

Кроме установившихся процессов регулирования различают переходные процессы (неустановившиеся режимы работы). Под переходным процессом понимают любое неустановившееся состояние системы регулирования, во время которого изменяется значение регулируемого параметра от одного установившегося к другому установившемуся.

Для систем автоматического регулирования устойчивость в переходном процессе должна являться обязательным ее свойством. Устойчивость переходного процесса иногда называют устойчивостью движения или динамической устойчивостью.

Определение устойчивости движения динамических систем автоматического регулирования является более сложной задачей, чем определение устойчивости в установившихся режимах работы. Пусть, например, система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя (см. рис. 5.17, *а*) находится в установившемся режиме работы, соответствующем точке A статической характеристики системы. Нагрузке на валу $M_{н_1}$ соответствует частота вращения n_1. Допустим, в момент времени $t=t_1$ произошло скачкообразное увеличение нагрузки на валу до значения $M_{н_2}$, которому соответствует новый установившийся режим B с установившимся значением частоты вращения вала $n=n_2$. Однако в силу инерционности подвижных частей системы переходу в установившийся режим B предшествует переходный процесс (неустановившийся режим).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Из рис. 5.21 видно, что в неустановившемся режиме каждому моменту времени t соответствует частота вращения вала

$$n(t) = n_{уст} + n_{пер}, \qquad (5.29)$$

где $n_{уст}$ — частота вращения, соответствующая данному установившемуся режиму после окончания переходного процесса; $n_{пер}$ — переходная погрешность частоты, обнаружнвающаяся только в переходном процессе.

В общем виде

$$x(t) = x_{уст} + x_{пер}(t), \qquad (5.30)$$

где $x(t)$ — значенне регулируемого параметра в неустановившемся режиме в каждый момент времени; $x_{уст}$ — установившееся значение регулируемого параметра; $x_{пер}$ — отклонение регулируемого параметра от установившегося значения.

Движение системы из одного установившегося режима в другой может оказаться либо устойчивым, либо неустойчивым. Это можно выяснить путем исследования динамики процесса регулирования, т. е. определением закона изменения регулируемого параметра в функции времени при воздействии на систему возмущающих факторов.

Если $x_{пер}$ стремится к нулю хотя бы за неограниченно большой промежуток времени, то система автоматического регулирования считается устойчивой. Если же $x_{пер}$ не стремится к нулю с течением времени, то система автоматического регулирования считается неустойчивой.

Рассмотрим понятия, связанные с устойчивостью движения, на примере с шариком (рис. 5.22).

Случай I. Шарик движется внутри трубы по внутренней (нижней) образующей $ГБ$ из точки A в точку B. Условно примем, что точки A и B соответствуют установившимся режимам. Причиной движения шарика из устойчивого равновесного состояния A в новое состояние B является сила F_1 (рис. 5.22, а). Предположим, что при движении шарика по образующей $ГБ$ вследствие, например, бокового толчка произойдет его отклонение. При этом возникает сила F_2, которая стремится вернуть шарик к прежнему направлению движения (рис. 5.22, *б*). Шарик, совершив несколько колебаний

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

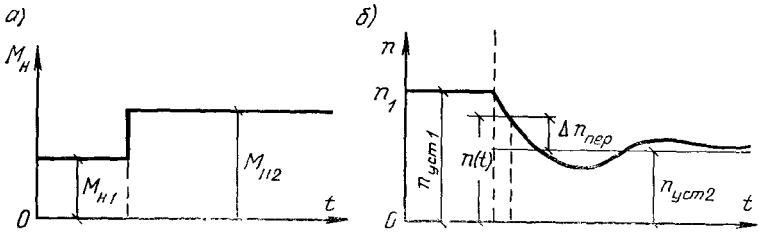


Рис 5 21. График процесса регулирования

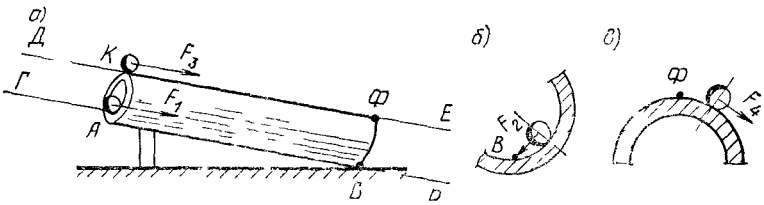


Рис. 5.22. К понятию устойчивости движения

относительно нижней образующей *ГБ*, вернется к устойчивому движению. Процесс восстановления устойчивого движения и будет являться переходным процессом. Очевидно, в этом случае наблюдаются устойчивое движение, устойчивый переходный процесс.

Случай II. Шарик движется по верхней образующей трубы *ДЕ* из точки *К* в точку *Ф*. Причиной движения шарика является сила F_3. Предположим, что при движении шарика по образующей *ДЕ* вследствие, например, небольшого бокового толчка или за счет неровностей на поверхности произойдет отклонение шарика от образующей *ДЕ*. Возникает сила F_4 (рис. 5.22, *в*), которая стремится отклонить шарик от направления *ДЕ*. Очевидно, что шарик отклонится от направления *ДЕ* и к нему не вернется. В этом случае наблюдаются неустойчивое движение, неустойчивый переходный процесс

Между переходным процессом при движении шарика по трубе и переходными процессами в системах автоматического регулирования можно провести аналогию. Для этого необходимо под движением понимать не только простое механическое перемещение, но и всякое

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

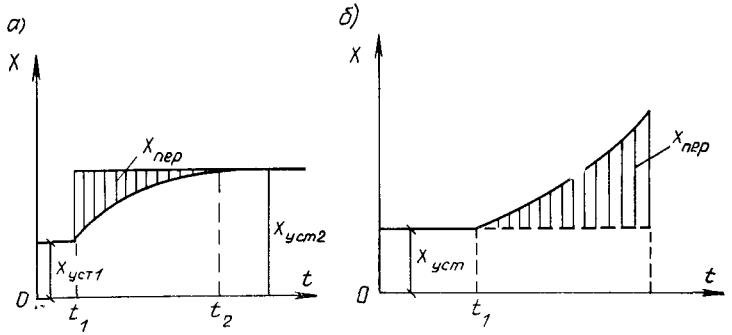


Рис. 5.23. Монотонный апериодический (*а*) и расходящийся (*б*) переходные процессы

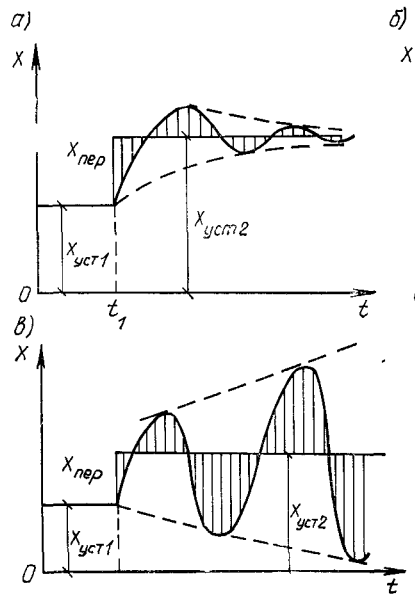


Рис. 5.24. Колебательные переходные процессы

изменение состояния той или иной физической величины (напряжения, скорости, силы тока, давления, температуры, частоты и т. д.).

Наблюдая за поведением системы регулирования при воздействии на нее ограниченного по величине внешнего возмущения, можно судить об ее динамической устойчивости.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Представление о различных режимах движения систем автоматического регулирования можно получить из следующих примеров.

Пример 1. Система переходит из старого установившегося состояния в новое. Регулируемый параметр x в этом случае монотонно приближается к установившемуся значению $x_{уст\,2}$. В течение переходного процесса $x_{пер}$ стремится к нулю (рис. 5.23, *а*). Переходный процесс носит затухающий характер. Система автоматического регулирования, обладающая подобными переходными процессами, является устойчивой.

Пример 2 (рис. 5.23, *б*). Пусть в момент времени $t=t_1$ в системе автоматического регулирования начался переходный процесс, который имеет расходящийся характер. В переходном процессе $x_{пер}$ монотонно возрастает. Система автоматического регулирования неустойчива. Здесь имеет место монотонная неустойчивость.

Пример 3 (рис. 5.24, *а*). Система, совершив несколько колебаний около нового установившегося значения регулируемого параметра, приходит к установившемуся режиму работы. Переходная погрешность $x_{пер}$ в переходном процессе изменяется как по абсолютной величине, так и по знаку. Однако амплитуда колебаний уменьшается, и процесс является затухающим. Переходный процесс подобного вида называется колебательным. Переходная погрешность $x_{пер}$ с течением времени стремится к нулю, процесс — устойчивый.

Пример 4 (рис. 5.24, *б*). Система автоматического регулирования совершает незатухающие колебательные движения около значения регулируемого параметра $x_{уст\,2}$ Переходная погрешность $x_{пер}$ изменяется по синусоидальному закону с постоянной амплитудой. Переходный процесс такого вида является граничным между сходящимся и расходящимся переходными процессами. Его следует относить к неустойчивому колебательному переходному процессу.

Пример 5 (рис. 5.24, *в*). Система, выведенная из установившегося режима, совершает расходящиеся колебательные движения около значения регулируемого параметра $x_{уст\,2}$. Амплитуда переходной погрешности

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

непрерывно возрастает. Колебательный переходный процесс подобного вида является неустойчивым.

Существует целый ряд показателей, по которым определяют, устойчива система или не устойчива. Теорией автоматического регулирования предусматриваются различные критерии устойчивости и методы анализа устойчивости систем автоматического регулирования. Современная электронно-вычислительная техника позволяет оперативно производить исследование систем автоматического регулирования на устойчивость, что имеет исключительно важное значение при проектировании систем автоматики.

ГЛАВА 6. КАЧЕСТВО ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

§ 6.1. Показатели качества процессов регулирования

Устойчивость движения системы автоматического регулирования является ее основным, но недостаточным свойством. Под устойчивостью и неустойчивостью движения систем автоматического регулирования понимается наличие или отсутствие в них затухания переходного процесса.

Не всякая устойчивая система автоматического регулирования отвечает заданным техническим требованиям. Затухание переходного процесса может происходить быстро или медленно, с большими или малыми отклонениями регулируемого параметра от заданного значения, может быть колебательным или апериодическим. Все эти факторы отражают так называемое качество процесса регулирования и требуют специального исследования.

Под качеством процесса регулирования понимают способность автоматического регулятора поддерживать с достаточной точностью заданный закон изменения регулируемого параметра. Качество процесса регулирования тем выше, чем меньше отклонение регулируемого параметра от заданного значения и чем быстрее достигается заданный установившийся режим.

Качество процесса регулирования характеризуют следующие четыре показателя:

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

1. **Ошибка, остающаяся по окончании переходного процесса,** т. е. ошибка в установившемся режиме работы, которая может состоять из двух составляющих.

Первая составляющая этой ошибки, обусловленная точностью действия отдельных звеньев, зависит от сил сухого трения, люфтов, зазоров, несбалансированности и т. д. Эта составляющая определяет зону нечувствительности системы автоматического регулирования (рис. 6.1).

Следовательно, в установившихся режимах работы величина регулируемого параметра $x(t)$ не будет строго постоянной во времени. В технических требованиях указываются отклонения, например, $\pm 5\%$ фактического значения регулируемого параметра Δx от оптимального $x_{уст}$.

Вторая составляющая рассматриваемой ошибки — статическая ошибка $\delta_{макс}$ и δ (неравномерность регулирования), которая зависит от величины нагрузки в статической системе (рис. 6.2) и равна нулю в астатической.

Если статическая ошибка δ и максимальная допустимая статическая ошибка $\delta_{макс}$ равны нулю, то регулирование и система являются астатическими.

2. **Перерегулирование** — максимальное отклонение регулируемой величины, которое не должно превышать максимально допустимого значения, т. е. $\Delta x_{макс} \leqslant \Delta x_{доп}$. В данном случае фактическое значение регулируемого параметра $x(t)$ в переходном процессе превышает установившееся значение $x_{уст}$, т. е. в системе имеет место перерегулирование. Максимальная величина перерегулирования $\Delta x_{макс} = x_{макс} - x_{уст}$ или $\frac{x_{макс} - x_{уст}}{x_{уст}} 100$ ($x_{макс}$ — максимальное значение регулируемого параметра).

3. **Время регулирования** $t_р$ — это промежуток времени, по истечении которого абсолютная величина $|x(t) - x_{уст}|$ не превышает ширины зоны нечувствительности h.

Практически временем регулирования $t_р$ называют промежуток времени (от начала переходного процесса), в течение которого абсолютная величина переходной ошибки становится меньше допускаемой (обычно она составляет 3—5% установившегося значения регулируемого параметра). Период времени от t_1 до t_2 и есть время регулирования. Время регулирования определяет продолжительность переходного процесса. Теоретически

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Рис. 6.1. Кривая установившегося процесса регулирования

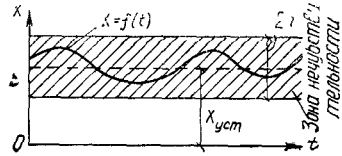
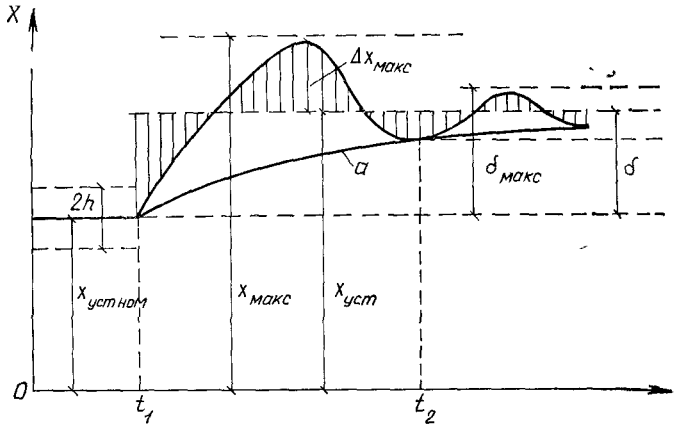


Рис. 6.2. Процесс регулирования с указанием показателей качества регулирования



переходный процесс считается законченным, если переходная ошибка $x_{пер}$ станет равной нулю, что возможно в бесконечности.

Время регулирования $t_р = t_2 - t_1$, или быстродействие системы автоматического регулирования, зависит от вида, числа и характера включения звеньев, входящих в данную систему. Представим себе систему автоматического регулирования, состоящую из n последовательно включенных звеньев.

При нарушении установившегося режима работы происходит отклонение регулируемого параметра и появляется регулирующее воздействие, «пробегающее» по всей системе. Чем быстрее оно «пробегает» по системе, тем быстрее происходит процесс регулирования. Однако чем больше число звеньев в системе автоматического регулирования при прочих равных условиях, тем больше времени потребуется на «пробегание» регулирующего воздействия по всему замкнутому контуру от первого до n-го звена, т. е. с увеличением числа звеньев си-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

стемы быстродействие уменьшается. Если быстродействие системы оказывается слишком незначительным, то при некоторых условиях система автоматического регулирования может оказаться неустойчивой.

4. **Число колебаний регулируемой величины в заданное время**, которое не должно превышать определенного значения. В связи с этим в некоторых системах должен быть апериодический (монотонный) переходный процесс при минимальном времени протекания (кривая *а* на рис. 6.2), а в некоторых системах целесообразнее обеспечивать колебательный переходный процесс, не допуская перерегулирования, т. е. $\Delta X_{макс} \leqslant \Delta X_{доп}$. В некоторых случаях колебательный процесс не должен иметь нежелательных частот или каких-либо искажений формы колебаний.

§ 6.2. Средства улучшения качества процессов регулирования

Для достижения требуемого качества регулирования необходимо обеспечить статическую точность. Статическая ошибка может быть уменьшена путем увеличения общего коэффициента усиления регулятора. Для некоторых систем это наиболее целесообразно в том случае, если требуется невысокая статическая точность и если при этом система регулирования остается устойчивой, а другие показатели качества регулирования — приемлемыми. Однако как бы мы ни увеличивали коэффициент усиления, статическая ошибка в статических регуляторах все равно остается.

Увеличение общего коэффициента усиления всегда ограничено, так как при больших коэффициентах появляются нежелательные колебания регулируемого параметра в переходных процессах (и даже неустойчивость); кроме того, не всегда технически возможно увеличение коэффициента усиления в данной конструкции регулятора.

Возможен другой вариант — изменение схемы регулятора таким образом, чтобы он по принципу действия не имел статической ошибки, например замена статического регулятора астатическим.

Повысить качество регулирования вообще и качество переходных процессов в частности можно путем

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

изменения параметров регулируемого объекта или регулятора. Обычно параметры регулируемого объекта задаются техническими условиями и изменению не подлежат, а изменение параметров регулятора в допускаемых пределах не обеспечивает требуемого характера протекания переходных процессов системы автоматического регулирования. В таких случаях возникает необходимость изменять структурную схему регулятора путем введения дополнительных звеньев. Устройства, состоящие из дополнительных звеньев и предназначенные для улучшения динамики регулирования, образуют совокупность так называемых корректирующих устройств, которые часто называют также стабилизирующими элементами.

Корректирующие устройства в зависимости от схемы их включения подразделяются на последовательные и параллельные. Если при включении этих устройств воздействие их будет совпадать по направлению с основным воздействием — это последовательное и параллельно-согласное включение, а если воздействие будет направлено навстречу основному воздействию, то это параллельно-встречное включение.

§ 6.3. Последовательное и параллельно-согласное включение корректирующих устройств

Устройства, включенные последовательно и параллельно согласно основному контуру регулирования, обычно дают воздействия по производной от отклонения регулируемого параметра. Применяются также устройства, дающие интегральное воздействие от отклонения регулируемого параметра.

Дополнительное воздействие по производной от регулируемого параметра является эффективным средством повышения качества переходных процессов (подавляются колебания и сокращается время регулирования). Оно широко применяется в сочетании с основным принципом регулирования.

Рассмотрим эффект подавления колебаний в системе автоматического регулирования от дополнительного воздействия регулятора на объект.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Допустим, что отклонение регулируемого параметра Δx изменяется во времени (рис. 6.3, *а*). Изменение $\frac{d\Delta x}{dt}$ во времени показано на рис. 6.3,*б*. Если регулятор оказывает на регулируемый объект воздействие, пропорциональное только отклонению регулируемого параметра (см. рис. 6.3, *а*), то при $\Delta x > 0$, т. е. на участке *OAB*, регулятор вырабатывает воздействие, направленное на уменьшение отклонения регулируемого параметра.

В точке *B* отклонение становится равным нулю. Однако процесс регулирования на этом не заканчивается и регулируемый параметр отклоняется в обратную сторону как из-за инерционности регулируемого объекта, так и из-за инерционности регулятора.

Регулятор переключается на действие в обратном направлении не в точке *B*, а позже — внутри участка *BC*. Инерционность регулятора способствует раскачиванию процесса, и тем сильнее, чем больше коэффициент усиления регулятора.

По-другому будет протекать переходный процесс, если регулятор дополнительно вырабатывает воздействие на объект, пропорциональное производной от отклонения регулируемого параметра. В этом случае регулятор вступит в действие при меньших отклонениях от исходного установившегося режима. Сигнал по производной имеет наибольшее значение в самом начале переходного процесса, когда Δx близко еще к нулю (см. рис. 6.3, *б*).

Кроме того, на участке *AO* производная $d\Delta x/dt$ и отклонение Δx имеют одинаковые знаки. В результате их суммирования уже при малом отклонении регулируемого параметра вырабатывается сигнал, достаточный для срабатывания регулятора, а при больших отклонениях это увеличивает воздействие регулятора на объект, направленное на уменьшение отклонения регулируемого параметра.

Следовательно, наличие сигнала по производной форсирует действие регулятора на участке возрастания отклонения регулируемого параметра. Поэтому вследствие более энергичного воздействия регулятора на объект максимальное отклонение будет меньше, чем в системе с регулятором, реагирующим лишь на отклоне-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ние регулируемого параметра (точка A займет положение A', см. рис. 6.3,$а$).

На участке AB отклонение регулируемого параметра уменьшается, производная меняет знак. На вход преобразующего элемента поступает результирующий сигнал, получающийся после вычитания из сигнала по отклонению сигнала по производной. Воздействие регулятора на объект уменьшается по сравнению с регулятором, не реагирующим на производную. Следовательно, наличие сигнала по производной тормозит действие регулятора на участке уменьшения отклонения регулируемой величины.

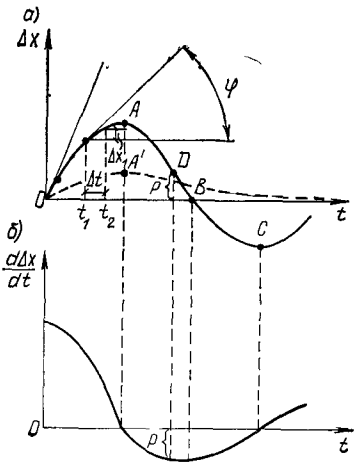


Рис. 6.3. Изменение отклонения Δx и производной $d\Delta x/dt$ во времени

Если регулятор, работающий только по отклонению регулируемого параметра, переключился на действие в обратную сторону в точке B, то это переключение произойдет раньше (внутри участка AB), так как результирующий сигнал принимает отрицательное значение внутри участка AB, например, после точки D, в которой сигнал по отклонению становится равным сигналу по производной.

Переключение регулятора на действие в обратную сторону, когда отклонение регулируемого параметра еще не достигло нулевого значения, предотвращает переход отклонения в отрицательную сторону. В результате подобного воздействия на объект регулирования переходный процесс может стать апериодическим (пунктирная линия на рис. 6.3, $а$). Итак, наличие сигналов по производной компенсирует в некоторой мере инерционность в переключении регулятора на действие в обратную сторону.

Таким образом, при наличии дополнительного воздействия по производной перестановка регулирующего элемента происходит не только вследствие отклонения

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

регулируемого параметра в данный момент времени, а также и потому, будет ли отклонение в последующие моменты времени убывать или возрастать и с какой быстротой. Регулятор приобретает способность «предвидеть» развитие переходного процесса и работать с опережением. Регуляторы с воздействием по производной иногда называют регуляторами с предварением.

Включение устройств, обеспечивающих дополнительное воздействие регулятора на объект, пропорциональное производной от регулируемого параметра, может осуществляться различными способами.

Первый способ. В обычную, рассмотренную ранее элементную схему системы вводят стабилизирующий элемент, включаемый параллельно и согласно основному воздействию (параллельно-корректирующее устройство) (рис. 6.4). В такой схеме регулятор имеет два измерительных элемента: первый дает воздействие на выходе, зависящее от отклонения регулируемого параметра Δn), а второй — воздействие на выходе, зависящее от скорости изменения этого отклонения dn/dt (такой элемент называется также дифференцирующим).

Подобное включение измерительных элементов в системе автоматического регулирования угловой скорости вращения вала теплового двигателя *1* удобно проследить по рис. 6.5. Перемещение золотника *3* в процессе регулирования определяется не только изменением угловой скорости вращения вала (воспринимаемое элементом *2*), но также и воздействием по производной от скорости вращения, которое осуществляется акселерометром. Приводной валик акселерометра *6* имеет на конце резьбу *7* с большим шагом (несамотормозящуюся). Тело с большой массой *8* имеет внутреннюю резьбу, посредством которой навернуто на валик *7*.

Когда угловое ускорение $\varepsilon = dn/dt$ отсутствует, в установившемся режиме работы угловые скорости вращения тела *8* и валика одинаковы. Тангенциальная составляющая силы инерции равна нулю, а следовательно, нет углового и осевого смещений тела *8*, которое удерживается в нейтральном положении пружинами *9* и *10*. Эти пружины установлены в цилиндре *11*, жестко связанном с валиком *6*.

При отклонении угловой скорости ω от заданного

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

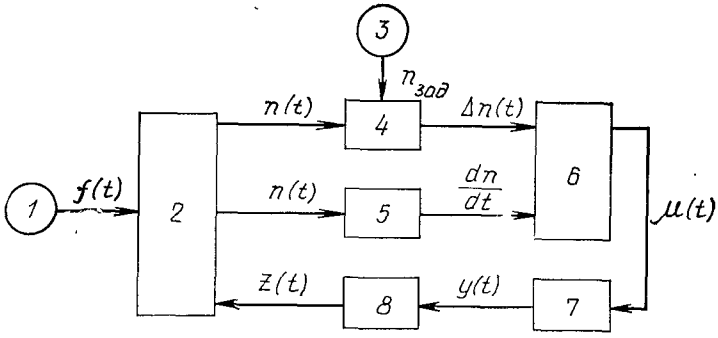


Рис. 6.4. Функциональная схема системы автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя с воздействием по производной

1 — возмущающее воздействие; *2* — регулируемый объект; *3* — настройка; *4* — измерительный элемент; *5* — дифференцирующий элемент; *6* — преобразующий элемент; *7* — исполнительный элемент; *8* — регулирующий элемент

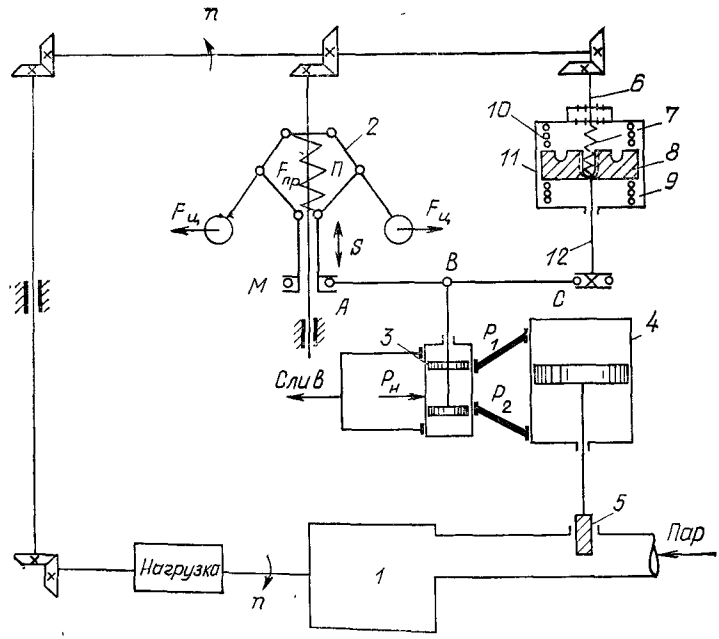


Рис. 6.5. Система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя с воздействием по производной

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

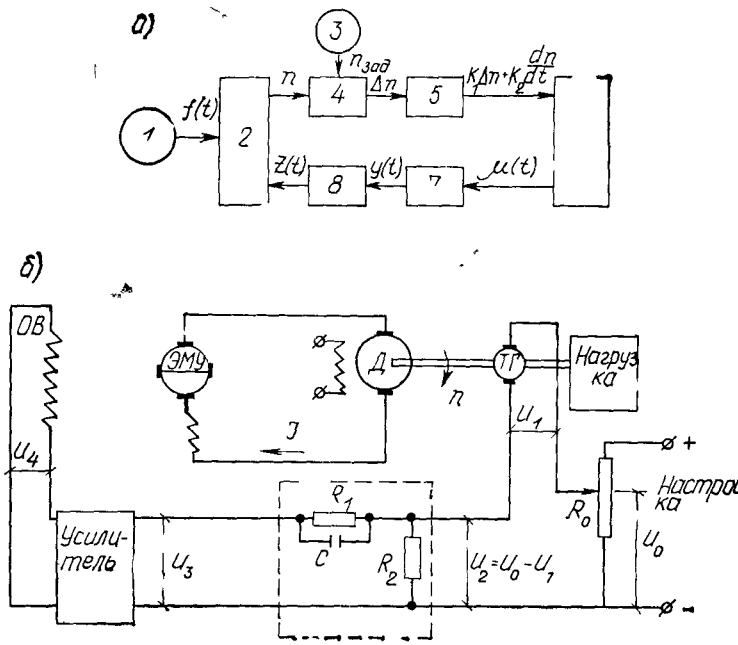


Рис. 6.6. Система автоматического регулирования частоты вращения вала электродвигателя с воздействием по производной

1 — возмущающее воздействие, *2* — регулируемый объект, *3* — настройка; *4* — измерительный элемент, *5* — дифференцирующий элемент с постоянной составляющей, *6* — преобразующий элемент; *7* — исполнительный элемент, *8* — регулирующий элемент

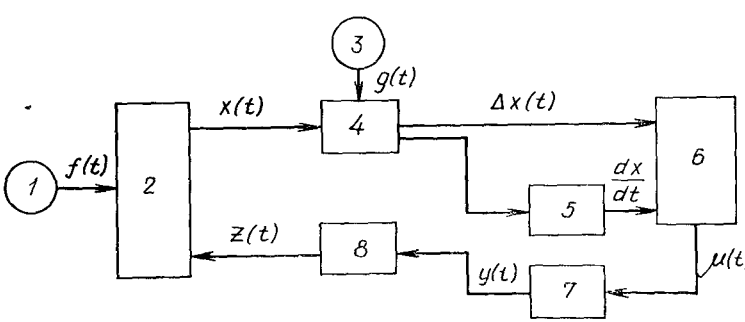


Рис. 6.7. Вариант функциональной схемы систем автоматического регулирования с воздействием по производной

1 — возмущающее воздействие, *2* — регулируемый объект *3* — настройка, *4* — измерительный элемент; *5* — дифференцирующий элемент, *6* — преобразующий элемент; *7* — исполнительный элемент, *8* — регулирующий элемент

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

значения появляется и угловое ускорение ε, а следовательно, тангенциальные составляющие сил инерции. Под их воздействием тело *8* поворачивается на резьбе *7* валика *6*, одновременно совершая поступательное движение. При этом тангенциальные составляющие сил инерции уравновешиваются противодействующей силой, возникающей от деформации пружин *9* и *10*. Шток *12* жестко связан с телом *8* и, перемещаясь в осевом направлении одновременно с последним, переставляет золотник *3*. Как видно из рис. 6.5, рычаг *ABC* является суммирующим элементом схемы. Сигнал от золотника передается гидроцилиндру *4*, который через регулирующий орган — заслонку *5* воздействует на поток пара, поступающего в двигатель.

Второй способ. Стабилизирующий элемент включают в схему последовательно (рис. 6.6, *а*). В этой схеме применено корректирующее устройство, на выходе которого получается сигнал, равный сумме двух слагаемых, первое из которых пропорционально отклонению регулируемого параметра, а второе — производной от этого отклонения.

Рассмотрим такое включение стабилизирующего элемента на примере системы автоматического регулирования частоты вращения вала электродвигателя.

Регулятор предназначен для поддержания постоянной частоты вращения вала n электродвигателя $Д$ независимого возбуждения при заданной настройке U_0 как при изменении нагрузки на валу электродвигателя, так и при других возмущающих воздействиях на систему. Измерительным элементом здесь является тахогенератор (ТГ), который выдает напряжение U_1, пропорциональное регулируемому параметру n. Это напряжение сравнивается на потенциометре настройки R_0 с заданным значением U_0. Напряжение рассогласования $U_2 = U_0 - U_1$ подается на вход стабилизирующего элемента, в качестве которого применен дифференцирующий контур, состоящий из R и C.

Отличительная особенность контура RC, собранного, как показано на рис. 6.6, *б*, — подача напряжения, равного сумме двух слагаемых, первое из которых пропорционально отклонению U_2, а второе — производной dU_2/dt, т. е.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$U_3 = K_2\left(U_2 + K_3\frac{dU_2}{dt}\right).$$

Напряжение U_3 приложено к зажимам на входе усилителя (преобразующий элемент). Усиленное напряжение U_4 приложено к зажимам обмотки возбуждения электромашинного усилителя (ЭМУ). В зависимости от величины этого напряжения электромашинный усилитель вырабатывает соответствующее напряжение, а следовательно, по цепи якоря электродвигателя протекает электрический ток I, который и оказывает регулирующее воздействие.

Допустим, нагрузка увеличилась. Частота вращения вала n должна уменьшиться. Пропорционально уменьшению n уменьшится и вырабатываемое тахогенератором напряжение $U_1 = K_1 n$. Напряжение рассогласования U_2 увеличится, что приведет к увеличению напряжения U_4, подводимого к зажимам обмотки возбуждения ЭМУ. В связи с этим возрастает сила электрического тока, протекающего по цепи якоря электродвигателя $Д$, что обеспечит увеличение вращающего момента $M_{вр} = KI$. Частота вращения вала увеличится.

Эффект, получаемый в результате дополнительного регулирующего воздействия регулятора на регулирующий объект, будет таким же, как и ранее рассмотренный.

Третий способ. Стабилизирующий элемент вводят в элементную схему параллельно согласно основной цепи воздействия (рис. 6.7). При таком способе включения на вход стабилизирующего элемента подается рассогласование $\varepsilon(t)$, которое выдается измерительным элементом. Так же, как и в рассмотренных выше двух способах, здесь на вход преобразующего элемента подается как сигнал, пропорциональный отклонению регулируемого параметра, так и сигнал, пропорциональный производной от этого отклонения.

Стабилизирующий элемент здесь представляет собой дифференцирующее устройство, например, дифференцирующий контур, состоящий из R и C, собранный по схеме на рис. 6.8. Напряжения $U_{вых}$ и $U_{вх}$ для такого контура определяются по зависимости

$$U_{вых} \approx CR\frac{dU_{вх}}{dt}. \qquad (6.1)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

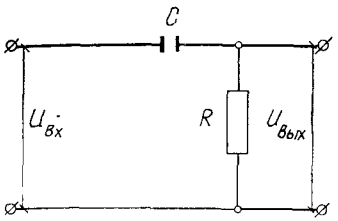


Рис. 6.8. Дифференцирующий RC-коитур

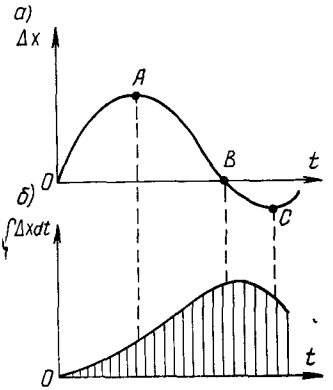


Рис. 6.9. Изменение отклонения Δx и интеграла $\int \Delta x dt$ по этому отклонению во времени

Здесь знак $\approx$ объясняется неидеальностью элемента вследствие его инерционности.

К корректирующим относятся также устройства, способствующие тому, что регулятор оказывает на регулируемый объект дополнительное воздействие, пропорциональное интегралу по отклонению регулируемого параметра. Рассмотрим эффект, получаемый в данном случае.

Изменение отклонения регулируемого параметра во времени показано на рис. 6.9,*а*, изменение интеграла по этому отклонению — на рис. 6.9, *б*. Как видим, дополнительное воздействие по интегралу, пропорциональное в каждый момент времени ординатам, отмеченным вертикальной штриховкой, направлено в одну сторону. Следовательно, когда воздействие регулятора по отклонению должно изменить направление (точка *B* на рис. 6.9, *а*), дополнительное воздействие по интегралу будет направлено в сторону дальнейшего уменьшения регулируемого параметра. Вследствие этого амплитуда колебаний увеличится (точка *C* на рис. 6.9, *б* опустится). При дополнительном воздействии по интегралу отмечается ухудшение некоторых динамических свойств системы, происходит ее раскачивание, а в некоторых случаях система может быть неустойчивой. Однако при дополнительном воздействии устраняется статическая ошибка, т. е. обеспечивается астатическое регулирование.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

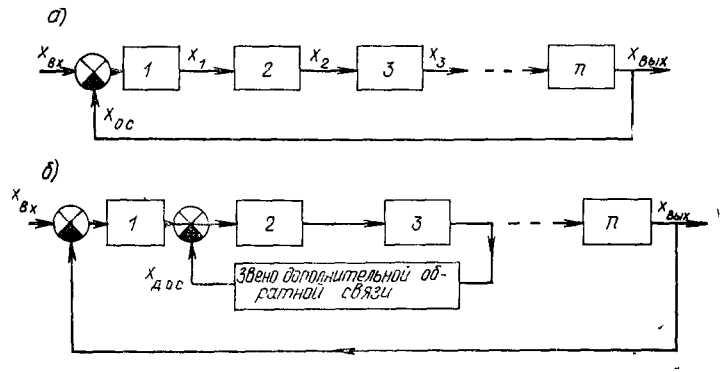


Рис. 6.10. Цепь последовательно соединенных звеньев, охваченных основной (*а*) и дополнительной (*б*) обратными связями

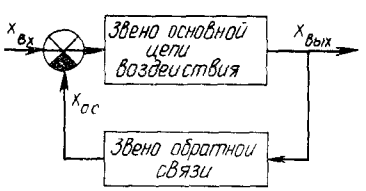


Рис. 6.11. Звено, охваченное обратной связью

§ 6.4. Параллельно-встречное включение корректирующих устройств (дополнительные обратные связи)

Замыкание выхода системы автоматического регулирования со входом обусловлено необходимостью сравнения текущего значения регулируемого параметра с его заданным значением. В таких системах цепь сравнения обычно называют основной обратной связью (рис. 6.10, *а*).

Связывание входа и выхода заложено в самом принципе регулирования, так как для сравнения необходимо иметь, по крайней мере, два параметра.

Для улучшения процесса регулирования, как правило, в регулятор вводят так называемые дополнительные обратные связи

Дополнительной обратной связью называется такое звено системы, которое, соединяя последующее звено

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

цепи с одним из предыдущих, создает дополнительный замкнутый контур (рис. 6.10, *б*).

Рассмотрим действие дополнительных обратных связей на следующем примере. На рис. 6.10 показана система, состоящая из последовательно соединенных звеньев от *1* до *n*. Эта система имеет замкнутую цепь воздействия, поскольку на вход первого звена подана выходная величина $x_{вых}=x_{ос}$.

Для улучшения динамики системы может оказаться целесообразным введение дополнительной цепи обратного воздействия. Соединение выхода звена *3* со входом звена *2* посредством звена обратной связи позволяет получить дополнительную обратную связь $x_{д.о.с}$, в результате чего образуется новый замкнутый контур, помимо основного, как это показано на рис. 6.10, *б*.

Применение дополнительных цепей обратного воздействия позволяет практически без замедления вводить в систему дополнительные управляющие импульсы, не дожидаясь, пока основной управляющий импульс полностью «пробежит» цепь последовательно соединенных звеньев основного контура системы автоматического регулирования. Укорочением цепей обратного воздействия можно значительно увеличить быстродействие системы автоматического регулирования.

Дополнительные обратные связи являются одним из эффективных средств повышения устойчивости работы и качества регулирования автоматических систем. Но не всякая дополнительная обратная связь является эффективной.

Обратные связи могут быть положительными и отрицательными. Обратная связь считается **положительной,** если подаваемые на вход одного и того же звена управляющий сигнал и сигнал обратной связи воздействуют на него в одном направлении (или имеют один и тот же знак).

Обратная связь считается **отрицательной,** если подаваемые на вход одного и того же звена управляющий сигнал и сигнал обратной связи воздействуют на него в разных направлениях (или имеют разные знаки).

Рассмотрим в цепи звеньев системы автоматического регулирования звено, охваченное обратной связью (рис. 6.11).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Допустим, что звено системы автоматического регулирования является безынерционным. Уравнение статики звена, лишенного обратной связи, имеет вид

$$x_{\text{вых}} = K x_{\text{вх}}. \tag{6.2}$$

Охватим звено обратной связью, т. е. подадим на вход звена часть выходной величины, которую назовем $x_{\text{о с}}$.

Пусть сигнал обратной связи $x_{\text{о с}}$ зависит от выходной величины и не зависит от времени, т. е.

$$x_{\text{о.с}} = \beta x_{\text{вых}}, \tag{6.3}$$

где β — коэффициент обратной связи.

Коэффициент обратной связи β показывает долю использования выходного сигнала $x_{\text{вых}}$ для воздействия на вход звена основной цепи воздействий в виде сигнала обратной связи $x_{\text{о с}}$.

Звено, охваченное положительной обратной связью, будет описываться уравнением

$$x_{\text{вых}} = K(x_{\text{вх}} + x_{\text{о с}}), \tag{6.4}$$

откуда с учетом (6.3)

$$x_{\text{вых}} = K(x_{\text{вх}} + \beta x_{\text{вых}})$$

или

$$(1 - K\beta)\, x_{\text{вых}} = K x_{\text{вх}}.$$

Разделив правую и левую части на $1 - K\beta$, получим

$$x_{\text{вых}} = \frac{K}{1 - K\beta} x_{\text{вх}}. \tag{6.5}$$

Обозначим

$$\frac{K}{1 - K\beta} = K_1,$$

тогда

$$x_{\text{вых}} = K_1 x_{\text{вх}}. \tag{6.6}$$

При $0 < K\beta < 1$ коэффициент усиления K_1 звена, охваченного положительной обратной связью, больше коэффициента усиления K звена без обратной связи, так как

$$\frac{K}{1 - K\beta} > K.$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Положительная обратная связь обычно применяется для увеличения коэффициента усиления того или иного звена основной цепи. Недостатком ее является снижение устойчивости системы автоматического регулирования.

Положительные обратные связи широко используют в магнитных усилителях. Схема и характеристики магнитного усилителя с положительной обратной связью показаны на рис. 6.12.

Входной величиной является управляющий ток I_y, выходной величиной — переменный ток $I_\sim$, протекающий через нагрузку.

Характеристика магнитного усилителя без обратной связи $I_\sim = f(I_y)$. Характеристика обмотки обратной связи $I_{o.c} = f(I_\sim)$ (прямая ОА). В данном случае $I_{o.c} = mI_\sim$, где $m = I_{o.c}/I_\sim = \operatorname{tg} \alpha$.

Для получения тока $I_{1\sim}$ на выходе усилителя при отсутствии обмотки обратной связи необходим постоянный ток подмагничивания I_{y1}. При наличии обратной связи для получения тока $I_{1\sim}$ необходим тоже подмагничивающий ток, равный I_{y1}, но значительная часть его, равная $I_{o.c1}$, будет создаваться обмоткой обратной связи, и лишь небольшая часть, равная $I_{y1} - I_{o.c}$, — управляющей обмоткой.

Чем больше сигнал обратной связи, тем меньшая сила управляющего тока нужна для создания одного и того же тока на выходе усилителя. Это значит, что коэффициент усиления увеличивается при увеличении обратной связи, так как

$$K_y = \frac{I_\sim - I_{xx}}{I_y}. \qquad (6.7)$$

Из выражения (6.7) следует, что с уменьшением I_y коэффициент усиления увеличивается. Как видно из характеристики магнитного усилителя, направления воздействия входной величины I_y и сигнала обратной связи $I_{o.c}$ совпадают. Согласно определению, такая обратная связь является положительной.

Звено, охваченное отрицательной обратной связью, будет описываться уравнением

$$x_{вых} = K(x_{вх} - x_{o.c}). \qquad (6.8)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

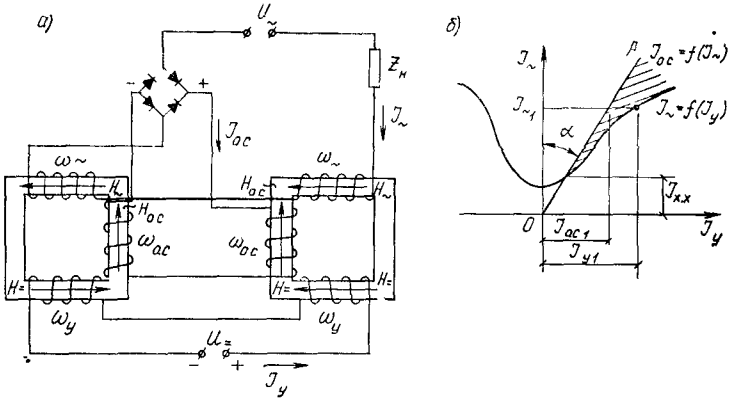


Рис. 6.12. Схема (*а*) и характеристики магнитного усилителя с положительной обратной связью (*б*)

Так как $x_{о.с}=\beta x_{вых}$,

$$x_{вых}=K(x_{вх}-\beta x_{вых}),$$

или

$$(1+K\beta)\,x_{вых}=K\,x_{вх},$$

откуда

$$x_{вых}=\frac{K}{1+K\beta}\,x_{вх}. \qquad (6.9)$$

Обозначим

$$\frac{K}{1+K\beta}=K_2,$$

тогда

$$x_{вых}=K_2\,x_{вх}. \qquad (6.10)$$

Коэффициент усиления звена K_2 меньше коэффициента усиления звена K без обратной связи.

Действительно, при $0<K\beta<1$

$$\frac{K}{1+K\beta}<K.$$

Полученное выражение показывает, что в системе с отрицательной обратной связью коэффициент усиления уменьшается, однако отрицательная обратная связь повышает устойчивость системы автоматического регулирования.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Так как положительная обратная связь не нашла широкого применения в системах автоматического регулирования, далее под термином обратная связь будем понимать только дополнительную отрицательную обратную связь.

Различают следующие виды обратных связей: жесткая, гибкая и комбинированная (изодромная).

Жесткая обратная связь. Для повышения устойчивости системы автоматического регулирования, когда допустима статическая ошибка, применяют жесткие обратные связи, при этом подаваемые сигналы $x_{о.с}$ пропорциональны выходной величине:

$$x_{о.с} = \beta x_{вых}, \qquad (6.11)$$

где $x_{о.с}$ — сигнал обратной связи; β — коэффициент обратной связи; $x_{вых}$ — выходной сигнал.

Сначала рассмотрим систему без обратной связи (см. рис. 4.10), когда муфта регулятора M через рычаг ABC воздействует на золотник 3.

Случай 1. Рассматриваемая система находится в установившемся режиме работы, т. е. нагрузка на объект вполне определенна и не изменяется во времени, потребление пара постоянно, энергия, потребляемая системой, равна энергии расходуемой, частота вращения вала n равна заданному значению.

Постоянному расходу пара обязательно соответствует вполне определенное, неподвижное положение заслонки 5 (считаем, что давление перед заслонкой неизменное). Совершенно очевидно, что заслонка 5 будет неподвижной, если давление масла над поршнем гидродвигателя и под ним будет одинаковым. Весом поршня и заслонки пренебрегаем в том случае, если золотник 3 перекрывает трубопроводы P_1 и P_2, т. е. нагнетательная трубка $P_н$ в установившемся режиме отсоединена от трубопроводов P_1 и P_2.

Случай 2. Допустим, частота вращения вала теплового двигателя увеличилась, например, из-за уменьшения нагрузки. Муфта M поднимается и с помощью рычага ABC поднимает шток золотника 3. Труба P_1 окажется соединенной с нагнетательной трубой $P_н$. Поршень начнет двигаться вниз. Перемещаясь вниз, поршень гидродвигателя опустит заслонку 5. Поступле-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ние пара в регулируемый объект уменьшится и частота вращения вала теплового двигателя снизится, стремясь стать равной заданной.

Действительно, равновесие системы возможно только тогда, когда трубы P_1 и P_2 перекрыты золотником $З$. Так как золотник жестко связан с точкой B рычага, то положение этой точки в равновесном состоянии является фиксированным, положение точки C неизменно. Следовательно, точка A рычага в установившемся режиме может также занимать только одно вполне определенное положение. Значит, муфта M центробежного механизма в установившемся режиме может занимать только одно вполне определенное положение. Одному положению муфты M соответствует одна вполне определенная частота вращения n.

При отклонении параметра n от заданного значения в процессе регулирования он станет равным точно заданному значению, т. е. рассматриваемая система автоматического регулирования является астатической.

Рассмотрим характер переходного процесса при движении системы от старого установившегося режима к новому установившемуся режиму работы.

Пусть в момент времени $t=t_1$ произошло резкое, скачкообразное снижение нагрузки на регулируемый объект (рис. 6.13, *а*), при этом частота увеличится (кривая FA на рис. 6.13, *б*) и регулятор начнет работать так, как и в предыдущем случае.

Когда частота вращения n станет равной заданному значению, золотник $З$ перекроет трубопроводы P_1 и P_2, поршень гидродвигателя *4* остановится. Остановка поршня произойдет только тогда, когда золотник, а следовательно, и муфта регулятора займут положение, соответствующее заданному значению частоты вращения. Однако такое выключение привода может быть слишком поздним, так как вследствие инерционности системы частота вращения будет продолжать уменьшаться и не останется равной заданному значению (кривая BC). Уменьшение частоты вращения ниже заданного значения сопровождается отклонением золотника вниз. Золотник соединит трубу $P_н$ с трубой P_2 и, следовательно, начнет двигаться вверх; при этом заслонка *5* тоже будет перемещаться вверх.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Количество пара, поступающего в двигатель, увеличивается, частота вращения вала двигателя начинает возрастать (кривая CD). Однако вследствие инерционности системы частота вращения будет продолжать увеличиваться (кривая DE).

Таким образом, система будет совершать затухающие колебательные движения, причем процесс затухания колебаний может протекать недопустимо долго. Чтобы

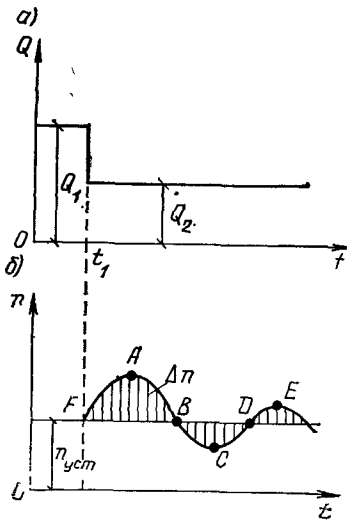


Рис. 6.43. График переходного процесса в системе автоматического регулирования частоты вращения вала

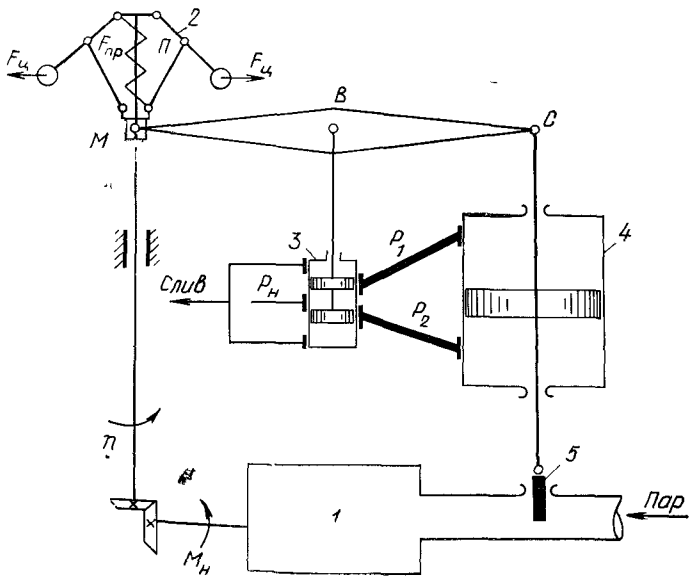


Рис. 6.14. Система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя с жесткой обратной связью

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

предотвратить перерегулирование (кривая BC), нужно отключить гидродвигатель раньше, чем регулируемый параметр достигнет заданного значения (внутри участка AB). Чем раньше осуществим «предварительное отключение», тем меньше будет перерегулирование.

Наиболее эффективным способом предварительного отключения исполнительного элемента является применение обратной связи. Рассмотрим систему автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя *1* с жесткой обратной связью (рис. 6.14).

В этом случае звеном жесткой обратной связи является тяга, соединяющая точку C рычага ABC с поршнем гидродвигателя *4*. Если в системе без обратной связи на рычаг ABC воздействие было только со стороны муфты M (точка A), то в системе с жесткой обратной связью имеем воздействие на рычаг ABC как со стороны муфты M (точка A), так и со стороны поршня гидродвигателя *4* (точка C).

Рассмотрим характер переходного процесса в этом случае (рис. 6.15). Допустим, в момент времени $t=t_1$ частота вращения вала увеличилась. Муфта M центробежного механизма *2* (см. рис. 6.14) поднимается, а вместе с ней поднимается точка A рычага ABC. В начале переходного процесса вследствие инерционности системы поршень гидродвигателя *4*, а следовательно, и точка C рычага останутся неподвижными. Точка B рычага поднимается, поршень золотника *3* соединит трубу $P_н$ с трубой P_1. Поршень гидродвигателя *4* начнет двигаться вниз, а заслонка *5* по мере своего движения вниз уменьшит поступление пара в двигатель. Частота вращения вала снизится. Одновременно с движением поршня происходит и движение точки C вниз. Если условно считать точку A неподвижной, то при опускании точки C вниз происходит вращение рычага ABC по часовой стрелке вокруг точки A. При этом точка B опускается. В отличие от системы без обратной связи в системе с обратной связью движение золотника *3*, обусловленное перемещением поршня гидродвигателя *4*, будет происходить в сторону, противоположную движению золотника *3*, обусловленному перемещением муфты M. В связи с этим от-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

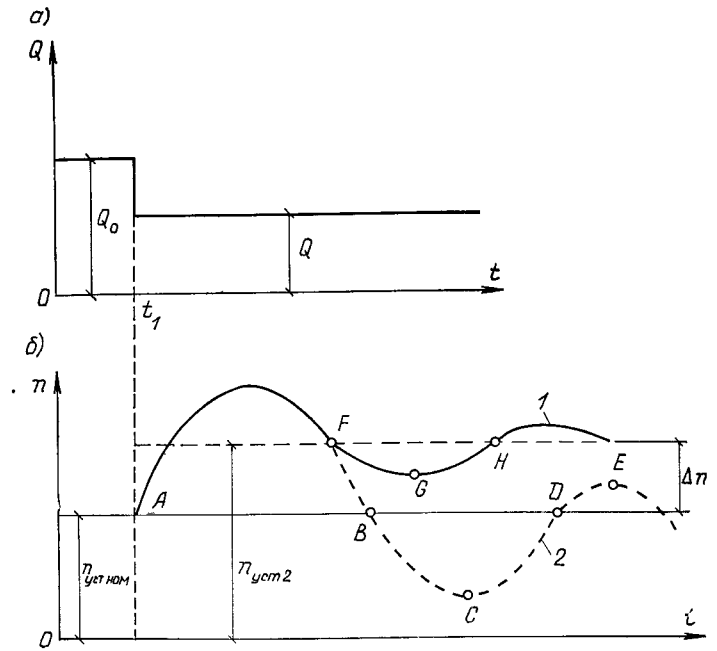


Рис. 6.15. График процесса регулирования в системе с жесткой обратной связью

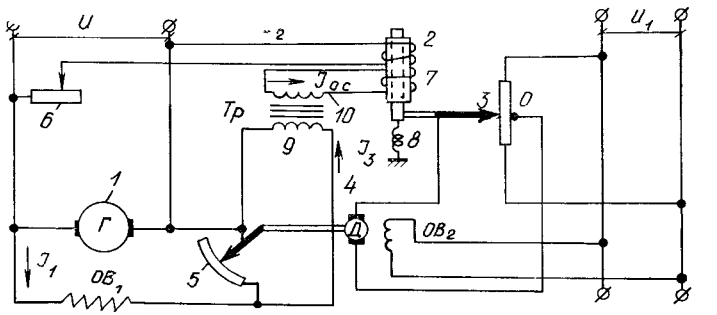


Рис. 6.16. Система автоматического регулирования напряжения генератора с гибкой обратной связью

1 — генератор; *2* — обмотка электромагнита; *3, 5, 6* — реостаты; *4* — двигатель; *7* — дополнительная обмотка электромагнита обратной связи; *8* — пружина; *9* — обмотка трансформатора; *10* — обмотка трансформатора обратной связи

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ключение исполнительного элемента произойдет не в точке B, а раньше, например в точке F.

Таким ооразом, в системе автоматического регулирования с жесткой обратной связью отключение исполнительного элемента происходит раньше, чем регулируемыи параметр (частота вращения) достигнет своего заданного значения.

Следует отметить, что в действительности рычаг ABC имеет одно результирующее движение, которое является результатом сложения отдельных перемещений.

Из изложенного следует, что установившийся режим работы возможен лишь при условии, когда перекрыты трубопроводы P_1 и P_2, так как в противном случае регулирующий элемент 5 займет новое положение. Рычаг ABC после прекращения переходного процесса займет положение, соответствующее частоте вращения вала теплового двигателя, отличающейся от заданного значения на величину статической ошибки Δn, т. е. установившийся режим наступит при частоте вращения $n_{уст.2}$, не равной заданному значению $n_{уст.ном}$.

Сравнивая кривые переходных процессов, происходящих в системах автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя с жесткой обратной связью (кривая 1) и без обратной связи (кривая 2), можно сделать вывод о том, что введение жесткой обратной связи приводит к более быстрому затуханию переходного процесса, т. е. к повышению устойчивости системы в переходных процессах и уменьшению времени регулирования $t_р$. Однако существенным недостатком систем с жесткой обратной связью является наличие статической ошибки регулирования.

Гибкая обратная связь. Чтобы повысить устойчивость системы автоматического регулирования, не допуская статической ошибки, применяют гибкие обратные связи, при которых сигналы $x_{о.с}$ пропорциональны скорости изменения выходной величины, т. е.

$$x_{о.с} = \beta \frac{d x_{вых}}{d t}, \qquad (6.12)$$

где $x_{о.с}$ — сигнал гибкой обратной связи; β — коэффициент обратной связи; $x_{вых}$ — выходиой сигнал; $dx_{вых}/dt$ — скорость изменения выходной величиины.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Как следует из определения, величина сигнала не зависит непосредственно от выходной величины $x_{вых}$ как в системе с жесткой связью, но зависит от скорости ее изменения. Такая обратная связь позволяет регулирующему элементу занимать различные положения в установившихся режимах при единственном значении регулируемого параметра.

Элементом электрической гибкой обратной связи (рис. 6.16) является дополнительная обмотка *7* электромагнита, включенная на вторичную обмотку трансформатора обратной связи *10*.

В установившемся режиме работы системы, когда движок регулирующего элемента *5* неподвижен, напряжение, подводимое к первичной обмотке *9* трансформатора, постоянно, а следовательно, по первичной цепи *9* протекает постоянный ток. Во вторичной обмотке *10* ЭДС не наводится. Сила тока обратной связи $I_{о.с}$ равна нулю, поэтому тяговое усилие от обмотки обратной связи также будет равно нулю.

Рассматриваемая система в установившемся режиме работы ничем не отличается от системы без обратной связи, следовательно, данная система астатическая. Действительно, в установившемся режиме двигатель *4* отключен, что возможно при положении движка преобразующего элемента *3* в точке *О* потенциометра.

При этом

$$F_э' = F_м = F_{м.уст} = \text{const},$$

где $F_{м.уст}$ — противодействующее усилие при нейтральном положении движка преобразующего элемента; $F_э'$ — тяговое усилие обмотки электромагнита *2*; $F_м$ — противодействующее усилие пружины *8*.

Как видим, тяговое усилие электромагнита в установившемся режиме равно одному, вполне определенному значению, а следовательно, и напряжение генератора в установившемся режиме равно одному заданному значению, т. е.

$$U = U_{зад} = \text{const}.$$

Переходный процесс в системе, изображенной на рис. 6.17, отражает влияние гибкой обратной связи на процесс регулирования. Допустим, в момент $t = t_1$ прои-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

зошло скачкообразное уменьшение нагрузки при заданном значении напряжения $U_{зад}$. С уменьшением нагрузки напряжение генератора увеличивается. Регулятор должен восстановить нарушенное равенство. В системе будет происходить переходный процесс. Кривая *1* показывает переходный процесс в системе без обратной связи, кривая *2* — в системе с гибкой обратной связью.

Начиная с момента $t=t_1$, напряжение увеличивается. Однако в системе с электрической гибкой связью увеличение напряжения происходит не по кривой *OA*, а по кривой *OF*. Действительно, с увеличением напряжения генератора увеличивается тяговое усилие, создаваемое обмоткой *2* электромагнита. Движок преобразующего элемента *3* переместится от нейтральной точки *O* вверх.

Включается двигатель *4* и движок регулирующего элемента *5*, перемещаясь по часовой стрелке, вызывает увеличение сопротивления обмотки возбуждения генератора. Перемещение движка регулирующего элемента приводит к изменению напряжения, прикладываемого к первичной обмотке *9* трансформатора обратной связи.

Во вторичной цепи трансформатора наводится ЭДС. По обмотке обратной связи *7* протекает ток обратной связи, равный

$$I_{о.с} = U_{о.с}/z_{о.с},$$

где $U_{о.с}$ — напряжение, подводимое к обмотке обратной связи; $z_{о.с}$ — сопротивление цепи обратной связи.

Обмотки электромагнита *2* и *7* намотаны так, что возникающее тяговое усилие $F_{э.о.с}$ дополнительной обмотки обратной связи *7* складывается с тяговым усилием $F_э'$ обмотки *2*. В этом случае $F_{общ}=F_э' + F_{э.о.с}$.

Движок преобразующего элемента *3* получает дополнительное перемещение вверх. Следовательно, регулирующий элемент *5* дополнительно увеличивает сопротивление в цепи обмотки возбуждения генератора. Скорость возрастания напряжения генератора в системе с гибкой обратной связью будет меньшая по сравнению с системой без этой связи. В точке *F* скорость возрастания напряжения равна нулю. Отклонение напряжения от заданного значения максимальное. Следует отметить, что в системе с гибкой обратной связью первый макси-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

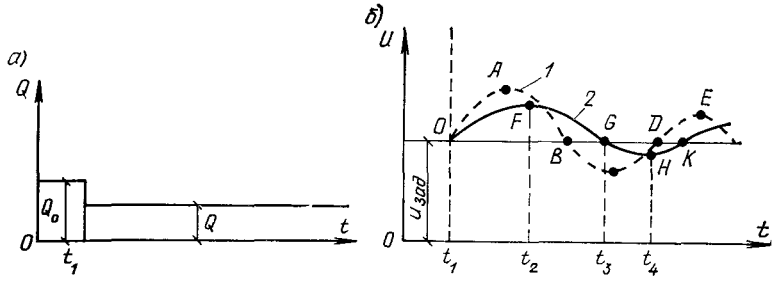


Рис. 6.17. Графнк процесса регулнрования в системе с гибкой обратной связью *а* — возмущающее воздействие на объект регулирования, *б* — переходный процесс в системе регулирования по кривой *OABDE* без гибкой обратной связи и по кривой *OFGHK* с гибкой обратной связью

мальный заброс напряжения меньше, чем в системе без обратной связи.

За время $t_2 - t_4$ напряженне генератора уменьшается. Скорость приближения напряжения к заданному значению меньше, чем в аналогичной системе автоматического регулирования без обратной связи. Роль замедлителя протекания процесса выполняет гибкая обратная связь.

С уменьшением напряжения генератора уменьшается $F_{общ}$, движок преобразующего элемента *3* начинает перемещаться вниз. Однако движок регулирующего элемента *5* продолжает перемещаться в сторону увеличения сопротивления в цепи обмотки возбуждения генератора, но скорость его становится все меньше и меньше. Когда движок преобразующего элемента *3* займет нейтральное положение 0, т. е. когда скорость перемещения движка регулирующего элемента *5* станет равной нулю, напряжение обратной связи также станет равным нулю.

Действие гибкой обратной связи в рассмотренном направлении прекратится. Напряжение генератора в этот момент равно заданному значению (точка *G* на кривой *2*).

Вследствие инерционности системы напряжение генератора продолжает уменьшаться (участок *GH*). Преобразующий элемент переключит двигатель *4*, регулирующий элемент *5* изменит направление перемещения. Движок *5* будет передвигаться в сторону уменьшения сопротивления в цепи обмотки возбуждения генератора. Как и раньше, при наличии гибкой обратной связи увеличи-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вается скорость перемещения движка регулирующего элемента *5*, а в конечном счете уменьшается скорость изменения напряжения генератора. Поэтому перерегулирование системы с гибкой обратной связью значительно меньше перерегулирования системы без обратной связи.

По мере протекания переходного процесса эффективность действия гибкой обратной связи снижается, а в конце переходного процесса сводится к нулю, поэтому гибкие обратные связи часто называются **исчезающими.**

Сравнивая системы с жесткой и гибкой обратными связями, можно сделать следующие выводы:

1) жесткая обратная связь позволяет подавлять колебания и уменьшать время регулирования системы, но при этом система превращается в статическую;

2) гибкая обратная связь так же, как и жесткая, позволяет подавлять колебания в системе, но с меньшим эффектом. При этом быстродействие системы возрастает медленнее, чем в системе с жесткой обратной связью. Однако при гибкой обратной связи в отличие от жесткой не возникает статической ошибки.

§ 6.5. Комбинированная обратная связь

Комбинированная обратная связь, часто называемая **гибкой изодромной или просто изодромной,** обладает преимуществами как жесткой, так и гибкой обратной связи.

Уравнение изодромной обратной связи имеет вид

$$T_{\text{о.с}} \frac{dx_{\text{о.с}}}{dt} + x_{\text{о.с}} = \beta \frac{dx_{\text{вых}}}{dt}, \qquad (6.13)$$

где β — коэффициент обратной связи; $T_{\text{о.с}}$ — постоянная времени устройства обратной связи.

Рассмотрим действие комбинированной обратной связи на примере ее использования в системе автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя *1* (рис. 6.18). В данной системе вместо элемента жесткой обратной связи введен элемент изодромной (гибкой) обратной связи, состоящий из катаракта *К* и пружины *6*. Цилиндр катаракта соединен жестко с поршнем гидродвигателя *4*, а поршень катаракта связан

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

с точкой C рычага ABC. Пружина *6* присоединена к точке C и действует на поршень катаракта.

Катаракт представляет собой цилиндр с маслом, в котором перемещается поршень. Масло перетекает из одной полости в другую через обводное отверстие или через узкое отверстие в поршне. Для перемещения поршня катаракта нужно приложить усилие, которое будет тем больше, чем меньше проходное сечение калиброванных отверстий в поршне и чем больше скорость перемещения поршня. В установившемся режиме работы пружина *6* расслаблена и точка C занимает определенное фиксированное положение, не зависящее от положения регулирующего элемента *5*.

Рассмотрим характер переходного процесса в системе с изодромной обратной связью (рис. 6.18).

Пусть в момент времени $t=t_1$ произошло скачкообразное уменьшение нагрузки на тепловой двигатель. При нарушении равновесия, т. е. установившегося режима, в рассматриваемом случае при увеличении частоты вращения центробежного механизма *2* муфта M поднимется

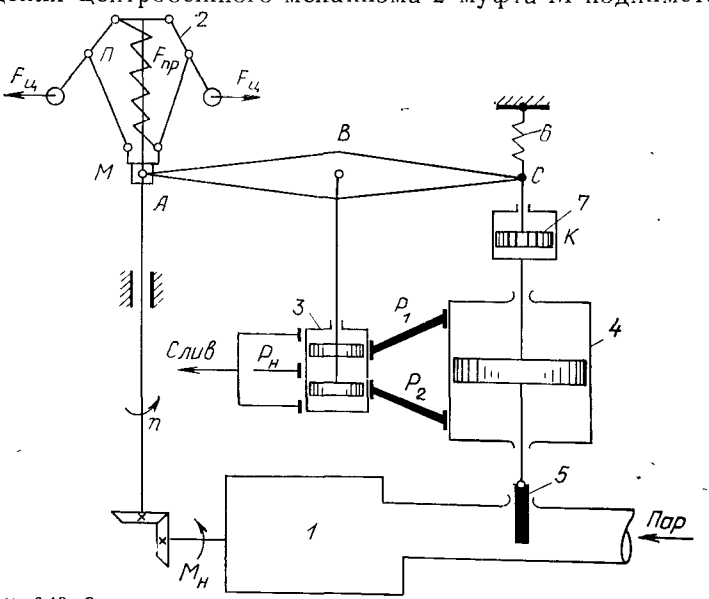


Рис. 6.18. Система автоматического регулирования частоты вращения вала теплового двигателя с комбинированной обратной связью

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

и увлечет конец A рычага ABC вверх. При этом произойдет соединение маслопровода P_1 с нагнетающей трубкой $P_н$ и поршень гидродвигателя *4* начнет перемещаться вниз, прикрывая заслонку (регулирующий элемент). Одновременно второй конец штока поршня *4* опустит вниз цилиндр катаракта.

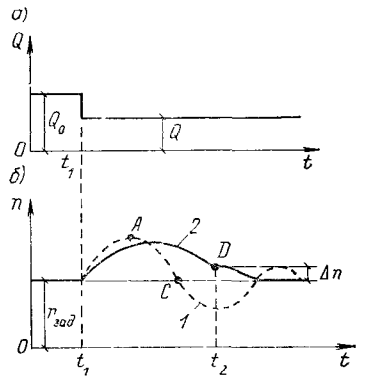


Рис. 6.19. График процесса регулирования в системе с комбинированной обратной связью
а — возмущающее воздействие на объект регулирования; *б* — переходный процесс в системе регулирования

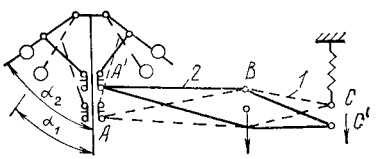


Рис. 6.20. Схема работы измерительной части регулятора

В начале процесса скорость движения поршня гидродвигателя *4* велика, так как верхняя полость цилиндра гидродвигателя *4* оказывается под полным давлением нагнетающей системы. Пружина *6* изодромного элемента стремится удержать поршень катаракта, т. е. сохранить неизменным положение точки C рычага ABC. Вследствие того что скорость перетекания масла из верхней полости катаракта в нижнюю очень незначительная из-за небольшого диаметра калиброванного отверстия в поршне, поршень катаракта опускается вниз, растягивая пружину *6*.

Следовательно, в начальный момент процесса сила торможения больше противодействующего усилия пружины *6*. Конец C рычага ABC опускается вниз. Происходит вращение рычага вокруг шарнира A муфты M. При этом золотник *3* опускается вниз, перекрывая трубу P_1, в связи с чем уменьшается скорость движения поршня гидродвигателя *4*.

Для упрощения примем, что насколько точка B рычага ABC поднимется вверх при увеличении частоты

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вращения, настолько она опустится вниз при движении катаракта как жесткого тела. Условно принимая в первый момент катаракт как жесткое тело, мы создаем жесткую связь между поршнем гидродвигателя *4* и точкой *C* рычага *ABC*. Действие такой связи было рассмотрено в § 6.4. Поршень гидродвигателя остановится тогда, когда золотник *3* полностью перекроет трубу P_1.

Если в системе без жесткой обратной связи гидродвигатель отключается в точке *C* (рис. 6.19, кривая *1*), что соответствует заданной частоте вращения, то в рассматриваемом случае отключение гидродвигателя произойдет тогда, когда скорость, уменьшаясь, не достигнет своего заданного значения, например в точке *D* (кривая *2*).

На рис. 6 20 показаны положения рычага *ABC*, соответствующие установившемуся режиму (поз. *1*) и моменту переходного режима, когда действие изодромной обратной связи как жесткой прекратилось (поз. *2*).

Рассмотрим характер переходного процесса, обусловленный инерционностью действия изодромного элемента.

В точке *D* переходного процесса (кривая *2*, рис. 6.19) пружина *6* растянута. Под действием упругих сил растянутой пружины создается разность давлений под поршнем катаракта и над ним. Масло перетекает в нижнюю полость. Поршень катаракта движется вверх. При этом точка *C* рычага *ABC* начинает движение к положению, соответствующему заданной частоте, и рычаг *ABC* вращается вокруг шарнира *A* муфты *M*. Золотник приоткрывает доступ маслу в верхнюю полость цилиндра гидродвигателя *4*. Затем следует дополнительное движение поршня гидродвигателя *4* вниз.

Заслонка *5* прикрывает доступ пару в тепловой двигатель *1*. Частота вращения продолжает уменьшаться, приближаясь к заданному значению. Грузики центробежного измерительного элемента *2* сходятся Муфта *M* опускается, вследствие чего перекрываются трубопроводы P_1 и P_2. По мере приближения частоты вращения n к заданному значению $n_{зад}$ точки *A* и *C* рычага *ABC* приближаются к положению, соответствующему $n_{зад}$. Золотник *3* перекроет трубопроводы P_1 и P_2, и процесс восстановления установившегося режима закончится.

Таким образом, процесс регулирования в системе с изодромной обратной связью протекает по двум циклам:

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

первый цикл — регулирование протекает так же, как и в системе с жесткой обратной связью. Особенностью этого цикла является эффективное воздействие регулятора на систему, вследствие чего регулируемый параметр быстро приближается к заданному значению, но не достигает его на величину статической ошибки Δn (момент времени $t=t_2$);

второй цикл — устранение статической ошибки регулирования применением изодромного элемента. Рычаг ABC в конце цикла занимает положение, соответствующее установившемуся режиму работы. При этом регулирующий элемент *5* может занимать различные положения.

Отсутствие жесткой связи между регулирующим элементом *5* и преобразующим элементом *3* — основной фактор, обеспечивающий астатическое регулирование.

Рассмотренный процесс регулирования с изодромной обратной связью описан схематично. В действительности нет определенной последовательности перемещений и воздействий. Процесс восстановления нарушенного равновесия (переходный процесс) обусловливается одновременно воздействиями обоих циклов.

Применение изодромной обратной связи повышает устойчивость системы автоматического регулирования и обеспечивает регулирование без статической ошибки.

Рассмотренные принципы регулирования реализуются главным образом путем применения автоматических регуляторов промышленного назначения, в которых возможно использование того или иного вида обратной связи. В процессе настройки такого регулятора (особенно электронного) при необходимости можно обеспечить пропорциональный, интегральный или изодромный законы регулирования путем целенаправленного изменения характера обратных связей.

Современные микропроцессорные системы позволяют значительно расширить диапазон регулирующих воздействий на объект управления, обеспечивают автоматическое (без непосредственного вмешательства оператора) изменение динамической структуры регулятора как по жесткой программе, так и в процессе адаптации к изменяющимся внешним условиям работы системы автоматического регулирования.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ГЛАВА 7. ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ В ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

§ 7.1. Статические и динамические характеристики помещения

Статическими характеристиками помещения как объекта регулирования являются зависимости температуры и влажности воздуха от регулирующих и возмущающих воздействий в установившемся состоянии. **Динамические характеристики** выражают связь между этими параметрами в переходном процессе регулирования.

Для нахождения аналитических выражений статических и динамических тепловых характеристик помещения следует воспользоваться математической моделью теплового режима помещения. Как отмечалось в § 2.2, для анализа тепловых характеристик помещения можно использовать аппарат теории теплоустойчивости, позволяющей рассчитывать температурные колебания в помещении при произвольной частоте периодических тепловых воздействий.

Использование математической модели теплового режима помещения на основе теории теплоустойчивости связано с введением ряда допущений, которые являются традиционными и присущи многим другим моделям.

Первое допущение состоит в том, что помещение рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами. Прежде всего это относится к распределению температуры воздуха в плане и по высоте помещения, которое обычно не учитывается. Кроме того, принимается равномерное и пропорциональное распределение лучистых тепловых потоков по площадям поверхностей. Все поверхности в помещении, имеющие разные температуры, заменяются одной изотермической с радиационной (или осредненной) температурой. При этом из общего теплообмена исключается лучистый теплообмен между поверхностями. Для большинства помещений эти допущения не вносят существенной погрешности в результаты расчета.

Для помещений большого объема с неравномерными

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

в плане тепловыделениями или при наличии сильно неизотермических поверхностей и мощных конвективных источников теплоты перечисленные выше допущения могут оказаться неправомерными. В этом случае помещение следует рассматривать как объект с рассредоточенными параметрами. При этом анализ тепловых процессов, протекающих в помещении, проводят с помощью математических моделей, реализуемых на ЭВМ или путем физического моделирования.

Статические характеристики определяют в виде коэффициентов передачи по регулирующим и возмущающим воздействиям. В общем случае при периодическом (в течение рабочей части суток) действии систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха установившимся состоянием будет периодически повторяющийся или квазистационарный тепловой режим помещения.

Основным уравнением, связывающим регулируемый параметр — температуру воздуха с возмущающими и регулирующими тепловыми воздействиями, в квазистационарном режиме является уравнение средней за рабочую часть суток тепловой нагрузки на систему (2.40).

Тепловой поток, вносимый в помещение системой и равный тепловой нагрузке на систему, для приборных систем отопления составит

$$Q_{\text{с}} = k_{\text{о.п}} F_{\text{о.п}} (t_{\text{о.п}} - t_{\text{в}}), \qquad (7.1)$$

а для систем воздушного отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха

$$Q_{\text{с}} = L (c \rho) (t_{\text{пр}} - t_{\text{в}}), \qquad (7.2)$$

где $k_{\text{о.п}}$, $F_{\text{о п}}$ — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С) и площадь нагрева отопительного прибора, м²; $t_{\text{о п}}$ — средняя температура теплоносителя, °С; $t_{\text{пр}}$ — температура приточного воздуха, °С.

Тогда решение уравнения (2.40) относительно $t_{\text{в}}$, содержащейся в левой части уравнения в величине $Q_{\text{с}}$ и в правой части в величине $Q_{\text{тр}}$, будет иметь вид

$$t_{\text{в}} = \frac{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} t_{\text{нар.о}} + \Sigma Q_j \eta_j - K t}{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} - K}, \qquad (7.3)$$

где $K = k_{\text{о.п}} F_{\text{о.п}}$; $t = t_{\text{о.п}}$ — для приборных систем отопления и $K = L(c\rho)$; $t = t_{\text{пр}}$ — для воздушных систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Для определения коэффициентов передачи помещения надо найти производные функции (7.3) по переменным параметрам. Коэффициенты передачи по регулирующим воздействиям равны:
по температуре приточного воздуха

$$K_{t_{\text{пр}}} = -\frac{L(c\rho)}{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} - L(c\rho)}; \qquad (7.4)$$

по температуре теплоносителя

$$K_{t_{\text{о.п}}} = -\frac{t_{\text{о.п}}}{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} - k_{\text{о.п}} F_{\text{о.п}}}; \qquad (7.5)$$

по расходу приточного воздуха

$$K_L = \frac{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} t_{\text{нар.о}} + \Sigma Q_j \eta_j - \eta_{\text{тр}} t_{\text{пр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}}}{(\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} - L(c\rho))^2}. \qquad (7.6)$$

Коэффициенты передачи по возмущающим воздействиям равны:
по температуре наружной среды

$$K_{t_{\text{нар}}} = \frac{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}}}{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} - K}; \qquad (7.7)$$

по тепловым потокам, поступающим в помещение,

$$K_{Q_j} = \frac{\eta_j}{\eta_{\text{тр}} \Sigma k_{\text{о}} F_{\text{о}} - K}. \qquad (7.8)$$

Динамические тепловые свойства помещения характеризуются амплитудной и фазовой частотными характеристиками.

Следует иметь в виду, что основные положения теории теплоустойчивости справедливы только для периодически повторяющихся тепловых воздействий, поэтому они не могут быть прямым образом использованы для непосредственного определения временных динамических характеристик тепловых процессов (при разовых ступенчатых и импульсных воздействиях).

Однако зависимости теории теплоустойчивости, выведенные для прерывистых периодических тепловых воздействий, могут быть применены и к расчету импульсных динамических характеристик (рис. 7.1). Для вычисления импульсных характеристик можно воспользоваться зависимостями (2.22) и (2.32), которые могут быть при-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

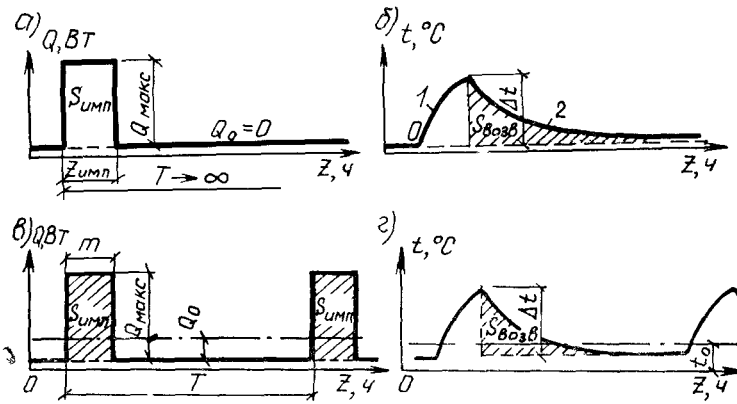


Рис. 7.1. Переходные тепловые процессы в объектах регулирования при разовых и периодически повторяющихся импульсов (П-образных) тепловых воздействиях

а — разовое импульсное тепловое воздействие ($z_{имп}$ — время импульса, ч), *б* — импульсная характеристика объекта (импульсная кривая разгона); *в* — прерывистые периодически повторяющиеся с периодом T тепловые воздействия, *г* — кривая периодически повторяющихся отклонений регулируемого параметра с амплитудами A_t от среднего за период значения t_0 (при $m \ll T$ $A_t \approx \Delta t$), *1* и *2* — кривые нарастания отклонения Δt регулируемого параметра при разовом воздействии и после прекращения импульсного воздействия

менены для определения отклонений регулируемого параметра от среднего за период в произвольный момент времени, так как закон изменения коэффициента прерывистости Ω известен. При этом следует предположить, что период T имеет бо́льшую протяженность (теоретически стремится к бесконечности). Ошибка будет тем меньше, чем меньше относительное время прерывистой подачи теплоты $m = \Delta z/T$.

Рассмотрим задачу аналитического нахождения частотных характеристик помещения, оборудованного системой кондиционирования воздуха, на основе закономерностей теории теплоустойчивости, которые приведены в § 2.2.

В зависимости от способа регулирования системы динамические свойства помещения описываются уравнениями вида:

при регулировании изменением температуры приточного воздуха

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\frac{t_в}{t_{пр}} = \varphi(\omega_{t_{пр}}); \tag{7.9}$$

при регулировании изменением расхода воздуха

$$\frac{t_в}{L(c\rho)} = \varphi(\omega_{L(c\rho)}), \tag{7.10}$$

где $\omega = 2\pi/T$ — частота колебаний

Рассматривая совместно уравнения (2.26) и (7.2), видим, что выражения (7.9) и (7.10) являются функцией комплексного числа — показателя теплопоглощения помещения $\dot{P}_{пом}$ и характеризуются модулем

$$\operatorname{mod}\frac{t_в}{t_{пр}} = \frac{A_{t_в}}{A_{t_{пр}}} = \frac{L(c\rho)}{\operatorname{mod}\dot{p}_{пом}}; \quad \operatorname{mod}\frac{t_в}{L(c\rho)} = \frac{A_{t_в}}{\Delta L(c\rho)} = \frac{t_{пр} - t_в}{\operatorname{mod}\dot{p}_{пом}} \tag{7.11}$$

и аргументом

$$\arg\frac{t_в}{t_{пр}} = \arg L(c\rho) - \arg\dot{p}_{пом};$$

$$\arg\frac{t_в}{L(c\rho)} = \arg(t_{пр} - t_в) - \arg\dot{p}_{пом}. \tag{7.12}$$

Таким образом, задача аналитического нахождения частотных характеристик помещения сводится к определению зависимости показателя теплопоглощения помещения $\dot{P}_{пом}$ от частоты ω при разных регулирующих воздействиях.

Из формул (2.27) — (2.29) следует

$$\dot{P}_{пом} = \Sigma(B_i F_i)_{огр} + (B F)_{об} + L(c\rho) + \frac{2\pi}{T} V_{пом}(c\rho)\, i, \tag{7.13}$$

где B_i и B — показатели теплопоглощения поверхностями соответственно i-го ограждения и оборудования, определяемые по формуле (2.25).

В состав формулы для определения показателей теплопоглощения $\dot{B}$, как это следует из (2.25), входит комплексное число — показатель теплоусвоения Y. Путем преобразования (2.25) можно показать, что величина B яв-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ляется тоже комплексным числом, которое имеет вид $B=A+Bi$.

Значения A и B зависят от конструкции ограждения, теплофизических свойств их материальных слоев и могут быть определены преобразованием формулы (2.25) после подстановки в нее величины $\frac{1}{Y}=\dot{R}_y=a+bi$ [см. формулы (2.7) и (2.9)]:

$$\dot{B}=\frac{1}{a+b\iota+1/\alpha_к}. \tag{7.14}$$

Из формулы (7.14) следует:

$$A=\frac{a+\frac{1}{\alpha_к}}{\left(a+\frac{1}{\alpha_к}\right)^2+b^2};\quad B=-\frac{b}{\left(a+\frac{1}{\alpha_к}\right)^2+b^2}. \tag{7.15}$$

Значения коэффициентов a и b, рассчитанные по формулам (2.14) и (2.15), приведены в табл. 2.1.

С учетом изложенного комплексное число — показатель теплопоглощения помещения $\dot{P}_{пом}$ — характеризуется модулем

$$\operatorname{mod}\dot{P}_{пом}=\sqrt{[(\Sigma A_i F_i)_{огр}+(AF)_{об}+L(c\rho)]^2+\left[(\Sigma B_i F_i)_{огр}+(BF)_{об}+\frac{2\pi}{T}V_{пом}(c\rho)\right]^2} \tag{7.16}$$

и аргументом

$$\arg\dot{P}_{пом}=\operatorname{arctg}\frac{(\Sigma B_i F_i)_{огр}+(BF)_{об}+\frac{2\pi}{T}V_{пом}(c\rho)}{(\Sigma A_i F_i)_{огр}+(AF)_{об}+L(c\rho)}. \tag{7.17}$$

Найденные для различных частот ω значения $\operatorname{mod}\dot{P}_{пом}$ и $\arg P_{пом}$ подставляют в (7.11) и (7.12) и определяют амплитудную и фазовую частотные характеристики по регулирующему воздействию. Формулы (7.9) и (7.10) являются аналитическим выражением комплексного коэффициента передачи или частотной характеристики $W_{пом}$ помещения.

С учетом (7.11), не выделяя для простоты показатель

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

теплопоглощения оборудования отдельной составляющей, запишем

$$W_{\text{пом},\ t_{\text{пр}}} = \frac{1}{\dfrac{\Sigma A_i F_i}{L\,(c\rho)} + 1 + \dfrac{\Sigma B_i F_i + V_{\text{пом}}\,(c\rho)\,\omega}{L\,(c\rho)}}. \quad (7.18)$$

В формуле (7.18) переменный по частоте коэффициент B_i представлен в виде произведения некоторой величины $\bar{B}$ на частоту колебания ω, т. е.

$$B_i = \bar{B}_i\,\omega, \quad (7.19)$$

причем B_i зависит от ω.

С учетом (7.19) перепишем формулу (7.18) в виде

$$W_{\text{пом},\ t_{\text{пр}}} = \frac{1}{\dfrac{\Sigma \bar{B}_i F_i + V_{\text{пом}}\,(c\rho)}{L\,(c\rho)}\,\omega\, i + \left(1 + \dfrac{\Sigma A_i F_i}{L\,(c\rho)}\right)}. \quad (7.20)$$

Разделив числитель и знаменатель формулы (7.20) на $1 + \dfrac{\Sigma A_i F_i}{L\,(c\rho)}$, получим

$$W_{\text{пом},\ t_{\text{пр}}} = \frac{K_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}}\,\omega\, i + 1}, \quad (7.21)$$

где

$$K_{\text{пом}} = \frac{1}{1 + \dfrac{\Sigma A_i F_i}{[L\,(c\rho)}};$$

$$T_{\text{пом}} = \frac{\Sigma B_i F_i + V_{\text{п м}}\,(c\rho)}{\Sigma A_i F_i + L\,(c\rho)}. \quad (7.22)$$

Выражение (7.21) соответствует частотной характеристике апериодического звена 1-го порядка с переменными коэффициентами.

Для расчета по (7.21) переходного процесса $t_{\text{в}}$ в помещении воспользуемся методикой определения переходного процесса при скачкообразном возмущении, известной из теории автоматического регулирования. Для этого сначала определим действительную часть (вещественную частотную характеристику) выражения (7.21)

$$R\,(\omega) = \frac{K_{\text{пом}}}{T^2_{\text{пом}}\,\omega^2 + 1}. \quad (7.23)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Выражение для переходного процесса при единичной скачкообразной функции с учетом (7.23) имеет вид

$$\frac{\Delta t_{\text{в}}}{\Delta t_{\text{пр}}}(z) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{K_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}}^2\omega^2 + 1}\,\frac{\sin\omega}{\omega}\,z\,d\omega. \qquad (7.24)$$

Непосредственное использование формулы (7.24) для построения графика переходного процесса затруднительно. Поэтому в теории автоматического регулирования применяется методика приближенного построения графика переходного процесса с помощью трапециевидных характеристик.

Изложенный метод определения динамики тепловых процессов в помещениях с использованием теории теплоустойчивости хотя и позволяет решить задачу в достаточно полной постановке, тем не менее оказывается трудоемким для инженерных расчетов. В результате решения серии задач по определению частотных характеристик кондиционируемого помещения по регулирующему воздействию оказалось, что в интервале изменения частоты 5—300 рад/ч частотные кривые соответствуют характеристикам апериодического звена 1-го порядка с постоянными коэффициентами. Это хорошо подтверждается рис. 7.2, на котором показаны амплитудные и фазовые частотные характеристики помещения, построенные при переменных *1* и постоянных *2* коэффициентах в дифференциальном уравнении динамики тепловых процессов в помещении.

Отмеченное обстоятельство позволяет упростить задачу расчета частотных характеристик.

При рассмотрении помещения как апериодического звена 1-го порядка с постоянными коэффициентами

$$W_{\text{пом. }t_{\text{пр}}} = \frac{k_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}}\,\omega\, i + 1}, \qquad (7.25)$$

где $k_{\text{пом}}$ — условный статический коэффициент передачи помещения; $k_{\text{пом}} < K_{\text{пом}}$.

В данном случае $k_{\text{пом}}$ и $T_{\text{пом}}$ не зависят от ω.

Анализ (7.25) показывает, что при $\omega = 1/T_{\text{пом}}$

$$\arg W_{\text{пом. }t_{\text{пр}}} = -\operatorname{arctg} 1 = -45°,$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

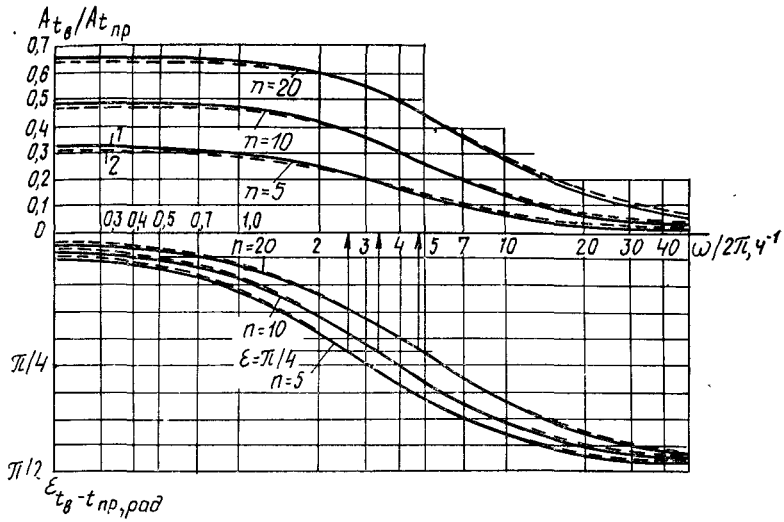


Рис. 7.2. Амплитудные и фазовые частотные характеристики коидиционируемого помещения, построеиные для кратностей воздухообмена $n=5$, 10, 20 $ч^{-1}$ по данным аналитических расчетов по формулам (7.11) и (7.12) (*1*) и в предположеиии, что процессы теплообмена в помещении можно описать дифференциальным уравнением 1-го порядка с постоянным коэффициентом (*2*)

т. е. кривая фазового запаздывания пересекает прямую $\varepsilon = -\frac{\pi}{4}$ (см. рис. 7.2).

$$\operatorname{mod} W_{\text{пом. } t_{\text{пр}}} = \frac{\sqrt{2}}{2} k_{\text{пом}}.$$

Частота колебаний $\omega_{т.п}$, соответствующая точке пересечения, определяется из (7.17) при условии $\arg P_{\text{пом}} = \frac{\pi}{4}$ или

$$\frac{(\Sigma B_i F_i)_{\text{огр}} + (B F)_{\text{об}} + V_{\text{пом}} (c\rho)\, \omega_{т.п}}{(\Sigma A_i F_i)_{\text{огр}} + (A F)_{\text{об}} + L (c\rho)} = 1. \qquad (7.26)$$

Так как в (7.26) коэффициенты A и B зависят от искомой частоты $\omega_{т.п}$, задача решается методом последовательных приближений. Чтобы сократить число операций, искомую частоту можно предварительно определить по формуле

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\omega_{т.п} = \frac{L(c\rho) + \Sigma(\alpha_{к_i} F_i)_{огр} + (\alpha_к F)_{об}}{V_{пом}(c\rho)}, \qquad (7.27)$$

которая получена из (7.13) в предположении, что $B \approx \alpha_к$.

Зная частоту $\omega_{т.п}$, определим $k_{пом}$ и $T_{пом}$:

$$k_{пом} = \sqrt{2} \bmod W_{пом} \mid \omega_{т.п} = \sqrt{2} \frac{L(c\rho)}{\bmod P_{пом} \mid \omega_{т.п}}, \qquad (7.28)$$

$$T_{пом} = \frac{1}{\omega_{т.п}}. \qquad (7.29)$$

С учетом (7.21) при $B \approx \alpha_к$ напишем формулы для приближенного определения $k_{пом}$ и $T_{пом}$:

$$k_{пом} = \frac{L(c\rho)}{L(c\rho) + \Sigma \alpha_{к_i} F_i}; \qquad (7.30)$$

$$T_{пом} = \frac{V_{пом}(c\rho)}{L(c\rho) + \Sigma \alpha_{к_i} F_i}. \qquad (7.31)$$

Помимо температурных условий в помещениях в общем случае регулируется влажность воздуха. Если пренебречь влагопередачей через ограждения, уравнение баланса влаги в помещении имеет вид

$$G_в d_{пр} + W = G_в d,$$

где $G_в$ — весовой расход воздуха, кг/ч; $d_{пр}$ и d — влагосодержание приточного и внутреннего воздуха, г/кг; W — выделение влаги в помещении, г/ч.

Статический коэффициент передачи по возмущающему W и регулирующему воздействию $d_{пр}$ определяется дифференцированием влагосодержания d, полученного из уравнения баланса влаги по перечисленным параметрам:

$$K_{пом.\ d_{пр}} = 1;$$

$$K_{пом.\ W} = \frac{1}{G_в}.$$

Дифференциальное уравнение накопления влаги в воздухе помещения определим в виде

$$G_в d_{пр} + W - G_в d = V\rho \frac{\partial d}{\partial z}.$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

После применения преобразования Лапласа получим выражение для частотной характеристики помещения по регулирующему воздействию

$$W_{d_{\text{пр}}} = K_{\text{пом.}\, d_{\text{пр}}} \frac{1}{1 + T\omega i}.$$

Постоянная времени T — величина обратная кратности воздухообмена

$$T = \frac{1}{n} = \frac{V\rho}{G} = \frac{V}{L}.$$

Помещение в этом случае как звено системы регулирования влажности является инерционным звеном с постоянной времени T, которая может достигать ощутимых значений, что следует учитывать при расчете САР.

§ 7.2. Динамические свойства теплообменных и смесительных аппаратов систем кондиционирования воздуха и вентиляции

Основными элементами установок теплоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха являются различные теплообменные и смесительные аппараты: емкие и скоростные водонагреватели, отопительные приборы, воздухонагреватели и воздухоохладители, оросительные камеры, смесительные камеры, водоструйные элеваторы и др. Динамика тепловых процессов, протекающих в этих аппаратах, определяется большим числом параметров, связанных с конструкцией аппаратов, условиями теплообмена на поверхностях теплообменников, температурой обменивающихся теплом сред, расходом теплоносителя, источниками и стоками тепла при фазовых превращениях и другими физическими процессами.

В связи с этим динамические характеристики многих теплообменных и смесительных аппаратов еще не разработаны в том виде, который позволил бы универсально использовать их на практике. Для анализа динамики разных типов теплообменных и смесительных аппаратов широко пользуются методами экспериментальных исследований.

Существуют два подхода к теоретическому исследо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

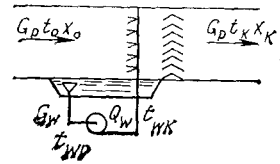


Рис. 7.3. Принципиальная схема камеры орошения

ванию теплообменных аппаратов, рассматривая их как объекты с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Теплообменные аппараты являются объектами с распределенными параметрами, и их динамика описывается дифференциальными уравнениями в частных производных. Во многих случаях оказывается достаточным для инженерных расчетов использование приближенной математической модели аппарата как объекта с сосредоточенными параметрами. Динамические характеристики при этом могут быть получены по экспериментальным данным или по теоретической зависимости переходного процесса, если динамика объекта описывается дифференциальным уравнением порядка выше первого.

Рассмотрим динамику теплообменных аппаратов как объектов с сосредоточенными параметрами на основе решения системы линейных дифференциальных уравнений.

Наиболее сложным с точки зрения описания динамики тепловых процессов объектом регулирования являются **оросительные камеры установок кондиционирования воздуха.** Принципиальная схема оросительной камеры, работающей в режиме адиабатического увлажнения, представлена на рис. 7.3.

В сложном процессе тепломассообмена в камере часть разбрызгиваемой воды испаряется и уносится потоком воздуха. Бóльшая часть воды собирается в поддоне камеры, откуда насосом вновь подается к форсункам. При рассмотрении динамики процесса тепломассообмена в камере за входную величину принимают температуру воздуха t_0 на входе в камеру. Выходной величиной в этом случае является влагосодержание $d_к$ воздуха, выходящего из камеры.

Для малых отклонений от статического состояния

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

можно составить систему дифференциальных уравнений, включающую переменные во времени z величины. В установившемся состояния температура воды t_W постоянна, а при изменении температуры воздуха t происходит и изменение температуры воды. Расход теплоты, отдаваемой воздухом воде и необходимой для изменения температуры и испарения части воды, описывается уравнением вида

$$G_W c_W - \left[\Delta t_{W_к}(z) - \Delta t_{W_0}(z) + \right.$$

$$\left. + r W F_W \left(\frac{\Delta d_0^н(z) + \Delta d_к^н(z)}{2} + \frac{\Delta d_к(z)}{2} \right) \right] =$$

$$= \alpha F_W \left(\frac{\Delta t_0(z) + \Delta t_к(z)}{2} - \frac{\Delta t_{W_0}(z) + \Delta t_{W_к}(z)}{2} \right), \quad (7.32)$$

где C_W — расход воды, кг/ч; c_W — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С), r — теплота испарения воды, Дж/кг; W — интенсивность влагообмена, кг/(м²·ч); α — коэффициент теплообмена на поверхности распыленной воды, Вт/(м²·°С); F_W — площадь поверхности распыленной воды, м².

Левая часть уравнения (7.32) определяет изменение энтальпии (теплосодержания) воды при изменении ее температуры t_{W_0} и влагосодержания d_0 на входе и $t_{W_к}$, $d_к$ на выходе на величины Δt_W, Δd. Правая часть соответствует изменению количества теплоты, отдаваемой воздухом воде при изменении температуры воздуха на входе в камеру t_0 на величину $\Delta t_0'$ и на выходе на величину $\Delta t_к'$ при соответствующем изменении температуры воды на величины $\Delta t'_{W_0}$ и $\Delta t_{W_к}$.

Процесс накопления теплоты в воде в связи с изменением температуры описывается дифференциальным уравнением

$$G_W c_W [\Delta t_{W_к}(z) - \Delta t_{W_0}(z)] = M c_W \frac{d \Delta t_{W_0}(z)}{dz}, \quad (7.33)$$

где M — масса воды, кг.

Изменение температуры и влагосодержания воздуха характеризуется уравнениями:

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\alpha F_W \left(\frac{\Delta t_0(z) + \Delta t_к(z)}{2} - \frac{\Delta t_{W_0}(z) + \Delta t_{W_к}(z)}{2} \right) = G_в c_в (\Delta t_0(z) - \Delta t_к(z)); \quad (7.34)$$

$$W F_W \left(\frac{\Delta d_0^н(z) + \Delta d_к^н(z)}{2} - \frac{\Delta d_к(z)}{2} \right) = G_в c_в \Delta d_к(z), \quad (7.35)$$

где $G_в$ — расход воздуха, кг/ч; $c_в$ — удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С).

Влагосодержание воздуха $d^н$ при полном насыщении ($\varphi = 1$) соответствует парциальному давлению водяного пара при температуре t_W. Для малых приращений температуры зависимость $d^н$ от $t_в$ может быть линеаризована в виде $\Delta d^н / \Delta t_W = a$.

Решение системы уравнений (7.32) — (7.35) с использованием преобразования Лапласа позволяет получить выражение для передаточной функции камеры орошения в операторной форме

$$W_{t_0} = K \frac{1 + T_1 P}{1 + T_2 P},$$

которое подстановкой $P = \omega i$ преобразуется в частотную характеристику объекта регулирования

$$W_{t_0} = K \frac{1 + T_1 \omega i}{1 + T_2 \omega i}, \quad (7.36)$$

где

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{a} + \frac{r}{c_в}\right)\left(0{,}5 + \frac{G_в c_в}{\alpha F_W}\right)}; \quad (7.37)$$

$$T_1 = \frac{M_W}{2 G_W}; \quad (7.38)$$

$$T_2 = \frac{M_W}{2 G_W} \frac{A}{A - 1}; \quad (7.39)$$

$$A = \frac{G_в c_в}{G_W c_W} \frac{1 + \frac{a r}{c_в}}{2 \frac{G_в c_в}{\alpha F_W} + 1}. \quad (7.40)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

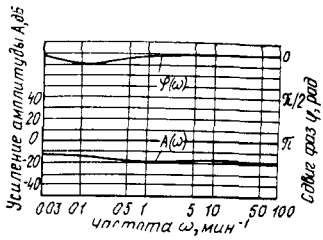


Рис. 7.4. Амплитудиая $A(\omega)$ и фазовая $\varphi(\omega)$ характеристики оросительиой камеры

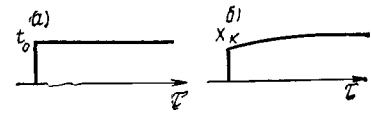


Рис. 7.5. Временная характеристика при скачкообразном изменении входной температуры t_0 воздуха
а — воздействие; *б* — ответ

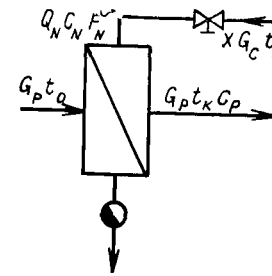


Рис. 7.6. Принципиальная схема парового воздухонагревателя

Амплитудную и фазовую характеристики оросительной камеры можно определить с помощью формулы (7.36), раскрыв ее в виде зависимости от частоты ω. В качестве примера на рис. 7.4 показаны усиление амплитуды и сдвиг по фазе для камеры орошения.

По уравнению (7.36) можно определить также временную характеристику процесса изменения влагосодержания при единичном скачкообразном изменении температуры воздуха (рис. 7.5).

$$d_к(z) = K\left[1 - \frac{T_2 - T_1}{T_2} e^{-z/T_2}\right]. \qquad (7.41)$$

Расчеты по формулам (7.38) и (7.39) показывают, что постоянные времени камер орошения изменяются в довольно широком диапазоне.

Помимо оросительных камер основными технологическими аппаратами СКВ являются **воздухонагреватели и воздухоохладители.**

С точки зрения анализа динамических свойств этого звена, работа теплообменника в режиме нагрева или охлаждения воздуха существенного значения не

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

имеет. Динамическая характеристика теплообменника не подвергается существенному изменению и в том случае, если он работает как осушитель воздуха.

Рассмотрим частотные характеристики наиболее часто употребляемых ребристых теплообменников. На рис. 7.6 показана принципиальная схема трубчатого теплообменника *2* с теплоносителем паром и выделены параметры, в основном определяющие динамические свойства теплообменника.

Количество теплоты, передаваемой теплоносителем воздуху, регулируется изменением расхода пара, которое осуществляется в клапане *1* на паропроводе. Входной величиной x в рассматриваемой схеме является высота подъема штока клапана на паропроводе, а выходной — температура воздуха $t_к$ на выходе из теплообменника.

Для упрощения исходного дифференциального уравнения воспользуемся традиционным в технике автоматического регулирования приемом линеаризации уравнения при малых отклонениях параметров. Этот прием позволяет, например, принять линейной зависимость расхода пара $G_т$ от переменной во времени высоты подъема штока клапана

$$G_т(z) = m\,x\,(z), \qquad (7.42)$$

где $G_т$ — расход теплоносителя (пара), кг/ч; x — высота подъема штока клапана, мм; m — коэффициент пропорциональности, кг/(ч·мм).

Приняв температуру пара средней по ходу его в теплообменнике $t_т$ и исходя из среднеарифметической разности температуры, получим уравнения теплового баланса при изменении параметров теплоносителя на некоторую величину $\Delta G_т$ и $\Delta t_т$.

Уравнение процесса передачи теплоты воздуху имеет вид

$$G_в c_в \Delta t_к (z) = k F \left(\Delta t_т (z) - \frac{\Delta t_к (z)}{2} \right). \qquad (7.43)$$

Уравнение процесса накопления теплоты массой теплообменника при изменении расхода теплоносителя запишем в виде

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\Delta G_{\text{с}}(z)\, r - kF\left(\Delta t_{\text{т}}(z) - \frac{\Delta t_{\text{к}}(z)}{2}\right) = M_{\text{т}} c_{\text{т}} \frac{d\,\Delta t_{\text{т}}(z)}{dz}, \qquad (7.44)$$

где k — коэффициент теплопередачи теплообменника, Вт/(м²·°С); F — площадь поверхности теплообменника, м²; $M_{\text{т}}$ — масса теплообменника, кг; $c_{\text{т}}$ — удельная теплоемкость материала теплообменника, Дж/(кг·°С); $t_{\text{к}}$ — температура воздуха на выходе из теплообменника, °С.

Исключив из уравнений (7.43) и (7.44) величины $\Delta t_{\text{т}}$ и $\Delta G_{\text{т}}$ и применив преобразования Лапласа, получим передаточную функцию теплообменника в операторной форме, которую преобразуем в амплитудно-фазовую частотную характеристику

$$W_{\text{х}} = K \frac{1}{1 + T\omega\imath}. \qquad (7.45)$$

Коэффициент усиления K равен:

$$K = \frac{mr}{G_{\text{в}} c_{\text{в}}}, \qquad (7.46)$$

а постоянная времени T имеет вид

$$T = \frac{M_{\text{т}} c_{\text{т}}}{G_{\text{в}} c_{\text{в}}}\left(\frac{1}{2} + \frac{G_{\text{в}} c_{\text{в}}}{kF}\right). \qquad (7.47)$$

Передаточная функция (7.45) характерна для инерционного звена 1-го порядка. Исследования динамических свойств теплообменных аппаратов показывают, что их передаточные функции могут быть аппроксимированы более точно звеном 1-го порядка с запаздыванием. В такой постановке уравнение частотной характеристики теплообменника будет иметь вид

$$W_{\text{х}} = K\omega \frac{1}{1 + 0{,}5T\omega\imath} e^{-T_0\omega\imath}, \qquad (7.48)$$

где T_0 — время запаздывания нагревателя, определяемое экспериментально.

Следует отметить, что при исследовании динамики воздухонагревателя как объекта с распределенными параметрами появляется возможность аналитического определения времени запаздывания, что повышает достоверность передаточной функции.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

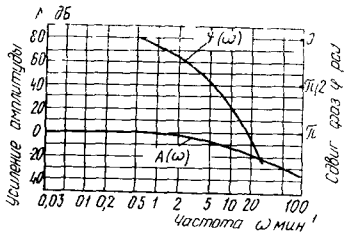


Рис. 7.7. Амплитудная A(ω) и фазовая φ(ω) частотные характеристики парового воздухонагревателя

Амплитудная и фазовая частотные характеристики парового воздухонагревателя, рассчитанные по уравнению (7.48), приведены на рис. 7.7.

При первичном теплоносителе воде частотная характеристика теплообменника принимает более сложный вид. чем выражение (7.48):

$$W = K\omega \frac{1 + T_{\omega_1}\omega i}{(1 + T_{\omega_2}\omega i)(1 + T_{\omega_3}\omega i)} e^{-T_{\omega_0}\omega i}, \qquad (7.49)$$

где K_ω — коэффициент усиления; T — постоянные времени, T_{ω_0} — время запаздывания.

Регулирование температуры приточного воздуха возможно помимо изменения расхода и температуры теплоносителя изменением расхода воздуха, проходящего з обвод теплообменника. При таком способе регулирования предусматривается безынерционный процесс смешивания двух потоков воздуха. Частотная характеристика такого звена определяется уравнением

$$W = K.$$

Коэффициент усиления выражает, например, отношение величины изменения влажности воздуха Δd к изменению угла поворота лопаток клапана $\Delta\beta$:

$$K = \Delta d/\Delta\beta.$$

Приведенные зависимости, характеризующие динамические свойства основных элементов установок кондиционирования воздуха, получены аналитическим путем на основе упрощенного представления физических процессов, протекающих в объектах регулирования. Использование экспериментальных способов определения

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

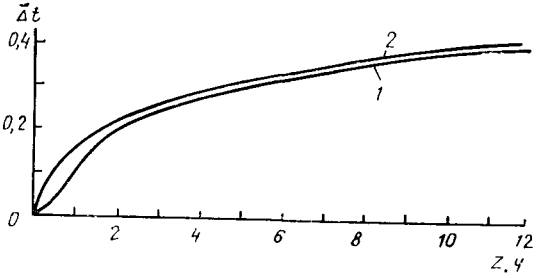


Рис. 7 8. Кривые разгона температуры воздуха помещения при возмущении температурой воды на входе в радиатор с учетом инерционности (*1*) и без учета (*2*)

динамических характеристик в ряде случаев позволяет уточнить структуру расчетных формул.

Основным теплообменным аппаратом отопления являются отопительные приборы. По предложению С. А. Чистовича отопительные приборы по динамическим свойствам разделяются на малотеплоемкие (радиаторы, конвекторы) и теплоемкие (отопительные панели).

Определение динамических характеристик приборов аналитическим путем сопряжено со значительными трудностями, связанными с большим числом определяющих факторов. Поэтому динамические свойства отопительных приборов анализируют, как правило, рассматривая их в качестве апериодического звена 1-го порядка без запаздывания.

Возможность такой постановки задачи оправдывается тем, что даже значительная ошибка в оценке динамических свойств малотеплоемких приборов не приводит к существенной погрешности при определении динамики температуры воздуха в отапливаемых помещениях.

На рис. 7.8 показаны кривые изменения температуры воздуха в помещении при разовом скачкообразном изменении температуры воды на входе в радиатор. Кривая *2* соответствует радиатору, рассматриваемому в качестве безынерционного звена. Как видим, вследствие запаздывания в радиаторе кривая изменения температуры воздуха деформируется и смещается вправо. Максимальная погрешность при подсчете инерционности радиатора достигает 7%.

С учетом изложенного передаточная функция малотеплоемкого отопительного прибора при входной вели-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

чине — температуре горячей воды $t_г$ и выходной величине — средней температуре воды в приборе в операторной форме имеет вид

$$W_o = K \frac{1}{1 + PT}, \tag{7.50}$$

где K — коэффициент усиления;

$$K = \frac{\bar{G}_т c_т}{G_т c_т + 0{,}5k}; \tag{7.51}$$

T — постоянная времени прибора

$$T = \frac{c_т \bar{M}_т + c_м \bar{M}_м}{2 c_т \bar{G}_т + k}, \tag{7.52}$$

где $c_т$, $c_м$ — удельная теплоемкость соответственно теплоносителя и материала прибора, Дж/(кг·°С); $\bar{G}_т$ — расход теплоносителя, отнесенный к единице площади поверхности прибора, кг/м²; $\bar{M}_в$, $\bar{M}_м$ — массы теплоносителя и материала прибора, отнесенные к единице площади поверхности прибора, кг/м²; k — коэффициент теплопередачи прибора, Вт/(м²·°С).

Исследованиями установлено отличие динамических характеристик теплоемких отопительных приборов от характеристик малотеплоемких приборов. Приведем здесь решение, полученное Ю. В. Кононовичем для ряда отопительных панелей, вмонтированных в ограждающие конструкции. Решение базируется на предположении, что отопительные панели можно рассматривать как неограниченные пластины с равномерно распределенной температурой на греющей поверхности. Результаты экспериментального исследования переходных процессов в отопительных панелях, подтвердившие это предположение, аппроксимируются передаточной функцией изменения температуры поверхности (выходная величина) в зависимости от изменения температуры теплоносителя $t_г$

$$W_{t_г} = K \frac{bP + 1}{a_2 P^2 + a_1 P + 1}, \tag{7.53}$$

где a_1, a_2 и b — коэффициенты, определяемые экспериментальным путем

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 7.3. Динамические свойства трубопроводов и воздуховодов

Трубопроводы и воздуховоды являются неотъемлемой частью систем теплоснабжения, отопления и вентиляции и предназначены для транспортирования воды, пара или воздуха.

Расчетом динамических свойств каналов предусматривается определить изменение температуры перемещаемой среды по длине канала. Физические процессы, происходящие при движении транспортируемой жидкости, носят общий характер, поэтому принцип составления дифференциальных уравнений для трубопроводов и воздуховодов при расчете их динамических характеристик одинаков.

Рассмотрим наиболее сложный случай расчета динамических характеристик воздуховода с теплоизоляцией. При изменении температуры в начальном сечении такого воздуховода процесс теплопередачи через стенки носит нестационарный характер. Так как изменение температуры в начальном сечении воздуховода носит, как правило, периодический характер, для решения задачи удобно воспользоваться положениями теории теплоустойчивости (см. § 2.2 и 7.1).

В неустановившемся режиме температура воздуха, проходящего по воздуховоду, является функцией двух переменных — длины l и времени z. Составим дифференциальное уравнение теплового баланса для элементарного участка воздуховода (рис. 7.9) длиной dl:

$$Q_1 - Q_2 - Q_3 = (c\rho)\,\frac{d t_в}{d z}\, f_в\, d l, \qquad (7.54)$$

где Q_1 — поток теплоты, подводимый к элементарному объему воздуховода,

$$Q_1 = L\,(c\rho)\,t_в; \qquad (7.55)$$

Q_2 — поток теплоты, уходящий из элементарного объема,

$$Q_2 = L\,(c\rho)\left(t_в + \frac{\partial t_в}{\partial l}\, d l\right); \qquad (7.56)$$

Q_3 — поток теплоты, передаваемый через стенку воздуховода,

$$Q_3 = U_в\,\alpha_в\, d l\,(t_в - \tau_в), \qquad (7.57)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

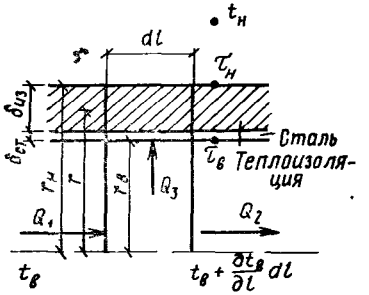


Рис. 7.9. Выделенный элемент воздуховода

L — расход воздуха, м³/ч; $\tau_в$ — температура поверхности стенки воздуховода, $f_в = \pi r_в^2$ — площадь поперечного сечения круглого воздуховода, м², $U_в$ — диаметр круглого воздуховода по внутреннему обмеру, м

Температура внутренней поверхности стенки $\tau_в$, как и $t_в$, является функцией двух переменных, т. е. $\tau_в = f(l, z)$.

Подставив составляющие баланса (7.55)—(7.57) в уравнение (7.54), получим

$$\frac{\partial t_в}{\partial z} = -\frac{h}{f_в}\frac{\partial t_в}{\partial l} - \frac{U_в \alpha_в}{f_в (c\rho)}(t_в - \tau_в). \qquad (7.58)$$

Граничные условия нестационарной теплопередачи в стенке воздуховода и толще теплоизоляции определяются следующими уравнениями:

на внутренней границе (стенки)

$$Q_з = -\lambda \left.\frac{\partial t}{\partial r}\right|_{r=r_в};$$

в толще (для m-го слоя изоляции)

$$\left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)_m = \frac{\lambda}{(c\rho)_m}\left[\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial l^2}\right]_m;$$

на наружной границе (теплоизоляции)

$$-\lambda \left.\frac{\partial t}{\partial r}\right|_{r=r_н} = U_н\, dl\, \alpha_н (\tau_н - t_н).$$

Для упрощения принято, что процесс теплопередачи через толщу соответствует процессу распространения одномерного теплового потока в плоскопараллельной стенке.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Пусть температура воздуха, поступающего в воздуховод, совершает гармонические колебания с частотой ω. В теории теплоустойчивости связь между гармоническими колебаниями температуры воздуха $t_в$ и поверхности $\tau_в$ определяется зависимостью

$$\tau_в = \frac{t_в}{1 + \frac{y}{\alpha_в}}. \qquad (7.59)$$

С учетом зависимости (7.59) уравнение (7.58) приобретает вид

$$t_в(\omega_l) = -\frac{L}{f_в}\frac{dt_в}{dl} - \frac{U_в \alpha_в}{f_в (c\rho)}\left(t_в - \frac{t_в}{1 + \frac{y_{пов}}{\alpha_в}}\right)$$

или относительно $\frac{dt_в}{dl}$

$$\frac{dt_в}{dl} = \frac{U_в \alpha_в}{L (c\rho)}\left(\frac{1}{1 + \frac{y_{пов}}{\alpha_в}} - 1 - \frac{f_в (c\rho)}{U_в \alpha_в}\omega l\right) t_в, \qquad (7.60)$$

где

$$\frac{1}{1 + \frac{y_{пов}}{\alpha_в}} - 1 = -\frac{B_в}{\alpha_к}; \qquad (7.61)$$

$B_в$ — показатель теплопоглощения поверхности стенки

Решение уравнения (7.60) позволяет получить формулу для расчета частотной характеристики, которая с учетом (7.61) имеет вид

$$W_{воз} = \frac{t_{в\,l}}{t_{в\,0}} = e^{-\frac{B_в U_в l}{L (c\rho)}} e^{-\frac{f_в l}{L}\omega l}, \qquad (7.62)$$

где $t_{в\,0}$, $t_{в\,l}$ — температура воздуха в начале и конце воздуховода

Модуль комплексного числа $W_{воз}$ является амплитудной частотной характеристикой воздуховода

$$\mathrm{mod}\frac{t_{в\,l}}{t_{в\,0}} = \frac{A_{t_{в\,l}}}{A_{t_{в\,0}}} = e^{-A\frac{U_в l}{L (c\rho)}}, \qquad (7.63)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

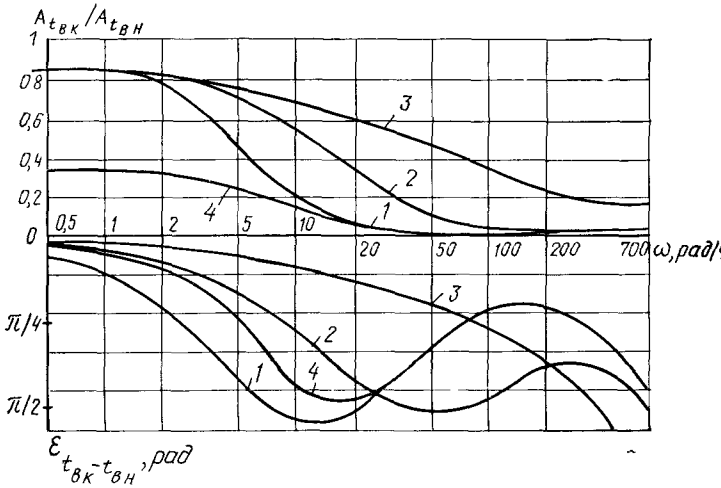


Рис. 7.10. Амплитудные и фазовые частотные характеристики воздуховода $l=50$ м при транспортировании по нему воздуха со скоростью $v_в=7$ м/с
$1-\delta_{ст}=2$ мм, $\delta_{из}=50$ мм, $2-\delta_{ст}=0{,}5$ мм, $\delta_{из}=50$ мм, $3-\delta_{ст}=0$, $\delta_{из}=50$ мм, $4-\delta_{ст}=2$ мм, $\delta_{из}=0$

а аргумент — фазовой частотной характеристикой

$$\arg \frac{t_{в\,l}}{t_{в.0}} = \varepsilon_{t_{в\,l}} - \varepsilon_{t_{в\,0}} = -57{,}3\,\frac{l}{L}\left(B\,\frac{U_в}{(c\rho)} + f_в\,\omega\right), \quad (7.64)$$

где A и B — действительная и мнимая части комплексного числа — показателя теплопоглощения поверхности стенки $B_в$, определяемые по формуле (7.15)

Частотные амплитудные и фазовые характеристики воздуховодов, рассчитанные по изложенному методу, показаны на рис. 7.10. Анализ полученных характеристик показывает, что воздуховод можно рассматривать как апериодическое звено 1-го порядка лишь при высоких частотах (или в начальный период переходного теплового процесса).

Изложенный метод расчета динамических свойств воздуховодов с теплоизоляцией в принципе справедлив и для расчета динамики **трубопроводов систем отопления и теплоснабжения.** При этом следует иметь в виду, что плотность воды на три порядка выше плотности воздуха. Большая массовая теплоемкость воды сглаживает

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

колебания температуры, и процесс теплообмена теплоносителя с поверхностью трубопровода не носит ярко выраженного нестационарного характера.

Неизолированные трубопроводы, применяемые в основном в системах отопления, при оценке их динамических свойств могут быть представлены как звенья транспортного запаздывания. Инерционностью в данном случае можно пренебречь, поскольку теплоемкость металла труб не оказывает заметного влияния на динамику процесса. В такой постановке передаточная функция неизолированного трубопровода примет вид

$$W_{t_0} = K\,(t_l/t_0)\,e^{-Pz_l}, \qquad (7.65)$$

где z_l — время прохождения теплоносителя по трубопроводу или величина транспортного запаздывания, ч

Величина транспортного запаздывания для трубопровода, состоящего из n участков, определяется по формуле

$$z_l = \frac{1}{3600}\sum_{1}^{n}\frac{1}{v\,n}, \qquad (7\ 66)$$

где v — скорость движения теплоносителя на участке, м/с

В табл. 7.1 приведены значения транспортного запаздывания для трубопроводов системы отопления с естественной ($v=0{,}05$—$0{,}2$ м/с) и насосной циркуляцией ($v=0{,}2$—1 м/с).

ТАБЛИЦА 7.1. ТРАНСПОРТНОЕ ЗАПАЗДЫВАНИЕ В ТРУБОПРОВОДАХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ z_l

Тип системы отопления	Значения z_l при длине пути воды до прибора, м			
	10	50	100	500
С естественной циркуляцией	1 –3	4—16	8 –33	—
С искусственной циркуляцией	0,2—1	1—4	2 8	10—40

Анализ переходных процессов в изолированных трубопроводах показывает, что инерционностью процесса теплопередачи для них пренебречь нельзя Передаточная функция изолированного трубопровода может быть

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

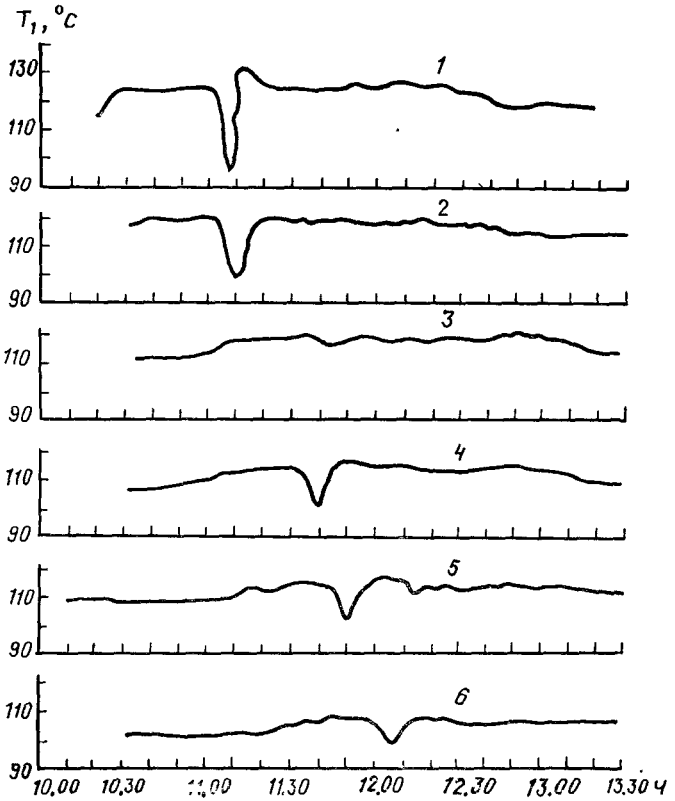


Рис. 7.11. Кривые температур воды в котельной (*1*) и на вводах в отапливаемые здания (*2—6*)

аппроксимирована апериодическим звеном 1-го порядка с транспортным запаздыванием

$$W_{t_0} = K\ (t_l/t_0)\ e^{-P\tau_i}\ (T_{тр}\ P + 1), \qquad (7.67)$$

где $T_{тр}$ — постоянная времени трубопровода, ч

Исследования, выполненные Ю. Я. Темпелем для распространенных типов прокладки трубопроводов тепловых сетей, показали, что динамические свойства изолированных трубопроводов практически не зависят от способа прокладки, материала и толщины изоляции. В результате исследований была получена зависимость,

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

аппроксимирующая данные расчетов постоянной времени изолированных трубопроводов

$$T_{\text{тр}} = \frac{z_l}{25}\sqrt[3]{d^2}, \qquad (7.68)$$

где d — диаметр трубопровода, м.

Транспортное запаздывание может быть определено расчетом по формуле (7.66) или экспериментально. В последнем случае оно определяется путем фиксирования времени прохождения температурного изменения у абонентов после подачи возмущения температуры на ТЭЦ или в котельной.

На рис. 7.11 приведены результаты экспериментального определения транспортного запаздывания для района теплоснабжения от квартальной котельной с расчетной отопительной нагрузкой 32 МВт. Общая длина сети 9,6 км, средний диаметр теплопровода 120 мм, расстояние до наиболее удаленного потребителя 2,1 км, до ближайшего — 0,17 км.

Как видно из рис. 7.11, время транспортирования теплоносителя до наиболее удаленного потребителя превышает 1 ч, а до головного абонента оно составляет всего 5 мин. В тепловых сетях большой протяженности транспортное запаздывание может составлять несколько часов.

§ 7.4. Динамика переходных процессов в парогенераторах

Для энергетического оборудования котельных и ТЭЦ характерен переменный в условиях непрерывного изменения нагрузки режим работы в соответствии с графиком теплопотребления.

Динамические характеристики парогенераторов и их элементов определяют путем решения системы дифференциальных уравнений с различной степенью полноты, описывающих сложный комплекс взаимосвязанных тепловых, гидромеханических, физико-химических и других процессов, которые протекают в объекте регулирования.

Для простейших математических моделей решения могут быть получены в аналитической форме. Простей-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

шая модель динамических процессов в парогенераторе представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений либо для всей установки, либо для каждого из входящих в нее элементов. В такой модели не учитываются реальная протяженность элементов парогенератора и связанная с ней зависимость параметров от координат (модель с сосредоточенными параметрами).

Распределенность параметров парогенератора в большинстве случаев аналитически учесть невозможно. Для этого используются численные решения исходных уравнений на ЭВМ.

Парогенераторы работают в разных режимах. Естественно, что предпочтительным оказывается режим с наибольшим КПД, который называется **оптимальным**. Коэффициент полезного действия парогенератора нелинейным образом зависит от нагрузки, избытка топлива, степени загрязнения поверхностей нагрева и других факторов.

Стационарный режим парогенератора определяют следующие основные параметры: расход, давление и температура теплоносителя по водопаровому тракту; расход, энтальпия и состав продуктов сгорания по газовому тракту; значение топочных потерь и др. Если известна связь между параметрами стационарного режима, то можно выбрать условия, обеспечивающие работу отдельных элементов с оптимальным КПД. Эти же параметры являются исходными при расчете динамики переходных процессов в парогенераторах, поскольку динамические расчеты, как правило, проводятся при отклонении параметров от стационарного режима.

Статические характеристики в общем случае нелинейны. С целью упрощения аналитических расчетов их линеаризуют.

Внешние возмущения в парогенераторе в общем случае носят случайный характер. Однако при анализе динамических свойств систем удобнее рассматривать разовые возмущения.

Качественную информацию о протекании динамических процессов можно получить из анализа стационарного распределения аккумулирующих емкостей в направлении пути потоков энергии и вещества. В парогенераторах на органическом топливе энергию переносят

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

две среды: греющий газ и теплоноситель (вода, пароводяная смесь, пар). Энергия в парогенераторе аккумулируется в объемах теплоносителя и греющего газа, металле поверхностей нагрева, топливе, а также в шлаке, изоляционных материалах. Указанные емкости неравноценны. Количество вещества и энергии, содержащихся в объеме греющего газа, невелико, поскольку плотность газа мала. Поэтому этой емкостью, как правило, пренебрегают. Иногда не учитывают аккумуляцию энергии в шлаке. Пренебрегают также тепловой емкостью изоляционных материалов, поскольку энергии в них запасается относительно мало, а время отдачи теплоты намного больше длительности переходного процесса.

Энергетическую емкость топочной камеры обычно приравнивают нулю, поскольку количество топлива, находящегося в ней, незначительно. Существенное количество топлива, а следовательно, и энергии содержится в устройствах для приготовления твердого топлива. Однако такие устройства обычно выделяют в самостоятельные динамические системы, последовательно соединенные с парогенератором.

Таким образом, в парогенераторах на органическом топливе энергия и вещество аккумулируются почти исключительно в объеме теплоносителя и металле поверхностей нагрева.

В динамическом процессе одновременно изменяется содержание вещества и энергии Обычно аккумуляционные явления вещества и энергии рассматриваются раздельно, что упрощает проведение качественного анализа

По направлению движения теплоносителя парогенераторы разделяются на три основных типа: с естественной циркуляцией, с многократной принудительной циркуляцией и прямоточные.

Простейший **прямоточный парогенератор** представляет собой обогревательную трубу (канал), на вход которой подается вода, а выходит из нее перегретый пар (рис. 7.12). Вода превращается в пар в процессе одного хода.

По длине парогенерирующей трубы при докритическом давлении располагаются зоны с различным состоянием потока: вода, пароводяная смесь, перегретый пар Границы между отдельными зонами определяются зна-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

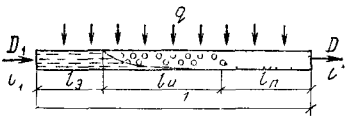


Рис. 7.12. Схема водопарового тракта прямоточного парогенератора

чением энтальпии теплоносителя на входе, расходом, интенсивностью теплообмена, рабочим давлением и длиной обогреваемого канала.

Длины экономайзерного $l_э$, испарительного $l_и$ и перегревательного $l_п$ участков при заданной тепловой нагрузке в стационарном режиме определяются зависимостями:

$$l_э = \frac{D\,\Delta i_н}{q_э}\,;\quad l_и = \frac{D\,r}{q_и}\,;\quad l_п = l - (l_э + l_п)\,; \qquad (7.69)$$

$$\Delta i_п = \frac{q_п\,l_п}{q}\,,$$

где $\Delta i_н$ — подогрев до кипения питательной воды, поступающей в парогенератор; D — расход пара, кг/с; r — теплота парообразования.

При этом интенсивность обогрева участка принимается по среднему значению на данном участке. Как видно из приведенных формул, длина соответствующего участка определяется приращением энтальпии и отношением расхода теплоносителя к удельной тепловой нагрузке q.

При изменении соотношения тепловосприятия и расхода теплоносителя границы между отдельными зонами перемещаются. Например, при увеличении тепловой нагрузки (при постоянном расходе питательной воды) длины экономайзерного и испарительного трактов уменьшатся, а длина перегревательного соответственно увеличится. Аналогичное перемещение произойдет и при изменении энтальпии среды на входе в обогреваемую трубу. При этом изменяется длина подогревательного и перегревательного участков, а длина испарительного тракта остается прежней.

В результате перемещения границ изменяется энтальпия среды на выходе. Для прямоточного парогенератора в стационарном режиме справедливо соотношение

$$q\,l = D\,(I_п - I_в)\,,$$

где $I_п$ и $I_в$ — энтальпия пара и питательной воды, кДж/кг.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Из приведенного соотношения следует, что при неизменных l и D приращение тепловой нагрузки вызывает относительно равное приращение энтальпии пара. Так, при изменении теплоподвода на 1% энтальпия пара изменится также на 1%. При $p=10$ МПа это соответствует изменению температуры пара примерно на 10 К. Это очень значительное изменение. Отсюда понятно, почему даже при сравнительно небольшом нарушении соотношения q/D происходит значительное изменение температуры пара.

При перемещении границ отдельных зон изменяется водопаровая емкость парогенератора. В связи с переходом от одного стационарного состояния к другому будет изменяться массовая емкость:

$$\left.\begin{aligned} \Delta G_{\text{в}} = G_{\text{в}} - G_{\text{в.0}};\quad \Delta G_{\text{п}} = G_{\text{п}} - G_{\text{п 0}};\\ \Delta G = \Delta G_{\text{в}} + \Delta G_{\text{п}}, \end{aligned}\right\} \qquad (7.70)$$

где индексы «в» и «п» соответствуют воде и пару.

В свою очередь,

$$\left.\begin{aligned} \Delta G_{\text{в}} = f\rho' [l_{\text{э}} + l_{\text{и}}(1-\bar{\varphi})] - f(\rho')[l_{\text{э 0}} + l_{\text{и.0}}(1-\bar{\varphi}_0)];\\ \Delta G_{\text{п}} = f\rho''[l_{\text{и}}\bar{\varphi} - l_{\text{и.0}}\varphi_0 + (l_{\text{п}} - l_0)]. \end{aligned}\right\} \qquad (7.71)$$

Долю сечения φ, занятую паром, легко найти через массовые параметры потока и коэффициент c, определяемый относительной скоростью движения пара:

$$\varphi = c\beta;\quad \bar{\varphi} = \frac{1}{l}\int_0^l \varphi(l)\,dl, \qquad (7.72)$$

где c — коэффициент, зависящий в основном от ρ и D; β — объемное расходное паросодержание:

$$\beta = \frac{\varkappa\dfrac{\rho'}{\rho''}}{1+\varkappa\dfrac{\rho'-\rho''}{\rho''}}; \qquad (7.73)$$

$\varkappa = q(z-l_{\text{н}})/Dr$ — массовое расходное паросодержание.

Наиболее простой зависимость $\bar{\varphi}$ получается при постоянном по длине обогреве:

$$\bar{\varphi} = c\frac{\rho'}{\rho'-\rho''}\left\{1 - \frac{\rho'}{(\rho'-\rho'')\varkappa}\ln\left[1+\frac{\varkappa(\rho'-\rho'')}{\rho''}\right]\right\}. \qquad (7.74)$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При рассмотрении всей длины испарительного тракта ($\chi=1$) усредненное значение доли сечения, занятой паром, будет равно:

$$\bar{\varphi} = c\,\frac{\rho'}{\rho'-\rho''}\left(1-\frac{\rho''}{\rho'-\rho''}\ln\frac{\rho'}{\rho''}\right). \qquad (7.75)$$

Дальнейший анализ упростится, если рассматривать зависимость плотности лишь от одного параметра, в первую очередь от энтальпии, на основе постоянства давления в парогенераторе.

Если рассматривается изменение массовой емкости на всей длине парообразующего тракта, то, согласно уравнению (7.75), среднее истинное объемное паросодержание зависит только от плотности фаз теплоносителя. При постоянном давлении средние значения доли сечения, занятой паром, в двух стационарных режимах равны между собой: $\bar{\varphi}=\bar{\varphi}_0$. При этом из уравнений (7.70) и (7.71) с учетом соотношений (7.69) получим

$$\Delta G = \frac{D_0}{q_0}\,\frac{n_\Gamma - n_\tau}{n_\tau} f\,(\rho'-\rho'')[\Delta i_н + n\,(1-\bar{\varphi})], \qquad (7.76)$$

где

$$n_\Gamma = D/D_0; \quad n_\tau = q/q_0.$$

Изменение емкости зависит от параметров потока, рабочего давления и отношения расхода теплоносителя к тепловой нагрузке. С повышением рабочего давления изменение емкости уменьшается.

Переход от одного режима к другому, отличающемуся от прежнего отношением q/D, сопровождается изменением массовой емкости, вследствие чего в переходный период увеличивается или уменьшается расход пара по отношению к расходу питательной воды. Для всего периода переходного процесса справедливо соотношение

$$\int_0^\infty (D_в - D_п)\,dz = \Delta G. \qquad (7.77)$$

На рис. 7.13, *а* показан примерный график изменения во времени ряда параметров парогенератора при нарушении отношения q/D вследствие увеличения G. Расход

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

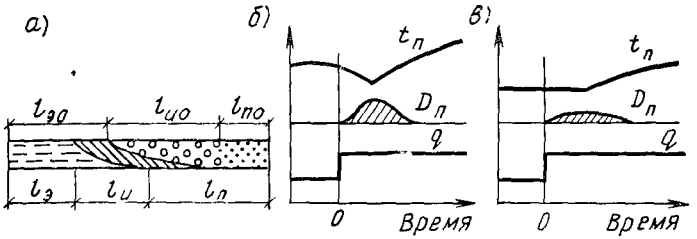


Рис. 7.13. Изменение параметров пара в прямоточном парогенераторе
а — положение границ фазовых состояний; *б* и *в* — при большом и малом переменных объемах

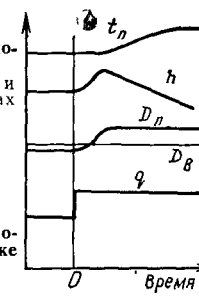


Рис. 7.14. Изменение параметров барабанного парогенератора при увеличении тепловыделения в топке

пара в первый момент времени превышает расход питательной воды в результате вытеснения части теплоносителя из объема парообразующих труб. Поэтому температура пара, несмотря на повышенный обогрев, может времено снизиться (рис. 7.13, *б*) или будет медленно нарастать (рис. 7.13, *в*).

Дополнительное количество пара, образовавшегося в переходном процессе, численно равно площади между кривыми $D_в$ и $D_п$. В свою очередь, площадь, ограниченная этими кривыми, равна изменению массовой емкости в соответствии с равенством (7.76). Способность парогенератора выдавать или аккумулировать в течение некоторого времени дополнительное (сверх подаваемого на вход) количество теплоносителя имеет большое значение для процесса регулирования.

Так как возможно перемещение границ между перегревательными и парообразующими поверхностями нагрева, температура пара на выходе не зависит от характера распределения теплоподвода вдоль тракта парогенератора. Поэтому регулирование температуры пара в прямоточном парогенераторе обеспечивается поддержанием

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

постоянного отношения суммарного теплоподвода к расходу питательной воды. Впрыск же играет вспомогательную роль, позволяя выиграть время для соответствующего изменения соотношения q/D.

В барабанных котлах (с естественной и многократной принудительной циркуляцией) имеется фиксированная граница между парообразующими и перегревательными поверхностями. Эта граница находится в барабане, уровень воды в котором отделяет перегревательные поверхности от парообразующих. При любых режимах (кроме аварийных) в перегреватель поступает практически сухой насыщенный пар.

Расход питательной воды всегда соответствует расходу пара и является откликом на изменения, происшедшие в пароводяном тракте. Изменением расхода питательной воды в барабане поддерживается определенный уровень, при этом паропроизводительность парогенератора почти не изменяется, поскольку она определяется в основном тепловой нагрузкой.

В свою очередь, характер изменения температуры пара определяется соотношением тепловосприятия поверхностей нагрева, расположенных до барабана (парообразующих) и после него (перегревательных). Если относительное увеличение тепловосприятия парообразующих поверхностей нагрева с ростом нагрузки меньше, чем увеличение тепловосприятия перегревательных поверхностей, то температура пара повышается. При этом изменение температуры пара относительно невелико, что связано с постоянством границы между парообразующими и перегревательными поверхностями нагрева. Несмотря на сравнительно небольшой диапазон изменения температуры пара, регулирование ее необходимо.

Примерный график изменения параметров барабанного парогенератора при повышении тепловыделения в топке представлен на рис. 7.14. Как видим, при увеличении тепловой нагрузки возрастает и паропроизводительность. При отсутствии регулирования уровень воды в барабане парогенератора вначале повышается, а затем снижается. Временное повышение уровня связано с вытеснением части воды из парообразующих труб в результате увеличения их парового объема. Последующее снижение уровня происходит до тех пор, пока

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

не будет восстановлен баланс между расходом воды и паропроизводительностью. Если в прямоточном парогенераторе изменение массового заполнения парогенерирующих труб сказывается на степени отклонения расхода пара от расхода питательной воды, то в барабанном парогенераторе при изменении массовой емкости изменяется положение уровня в барабане.

Температура пара регулируется путем искусственного перераспределения тепловосприятия между парообразующими и перегревательными поверхностями нагрева (газовое регулирование) либо путем переноса части парообразующей (впрыск) или водоподогревательной (поверхностный пароохладитель) поверхности в перегревательную в обход барабана.

Рассмотрим аккумуляцию тепловой энергии в парогенерирующих каналах. Тепловая энергия аккумулируется в объеме теплоносителя и в металле поверхностей нагрева:

$$Q = \int_0^{l_э} f c_в \rho\,(z)\, t\,(z)\, dz + \int_{l_э}^{l_и} f \rho\,(z)\, i\,(z)\, dz + \int_{l_и}^{l_п} f c_п \rho\,(z)\, t\,(z)\, dz + \int_0^{l} q_м c_м \theta\,(z)\, dz. \qquad (7.78)$$

Количество теплоты, содержащееся в объеме теплоносителя, определяется массой последнего, распределением температуры (энтальпией) теплоносителя и давлением. При переходе от одного стационарного режима к другому выделяется (поглощается) теплота в количестве $\Delta Q = Q - Q_0$. Значения Q и Q_0 подсчитывают по уравнению (7.78) в соответствии с характеристиками стационарного режима.

Масса перегретого пара по сравнению с массой металла перегревателя ничтожно мала. В соответствии с этим и количество теплоты, содержащееся в паре, невелико, поэтому в расчетах его обычно не учитывают. По этой же причине обычно пренебрегают аккумуляцией теплоты в насыщенном паре. Таким образом, тепловая энергия в основном сосредоточена в воде и металле всех поверхностей нагрева.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Аккумулированная тепловая энергия реализуется поразному в зависимости от вида поверхности нагрева и характеристик стационарных режимов. Так, если два стационарных режима отличаются только давлением, то в динамическом процессе выделится лишь теплота, аккумулированная в металле и воде на испарительном участке. В то же время содержание теплоты в экономайзере и перегревателе изменится мало, поскольку температура воды и пара незначительно зависит от давления. Напротив, при нарушении соотношения между расходом питательной воды и теплоподводом значительно изменится содержание теплоты в подогревателе и перегревателе, а содержание теплоты в испарителе изменится мало и лишь вследствие сокращения площади поверхности (прямоточный парогенератор).

Действие тепловой аккумуляции обусловливает большую инерцию изменения основных технологических параметров парогенератора в переходном процессе и, в частности, температуры, что предъявляет специфические требования к системе автоматического регулирования.

§ 7.5. Статические характеристики насосных, вентиляторных и компрессорных установок

В системах ТГС и СКМ для перемещения различных жидкостей и газов широко применяются насосы, вентиляторы (дымососы), компрессоры и другие нагнетатели.

Насосы предназначены для перемещения жидкостей и сообщения им энергии. В насосе механическая энергия, подводимая от двигателя (чаще всего электрического), превращается в потенциальную кинетическую и тепловую энергию потока жидкости.

Вентиляторы (дымососы) перемещают газовые среды при степени повышения давления (отношении давления газа на выходе к давлению его на входе) до 1,15.

Компрессоры — установки с искусственным (обычно водяным) охлаждением — обеспечивают степень повышения давления газа более 1,15. Установки, создающие степень повышения давления газа более 1,15, но без искусственного охлаждения, называются нагнетателями.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При автоматизации систем ТГС применяются также гидравлические двигатели, в которых гидравлическая энергия потока жидкости превращается в механическую.

Характеристики насосов. В системах теплоснабжения в качестве сетевых циркуляционных, подкачивающих, смесительных и подпиточных насосов применяются центробежные насосы различных типов. Насосы рассчитаны на работу с определенной частотой вращения вала рабочего колеса. Допускается работа насосов с пониженной частотой вращения, а увеличение ее обязательно должно быть согласовано с заводом-изготовителем.

Требуемую мощность N, кВт, на валу электродвигателя насоса определяют по формуле

$$N = \frac{GH\gamma}{3600 \cdot 102\,\eta_{\text{п}}\,\eta}, \qquad (7.79)$$

где GH — расход и напор насоса; γ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; $\eta_{\text{п}} \approx 0{,}98$ — КПД передачи; η — КПД насоса, определяемый по его характеристике (рис. 7.15).

Установочная мощность электродвигателя равна

$$N_{\text{у}} = kN,$$

где k — коэффициент запаса мощности. При мощности насосов до 50 кВт $k \approx 1{,}2 \div 1{,}3$; выше 50 кВт $k = 1{,}1 \div 1{,}2$.

Основная задача регулирования насоса — подача в сеть расхода в соответствии с определенным графиком. При этом, как показывают характеристики насоса (см. рис. 7.15), все основные параметры (H, N, η) имеют тенденцию изменяться. Некоторые параметры насосов находятся в зависимости от характеристик сети трубопроводов и требований потребителей. Насосы, обеспечивая заданный график подачи расходов воды, должны создавать переменное давление в соответствии с требованиями потребителей и в зависимости от гидравлических параметров системы трубопроводов.

Возможны различные варианты регулирования подачи.

Дроссельное регулирование при $n = \text{const}$, достигаемое введением дополнительного гидравлического сопротивления в сеть трубопроводов путем установки регулирующего дросселя. Поскольку наибольшая подача обеспечивается при полностью открытом дросселе, такое регулирование применяют только с целью уменьшения по-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

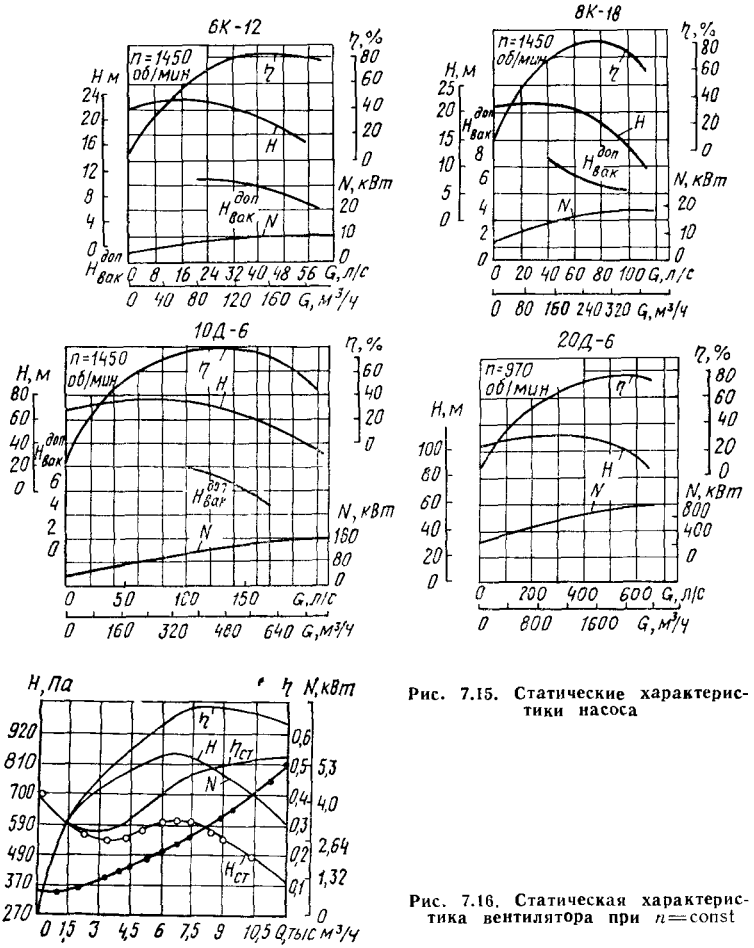


Рис. 7.15. Статические характеристики насоса

Рис. 7.16. Статическая характеристика вентилятора при n=const

дачи. При дросселировании уменьшается мощность на валу насоса и вместе с тем повышается доля энергии, расходуемой при регулировании. Энергетическая эффективность такого регулирования насоса низкая, однако ввиду простоты этот способ получил широкое распространение.

Регулирование изменением частоты вращения вала насоса применяется в тех случаях, когда можно изменять

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

частоту вращения вала двигателя. Этим способом возможно регулирование подачи в любом направлении. Так как нет потерь энергии, обусловленных гидравлическим сопротивлением дросселя, этот способ регулирования эффективнее дроссельного. Для изменения частоты вращения вала насоса применяют специальные электроприводы, вариаторы и гидравлические муфты. При использовании вариаторов и муфт переменная частота вращения вала достигается изменением передаточного отношения вариатора или гидромуфты при постоянной частоте вращения вала двигателя.

Регулирование направляющим аппаратом на входе в рабочее колесо насоса осуществляется путем изменения условий входа жидкости на рабочие лопасти насоса. Закручивание потока, поступающего на рабочее колесо, влияет на напор и при заданной характеристике трубопровода изменяет подачу насоса. Направляющие аппараты необходимо располагать в непосредственной близости от входа в колесо, что обеспечивает эффективное регулирование.

Изменение подачи насоса в большинстве случаев сопровождается изменением его КПД. Отклонение КПД от максимального значения (регламентируемого ГОСТ) тем значительнее, чем глубже регулирование. Работа насоса с низким КПД невыгодна. Допускается снижение КПД на 7% максимального. Насосы целесообразно подбирать не по обычным характеристикам, а по характеристикам, построенным с учетом допустимого снижения КПД. На этих характеристиках выделяются участки с допустимым КПД, называемые полем характеристик. Поля характеристик при различных способах регулирования насосов различны.

В насосных системах могут возникать изменения режимов, обусловленные срывом потока с лопастей (при дроссельном регулировании до малых расходов), резким изменением частоты вращения вала насоса (при изменении частоты тока в электрической сети), быстрым изменением расходов со стороны потребителей и т. д. При таких возмущениях система выходит из равновесия и отмечается неустойчивая ее работа — самопроизвольные колебания подачи, давления и мощности. При определенных условиях эти случайные возмущения вызывают

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

колебания с возрастающей амплитудой, устойчивость не восстанавливается и в системе возникают автоколебания — помпаж, который сходен с явлением резонанса при колебаниях механических систем. Неустойчивость и помпаж опасны ввиду резкого, толчкообразного повышения давления в потоке и соответственно увеличения напряжений в рабочих частях системы.

Характеристики вентиляторов — зависимости напоров, мощности на валу и КПД от объемной подачи воздуха — устанавливают непосредственным испытанием их при постоянной частоте вращения рабочего колеса и плотности воздуха $\rho = 1{,}2$ кг/м^3.

Типичная статическая размерная характеристика вентилятора приведена на рис. 7.16. Широко используются также безразмерные характеристики, общие для целой серии геометрически подобных вентиляторов. Регулирование подачи вентиляторов осуществляется теми же способами, что и регулирование насосов.

Характеристики компрессоров. Работу компрессора характеризуют объемная подача Q, начальное p_1 и конечное p_2 давление или степень повышения давления p_2/p_1, частота вращения и мощность N на валу компрессора. Характеристиками компрессора являются зависимости между подачей и основными параметрами (p_2/p_1, N, КПД) при определенных свойствах газа и заданной частоте вращения. Характеристики получают в результате испытаний на стенде, которые затем пересчитывают на реальные условия работы компрессора. Регулирование компрессоров осуществляется на постоянную подачу (при переменном давлении) или постоянное давление (при переменной подаче).

По своим **динамическим свойствам** насосы, вентиляторы и компрессоры относятся к апериодическим звеньям, постоянная времени которых определяется соотношением вращающейся массы к электрической мощности двигателя. Инерционность насосов, вентиляторов и компрессоров достаточно мала в сравнении с инерционностью уже рассмотренных элементов систем ТГС и СКМ, поэтому ею можно пренебречь и считать насосы, вентиляторы и компрессоры практически безынерционными установками.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 7.6. Статические характеристики регулирующих органов

Основными регулирующими дроссельными органами являются шиберы и поворотные заслонки (для регулирования расхода газа) или дроссельные клапаны (для жидкостей, пара и др.). Расход среды через регулирующий орган изменяется при изменении площади проходного сечения и перепада давления на регулирующем органе. Зависимость между площадью проходного сечения S и ходом y регулирующего органа представляет собой его **конструктивную** (внутреннюю) характеристику. Для шиберов и поворотных заслонок (непрофилируемых регулирующих органов) эта зависимость (рис. 7.17) имеет вполне определенный характер и изменить ее нельзя.

Дроссельные клапаны (профилируемые регулирующие органы) выпускают с конструктивными характери-

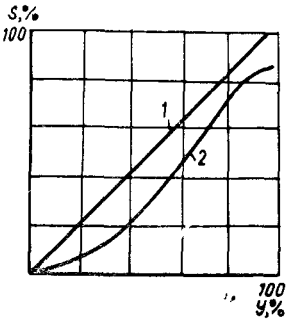


Рис. 7.17. Конструктивные характеристики непрофилируемых дроссельных органов
1 — прямоугольного шибера, *2* — поворотной заслонки

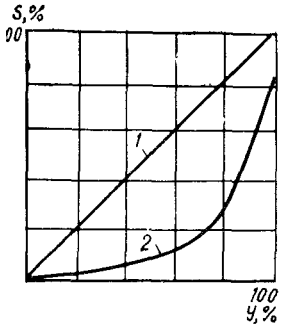


Рис. 7.18. Линейная (*1*) и экспоненциальнаи (*2*) конструктивные характеристики профилируемых дроссельных органов (клапанов)

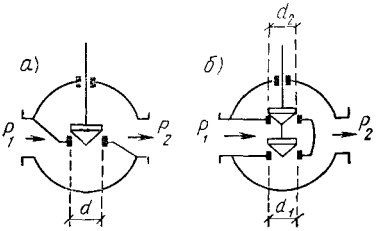


Рис. 7.19. Принципиальные схемы односедельного (*а*) и двухседельного (*б*) регулирующих дроссельных клапанов

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

стиками двух типов: линейной и экспоненциальной (рис. 7.18). У дроссельных клапанов с линейной характеристикой площадь проходного сечения $S=Cy$, у клапанов с экспоненциальной характеристикой $S=Ce^{y}$. Эту характеристику называют также «равнопроцентной» или «постояннопроцентной», так как при всех значениях y относительная величина приращения площади $\frac{1}{S}\frac{dS}{dy}$ постоянна.

Для регулирующего воздействия на поток жидкости или газа, находящихся под значительным давлением при небольших диаметрах трубопровода, может быть применен односедельный клапан (рис. 7.19, *а*). Усилие, создаваемое клапаном, зависит от его диаметра и положения (расстояния от седла). В полностью закрытом состоянии клапан создает усилие

$$p=\frac{\pi d^2}{4}\Delta p_{\text{р.о}},$$

где d — диаметр клапана; $\Delta p_{\text{р о}}$ — максимальная разность давления до и после клапана.

При больших диаметрах и больших давлениях усилие, необходимое для полного закрытия клапана, которое создается исполнительным механизмом, должно быть весьма значительным. С целью уменьшения усилия применяют двухседельные клапаны (рис. 7.19, *б*). Поскольку диаметры седел клапанов d_1 и d_2 почти равны, а усилия, которые создаются каждым клапаном, прямо противоположны по направлению, для закрытия двухседельных клапанов требуется значительно меньшее усилие

$$p=\frac{\pi}{4}(d_1^2-d_2^2)\Delta p_{\text{р.о}},$$

т. е. он оказывается разгруженным. Недостатком двухседельных клапанов является их негерметичность.

Эффективность работы регулирующего органа, установленного на сети, определяется его статической характеристикой. Основным условием выбора статической характеристики регулирующего органа является постоянство коэффициента передачи объекта (сети) при любых изменениях нагрузок.

Статические (внешние, рабочие или расходные) ха-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

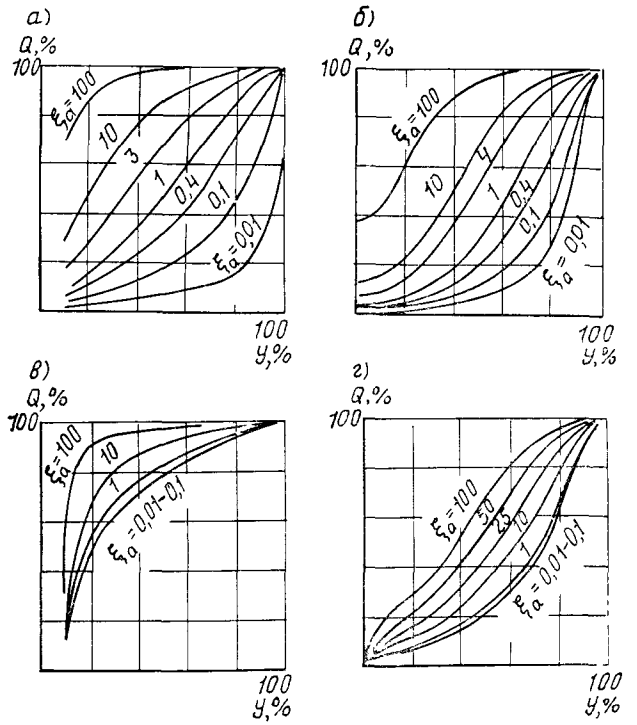


Рис. 7.20. Статические (расходные) характеристики квадратного шибера (*а*), круглой поворотной заслонки (*б*), двухседельного клапана с линейной конструктивной характеристикой (*в*) и экспоненциальной конструктивной характеристикой (*г*)

рактеристики регулирующих органов подобны их конструктивным характеристикам только при постоянном перепаде давления. Фактические статические характеристики зависят от условий установки регулирующих органов: от соотношения перепада давления на регулирующем органе $\Delta p_{р\,о}$ и общего перепада давления $\Delta p_л$ в линии (сети), где расположен регулирующий орган. Это соотношение перепадов изменяется не только при установке регулирующего органа на разных линиях, но и при изменении степени его открытия: по мере открывания перепад $\Delta p_{р\,о}$ падает, а сопротивление линии $\Delta p_л$ в связи с увеличением расхода возрастает.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Статические характеристики основных регулирующих органов приведены на рис. 7.20. Условия установки регулирующего органа принято характеризовать величиной $\xi_л$ — условным коэффициентом сопротивления линии, отнесенным к скорости потока $v_{р.о}$ в сечении регулирующего органа.

Сопротивление линии можно представить в виде зависимости

$$\Delta p_л = \Sigma \Delta p_i = \xi_л \frac{\rho v_{р.о}^2}{2g},$$

где Δp_i — сопротивление отдельных участков линии при максимальной нагрузке; $v_{р\,о} = G/F_{р,о}$,

откуда

$$\xi_л = \frac{2g \Delta p_л}{\rho v_{р.о}^2}. \qquad (7.80)$$

Требуемая статическая характеристика регулирующего органа обеспечивается при соответствующем $\xi_л$ (см. рис. 7.20).

Величина $\xi_л$ зависит от площади проходного сечения регулирующего органа $F_{р\,о}$ при известном максимальном расходе регулирующей среды G.

Из уравнения (7.80)

$$\xi = \frac{2g \Delta p_л}{\rho} \frac{F_{р.о}^2}{G^2}.$$

Следовательно, площадь проходного сечения должна быть равна

$$F_{р\,о} = G_{макс} \sqrt{\frac{\xi_л \rho}{2g \Delta p_л}}.$$

Конструктивная характеристика *квадратного шибера* линейна, а реальные статические характеристики могут быть весьма разнообразными. Так, при $\xi_л = 1$ статическая характеристика квадратного шибера очень близка к линейной с постоянным коэффициентом передачи. При $\xi_л = 0{,}01 \div 0{,}1$ можно получить характеристики со значительно увеличивающимся по мере открывания (следовательно, по нагрузке) коэффициентом передачи регулирующего органа.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Статическая характеристика *круглой поворотной заслонки* может быть линейной лишь в ограниченном диапазоне хода $y=30—70\%$. При $\xi_л=0{,}01\div0{,}1$ можно получить статические характеристики с коэффициентом передачи, увеличивающимся в 10—15 раз при переходе от минимальной к максимальной степени открытия. В обоих случаях при $\xi_л=1$ коэффициент передачи регулирующего органа по мере увеличения y, т. е. нагрузки, сначала (при $y<10—20\%$) возрастает, а затем (при $y>30\%$) резко падает. Регулирующие органы с такими характеристиками обычно не пригодны для устройств с широким диапазоном изменения нагрузок (например, воздухонагревателей систем вентиляции и кондиционирования воздуха).

Статические характеристики *двухседельного клапана* (см. рис. 7.20) с линейной конструктивной характеристикой даже при $\xi_л=0{,}01$ неблагоприятны, так как коэффициент передачи регулирующего органа с увеличением нагрузки падает, что сужает допустимый диапазон регулирования. Если конструктивная характеристика клапана экспоненциальная, его статические характеристики близки к линейной (см. рис. 7.20). Так, при $\xi_л=0{,}1—1{,}0$ коэффициент передачи клапана может быть увеличен в 15 раз при переходе от $y=10$ к $y=90\%$. При $\xi_л=25—50$ статическая характеристика клапана практически линейна в широком диапазоне нагрузок ($y=10—80\%$).

Приведенные зависимости справедливы и при работе регулирующего органа в условиях переменного перепада давления при его открытии (закрытии). В отдельных случаях могут быть установлены автоматические регуляторы, поддерживающие постоянный перепад на регулирующем органе. Тогда статическая характеристика регулирующего органа совпадает с его конструктивной характеристикой.

При необходимости статические характеристики регулирующих органов можно изменить применением специальных кинематических устройств между исполнительным механизмом и регулирующим органом; характеристики профилируемых регулирующих органов можно изменить путем изменения профиля клапана.

В системах автоматического регулирования регулирующие органы (дроссельные заслонки или регулирую-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

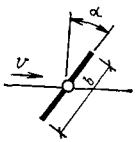


Рис. 7.21. К расчету противодействующего момента клапана

щие клапаны) открываются или закрываются с помощью различных электрических, пневматических или гидравлических исполнительных механизмов (сервоприводов). Для полного открытия (закрытия) регулирующего органа требуется исполнительный механизм определениой мощности.

Расчет требуемой мощности исполнительного механизма выполним на примере дроссельной заслонки.

Общий противодействующий момент M при движении потока воздуха через дроссельную заслонку (воздушный клапан) определим по формуле

$$M = C \rho v^2 F + K_{тр} n,$$

где C — коэффициент, зависящий от угла открытия заслонки α (рис. 7.21); ρ, v — плотность и скорость движения воздуха; F — площадь заслонки; $K_{тр}$ — коэффициент трения; n — число лопаток (воздушного многостворчатого клапана).

Для привода регулирующих органов в прямоточных системах кондиционирования воздуха максимальный вращающий момент исполнительного механизма $M = C\rho v^2 F$, где $C = 0{,}26$ при $\alpha = 15°$. При этом скорость движения воздуха v в сечении клапана составляет 20—23 м/с.

Коэффициент $K_{тр}$ определяется экспериментально. Для кондиционеров серии КД $K_{тр} = 0{,}15$, а для кондиционеров серии КТ $K_{тр} = 0{,}08$.

Для регулирующих клапанов рециркуляционных систем максимальный вращающий (противодействующий) момент достигается при $C = 0{,}14$ и $\alpha \approx 45°$. При этом для клапанов наружного воздуха $v \sim 15$ м/с, для рециркуляционных клапанов $v \sim 11$ м/с.

Противодействующий момент M линейно зависит от производительности L установки кондиционирования воздуха. Для прямоточных СКВ $M = 4—20$ кгс·м (40—200 Н·м) при изменении производительности от 40 до 250 тыс. м³/ч. Для рециркуляционных СКВ величину M принимают по табл. 7.2.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 7.2. ЗНАЧЕНИЯ ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИХ МОМЕНТОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ В РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СКВ

Установки СКВ	Производительность установки, тыс. м³/ч	Противодействующий момент M, Н·м
Кондиционеры типа КД:		
наружный клапан	40	15
	250	70
рециркуляционный	40	7
	250	60
Кондиционеры типа КТ:		
наружный клапан	40	10
	250	68
рециркуляционный	40	8
	250	56

Для того чтобы полностью открыть (закрыть) соответствующий клапан, мощность исполнительного механизма (например, крутящий момент) должна быть больше противодействующего момента M.

В системах кондиционирования воздуха (вентиляции) в настоящее время применяются электрические исполнительные механизмы типа МЭО с крутящим моментом 10—250 Н·м.

РАЗДЕЛ III. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

ГЛАВА 8. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СРЕД В СИСТЕМАХ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

§ 8.1. Назначение автоматического контроля. Требования к контрольно-измерительным приборам. Погрешности измерений

Для качественного ведения любого технологического процесса необходим контроль за несколькими характерными величинами, называемыми **параметрами процесса.** В системах теплогазоснабжения и кондиционирования

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

микроклимата основными параметрами являются температура, потоки теплоты (общие, радиационные и др.), влажность, давление, расход, уровень жидкости и некоторые другие. В результате контроля необходимо установить, удовлетворяет ли фактическое состояние (свойство) объекта контроля заданным технологическим требованиям. Наблюдение за параметрами систем осуществляется с помощью измерительных приборов.

Суть измерения — получение количественной информации о параметрах путем сравнения текущего значения технологического параметра с некоторым его значением, принятым за единицу. Результатом контроля является представление о качественных характеристиках контролируемых объектов.

Совокупность устройств, с помощью которых выполняются операции автоматического контроля, называется **системой автоматического контроля (САК).**

Основными функциями САК являются восприятие контролируемых параметров с помощью датчиков, реализация заданных требований к контролируемому объекту (норм или значений уставок), сопоставление параметров с нормами, формирование суждения о состоянии объекта контроля (на основании анализа этого сопоставления) и выдача результатов контроля.

До появления автоматических управляющих устройств и цифровых вычислительных машин (ЦВМ) основным потребителем измерительной информации был экспериментатор, диспетчер и т. д. В современных САК измерительная информация от приборов часто поступает непосредственно в автоматические управляющие устройства. В этих условиях в основном используются электрические средства измерений, отличающиеся следующими преимуществами:

1) простота изменения чувствительности в широком диапазоне значений измеряемой величины Использование электроники позволяет в тысячи раз усиливать электрические сигналы, а следовательно, увеличивать чувствительность аппаратуры;

2) малая инерционность электрической аппаратуры или широкий частотный диапазон, что позволяет измерять как медленно, так и быстро изменяющиеся во времени величины;

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

3) возможность измерения на расстоянии, в недоступных местах, централизация и одновременность измерения многочисленных и различных по своей природе величин, т. е. возможность создания комплексных измерительно-информационных систем (ИИС), передача результатов измерения на большие расстояния, математическая обработка и использование их для целей управления (создание управляющих систем);

4) возможность комплектования измерительных и обслуживаемых ими автоматических систем из блоков однотипной электрической аппаратуры, что имеет важнейшее значение для создания ИИС.

Механизм передачи информации, имеющийся в любой измерительной системе, может быть вскрыт с помощью негэнтропийного принципа. Передача информации возможна только материальным путем — использованием для ее транспортировки энергии. При сопоставлении различных способов передачи информации обнаруживается их общее свойство — информация никогда не возникает сама собой, но самопроизвольно убывает. Это объясняется тем, что для создания некоторого упорядоченного состояния вещества или энергии, способного нести информацию (например, электрического импульса), необходимо затратить работу. Затраченная работа создает в объекте запас энергии, которая стремится освободиться, рассеяться. В результате этого наиболее вероятными являются беспорядочные состояния объекта, а состояния с высокой упорядоченностью являются маловероятными.

Мерой «беспорядка» в газовой термодинамике служит **энтропия** $s=\theta/T$, являющаяся отношением тепловой энергии газа θ к его абсолютной температуре T. Согласно второму началу термодинамики, энтропия во всех случаях возрастает или, по крайней мере, остается неизменной

К. Шеннон заимствовал термин «энтропия» из статической термодинамики для обозначения аналогичного понятия в создаваемой им теории информации. Однако для характеристики упорядоченности, т. е. запасенной в системе энергии и ее способности содержать информацию, отсчет энтропии должен вестись в обратную сторону, т. е. с обратным знаком. Понятие «мера упорядочен-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ности» характеризуется термином «негэнтропия» — **отрицательная энтропия.**

Измерение невозможно без поступления на вход прибора энергии от объекта измерения. Чтобы отдать эту энергию, объект должен ею обладать, т. е. иметь достаточную негэнтропию. Однако количество переносимой информации зависит не от абсолютной величины энергии, а от соотношения ее с другими потоками энергии, несущими информацию о других объектах и являющимися помехами в процессе получения информации о данном объекте. Этот механизм транспортировки информации энергетическими потоками получил название **негэнтропийного принципа передачи информации,** или принципа Бриллюэна.

Для исследования процессов, методов и средств контроля и измерения целесообразно использовать основные положения теории информации (равно как и теории вероятности и математической статистики). В теории информации рассматриваются такие ситуации, когда появление того или иного события (из числа возможных в данной ситуации) не может быть однозначно предсказано заранее. В этих условиях наиболее полное описание ситуации состоит в том, что каждое из событий характеризуется вероятностью его появления. Количество информации является мерой, определяющей степень взаимосвязи между ситуациями. Чем более тесная эта взаимосвязь, тем большее количество одной из них получается при наблюдении событий, реализующихся во второй ситуации. Количество информации обращается в ноль, если ситуации совершенно независимы, и становится максимальным, если между событиями существует однозначная функциональная связь.

Состояние контролируемых параметров можно рассматривать как случайные события, а процесс контроля — как ситуацию, в которой они могут происходить. Невозможность предсказания, какое из значений контролируемого параметра x будет на входе устройства контроля, позволяет считать появление этих значений случайными событиями. Количество информации в этом случае определяет, насколько полно можно судить о значениях параметра x по полученным результатам контроля.

Качество измерений, а также передачи информации

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

измерительными приборами или каналами ИИС принято характеризовать не их точностью, а размером допущенных погрешностей. **Погрешностью** называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Различают абсолютную и относительную погрешности измерения.

Абсолютная погрешность измерения Δx равна разности между результатом измерения $x_и$ и истинным значением измеряемой величины x:

$$\Delta x = x_и - x.$$

Относительная погрешность измерения δ представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} 100.$$

В измерительной технике используется также понятие **приведенной погрешности**

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_к} 100.$$

где $x_к$ — постоянная величина разности конечных значений пределов измерения.

По приведенной погрешности определяется одна из важнейших характеристик прибора — **класс точности,** который выражается числом, выбираемым из ряда следующих чисел: $1 \cdot 10^n$; $1{,}5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2{,}5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где $n = 1; 0; -1; -2$ и т. д.

У приборов с указанным классом точности основная приведенная погрешность в рабочем диапазоне шкалы, выраженная в процентах, не превышает значения, соответствующего классу точности.

Другой общей характеристикой электроизмерительных приборов является чувствительность. **Чувствительностью прибора** S к измеряемой величине x называется производная от перемещения указателя a по измеряемой величине x:

$$S = \frac{da}{dx} = F(x). \qquad (8.1)$$

Выражение (8.1) характеризует чувствительность прибора в данной точке шкалы. Если чувствительность по-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

стоянна, т. е. не зависит от измеряемой величины, то ее можно определить как $a/\bar{x}$. Чувствительность постоянна у приборов с равномерной шкалой. Чувствительность прибора имеет размерность, зависящую от характера измеряемой величины.

Величина, обратная чувствительности, $C=\frac{1}{S}$ называется **ценой деления** (постоянной) прибора. Она равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы.

Электроизмерительные приборы характеризуются высоким быстродействием. Под **быстродействием** прибора понимается отрезок времени от момента скачкообразного изменения измеряемого параметра до момента, когда отклонение указателя прибора от нового установившегося состояния не превысит допустимой погрешности прибора. Для аналоговых приборов это время, согласно ГОСТу, не должно превышать 4 с.

Цифровые приборы характеризуются **временем измерения,** под которым понимают время с момента изменения измеряемой величины или начала цикла измерения до момента получения нового результата на отсчетном устройстве с нормированной погрешностью.

Важным показателем прибора является его надежность. Под **надежностью** электроизмерительных приборов понимают способность их сохранять заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Если значение одной или нескольких характеристик прибора выходит из данного диапазона предельных значений, то считают, что имеется отказ. Количественной мерой надежности является минимальная вероятность безотказной работы прибора в заданных промежутках времени и условиях работы. **Вероятностью безотказной работы** называется вероятность того, что в течение определенного времени непрерывной работы не произойдет ни одного отказа. Время безотказной работы указывается в техническом паспорте прибора.

Погрешности имеют систематическую и случайную составляющие.

Под **систематическими** понимают погрешности, остающиеся постоянными или закономерно изменяющимися при повторных измерениях. Примером систематических

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

погрешностей является погрешность градуировки прибора. Систематические погрешности возникают при воздействии на средства измерения внешних факторов (например, колебания температуры, давления среды, напряжения питания). Систематические погрешности могут быть учтены и, следовательно, исключены или значительно уменьшены введением соответствующих поправок.

Случайными называются погрешности, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные погрешности не могут быть исключены опытным путем, но их влияние на результат измерения может быть теоретически учтено и уменьшено путем многократных измерений величин в одинаковых условиях. При систематических погрешностях измерений, близких к нулю, наиболее достоверным значением измеряемой величины будет среднее арифметическое из полученных значений

$$x_{ср} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n},$$

где x_1, x_2, x_n — результаты отдельных измерений; n — число измерений

При неограниченно большом числе измерений $x_{ср}$ стремится к истинному значению измеряемой величины. Для характеристики частоты появления случайной величины (в данном случае это погрешность измерения) теория вероятности предлагает пользоваться законом распределения вероятностей этой величины.

В практике электрических измерений используются различные законы распределения. Одним из наиболее распространенных законов распределения случайных погрешностей является нормальный закон (закон Гаусса).

Математическое выражение нормального закона имеет вид

$$P(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2}, \qquad (8.2)$$

где $P(\delta)$ — плотность вероятности случайных погрешностей δ; σ — среднее квадратическое отклонение.

При $\delta = 0$

$$P(\delta) = 1/\sigma\sqrt{2\pi}.$$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

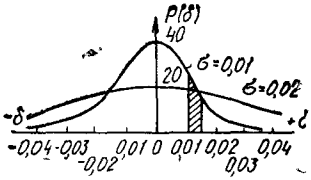


Рис. 8.1. Кривая нормального закона распределения случайных погрешностей

Среднее квадратическое отклонение может быть выражено через случайные отклонения результатов наблюдений ρ:

$$\sigma \approx \sqrt{\rho_1^2+\rho_2^2+\ldots+\rho_n^2/(n-1)},$$

где

$$\rho_1 = x_1 - x_{ср};\quad \rho_2 = x_2 - x_{ср};\quad \ldots;\quad \rho_n = x_n - x_{ср}.$$

Характер кривых, описываемых уравнением (8.2) для двух значений σ, показан на рис. 8.1. Как видим, чем меньше δ, тем чаще встречаются малые случайные погрешности, т. е. тем точнее выполнены измерения.

Если известен закон распределения случайных погрешностей, то можно определить вероятность появления погрешности δ, не выходящей за некоторые заранее принятые границы. Этот интервал называют **доверительным,** а характеризующую его вероятность — **доверительной.** Доверительный интервал выбирают в зависимости от конкретных условий измерений. Так, например, при нормальном законе распределения случайных погрешностей часто пользуются доверительным интервалом от $+3\sigma$ до -3σ, для которого доверительная вероятность равна 0,9973. Это означает, что только одна из 370 погрешностей абсолютной величины будет больше 3σ. Так как практически число отдельных измерений редко превышает несколько десятков, значение 3σ считается максимально возможной случайной погрешностью.

Для оценки точности результата измерения можно использовать так называемую **вероятную погрешность,** относительно которой при повторных измерениях какой-либо величины имеются случайные погрешности, одна половина которых по абсолютной величине меньше вероятной погрешности, а другая больше ее. При нормальном законе распределения случайных погрешно-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

стей вероятная погрешность может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon = \frac{2}{3}\sigma = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{\Sigma \rho_i^2}{n-1}}.$$

Указанный способ определения доверительных интервалов справедлив только при большом количестве измерений ($n > 20 \div 30$). Практически величину ε приходится чаще всего определять по результатам значительно меньшего числа измерений, используя при нормальном законе распределения коэффициенты Стьюдента t_n, которые зависят от задаваемой доверительной вероятности P и количества измерений n.

Для определения доверительного интервала среднюю квадратическую погрешность σ надо уменьшить на коэффициент Стьюдента. Окончательный результат измерения составит:

$$x = x_{ср} \pm t_n \sigma.$$

В практике измерений встречаются и другие законы распределения, которые могут быть установлены на основании статистической обработки опытных данных, например закон равномерной плотности.

Обычно при измерении какой-либо величины имеется несколько источников случайных погрешностей с различными законами распределения вероятностей. Закон распределения суммарной погрешности можно считать нормальным, если соблюдены условия возможности применения центральной предельной теоремы теории вероятностей.

Центральная теорема теории вероятностей формулируется следующим образом: если имеется достаточно большое число независимых случайных величин, то сумма их будет подчиняться нормальному закону распределения независимо от законов распределения каждой из них. Практически центральная теорема может применяться при четырех-пяти слагаемых.

Анализ дезинформационного действия случайных помех с различными законами распределения вероятностей показывает, что вносимая помехой дезинформация определяется не только мощностью этой помехи, но зависит от закона распределения этой помехи. Тео-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

рема К. Шеннона утверждает, что если помеха в вероятностном смысле не зависит от сигнала, то независимо от закона распределения и мощности сигнала дезинформационное действие помехи определяется ее энтропией

$$H(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \ln P(x)\, dx,$$

где $H(x)$ — энтропийное значение погрешности.

Согласно К. Шеннону, количество информации определяется как разность энтропий

$$I = H(x) - H(x/x_n),$$

где $H(x)$ — энтропия значений измеряемой величины до измерения; $H(x/x_n)$ — энтропия неопределенности действительного значения x в интервале неопределенности вокруг полученного после измерения показания x_n.

Единицы измерения энтропии и количества информации одни и те же, однако числовое значение энтропии или информации зависит от основания используемых логарифмов. При теоретическом анализе, интегрировании и дифференцировании математических выражений удобно использовать натуральные логарифмы, и тогда энтропия и количество информации получаются в так называемых натуральных единицах (сокращенно — нит). При анализе цифровых машин и других устройств, работающих в двоичном коде, удобнее использовать двоичные логарифмы, и тогда энтропия и количество информации получаются в двоичных единицах (сокращенно — бит). При анализе измерительных устройств, работающих в большинстве случаев в десятичном (или двоично-десятичном) коде, удобнее использовать десятичные логарифмы и десятичные единицы энтропии и информации (сокращенно — дит).

Соотношение между этими единицами примерно следующее: 1 дит = 2,3 нит = 3,3 бит.

В теории измерительной техники одним из основных является понятие «**Измерительное преобразование**», которое представляет собой отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

Применение измерительных преобразований являет-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

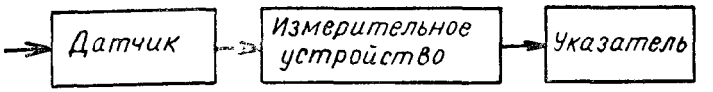


Рис. 8.2. Простейшая функциональная схема измерительного прибора

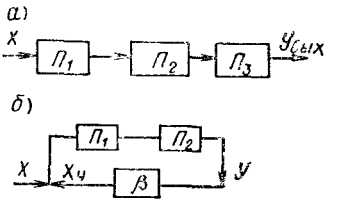


Рис. 8.3. Схемы прямого (*а*) и обратного преобразования (*б*)

ся единственным методом практического построения любых измерительных устройств, так как любое измерительное устройство использует те или иные функциональные связи между входной и выходной величинами. Эти функциональные связи могут быть относительно сложными (например, в приборах для электрических измерений неэлектрических величин) и весьма простыми, если понимать под функциональным преобразованием и масштабное преобразование (например, в усилителях).

Измерительные преобразования выполняются в **измерительных преобразователях**, основанных на определенном физическом принципе и предназначенных для выполнения частного измерительного преобразования. Основное требование к измерительным преобразователям — точная передача информации, т. е. минимальные потери информации. Одно и то же измерительное преобразование может быть выполнено целым рядом различных по принципу измерительных преобразователей. Например, измерительное преобразование температуры T в механическое перемещение Δl может быть выполнено и ртутным термометром, и биметаллическим элементом, и термопарой с включенным на ее выходе милливольтметром (см. § 8.3). Поэтому понятие «измерительное преобразование» значительно более широкое, чем понятие «измерительный преобразователь».

Метод измерений, т. е. совокупность отдельных измерительных преобразований, необходимых для восприятия информации о размере измеряемой величины и

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

преобразования ее в такую форму, которая необходима получателю информации, наиболее наглядно можно изобразить в виде функциональной схемы (рис. 8.2).

Измерительный прибор конструктивно чаще всего разделяют на три самостоятельных узла: датчик, измерительное устройство и указатель (или регистратор), которые могут размещаться отдельно друг от друга и соединяться между собой кабелем или другой линией связи.

Датчик прибора для измерения той или иной величины представляет собой конструктивную совокупность нескольких измерительных преобразователей, размещаемых непосредственно у объекта измерения.

Требования и эксплуатационные условия на объекте измерения обычно более жесткие (повышенная температура, вибрации, недостаток места), чем в месте отсчета или регистрации. Поэтому непосредственно в точку пространства, где необходимо произвести измерение, помещается минимум измерительных преобразователей, которые могут воспринять информацию о значении величины и преобразовать ее в вид, пригодный для передачи на расстояние.

Используя дистанционную передачу, остальную часть измерительной аппаратуры (измерительные цепи, усилитель, источники питания и т. д.), называемую обычно **измерительным устройством,** выполняют в виде самостоятельного конструктивного узла, который может быть размещен в более благоприятных условиях. Требования к последней части измерительного прибора, т. е. к его **указателю** (регистратору), отличаются от указанных выше и определяются удобством использования полученной информации.

Функциональные схемы измерительных приборов могут быть значительно сложнее представленной на рис. 8.2. Однако основной принцип, заключающийся в том, что любое измерительное устройство представляет собой канал приема и преобразования информации о размере измеряемой величины, образованный последовательной цепью более простых или более сложных измерительных преобразователей, всегда остается справедливым.

В САК датчик называют **первичным прибором**. Он

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

соединяется линией связи с **вторичным прибором**, объединяющим измерительное устройство и указатель. Один и тот же вторичный прибор может использоваться для контроля нескольких параметров. В более общем случае к одному вторичному прибору подключается несколько первичных преобразователей — датчиков.

С метрологической позиции, т. е. с точки зрения состава результирующей погрешности и зависимости ее от погрешностей отдельных преобразователей, методы измерительных преобразований разделяются на два основных, принципиально отличающихся класса: метод прямого преобразования (по иной терминологии — метод непосредственной оценки) и метод уравновешивающего преобразования.

Метод прямого преобразования характеризуется тем, что все преобразования информации производятся только в одном, прямом направлении — от входной величины x через ряд измерительных преобразователей $П_1$, $П_2$,.. к выходной величине $y_{вых}$ (рис. 8.3, *а*).

Метод прямого преобразования отличается сравнительно низкой точностью, так как по измерительной цепи передается вся энергия, получаемая от объекта измерения. Результирующая погрешность всего канала определяется в равной мере погрешностями всех преобразователей.

В методе уравновешивания используются две цепи преобразователей: цепь прямого преобразования $П_1$, $П_2$,... и цепь обратного преобразования, состоящая из преобразователя β (рис. 8.3, *б*). С помощью цепи β создается величина x_y, однородная с величиной x и уравновешивающая ее, в результате чего на вход цепи $П_1$, $П_2$,... поступает только небольшая часть входной преобразуемой величины x, и эта цепь служит лишь для обнаружения степени неравновесия.

Вторичные приборы в соответствии с примененным в них методом измерения разделяются на приборы прямого преобразования и приборы уравновешивания.

Измерительные приборы прямого преобразования отличаются простотой конструкции (следовательно, большей надежностью), меньшими массой, габаритами и стоимостью, имеют высокое быстродействие, благодаря чему широко применяются при измерениях. Однако

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

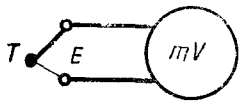


Рис. 8.4. Схема измерения температуры с помощью термопары и милливольтметра

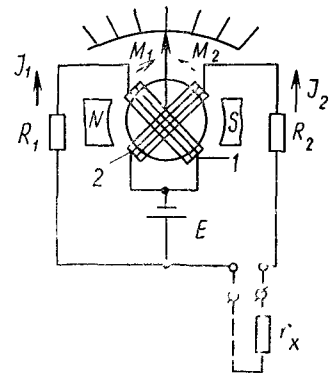


Рис. 8.5. Схема логометра

эффективность «извлечения» информации из потока энергии, получаемого от объекта измерения, в этих приборах достаточно мала, чем объясняется их относительно низкая точность.

По методу прямого преобразования построен прибор для измерения температуры с помощью термопары и милливольтметра (рис. 8.4). В замкнутом контуре, состоящем из термопары и рамки милливольтметра mV, в процессе измерения существует ток, величина которого определяет угол поворота подвижной системы прибора. Поэтому изменение электрических характеристик цепи, вызванное, например, изменениями внешних условий, приводит к значительным погрешностям.

Основным принципом повышения эффективности выделения информации в цепях прямого преобразования является согласование сопротивлений. В рассматриваемом приборе для получения рамкой милливольтметра с сопротивлением $R_р$ наибольшей мощности от термопары с сопротивлением R_i необходимо, чтобы $R_i = R_р$.

Приборы прямого преобразования могут содержать и более сложные измерительные цепи, например в виде делителей (тока или напряжения), неравновесных мостов.

На рис. 8.5 представлена схема прибора прямого преобразования — логометра. Логометр — магнито-электрический прибор постоянного тока с электрическим противодействующим моментом. Подвижная часть логометра выполнена в виде двух жестко скрепленных

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

между собой рамок *1* и *2*, по обмоткам которых протекают токи I_1 и I_2, подводимые к обмоткам с помощью безмоментных токопроводов. Моменты M_1 и M_2 направлены навстречу друг другу и зависят от угла поворота α подвижной части, т. е. являются функцией угла α. Технически это достигается неравномерностью магнитного поля в зазоре. При установившемся равновесии моменты M_1 и M_2 равны:

$$k_1 F_1(\alpha) I_1 = k_2 F_2(\alpha) I_2,$$

где

$$k_1 F_1(\alpha) I_1 = M_1, \quad \text{а} \quad k_2 F_2(\alpha) I_2 = M_2.$$

Следовательно,

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right),$$

т. е. логометр измеряет отношение силы токов. Если сопротивление R цепи одной рамки постоянно, а сопротивление r_x в цепи второй рамки связано функциональной зависимостью с контролируемым параметром (например, r_x представляет собой термометр сопротивления), то угол отклонения логометра α является функцией измеряемой температуры. При увеличении измеряемой температуры увеличивается сопротивление обмотки термометра, уменьшается сила тока I_2 и рамки поворачиваются по часовой стрелке. Различным температурам измеряемой среды соответствуют различные углы поворота рамок и укрепленной на них стрелки.

Основное достоинство логометра — независимость показаний прибора от величины питающего напряжения E, нестабильность которого приводит к значительным погрешностям измерений в приборах прямого преобразования.

§ 8.2. Вторичные приборы систем автоматического контроля

В приборах уравновешивающего преобразования значительно эффективнее используется энергия, получаемая от объекта измерения, что обеспечивает большую точность и более широкий рабочий диапазон, одна-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

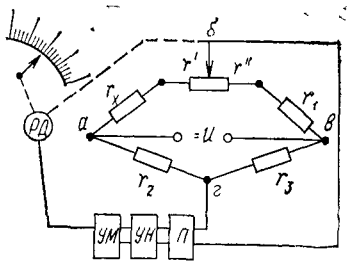


Рис. 8.6. Принципиальная схема автоматического моста

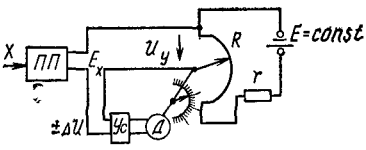


Рис. 8.7. Схема автоматического потенциометра

ко значительно уменьшается быстродействие и усложняется конструкция, а следовательно, увеличиваются масса, объем, стоимость и снижается надежность приборов. Тем не менее приборы все шире используются на практике, так как обеспечивают показатели качества измерения, недостижимые для приборов прямого преобразования.

В системах ТГС и СКМ широко применяются приборы уравновешивания с мостовыми равновесными и компенсационными измерительными схемами.

В качестве вторичного прибора используется мост с автоматическим процессом уравновешивания — **автоматический мост** (рис. 8.6). Плечи моста *аб*, *бв*, *аг* и *гв* содержат соответственно сопротивления r_x+r'; r_1+r''; r_2; r_3. Величина r_x представляет собой сопротивление датчика того параметра, для измерения которого предназначен мост (например, термосопротивление при измерении температуры), а величины r', r'' — части регулируемого реохорда, ползунок которого связан через передачу с ротором реверсивного двигателя РД. На диагональ моста *ав* подается напряжение от источника напряжения постоянного тока. Питание может осуществляться и от источника переменного тока; в этом случае отпадает необходимость во включении преобразователя П.

Если мост уравновешен, то потенциалы точек *б* и *г* равны, т. е. $U_{бг}=\varphi_б-\varphi_г=0$, напряжение в измерительную схему не поступает и ротор двигателя неподвижен.

Условие равновесия моста может быть записано следующим образом:

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$R_{аб} R_{гв} = R_{бв} R_{аг},$$

т. е.

$$(r_x + r') r_3 = (r_1 + r'') r_2,$$

откуда

$$r_x + r' = (r_1 + r'') \frac{r_2}{r_3}.$$

При изменении контролируемого параметра изменяется сопротивление датчика r_x, мост выходит из состояния равновесия и на диагонали *бг* появляется напряжение, величина и направление которого зависят от значения r_x. Это напряжение преобразуется в напряжение переменного тока преобразователем П, усиливается усилителями переменного тока (УН — усилитель напряжения, УМ — усилитель мощности) и подается на реверсивный двигатель РД. При вращении ротор двигателя передвигает ползунок реохорда в сторону достижения равновесия моста и одновременно поворачивает указатель, а при записи измеряемой величины перемещает перо, записывающее на диаграмме ее значение. Ротор двигателя будет вращаться до достижения равновесия моста.

Если автоматический мост предназначен для управления, то контактные или регулирующие устройства приводятся в действие тем же двигателем. Результаты измерения не зависят от величины напряжения питания. В момент измерения ток в измерительной диагонали отсутствует, что позволяет получить высокую точность измерения.

Погрешность прибора зависит от погрешности уравновешивающего преобразования и от погрешности указателя. Точность прибора повышается при увеличении чувствительности усилителя и его коэффициента усиления. Погрешность автоматических мостов не превышает $\pm 0{,}5\%$, а в некоторых случаях и $\pm 0{,}2\%$ предела измерения.

В ТГС и СКМ автоматические мосты применяются для измерения температуры, а также давления, расхода вещества, уровня жидкости, влажности и многих других неэлектрических величин, изменение которых может быть преобразовано в изменение электрического сопро-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

тивления соответствующих датчиков. Технические характеристики автоматических мостов приведены в табл. 8.1.

В качестве вторичных приборов широко применяются также **автоматические потенциометры**, в которых используется компенсационная схема измерения. Автоматические потенциометры применяют для измерения электрических и неэлектрических величин, которые могут быть предварительно преобразованы в напряжение или ЭДС постоянного тока.

Контролируемая величина x с помощью первичного преобразователя ПП преобразуется в ЭДС E_x, поступающую на вход автоматического потенциометра (например, термоЭДС термопары при контроле температуры) (рис. 8.7). Величина ЭДС E_x сравнивается с напряжением U_y, разность между ними $\pm\Delta U$ подается на вход усилителя Ус, а затем на вход двигателя Д.

Уравновешивающее напряжение U_y снимается с выхода цепи обратного преобразования, образованного источником стабильного напряжения E и реохордом R. Входной величиной цепи обратного преобразования является угол поворота вала двигателя $Д$, отсчитываемый по указателю прибора. Цепь прямого уравновешивания составляют усилитель Ус и двигатель $Д$.

При равенстве ЭДС E_x и уравновешивающего напряжения U_y ротор двигателя неподвижен и отсчетное устройство, проградуированное в значениях измеряемого параметра, показывает его мгновенное значение. При изменении сигнала на входе нарушается компенсация, на вход усилителя Ус подается $\Delta U = E_x - U_y$ (величина и направление которого определяются значением контролируемого параметра). После усиления напряжение сигнала поступает на двигатель, который перемещает подвижной контакт реохорда до наступления момента компенсации, соответствующего новому значению контролируемого параметра.

Основными источниками погрешностей в рассматриваемых приборах являются случайная погрешность от неполного уравновешивания вследствие некоторого порога трогания двигателя, погрешность реохорда и погрешность от нестабильности источника напряжения E. Для уменьшения последней составляющей ис-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 8.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Информационная функция	Модификация прибора	Ширина шкалы записи, мм	Электрическая ветвь ГСП						Технические данные			
			конструктивная база	источник				габариты лицевой части, мм	класс точности		быстродействие, с	число точек контроля
				датчик напряжения и тока	потенциометрический сигнал	сопротивление	дифференциально-трансформаторный датчик		показания	записи		
Показывающие	Профильные	160	Комплекс АСК	М-1730	МВУ6-41	МВУ6-42	—	160××30	0,5	—	2,5	1; 3; 4; 8; 12
	Стрелочные	300		КПУ-1	КПП-1	КПМ-1	КПД-1	160××200	0,5	—	2,5; 5	1
	С вращающейся шкалой	500		КВУ-1	КВП-1	КВМ-1	КВД-1	240××160	1,0	1,0	2,5; 5	1
Показывающие и самопишущие	Ленточные	100	Комплекс КС	КСУ-1	КСП-1	КСМ-1	КСД-1	160××200	1,0	1,0	2,5; 5	1
		160		КСУ-2	КСП-2	КСМ-2	КСД-2	240××320	0,5	1,0	2,5; 10	1; 3; 6; 12
		250		КСУ-4	КСП-4	КСМ-4	КСД-4	400××400	0,25	0,5	1; 2,5; 10	1; 3; 6; 12
	Дисковые	d=300		КСУ-3	КСП-3	КСМ-3	КСД-3	320××320	0,5	1,0	5; 16	1

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

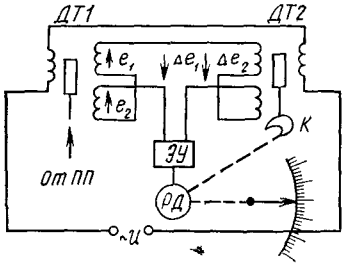


Рис. 8.8. Схема автоматического дифференциально-трансформаторного прибора

пользуются тщательно стабилизированные электронные источники опорного напряжения или производится периодическая регулировка.

Приборостроительной промышленностью выпускаются автоматические потенциометры, работающие в комплекте с датчиками постоянного напряжения 0—1 и 0—10 В (модификации КПУ, КВУ, КСУ) и датчиками постоянного тока 0—5 и 0—20 мА, а также с одной или несколькими термопарами стандартной градуировки (модификации КПП, КВП, КСП) (см. табл. 8.1).

В качестве вторичных приборов в системах ТГС и СКМ находят широкое применение **автоматические дифференциально-трансформаторные приборы** (рис. 8.8). Эти приборы работают с датчиком, имеющим специальный дифференциальный трансформатор (ДТ1) с подвижным сердечником, выполненным из мягкой стали. Сердечник связан с чувствительным элементом первичного прибора. Во вторичном приборе имеется аналогичный трансформатор ДТ2, сердечник которого перемещается профилированным кулачком К. Вторичные обмотки трансформаторов, каждая из которых состоит из двух включенных встречно секций, т. е. $\Delta e = e_1 - e_2$, выполнены по компенсационной схеме. По первичным обмоткам ДТ1 и ДТ2 протекает одинаковый ток, так как они включены последовательно и питаются переменным напряжением. При одинаковом положении сердечников катушек во вторичных катушках индуктируются равные друг другу ЭДС ($\Delta e_1 = \Delta e_2$), а вследствие встречного включения вторичных обмоток эти ЭДС компенсируются и на вход электрического усилителя ЭУ сигнал не поступает.

При рассогласованном положении сердечников, что

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вызывается перемещением сердечника катушки датчика при изменении контролируемого параметра, нарушается равенство ($\Delta e_1 \neq \Delta e_2$), на вход усилителя подается напряжение, равное их разности. Величина и фаза этого напряжения зависят от величины и направления рассогласования. Это переменное напряжение, усиленное электронным усилителем, приводит во вращение фазочувствительный двигатель, который с помощью кулачка перемещает плунжер в катушке прибора до получения равенства напряжений, индуктируемых во вторичных обмотках обеих катушек. Одновременно двигатель перемещает отсчетное устройство прибора. Двигатель останавливается при достижении согласования положений плунжеров ДТ1 и ДТ2.

Автоматические дифференциально-трансформаторные приборы (см. табл. 8. 1) применяются для измерения неэлектрических величин—давления, расхода, уровня, напора и т. п. (модификации КПД, КВД, КСД).

По устройству и назначению вторичные приборы делятся на две группы:

а) показывающие, дающие информацию о мгновенном значении измеряемого параметра;

б) показывающие и самопищущие, осуществляющие мгновенное измерение и фиксирующие величину измеряемого параметра на диаграммной бумаге (см. табл. 8.1).

Электрическая ветвь ГСП оснащена комплексом вторичных приборов КС, который содержит шесть групп приборов: две группы — показывающие и четыре— самопишущие. К первой группе КП-1 относятся стрелочные показывающие приборы, показания которых отсчитываются с помощью указателя, перемещающегося относительно шкалы. Шкала расположена по окружности и охватывает угол 315°. Приборы второй группы КВ-1 имеют вращающуюся шкалу, нанесенную на цилиндрическую поверхность. Третью, четвертую и пятую группы составляют самопишущие приборы, фиксирующие результат измерений на диаграммной ленте. Запись осуществляется на ленты шириной 100 мм (КС-1 — миниатюрное исполнение), 160 мм (КС-2— малогабаритное исполнение) и 250 мм (КС-4) в прямоугольных координатах. Скорость движения диа-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

граммной ленты может изменяться от 20 до 720 мм/ч. К шестой группе относятся самопишущие приборы, в которых запись ведется в полярных координатах на дисковой диаграмме. Частота вращения диаграммного диска постоянна — 1 об/сут. Угол поворота пропорционален времени измерения.

Приборы каждой группы выпускаются в четырех модификациях, имеющих соответствующие измерительные схемы. Приборы КВ-1, КС-2 и КС-4 могут выпускаться многоточечными, при этом они контролируют 3, 6, 12 однотипных датчиков, а на диаграмме отметки о величине измеряемого параметра печатаются циклично точками, рядом с которыми цифрами указываются номера датчиков.

В настоящее время разработан комплекс узкопрофильных вторичных показывающих приборов АСК. Они занимают на щитах в 5—10 раз меньшую площадь, чем приборы комплекса КС, и имеют световые указатели — светофильтры, позволяющие выделить зону допустимого изменения технологического показателя.

Приборы АСК легко группируются в блоки, а также выпускаются многоканальными (на 3, 4, 8, 12 измерительных каналов). Многоканальные приборы состоят из модулей, каждый из которых имеет четыре самостоятельные измерительные схемы с общей оптической системой.

Все выпускаемые промышленностью вторичные приборы при необходимости могут быть укомплектованы дополнительным набором специальных устройств. В комплекте с приборами могут поставляться двух- и трехпозиционные сигнальные устройства, которые используются в системах позиционного регулирования, преобразователи сигналов ГСП постоянного и переменного тока, частотные и пневматические, а также реостатные преобразователи для систем регулирования, реостатные задатчики регулирования.

В зависимости от сигнала первичного прибора выбирается тип измерительной схемы, а в зависимости от информационной функции прибора и требуемой точности контроля принимается конструктивное решение вторичного прибора. Шкала прибора определяется по

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

каталогу таким образом, чтобы верхний предел измерений приблизительно соответствовал двум третям шкалы, после чего устанавливается набор необходимых дополнительных устройств.

§ 8.3. Первичные преобразователи (датчики)

Современная техника автоматического контроля сталкивается с необходимостью контроля самых различных величин как по своей природе, так и по диапазонам измерений, скоростям изменений и т. п. Для облегчения оптимального выбора и использования датчиков в САК необходима их классификация.

По принципу действия датчики, применяемые в электрических САК, можно разделить на две группы: параметрические и генераторные.

В параметрических датчиках (термосопротивлениях, тензосопротивлениях, фотосопротивлениях, емкостных датчиках) контролируемая величина преобразуется в параметр электрической цепи: сопротивление, индуктивность, емкость, взаимную индуктивность. Для обнаружения изменения параметра цепи под действием контролируемой величины необходимы вспомогательные источники электрической энергии.

В генераторных датчиках различные виды энергии непосредственно преобразуются в электрическую. К генераторным относятся термоэлектрические датчики (термопары), индукционные, основанные на явлении электромагнитной индукции, пьезоэлектрические, фотоэлектрические и т. п.

По виду выходной величины датчики, применяемые в САК, можно разделить на группы, в которых контролируемый параметр преобразуется в следующие величины:

1) омическое сопротивление;
2) емкость;
3) индуктивность;
4) величину постоянного тока (напряжения);
5) амплитуду переменного тока (напряжения) и т. д.

Такая классификация позволяет выбрать наиболее пригодные измерительные устройства.

. . .

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

По виду входных величин датчики, используемые в системах ТГС и СКМ, разделяют на следующие основные группы:

1) датчики температуры и потоков теплоты;
2) датчики влажности и энтальпии влажного воздуха;
3) датчики уровня;
4) датчики давления;
5) датчики расхода;
6) датчики для анализа состава вещества.

Такая классификация облегчает выбор датчиков для заданных контролируемых параметров.

Датчики являются одним из важнейших функциональных элементов всякой системы контроля. Их свойства и характеристики часто во многом определяют работу САК в целом.

Основными характеристиками первичных преобразователей являются:

1) *вид функциональной зависимости* между изменяющимися входной x и выходной y величинами — $y=f(x)$;

2) *чувствительность,* которая определяется как отношение изменения выходной величины Δy к вызвавшему это изменение приращению входной величины Δx ($S=\Delta y/\Delta x$), и *порог чувствительности* — наименьшее изменение входной величины, вызывающее изменение выходного сигнала;

3) *основная погрешность преобразования* — максимальная разность между получаемым значением выходного сигнала и его номинальным значением, соответствующим данному значению измеряемой величины при нормальных внешних условиях, выражаемая в процентах величины диапазона изменения сигнала;

4) *дополнительная погрешность* — погрешность, вызываемая отклонением внешних условий от нормальных значений: температура 20 ± 5°С, относительная влажность 60 ± 20% и т. д.

При выборе датчиков необходимо учитывать, что во время эксплуатации они находятся в особо тяжелых условиях. Размещают их непосредственно на объекте контроля, часто при резко изменяющихся температурах, давлениях, вибрациях, агрессивном действии кон-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

тролируемых сред. В связи с этим требуется тщательный выбор принципов построения, конструктивных элементов и материалов с целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности.

Измерение температуры

В технике автоматизации систем ТГС и СКМ одним из наиболее распространенных контролируемых параметров является температура жидкостей и газов. Приборы для измерения температуры называются термометрами. В автоматических системах измерение температуры основано, как правило, на измерении физических свойств тел, функционально связанных с температурой. По принципу действия термометры подразделяются на термометры расширения (жидкостные и механические), манометрические, термоэлектрические, термометры сопротивления.

Термометры расширения измеряют температуру по тепловому расширению жидкости (жидкостные) или твердых тел (дилатометрические и биметаллические).

В жидкостных стеклянных термометрах в зависимости от величины измеряемой температуры в качестве рабочего вещества применяются ртуть (диапазон измеряемых температур от —30 до +600°С), спирт (от —130 до +60°С), керосин (от +200°С). Цена деления жидкостных термометров 0,5; 1; 2; 5; 10°С (в зависимости от пределов измерения). Погрешность показаний не превышает одного деления шкалы.

Выпускаются 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 типов ТЭК и ТПК представляют собой стеклянные датчики, заполненные ртутью. Они снабжены одним, двумя или тремя контактными устройствами. При изменении температуры происходит электрическое замыкание (размыкание) контактов. В датчиках типа ТЭК заданные значения контролируемых температур являются постоянными, а в термометрах типа ТПК имеется контактное устройство с переменным заданием контролируемой темпера-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

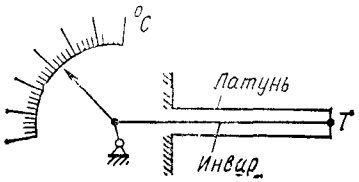


Рис. 8.9. Схема дилатометрического датчика

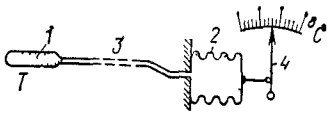


Рис. 8.11. Схема манометрического термометра

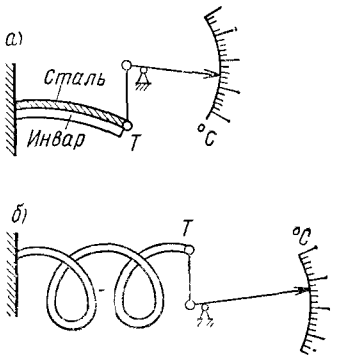


Рис. 8.10. Схема биметаллического термометра в виде пластины (*а*) и в виде спирали (*б*)

туры, причем точка задания может находиться в пределах всего рабочего интервала термометра. Электроконтактные термометры снабжены шкалой. Общий (независимо от модификации) диапазон контролируемых температур от 0 до +300°С, цена деления шкалы 1 или 2°С, допустимые отклонения не превышают одного наименьшего деления шкалы, допустимые отклонения срабатывания контактного устройства от 1 до 5°С.

К механическим относятся дилатометрические и биметаллические датчики.

Принцип действия **дилатометрических термометров** основан на разности линейного расширения двух твердых тел с различными температурными коэффициентами расширения. Для изготовления этих термометров используют материалы со значительно отличающимися коэффициентами линейного расширения, например инвар (сплав никеля и железа), коэффициент линейного расширения которого практически равен нулю, и латунь с большим коэффициентом линейного расширения.

Дилатометрический термометр состоит из инварного стержня, латунной трубки и показывающей стрелки (рис. 8.9). Один конец инварного стержня жестко соединен с дном латунной трубки, а другой свободно перемещается. В зависимости от температуры окру-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

жающей среды возникает разность удлинений трубки и стержня. При этом свободный конец стержня отклоняет стрелку прибора. Дилатометрические термометры применяются при измерении температур в диапазоне 0—500°С.

Дилатометрическими терморегулирующими устройствами являются датчики-реле типа ТУДЭ. Полученное приращение стержня преобразуется в упругую деформацию пружины и вызывает замыкание или размыкание контактов. Датчики температуры типа ТУДЭ выпускаются в двенадцати модификациях; класс точности 1,5; 2,3; 4,0.

Биметаллический датчик представляет собой пластину, сваренную из двух металлов с различными температурными коэффициентами расширения. Наиболее часто употребляемая пара сталь — инвар. Принципиальная схема чувствительного элемента, состоящего из консольно укрепленной пластины, показана на рис. 8.10,*а*.

При $\alpha_1 > \alpha_2$ (α — температурный коэффициент линейного расширения, незакрепленный конец пластинки перемещается при изменении температуры T окружающей среды. Перемещение конца пластинки через рычажную систему передач приводит в движение показывающую стрелку прибора. Показания биметаллического термометра могут регистрироваться на диаграммной ленте.

Для увеличения чувствительности иногда биметаллические термометры выполняют в виде спирали (рис. 8.10,*б*).

В биметаллических датчиках-реле типа ДТКБ свободный конец биметаллического чувствительного элемента замыкает или размыкает контакты при изменении контролируемой температуры. Точность срабатывания контактной группы не более $\pm 0{,}5$ °С.

Механические термометры просты по конструкции и надежны в работе. Однако они обладают недостаточной точностью вследствие влияния остаточных деформаций и значительной инерционностью. Применяются в основном в системах автоматического регулирования, например СКВ, где необходимы конструктивно

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

несложные датчики температуры, не требующие специальных усилителей-преобразователей.

Принцип действия **манометрических термометров** основан на зависимости от температуры давления среды, находящейся в замкнутом объеме. Манометрический термометр (рис. 8.11) представляет собой замкнутую систему, в которую входят термобаллон *1*, погружаемый в измеряемую среду, капилляр *3*, упругая манометрическая пружина *2*, связанная со стрелкой прибора *4*, шкала, проградуированная в °С.

В зависимости от вида среды, находящейся в замкнутой системе, манометрические термометры разделяются на *жидкостные* (рабочее вещество — ртуть, кремний, органическая или полиметилсилаксановая жидкость), *газовые* (наполнитель — азот или аргон), *конденсационные* (или паровые), в которых используются низкокипящие жидкости — фреон, ацетон, этиловый спирт. При увеличении температуры измеряемой среды, в которую погружен термобаллон, повышается давление в замкнутой системе. Это изменение давления по соединительной трубке (дистанционному капилляру) передается одновитковой манометрической пружине, один конец которой жестко закреплен в держателе, а второй, перемещаясь под действием избыточного давления, поворачивает стрелку относительно шкалы.

Термобаллон выполняется из стали. Манометрические термометры выпускаются с различной длиной соединительного капилляра (наибольшая длина 60 м). Длина капилляра выбирается в зависимости от удаления прибора от места установки термобаллона. Для защиты от механических повреждений капилляр, изготовленный из латунной трубки, покрыт по всей длине полиэтиленовой оболочкой или стальной лентой.

Конденсационные манометрические термометры нельзя использовать 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 получается значительная температурная погрешность.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Преимущества газовых термометров — сравнительно малая температурная погрешность и наибольшая дистанционность за счет соединительной капиллярной трубки. Достоинства жидкостных термометров — малая инерционность и небольшие размеры термобаллона, парожидкостных — небольшая температурная погрешность и сравнительно малые размеры термобаллона.

Точность измерения манометрических термометров зависит от колебаний температуры среды, окружающей соединительный капилляр. При отклонении температуры среды от 20 °С (при которой производится градуировка прибора) дополнительная погрешность, %, может быть рассчитана по формуле

$$\Delta = \pm [x + k(t - 20)],$$

где x — половина основной допустимой погрешности, %; k — температурный коэффициент, равный 0,025 для конденсационных приборов, 0,05 — для газовых и 0,075% на 1°С для жидкостных.

Манометрические термометры выпускаются показывающими, самопишущими, сигнализирующими. Класс точности 1; 1,5; 2,5; 4.

Принцип действия **термометров сопротивления** основан на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Зависимость сопротивления проводника от его температуры выражается формулой

$$R = Ae^{\alpha T},$$

где A — постоянный коэффициент; α — температурный коэффициент сопротивления (ТКС); T — температура, К.

Если при некоторой начальной температуре T_0, °С, сопротивление проводника равно R_0, то сопротивление R_t этого проводника при произвольной температуре T, °С, определяется по формуле

$$R_t = R_0 e^{\alpha (T - T_0)}$$

или, пользуясь разложением в степенной ряд и ограничиваясь первыми двумя членами ряда, получим

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)].$$

Материалы, используемые для изготовления термометров сопротивления, должны иметь максимальный и постоянный температурный коэффициент сопротивле-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ния (ТКС), линейную зависимость сопротивления от температуры, обладать хорошей воспроизводимостью свойств и инертностью к воздействиям окружающей среды.

Для изготовления проводниковых термометров сопротивления используют медь, никель платину, вольфрам, которые обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (табл. 8.2), мало изменяющимся в диапазоне 0—150 °С (для никеля и меди) и 0—600°С для платины. При более высоких температурах эти материалы интенсивно окисляются.

ТАБЛИЦА 8.2. НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕРМОМЕТРАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Материал	ТКС в диапазоне 0—100°С, 1/К	Удельное сопротивление при 20°С, Ом·мм²/м	Материал	ТКС в диапазоне 0—100°С, 1/К	Удельное сопротивление при 20°С, Ом·мм²/м
Платина	0,0039	0,105	Никель	0,0069	0,08
Медь	0,00427	0,017	Вольфрам	0,0048	0,055

В качестве чувствительных элементов платиновых термосопротивлений (ТСП) используют платиновую спираль, помещенную в капиллярную керамическую трубку с керамическим порошком, которая находится в защитной арматуре.

Чувствительный элемент медных термосопротивлений (ТСМ) представляет собой бескаркасную безындукционную обмотку из медной проволоки, которая покрыта фторопластовой пленкой и помещена в тонкостенную металлическую гильзу с керамическим порошком. Для повышения интенсивности теплообмена между термометром сопротивления и средой термометр иногда выполняется не из проволоки, а из ленты.

Термометры сопротивления относятся к одним из наиболее точных преобразователей температуры. Погрешность измерения температуры с помощью ТСП может составить 0,001°С.

Для изготовления полупроводниковых термосопротивлений (термисторов) применяются окислы металлов (Mn_2O_3, Cu_2O_3, Fe_2O_3 и др.), которые прессуются и спекаются при высокой температуре. Полупроводнико-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вые термосопротивления в отличие от металлических имеют меньшие размеры и большие значения ТКС. Температурный коэффициент сопротивления термисторов отрицателен и уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры $\alpha = B/T^2$. При 20 °С ТКС составляет 0,02—0,08 1/К.

Температурная зависимость сопротивления термисторов (рис. 8.12) достаточно хорошо описывается формулой

$$R_T = A e^{B/T},$$

где Т — абсолютная температура; A — коэффициент, имеющий размерность сопротивления; B — коэффициент, имеющий размерность температуры.

Термисторы могут иметь самую разнообразную форму: цилиндрическую, в виде дисков, шайб, бусинок и др.

Термисторы типа ММТ-1 и КМТ-1 представляют собой полупроводниковый стержень, покрытый эмалевой краской, с контактными колпачками и выводами. Этот тип термосопротивлений может быть использован только в сухих помещениях.

Термосопротивления типов ММТ-4 и КМТ-4 заключены в металлические капсулы и герметизированы, благодаря чему они могут применяться в условиях любой влажности и даже в жидкостях, не являющихся агрессивными относительно корпуса термосопротивления.

Миниатюрные полупроводниковые термосопротивления типа СТ имеют каплевидную форму с чувствительным элементом, герметизированным стеклом. Они позволяют измерять температуру малых объектов с минимальными искажениями режима. Точность измерения температуры может быть весьма высокой (до 0,001 К) при регулярности поверки один раз в три месяца.

Несмотря на преимущества полупроводниковых термосопротивлений (более высокая чувствительность и большее омическое сопротивление, меньшие габариты и инерционность), их широкое внедрение ограничено рядом недостатков, основными из которых являются их нелинейность и плохая взаимозаменяемость вследствие значительного технологического разброса параметров.

Для обеспечения взаимозаменяемости чувствитель-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

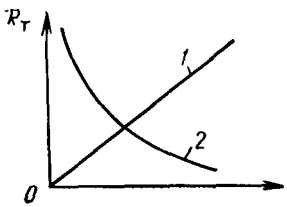


Рис. 8.12. Температурная зависимость сопротивления проволочных термометров (1) и термисторов (2)

ных элементов, улучшения линейности шкал, возможности построения многоканальных приборов применяют различные унифицирующие и линеаризирующие цепи, представляющие параллельно-последовательные включения ПТС с резисторами.

Температура датчика термосопротивления (как проводникового, так и полупроводникового), а следовательно, и его сопротивление определяются многими факторами, главными из которых являются плотность протекающего через датчик тока, температура наружной среды, физические свойства газовой и жидкой среды (ее плотность, теплопроводность и т. п.), скорость движения газовой или жидкой среды и т. п.

Зависимость сопротивления датчика от всех этих факторов используется при каждом измерении различных неэлектрических величин (температуры, скорости движения, концентрации и т. п.). Однако при конструировании датчика температуры необходимо стремиться к тому, чтобы все остальные факторы, являющиеся мешающими, как можно меньше влияли на сопротивление датчика и определяли его погрешности.

При измерении температуры термометры сопротивления используются в комплекте со вторичными приборами, в качестве которых применяются либо стрелочные приборы (омметры и логометры), либо автоматические мосты (в системах автоматического регулирования).

Термоэлектрические термометры (термопары) широко применяются в системах автоматического контроля. Принцип действия термоэлектрических датчиков основан на использовании термоэлектрического эффекта, когда в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников с двумя спаями, возникает ЭДС, если температуру спаев поддерживать различной. Величина

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

этой ЭДС (термоЭДС) зависит от материала проводников и разности температур спаев. Цепь, состоящая из двух разнородных проводников с двумя спаями, называется **термопарой**. Если температуру одного из спаев поддерживать постоянной, то ЭДС, возникающая в термопаре, будет функцией температуры другого спая. Обычно в термопаре спай, подверженный воздействию контролируемой температуры, называется *горячим*, а другой спай — *холодным* (с температурой $T=\text{const}$):

$$E_{AB}(T_1, T_2) = f(T_1) - C = f_1(T_1),$$

где E_{AB} — ЭДС термопары.

Для характеристики различных материалов обычно определяют их термоЭДС в паре с платиной при температуре горячего спая 100 °С и температуре холодного спая 0 °С, а ЭДС термопары из двух разных материалов определяют как разность термоЭДС каждого из этих материалов в паре с платиной. При конструировании термопар стремятся сочетать такие термоэлектроды, один из которых развивает с платиной положительную термоЭДС, а другой — отрицательную. При этом необходимо учитывать пригодность того или иного термоэлектрода для применения в заданных условиях измерения (влияние на термоэлектрод среды, температуры и т. д.).

Существует несколько конструкций термопар (табл. 8.3). Наиболее распространены термопары: хромель—копель (ТХК), хромель—алюмель (ТХА) и платинородий — платина (ТПП). Для изготовления термопар применяют электроды в виде проволоки диаметром 0,5—3,2 мм. Электроды соприкасаются только в рабочем конце, в остальной части они изолированы друг от друга.

При определении температуры по ЭДС термопары пользуются полученными экспериментально градуировочными таблицами или градуировочными кривыми термопар.

Так как обычно градуировочные таблицы термопар снимаются при температуре холодного спая 0 °С, а в условиях эксплуатации температура холодных спаев отлична от нуля, то для определения контролируемой

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 8.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

Тип	Градуировка	Материал термоэлектродов	Пределы измерения, °С, при применении	
			длительном	кратковременном
ТПП	ПП-1	Платинородий (10% родия) — платина	—20...+1300	1600
ТПР	ПР-30/6	Платинородий (30% родия) — платинородий (60% родия)	300...1600	1800
ТХА	ХА	Хромель — алюмель	—50...+1000	1300
ТХК	ХК	Хромель — копель	—50...+600	800
ТВР	ВР-5/20	Вольфрам — рений (5% рения)—вольфрам—рений (20% рения)	800...1800	2300
ТВР	ВР-10/20	Вольфрам — рений (20% рения)	100...1800	2300

температуры необходимо вводить поправку на фактическую температуру холодного спая. В автоматических приборах такие поправки обычно вводятся с помощью устройств температурной компенсации.

Недостатки термоэлектрических датчиков — относительно небольшая точность при измерениях высоких температур, нелинейность рабочей характеристики, погрешность вследствие изменения температуры холодного спая.

Так как термоЭДС относительно мала (милливольты), в комплекте с термопарами в качестве вторичных приборов применяются чувствительные милливольтметры или автоматические потенциометры.

При эксплуатации котельных установок весьма важной проблемой является **измерение теплового излучения,** включающее измерение лучистой энергии, получаемой от какого-либо источника, и измерение радиационных характеристик материалов, выражаемых обычно в виде отношения отраженной, поглощенной или переданной энергии к поступившей энергии. Датчики, измеряющие лучистую энергию, называются радиометрами. Наибольшее распространение получили фотоэлектрические и термические преобразователи.

В зависимости от длины волны регистрируемого из-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

лучения применяются различные типы фотоэлектрических датчиков. Вакуумные фотоэлектрические умножители используются в диапазоне от ультрафиолетового участка спектра до 1 мкм. Фотопроводники из сернистого свинца регистрируют излучения с длиной волны до 3 мкм; охлаждаемые фотосопротивления из легированного германия воспринимают излучение в инфракрасном участке спектра (длина волны до 10 мкм). Эти датчики обладают высокой чувствительностью и малой инерционностью (постоянная времени от 1 до 1000 мкс).

В термических датчиках измеряемое излучение вызывает «тепловой эффект», т. е. тепловое движение частиц вещества, который регистрируется тем или иным способом: в термисторе повышается электрическое сопротивление, в термопаре появляется термоэлектродвижущая сила, в элементе Голэя этот эффект проявляется повышением давления и расширением газа, вызывающим отклонение небольшого зеркала, которое, в свою очередь, перемещает луч света по фотоэлементу. Термические датчики имеют относительно низкую чувствительность и большую инерционность (постоянная времени 0,1—10 с). Преимуществом их является то, что они могут изготовляться в виде линеек и обладать высокой избирательностью.

Для измерения радиационных характеристик материалов создаются так называемые **рефлектометры** специальных конструкций, которые позволяют получить на выходе регистрирующего устройства информацию, характеризующую воспринимаемое тепловое излучение материала или вещества в виде энергетического спектра в определенном диапазоне. Техническое решение подобных информационных систем основано на применении специальных устройств электроники, управляемых с помощью микропроцессоров и мини-ЭВМ.

Измерение влажности

Влажность — физический параметр смеси газа и водяного пара; мера влажности — доля водяного пара, содержащегося в этой смеси.

Влажный воздух является смесью сухого воздуха и водяного пара. Влажность воздуха оценивается абсо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

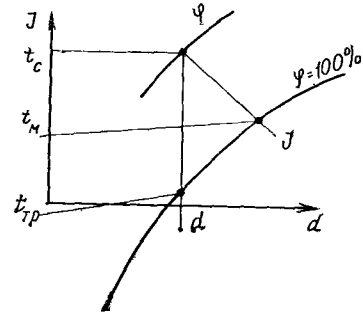


Рис. 8.13. *I—d*-диаграмма параметров влажного воздуха

t_c; $t_м$ — температура по «сухому» и «мокрому» термометрам; $t_{тр}$ — температура «точки росы»; I — энтальпия; *d* — влагосодержание, φ — относительная влажность

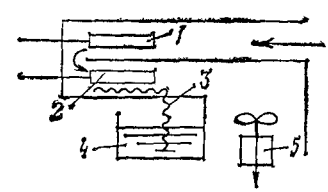


Рис. 8.14. Принцип действия психрометра

1 и *2* — сухой и мокрый термометры; *3* — батист, смачиваемый водой; *4* — емкость; *5* — вентилятор

лютной влажностью, влагосодержанием *d*, температурой точки росы $t_{т\,р}$, относительной влажностью φ и энтальпией (теплосодержанием) *I*. Параметры влажного воздуха можно наглядно представить на *I—d*-диаграмме (рис. 8.13).

Влажность измеряется следующими методами: психрометрическим, гигроскопическим, по точке росы, электролитическим, весовым. Классическим методом измерения влажности воздуха является **психрометрический.** Приборы, основанные на этом методе, называются психрометрами. Психрометры измеряют температуру сухого t_c и мокрого $t_м$ термометров (см. рис. 8.13). Температурные условия, близкие к $t_м$, создаются в процессе адиабатического испарения воды с поверхности мокрого термометра. Зная t_c и $t_м$, можно определить относительную влажность воздуха

$$\varphi = \frac{P_м - A\,(t_c - t_м)\,B}{P_c}\,100,$$

где $P_м$, P_c — упругость насыщенного водяного пара соответственно при температурах t_c и $t_м$; *A* — психрометрическая постоянная, зависящая от рода газа, скорости потока вокруг «мокрого» термометра, температуры $t_м$ и конструкции прибора; *B* — барометрическое давление.

Принцип действия психрометра представлен на рис. 8.14. Для измерения температуры t_c и $t_м$ применяют

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

проволочные (полупроводниковые) термометры сопротивления и термопары в комплекте с автоматическими мостами или потенциометрами. Основная погрешность при измерении по психрометрическому термометру не превышает ±3% относительной влажности. Дополнительно погрешность увеличивается на ±2% за счет погрешности вторичного прибора и колебаний температуры окружающего воздуха. Диапазон измерения психрометрами относительной влажности 20—100% при температуре 5—50°С.

Психрометрический метод позволяет определить энтальпию (теплосодержание) влажного воздуха, так как

$$I = f(t_м),$$

В системах кондиционирования воздуха применяется **гигроскопический метод** измерения влажности, основанный на использовании линейного и объемного расширения материала при изменении влажности. В качестве гигроскопических высокочувствительных материалов используются человеческий волос, брусок канадской сосны, капрон, вискозная пленка и другие материалы. Точность измерения составляет ±(3÷5) % относительной влажности.

Для измерения влажности газов применяется **метод точки** росы. При этом методе определяют температуру поверхности $t_{т\,р}$, при которой устанавливается динамическое равновесие между количеством влаги, испаряющейся с поверхности и осаждаемой на поверхности из газа. Практически измеряют температуру поверхности металлического зеркала, которое охлаждается до тех пор, пока не появится конденсат (роса). С помощью терморегулятора поддерживают температуру поверхности таким образом, чтобы количество конденсата не изменялось. По температурам $t_с$ и $t_{т,р}$ можно определить относительную влажность. Метод позволяет измерять влагосодержание d воздуха — $d=f(t_{т\,р})$.

Достоинства метода — относительно высокая точность и возможность измерения влажности воздуха и различных газов при низких температурах (—160°С) и высоких давлениях ($2 \cdot 10^7$ Па). Недостатками являются сложность конструкции и дополнительные погрешности от

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

загрязнения зеркала содержащимися в газе примесями (пыль, агрессивные газы и т. п.).

Широко применяются **электролитические датчики влажности,** принцип действия которых основан на зависимости электрических свойств чувствительного элемента от влажности контролируемого воздуха или газа. По принципу действия и конструктивному исполнению эти датчики подразделяются на подогревные и неподогревные.

Неподогревные датчики имеют чувствительный элемент из гигроскопического материала, нанесенного между электродами, электрическое сопротивление которого изменяется при изменении влажности. Наиболее распространен датчик в виде полоски из полистирола, покрытой с обеих сторон влагочувствительной пленкой, содержащей хлористый литий. Электроды из благородных металлов (золото, платина) наносят на пластинку методом напыления на влагочувствительную пленку. Такие кондуктометрические гигрометры применяются для измерения относительной влажности в широком диапазоне при температуре от —40 до +50°С. Погрешность измерения зависит от колебаний атмосферного давлени и температуры. Инерционность такого датчика тем меньше, чем тоньше влагочувствительная пленка (постоянная времени 1—3 с).

Весьма перспективным является сорбционно-кондуктометрический метод, основанный на изменении электрического сопротивления полупроводниковых пленок (окись цинка, окись алюминия) или кристаллов (силикагель, алюмогель) при поглощении ими влаги. Разработанные с использованием этого принципа влагомеры позволяют измерять влажность в газообразных средах с точностью +3%.

Принцип работы *подогревных* хлористо-литиевых гигрометров основан на автоматическом поддержании температуры слоя электролита, при которой влажность контролируемого 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

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

пленкой насыщенного раствора данной соли. Затем продолжается адсорбция воды поверхностью раствора данной соли. При этом концентрация раствора у поверхности понижается, вследствие чего постепенно происходит полное растворение кристаллов гигроскопической соли. При дальнейшей адсорбции воды концентрация раствора снижается и, следовательно, повышается давление паров воды над поверхностью раствора. Адсорбция воды замедляется и полностью прекращается, когда давление водяного пара над поверхностью раствора станет равным давлению водяного пара в воздухе. Процесс адсорбции заканчивается и достигается фазовое равновесие пар—раствор. Приборы измеряют температуру фазового равновесия (равновесную температуру), соответствующую температуре точки росы, при этом фиксируется парциальное давление водяных паров в воздухе.

Приборы, принцип действия которых основан на методе фиксации температуры фазового равновесия, называют подогревными, так как для достижения равновесной температуры им необходим источник теплоты. Таким источником теплоты является электролит — насыщенный раствор гигроскопической соли, по которому проходит электрический ток. При постоянном напряжении питания количество выделяемой теплоты зависит от количества электролита, которое, в свою очередь, определяется разностью температур между насыщенным раствором и воздухом. При отклонении температуры от равновесной нарушается равенство давлений, вследствие чего происходит массоперенос между насыщенным раствором и воздухом до тех пор, пока количество выделяемой теплоты не будет достаточным для поддержания температуры фазового равновесия.

В качестве гигроскопической соли широко используется хлористый литий. Конструкция подогревного хлористолитиевого датчика влажности представлена на рис. 8.15. Внутри трубки-изолятора *1* помещен термометр сопротивления *2*, а снаружи — влагочувствительный элемент, который состоит из стеклотканого чулочка *3*, пропитанного хлористолитиевым раствором, с навитой на него электрической спиралью *4*. Спираль, подключенная к источнику переменного напряжения *5*, предназначена для пропускания электрического тока через

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

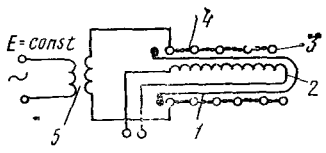


Рис. 8.15. Конструкция подогревного хлористо-литиевого датчика влажности

раствор гигроскопической соли, смачивающий стеклотканый чулочек. В датчике устанавливается колебательный процесс изменения температуры около среднего ее значения $t_{т.р}$, равного значению равновесной температуры, соответствующей измеряемой влажности. Температура точки росы измеряется термометром сопротивления, находящимся внутри датчика. Погрешность такого датчика составляет $\pm 2\%$. В качестве вторичного прибора используется автоматический мост. Недостатком подогревных датчиков является то, что даже при кратковременном отключении электропитания цепи подогрева возникает значительная погрешность показаний и требуется регенерация соли.

При автоматизации систем кондиционирования воздуха используют сорбционные и подогревные гигрометры. В группу сорбционных электролитических гигрометров входят датчики со вторичным прибором типов УДРОВ, СПР, СПР-103, ВВЧ. Датчик относительной влажности ДОВП с вторичными приборами ВЧ-510У и ВА-536У является пьезосорбционным.

В комплекте с электрическим датчиком влажности ДИВ используется регулятор относительной влажности А281, предназначенный для работы в диапазоне 20—100% относительной влажности воздуха.

Для измерения незначительного влагосодержания газов применяют **кулонометрические измерители,** принцип действия которых основан на непрерывном поглощении влаги из контролируемого газового потока пленкой гидрофильного вещества (фосфорного ангидрида) и одновременном разложении воды на водород и кислород в толще пленки путем электролиза. В установившемся режиме сила тока электролиза служит мерой влажности анализируемого газа. Чувствительный элемент представляет собой два платиновых электрода, между которыми расположена пленка фосфорного ангидрида. Кулонометрические датчики применяются в комплекте с автоматическими потенциометрами. Приборы рассчитаны на измерение от 0 до 1000 объемных миллионных долей

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

влагосодержания при температуре 5—50°С с основной приведенной погрешностью ±(1,5—5%).

Помимо электролитических для измерения относительной влажности используют пьезосорбционный датчик, влагочувствительным элементом которого служит калиброванный кварц, покрытый полиамидной пленкой. При изменении относительной влажности изменяется электрическое напряжение датчика, воспринимаемое измерительным прибором, например, автоматическим потенциометром. Прибор обеспечивает измерение относительной влажности в диапазоне 0—100% при температуре 5—50°С. Основная погрешность составляет ±(2,5—5%).

Измерение давления

Приборы для измерения избыточного давления (выше атмосферного) называются *манометрами,* для измерения вакуумного давления (ниже атмосферного) — *вакуумметрами.* По принципу действия манометры разделяются на жидкостные, пружинные, мембранные, сильфонные и электрические. Приборы, предназначенные для измерения разности давления (перепада), называются *дифференциальными манометрами (дифманометрами).*

Жидкостные манометры отличаются простотой конструкции, небольшой стоимостью изготовления и относительно высокой точностью измерения, благодаря чему широко применяются в производственных и лабораторных условиях. Жидкостные манометры представляют собой сообщающиеся сосуды, заполненные рабочей жидкостью (вода, ртуть, масло, спирт и т. п.). При наличии разности давлений уровни рабочей жидкости перемещаются до установления равновесия.

Простейшие жидкостные *U-образные манометры* (рис. 8.16, *а*) применяют для измерения небольших давлений и их перепадов. Погрешность отсчета показаний составляет ±2 мм столба рабочей жидкости и не зависит от диаметра трубок.

При частых колебаниях измеряемого давления отсчет по шкале U-образного манометра затруднителен в связи с колебаниями уровня рабочей жидкости в трубках, поэтому целесообразно применять *однотрубный ма-*

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

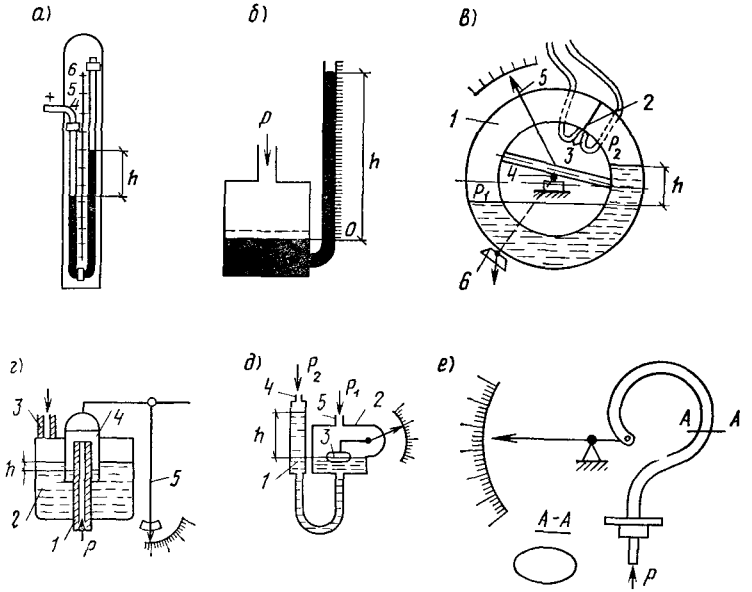


Рис. 8.16. Манометры
а — U образный, *б* — чашечный, *в* — типа «кольцевые весы», *г* — колокольный; *д* — поплавковый, *е* — одновитковый трубчатый

шечный манометр (рис. 8.16, *б*). Погрешность отсчета показаний может составлять ±0,5 мм столба рабочей жидкости.

В жидкостных манометрах (дифманометрах) типа *«кольцевые весы»* (рис. 8.16, *в*) сообщающиеся сосуды в корпусе *1* выполнены в виде замкнутой кольцевой трубки, разделенной перегородкой *2*. С обеих сторон перегородки имеются два штуцера *3*, соединенных с точками замера. Кольцо до половины заполнено рабочей жидкостью и покоится на призматической опоре *4*. В зависимости от разности давлений будут изменяться разность уровней рабочей жидкости *h* и угол поворота кольца до тех пор, пока масса столба жидкости не уравновесится грузом-противовесом *6*; при этом стрелка прибора *5* покажет на шкале величину измеряемого давления.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Колокольные манометры (дифманометры) (рис. 8.16, *г*) предназначены для измерения давления неагрессивных газов. Чувствительным элементом прибора является колокол *4*, частично погруженный в трансформаторное масло *2* и соединенный системой рычагов со стрелкой *5*. Внутрь колокола введена трубка *1*, соединенная с измеряемой средой. При изменении давления в подколокольном пространстве колокол поднимается либо опускается, приводя в движение стрелку прибора. При использовании прибора в качестве дифманометра к колоколу подводится разность давлений: большее давление создается в пространстве над колоколом с помощью трубки *3*, меньшее — в пространстве под колоколом.

Перемещение колокола может быть преобразовано в изменение комплексной взаимоиндуктивности. В этом случае прибор работает в комплекте со вторичными миниатюрными ферродинамическими приборами. Дифманометры выпускаются на перепады давлений 10—40 кгс/см² (1—4 МПа). Основная погрешность измерения ±(1,6—4%).

Поплавковые манометры (рис. 8.16, *д*), по принципу действия аналогичные чашечным, состоят из двух сообщающихся сосудов *1* и *2*, заполненных ртутью. На поверхности широкого сосуда *2* плавает стальной поплавок *3*. Если с помощью трубки *5* соединить этот сосуд со средой с избыточным давлением, которое должно быть измерено, уровень ртути в нем опустится. Поплавок, опускаясь, приведет в движение стрелку, которая покажет величину избыточного давления.

При измерении разности давлений к сосудам дифманометра подводятся две трубки *4* и *5*, соединенные с измеряемой средой. Перепад давлений уравновешивается весом столба жидкости *h*. Сохраняя размер широкого сосуда и изменяя диаметр и высоту узкого сосуда, можно при одном и том же ходе поплавка измерять различные предельные перепады давления.

Принцип действия **пружинных манометров** основан на использовании упругости полой пружины. Наибольшее распространение получили манометры с трубчатой одновитковой пружиной (рис. 8.16, *е*). Один конец пружины впаян в камеру, а другой соединен передаточным механизмом со стрелкой прибора. Камера соединена с

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

измеряемой средой через резьбовой штуцер. При повышении измеряемого давления пружина стремится выпрямиться, свободный ее конец начинает перемещаться и передаточный механизм приводит в движение стрелку, которая по шкале прибора указывает давление.

Для увеличения чувствительности манометра используют многовитковые пружины. Их необходимо применять в самопишущих манометрах, где угол поворота свободного конца пружины должен быть достаточным для записи на диаграмме с помощью специального механизма.

Помимо измерения манометрами некоторых модификаций осуществляется управление внешними электрическими цепями путем включения и выключения контактов в схеме сигнализации, автоматики и блокировки технологических процессов.

В приборах с унифицированными выходными параметрами типа МЭД перемещение свободного конца трубчатой пружины передается сердечнику индукционной катушки. Приборы работают в комплекте со вторичными дифференциально-трансформаторными приборами. Класс точности 1 и 1,5.

Мембранные манометры предназначены для измерения давления сухого воздуха или газов, нейтральных по отношению к стали, цветным металлам и их сплавам. В мембранном манометре (рис. 8.17, *а*) в качестве измерительного элемента использована гофрированная упругая пластинка — мембрана, которая под действием избыточного давления прогибается. Манометры этого типа применяют для измерения небольших давлений. Преимущество мембранных манометров — меньшая чувствительность к вибрациям.

Для измерения разности давлений широко применяют мембранные дифманометры (рис. 8.17, *б*), чувствительным элементом которых является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок *5* и *6*. Каждая коробка сварена из двух мембран, профили которых совпадают. Внутренние полости коробок заполнены дистиллированной водой и соединены каналом. С центром верхней мембраны связан сердечник *2* дифференциального трансформатора *1*.

Мембранные коробки помещены в герметические ка-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

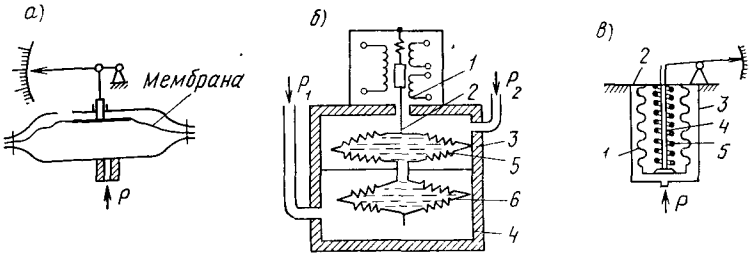


Рис. 8.17. Мембранные манометры

а — с плоской мембраной; *б* — с мембранными коробками, *в* — с гофрированной мембраной (сильфонный)

меры *3* и *4*, на которые через штуцеры передаются давления (в нижнюю — большее P_1, в верхнюю — меньшее P_2). Под воздействием разности давлений жидкость из мембраны *6* вытесняется в мембрану *5*, вызывая перемещение сердечника трансформатора и изменение напряжения и фазы на выходе первичного прибора. Эти дифманометры обычно используются в комплекте со вторичными приборами типа КСД, КВД и др., входящими в состав ГСП. Мембранные дифманометры некоторых модификаций работают в комплекте с приборами ферродинамической системы. Пределы измерения разности давления 0,4—2500 кгс/см² (0,04—250 МПа). Класс точности 1 и 1,5.

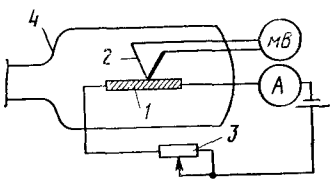


Рис. 8.18. Электрический манометр

В настоящее время все более широко применяются **сильфонные манометры** (рис. 8.17,*в*), чувствительным элементом которых является гармониковая мембрана — сильфон, выполненный из упругого металла (нержавеющая сталь, томпак и другие сплавы).

Верхняя часть сильфона *1* соединена перегородкой *2* с герметической камерой *3*. Ко дну сильфона припаяна стойка *4*, соединенная со стрелкой манометра передаточным механизмом. На герметическую камеру через штуцер передается давление измеряемой среды и сильфон деформируется в продольном направлении. Свободный конец стойки перемещается и приводит в движение

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

стрелку прибора. При снятии давления вследствие упругих свойств пружины *5* сильфон возвращается в первоначальное положение.

В дифференциальных манометрах используют два сильфона. В зависимости от типа прибора перемещение сильфона под действием перепада давления преобразуется в унифицированный токовый либо пневматический выходной сигнал. В комплект прибора входят соответствующий преобразователь и усилитель. Предельные номинальные перепады давлений, измеряемые сильфонными дифманометрами, 0,4—2500 кгс/см² (0,04—250 МПа). Класс точности 0,6; 1,0; 1,5.

Электрические манометры еще не получили достаточного распространения в технике ТГС и СКМ. Примером такого типа приборов является электрический вакуумметр с термосопротивлением (рис. 8.18). Термосопротивление *1*, выполненное из пластиковой проволоки, включено в цепь постоянного тока. Амперметр *А* и реостат *4* служат для поддержания постоянным нагревающего тока. К термосопротивлению приварен рабочий конец термопары *2*, изготовленной из хромель-копеля. ТермоЭДС, измеряемая магнитоэлектрическим милливольтметром, определяется температурой термосопротивления и, следовательно, степенью вакуума в колбе *3*, подсоединенной к контролируемому объему. Прибор отличается простотой конструкции, но имеет невысокую точность измерения (±20%).

Измерение расхода

Приборы, измеряющие расход жидкости и газа, называются **расходомерами.** Существуют следующие основные группы расходомеров:

1) переменного перепада давления, основанные на взаимосвязи расхода и перепада давления, создаваемого потоком при протекании через неподвижные устройства в трубопроводе;

2) постоянного перепада (ротаметры), принцип действия которых основан на зависимости перемещения тела, воспринимающего динамическое давление обтекающего его потока, от расхода протекающей среды;

3) турбинные, основанные на зависимости частоты

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вращения устройства, установленного в трубопроводе, от расхода протекающего вещества;

4) расходомеры, принцип действия которых основан на зависимости между расходом и основными величинами, характеризующими физические явления (теплопередача и др.).

В системах ТГС и СКМ в основном применяют **расходомеры переменного перепада давления,** которые состоят из трех элементов: сужающего устройства, дифференциального манометра для измерения перепада давления (дифманометра-расходомера) и соединительных линий с запорной и предохранительной арматурой.

Сужающее устройство (диафрагма, сопло и т. п.), установленное в трубопроводе, по которому протекает жидкость (газ), создает местное сужение потока. Скорость движения в суженном сечении повышается, часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую, в результате чего статическое давление в этом сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность (перепад) этих давлений, зависящая от скорости движения (или расхода) жидкости, протекающей по трубопроводу, измеряется дифманометрами.

Объемный расход несжимаемой жидкости, м³/с, при измерении перепада давления мембранными, сильфонными или кольцевыми дифманометрами можно определить по формуле

$$Q_0 = 1{,}1\,\alpha\, d^2 \sqrt{\Delta P/\rho}, \qquad (8.3)$$

или

$$Q_0 = 1{,}1\,\alpha\, m D^2 \sqrt{\Delta P/\rho}, \qquad (8.4)$$

где d — диаметр отверстия (горловины) сужающего устройства, м; D — внутренний диаметр трубопровода перед сужающим устройством, м; ΔP — перепад давления, Па; ρ — плотность измеряемой среды, кг/м³; m — модуль сужающего устройства, равный отношению площадей отверстий сужающего устройства и трубы d^2/D^2; α — коэффициент расхода, учитывающий отклонения реальных условий протекания жидкости от идеальных (вязкость жидкости, трение ее о стенки трубопровода и сужающее устройство и т. п.).

Коэффициенты расхода для каждого сужающего устройства определены экспериментально по эталонным образцам с заданными значениями m при условии, что влияние всех прочих факторов исключено. Коэффициен-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

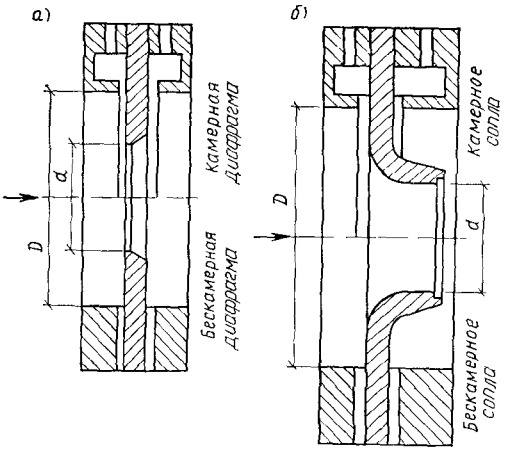


Рис. 8.19. Сужающие устройства
а — нормальная диафрагма; *б* — сопло, *в* — труба Вентури

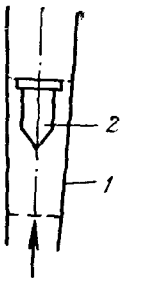


Рис. 8.20. Схема ротаметра

ты расхода эталонных сужающих устройств называются *исходными*. Все отклонения истинного коэффициента расхода от исходного, обусловленные различием условий работы сужающего устройства, учитываются введением *поправочных множителей*.

В качестве сужающих устройств применяют диафрагмы, сопла, трубы Вентури. Наибольшее распространение получили диафрагмы. Нормальная **диафрагма** (рис. 8.19,*а*) представляет собой плоский диск с круглым концентрическим отверстием истечения.

Со стороны входа потока отверстие имеет острую прямоугольную кромку, со стороны выхода — конический расширитель. Существуют две разновидности нормальной диафрагмы: в одном случае для отбора давления устраивают кольцевую камеру, в другом — просверливают отверстия по окружности трубы, соединяют их снаружи общей трубкой, из которой и производят отбор давления.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Имеется ряд специальных конструкций диафрагм: концевые, устанавливаемые на конце трубопровода (при входе или выходе); сегментные, применяемые для измерения расхода загрязненных жидкостей и газа; прямоугольные, используемые для измерения расхода в прямоугольных трубопроводах; сдвоенные, применяемые при малых расходах. Диафрагмы отличаются простотой конструкции и небольшой стоимостью.

В тех случаях когда необходимо уменьшить безвозвратную потерю давления, вместо диафрагм применяют сопла (рис. 8.19, *б*) и трубы Вентури (рис. 8.19, *в*). При использовании труб Вентури, профиль которых приближается к естественной форме струи, безвозвратная потеря давления составляет в среднем 10—20% вместо 40—80% при использовании диафрагм.

Тип сужающего устройства выбирают в основном в зависимости от свойств измеряемой жидкости. Диафрагмы можно применять только для измерения расхода жидкости, не содержащей частицы, которые способны стачивать (скруглять) острые кромки их отверстий. При измерении расхода жидкости с большим содержанием крупных взвешенных веществ применяют трубы Вентури.

Точность измерения с помощью сопел и труб Вентури несколько выше, чем при использовании диафрагм, однако трубы Вентури отличаются громоздкостью, сложностью конструкции и высокой стоимостью.

В качестве сужающего устройства целесообразно применять местные сопротивления трубопровода, например колена. Для этого стенки колена просверливают и оборудуют штуцерами, к которым присоединяют дифманометры. Точность измерения расхода в большой степени зависит от длины прямых участков трубопровода до и после сужающего устройства. При наличии местных сопротивлений, искажающих поток, необходимая минимальная длина прямых участков увеличивается. Между расширенным или суженным концом перехода и дроссельным прибором должен быть прямой участок трубопровода с постоянным диаметром d в среднем длиной не менее $15\,d$ до прибора и $5\,d$ после него.

Создаваемый сужающим устройством перепад дав-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ления воспринимается дифманометром, градуированным в единицах расхода. Для измерения расхода часто применяют поплавковые и мембранные дифманометры, а также колокольные и сильфонные.

Дифманометры-расходомеры изготовляют на различные предельные значения перепада давления. Тип дифманометра следует выбирать таким образом, чтобы основная часть измерений приходилась на ближайшую к верхнему пределу треть шкалы. Начальные 30—35% шкалы считаются обычно нерабочей зоной из-за малой точности измерений. Дифманометр соединяется с сужающим устройством с помощью соединительных (импульсных) трубок, длина которых не превышает 50 м.

Погрешность измерений приборов этой группы составляет 1—2%. Они могут применяться для измерения расходов как жидкостей, так и газа при температурах до сотен градусов и давлениях до десятков мегапаскалей.

Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры) относятся к группе расходомеров обтекания, основанных на зависимости перемещения тела, воспринимающего динамическое давление обтекающего его потока, от расхода измеряемой среды. В этих расходомерах измерительный орган (вертикально перемещающийся поплавок) в зависимости от расхода изменяет площадь проходного отверстия таким образом, что перепад давления по обе его стороны остается постоянным.

Ротаметр представляет собой вертикальную коническую трубку *1*, в которой находится поплавок (ротор) *2*, свободно перемещающийся по всей длине трубки (рис. 8.20).

При изготовлении ротаметров прибегают к экспериментальной градуировке его, нанося шкалу по высоте подъема поплавка при заданных значениях расхода. Погрешности измерения зависят от качества изготовления ротаметров и точности градуировки. Общая погрешность измерения расхода ротаметрами с индивидуальной градуировкой составляет 0,6—1%. С учетом погрешности отсчета, которая зависит от измеряемого расхода, общая погрешность существенно возрастает и, например, при $Q=0{,}1\ Q_{макс}$ составляет 2—2,5%.

Выпускаются ротаметры со стеклянной и металличе-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ской трубкой. Стеклянные ротаметры применяют для измерения расхода при избыточных давлениях 0,5—1 МПа. При больших давлениях, а также при необходимости дистанционного измерения используют металлические ротаметры.

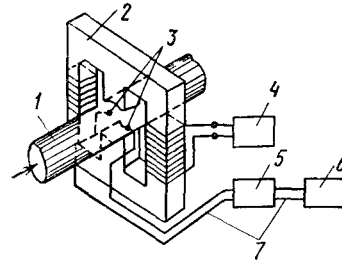


Рис. 8.21. Принципиальная схема электромагнитного расходомера

1 — труба; *2* — электромагнит, *3* — электроды, *4* — источник питания, *5* — усилитель; *6* — вторичный прибор, *7* — линия связи

Недостатками ротаметров являются их большая чувствительность к температурному изменению вязкости, инерционность, невозможность измерения загрязненных жидкостей. Для измерения расхода высокоагрессивных сред и сред, содержащих взвешенные абразивные частицы, применяют электромагнитные, ультразвуковые, тепловые расходомеры.

Принцип действия наиболее широко применяемых электромагнитных индукционных расходомеров основан на измерении ЭДС, индуктируемой в потоке электропроводной жидкости, пересекающем магнитное поле. Индуктируемая ЭДС пропорциональна скорости пересечения проводником магнитного поля, т. е. скорости движения жидкости.

Электромагнитные расходомеры состоят из первичного преобразователя (датчика), измерительного блока, линий связи и дополнительных блоков, например счетного устройства для суммирования количества протекающей жидкости.

Схема электромагнитного расходомера показана на рис. 8.21. Отрезок трубы, по которой протекает жидкость, расположен между полюсами магнита. Силовые линии магнитного поля перпендикулярны направлению потока жидкости. При протекании в трубе жидкость пересекает силовые линии магнитного поля. При этом в жидкости, как в движущемся проводнике, индуктируется ЭДС, которая снимается двумя электродами, расположенными в одном с полюсами магнита поперечном сечении, но под углом 90° к направлению магнитных

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

силовых линий. Электроды должны быть изолированы от стенок трубы, а внутренняя поверхность корпуса — от жидкости.

Электромагнитные расходомеры могут быть с постоянным или переменным магнитным полем.

Индуктируемая на электродах разность потенциалов определяется основным уравнением электромагнитной индукции и при постоянном магнитном поле равна:

$$L = \frac{d\Phi}{dt} = -Bvd \tag{8.5}$$

или

$$E = -\frac{4B}{\pi d} - Q, \tag{8.6}$$

где Φ — магнитный поток; B — магнитная индукция; v — средняя скорость движения жидкости; d — внутренний диаметр измерительного отрезка трубы.

Если электромагнит питается переменным током и, следовательно, магнитное поле его меняется во времени t с частотой f, то ЭДС находят из уравнения

$$E = B_{\text{макс}} v d \sin 2\pi f t. \tag{8.7}$$

При выражении скорости движения жидкости через объемный расход Q, м³/ч, ЭДС равна, мВ:

$$E = 3{,}6 \cdot 10^{-4} \frac{Q B_{\text{макс}} \sin \pi f t}{d}. \tag{8.8}$$

Расходомеры с постоянным магнитным полем не получили широкого применения вследствие их существенного недостатка — поляризации электродов, которая вызывает изменение сопротивления датчика и, следовательно, искажает показания прибора.

Находят применение расходомеры с электромагнитами, питаемыми переменным током, в которых явление поляризации отсутствует. Но в таких расходомерах переменное магнитное поле, кроме основной ЭДС, характеризующей измеряемый расход жидкости, образует и другие так называемые трансформаторные или паразитные ЭДС, которые наводятся магнитным полем в контуре «электрод — жидкость—электрод — нагрузка» аналогично наведению ЭДС во вторичной обмотке трансформатора. Для правильной работы прибора эти паразитные ЭДС должны быть скомпенсированы одним из известных способов компенсации.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Принцип действия **ультразвуковых расходометров** основан на том, что скорость распространения ультразвука в движущейся среде равна геометрической сумме средней скорости движения среды и скорости ультразвука в данной среде.

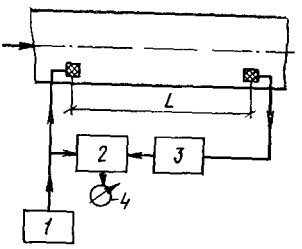


Рис. 8.22. Схема ультразвукового расходомера

1 — генератор, *2* — фазометр; *3* — усилитель, *4* — измерительный прибор

Чаще всего используют два метода измерения расхода с помощью ультразвука: фазовый и частотный.

Фазовый метод основан на измерении сдвига фаз между ультразвуковыми колебаниями, направленными попеременно по потоку и против него. Схема простейшего расходомера, основанного на фазовом методе, представлена на рис. 8.22. В трубопроводе на расстоянии L один от другого установлены два вибратора, выполненных из пьезокристаллов (кварц, титанат бария и др.). Один из вибраторов преобразует электрические колебания, посылаемые генератором, в ультразвуковые Второй вибратор служит приемником ультразвуковых колебаний, прошедших через движущуюся среду (жидкость). Принятые колебания усиливаются усилителем *3* и поступают на один вход фазоизмерительного устройства *2;* на второй вход этого устройства подаются колебания от генератора. При неподвижной среде сдвиг между передаваемыми и принятыми колебаниями стационарен. Этот сдвиг обусловлен прохождением энергии через всю систему. Когда среда движется, то к стационарному фазовому сдвигу добавляется дополнительный сдвиг фаз, вызванный движением среды.

С помощью фазометрического устройства измеряются фазовые сдвиги «по течению» и «против течения» и определяется разность между ними. При этом исключается стационарный фазовый сдвиг и результат измерения зависит только от скорости движения среды, т. е. от расхода.

Ультразвуковые расходомеры по сравнению с электромагнитными имеют два существенных преимущества:

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

они практически не требуют дополнительных затрат энергии и могут измерять расход жидкости любой электрической проводимости.

Принцип действия **тепловых расходомеров** основан на изменении теплового состояния приемного преобразователя в зависимости от расхода (скорости) жидкости или газа, протекающих по трубе. По характерным признакам переноса теплоты и принципу измерения различают расходомеры пограничного слоя, калориметрические и термоанемометрические.

В расходомерах теплового слоя тепловое состояние изменяется вследствие переноса теплоты от нагревателя к термоприемнику тонким пограничным тепловым слоем. Основная масса потока в теплообмене не участвует.

В калориметрических расходомерах теплота от нагревателя переносится всей массой потока нагреваемой среды.

Термоанемометрические расходомеры отличаются тем, что тепловое состояние измеряется в теле небольших размеров (металлическая нить, пленка или полупроводниковый элемент), помещенном непосредственно в поток. К термоанемометрическим расходомерам относятся и термоэлектрические анемометры, которые используются как «точечные» приборы. Чувствительные элементы их настолько малы, что можно пренебречь неравномерностью набегающего потока как по скорости, так и по температуре.

В реальных потоках воздуха с неравномерным распределением скорости и температуры по сечению с целью осреднения скорости может быть использован термоанемометр с чувствительным элементом в виде сетки, перекрывающей все сечение воздуховода. Такой чувствительный элемент можно представить как совокупность «точечных» чувствительных элементов, соединенных последовательно. Теория расчета такого распределенного элемента основывается на использовании уравнения теплового баланса подогреваемого «точечного» чувствительного элемента, представленного в виде отношения сопротивлений элемента в нагретом и холодном состоянии, которые при определенных предположениях зависят лишь от скорости потока в точке измерения и не зависят от температуры воздуха.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Основными элементами указанного измерителя расхода 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. 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 установлены как в каналах наружного и уходящего воздуха, так и в рециркуляционных каналах СКВ.

Тепловые расходомеры имеют ряд преимуществ: они не вызывают потерь напора, могут быть использованы для измерения расхода неэлектропроводных сред, применимы для измерения весьма малых расходов В качестве вторичных приборов для них используются автоматические потенциометры или мосты. Недостатками их являются малый диапазон измерений, нестабильность показаний, нелинейность шкалы, относительно большая инерционность.

При эксплуатации и исследовании систем вентиляции и кондиционирования воздуха возникает необходимость экспериментального определения скорости установившихся и нестационарных потоков газов и жидкостей, причем в некоторых случаях большое значение имеет информация о пульсациях скорости потока. Для измерения скоростей потоков газов и жидкостей применяют различные методы измерения расхода, рассмотренные выше, и их конструктивные реализации. Однако каждый из этих методов при использовании для измерения скорости потока имеет определенные недостатки, главными из которых являются инерционность и низкая точность.

Представляет интерес оптический метод исследования потоков жидкостей и газов с использованием пучка монохроматического света, излучаемого лазером. При этом методе измеряется частота допплеровского смещения между излучаемыми и рассеянными на движущихся в потоке частицах колебаниями световых волн. Коэффициент пропорциональности между измерениями частоты рассеянных колебаний света и скорости потока

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

зависит только от геометрии оптической схемы и длины волны излучаемого света.

Для уменьшения погрешности измерения размеры вносимых в поток частиц не должны превышать 0,1—2 мкм.

Недостатками оптического метода являются высокая стоимость измерительной аппаратуры и необходимость создания и введения в поток мелкодисперсных аэрозолей.

Наиболее перспективным методом измерения скоростей потоков жидкости и газов представляется **термоанемометрический метод.** Термоанемометр обеспечивает измерение амплитуды и спектральных характеристик пульсации скорости воздушных потоков в различных объектах, но может быть применен для измерения быстроизменяющейся температуры газового потока.

С изменением скорости потока происходит изменение тепловой энергии проволочного терморезистора и, следовательно, электрического сопротивления, включенного в плечо электрического моста. В результате на измерительной диагонали моста появляется напряжение разбаланса, которое подается на вход усилителя постоянного тока. Напряжение разбаланса приводит к изменению силы тока в терморезисторе.

Измерение уровня

По способу измерений уровнемеры, применяемые в системах ТГС и СКМ, подразделяются на поплавковые, гидростатические, акустические и электрические.

Поплавковые уровнемеры широко применяются благодаря простоте устройства. В этих приборах чувствительным элементом является поплавок, плавающий на поверхности жидкости и перемещающийся по вертикали вместе с изменением уровня. Масса поплавка уравновешивается противовесом. Вертикальное перемещение поплавка приводит в движение передаточный механизм, стрелка которого показывает на шкале уровень жидкости в резервуаре.

Для дистанционной передачи показаний и сигнализации крайних положений уровня к корпусу резервуара крепится дистанционная потенциометрическая установ-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

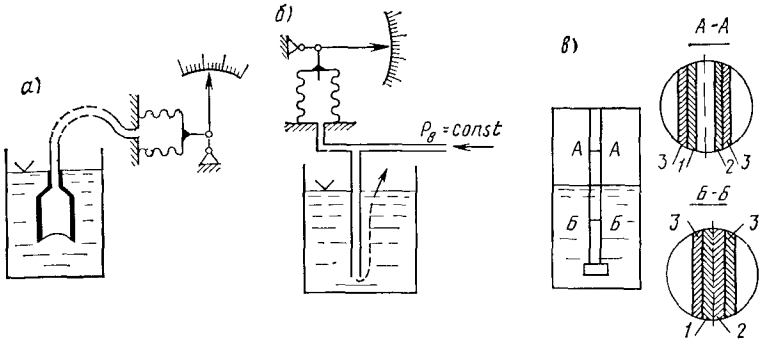


Рис. 8.23. Гидростатические уровнемеры ($P_в$ — давление сжатого воздуха)

ка, в которой при перемещении поплавка изменяется положение подвижного контакта реостата, включенного как потенциометр. В комплект прибора (УДУ-5) входят электрический мост и блок контроля и сигнализации. Диапазон измерения уровня 12 м, основная погрешность при местном измерении ±5—10 мм; погрешность дистанционной передачи ±15 мм.

Широкое распространение получили **гидростатические уровнемеры,** в которых контролируемый уровень определяется по величине статического давления столба жидкости. Существует ряд конструкций гидростатических уровнемеров мембранного и сильфонного типов. Можно использовать также дифманометры, если уровнемер можно расположить ниже измеряемого уровня.

Для измерения уровня в резервуарах, расположенных ниже места установки уровнемера, можно использовать гидростатические приборы, показанные на рис. 8.23.

На рис. 8.23, *а* приведена схема измерений с помощью колокола, погруженного в резервуар и соединенного трубкой с манометром, градуированным в единицах измерения уровня. Нижняя часть колокола закрывается гибкой мембраной во избежание растворения воздуха в воде, что приводит к погрешностям измерения. При прогибе мембраны изменяется объем воздуха, заключенного в колоколе, и создается повышенное давление, измеряемое манометром.

На рис. 8.23, *б* показана схема пневматического уров-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

немера. Трубку измерителя погружают в емкость почти до самого дна. Через эту трубку непрерывно продувается сжатый воздух с постоянными давлением и расходом, что обеспечивается редуктором. Давление воздуха, поступающего в трубку, должно превышать давление, создаваемое столбом жидкости при наивысшем положении уровня над отверстием трубки. Этот метод измерения основан на закономерности: давление воздуха P в трубке равно длине погруженной части трубки H, умноженной на удельный вес жидкости. Давление P, создаваемое в полости трубки, измеряется манометром, шкала которого градуирована в единицах высоты уровня.

Представляет интерес гидростатический уровнемер, показанный на рис. 8.23, *в*. В качестве датчика применена гибкая мерная полоса, подвешенная внутри резервуара, уровень жидкости в котором контролируется. Натяжение мерной полосы обеспечивается грузом на нижнем конце ее. Полоса состоит из спирали сопротивления *1* и тонкой металлической ленты *2*, закрепленных на противоположных внутренних сторонах упругой оболочки *3* из материала-изолятора.

При отсутствии жидкости вокруг полосы за счет упругости ее оболочки спираль и лента не касаются друг друга. Под воздействием давления жидкости оболочка деформируется, металлическая лента шунтирует участок спирали, соответствующий текущему значению уровня. Изменяющееся электрическое сопротивление является выходным параметром датчика. В качестве вторичного прибора может быть использован автоматический мост.

Акустический датчик уровня ЭХО-1 предназначен для непрерывного автоматического дистанционного контроля и регулирования уровня сред. Принцип работы ультразвукового датчика основан на свойстве ультразвуковых колебаний отражаться от границы раздела сред с различным акустическим сопротивлением (газ—жидкость). Мерой уровня является время распространения ультразвуковых колебаний от источника измерения, расположенного со стороны газа, до плоскости границы раздела и обратно.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

В комплект акустического датчика входят акустический преобразователь, электронный блок. Пределы измерения уровня 0—1000; 0—2000; 0—3000 мм. Класс точности 2,5.

Электрические уровнемеры составляют значительную группу приборов, чувствительные элементы которых основаны на преобразовании различных электрических свойств воды в соответствующую величину ее уровня. Из электрических уровнемеров наиболее часто применяются электродные устройства. В последнее время широкое применение находят электрические емкостные уровнемеры. Емкостной датчик представляет собой электрод, погружаемый в измерительную среду. По конструкции электрода датчики разделяются на стержневые, пластинчатые, тросовые и кабельные. Предел измерения 1—20 м (в зависимости от конструкции датчика). Основная погрешность не превышает ±2,5% предела измерения. Выпускается несколько типов таких приборов. Приборы типа ЭСУ служат для контроля одного или двух положений уровня, типа ЭИУ — для непрерывного дистанционного измерения уровня жидких материалов. В системе ГСП для измерения уровня в пределах 0,6—10 м используется емкостной уровнемер ДУЕ-2 с токовым выходом.

Измерение химического состава газов

Приборы, предназначенные для определения состава и концентрации газов, называются **газоанализаторами.** Типы автоматических газоанализаторов различны. Механические газоанализаторы действуют по принципу сравнения удельных весов газов и воздуха.

Большое распространение получили электрические методы анализа газов, которые в зависимости от используемых физико-химических явлений и свойств газов подразделяются на следующие группы:

1) электрические (кондуктометрический, кулонометрический, потенциалометрический);

2) электрофизические (тепловой, магнитный, емкостный);

3) ионизационные;

4) спектрометрические;

Действие **электрических газоанализаторов** основано

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

на поглощении отдельных компонентов исследуемой смеси газов при пропускании ее через определенные реактивы и образовании электролита. Электрическая проводимость электролита возрастает по мере повышения концентрации растворенных в нем веществ.

Кондуктометрический метод определения концентрации газов основан на измерении электрической проводимости раствора, с которым реагирует определяемый компонент анализируемого газа. Так, для анализа CO_2 используется реакция CO_2 с водным раствором $BaCO_3$:

$$CO_2 + BaCO_3 + H_2O \rightleftarrows Ba(HCO_3)_2.$$

Так как $Ba(HCO_3)_2$ более растворим, чем $BaCO_3$, электрическая проводимость раствора увеличивается

Кондуктометрический газоанализатор (рис. 8.24) состоит из дифференциального электролитического преобразователя, помещенного для выравнивания температур плеч в масляный термостат *1*, и мостовой измерительной цепи. Электрическая проводимость раствора между электродами *2* и *3* постоянная, а между электродами *6* и *7* она зависит от концентрации определенного компонента газа, который поглощается раствором в змеевике *4*. Непрореагировавшая часть газа отделяется от жидкости в газоотделителе *5* и удаляется вместе с раствором.

Кондуктометрические газоанализаторы используют для измерения малых концентраций широкого класса газов (CO_2, SO_2, H_2S, NH_3, H_2 и др.). Выпускаются они с диапазонами измерений от $0—10^{-6}$ до 0—0,5% объемных.

Принцип действия **кулонометрических газоанализаторов** основан на измерении силы тока или количества электричества при электролизе вещества, реагирующего с измеряемым компонентом.

Потенциалометрический метод, основанный на измерении разности электродных потенциалов гальванических элементов, широко применяется для измерения активности водородных ионов в растворах и пульпе с помощью pH-метров. Этот метод используется также для анализа газов, измерения влажности.

Для измерения концентрации кислорода в газовых средах наряду с гальваническими датчиками с жидки-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

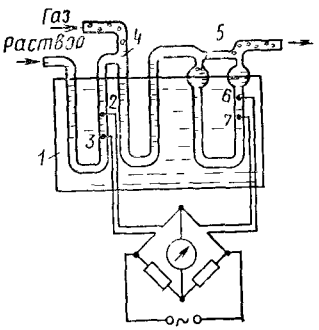


Рис. 8.24. Кондуктометрический концентратомер

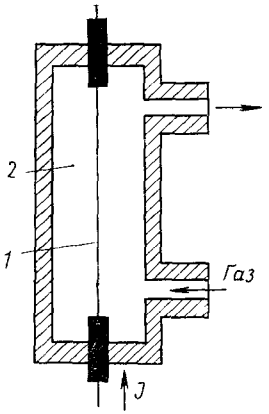


Рис. 8.25. Датчик газоанализатора, основанного на измерении теплопроводности

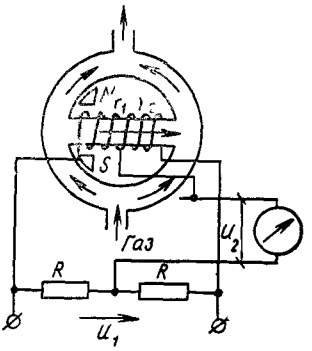


Рис. 8.26. Термомагнитный кислородомер

ми электролитами, изменяющими свою ЭДС при поглощении электролитом кислорода из анализируемого газа, применяются кислородомеры с твердым электролитом. Действие таких приборов основано на измерении разности потенциалов, возникающих на поверхности мембраны из твердого керамического электролита, нагреваемого до температуры 850°С.

ЭДС такого гальванического датчика пропорциональна логарифму относительной концентрации кислорода по обе стороны мембраны. С одной стороны мембраны подается анализируемый газ, с другой — обычный воздух. Кислородомеры с чувствительным элементом из твердого электролита обладают высокой чувствительностью, широким диапазоном измерения (0,1—20,

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

1—100% объемных), но они не пригодны для анализа кислорода в горючих и полимеризующихся средах.

Для измерения концентраций веществ наиболее широко применяются методы и приборы, основанные на использовании тепловых, магнитных, диэлектрических свойств вещества. При электрофизических методах измерения химический состав анализируемого газа остается неизменным.

Тепловые методы основаны на измерении различной теплопроводности компонентов, входящих в анализируемую газовую смесь. Приборы, основанные на этом методе измерения — **катарометры,** особенно пригодны для анализа содержания газов H_2, He, CO_2, SO_2, Cl_2, так как они значительно отличаются по теплопроводности от других газов, а также для измерения вакуума, при определении абсолютной концентрации газов безотносительно к их составу.

В качестве чувствительных элементов в катарометрах (рис. 8.25) используются нагреваемые электрическим током J платиновые или полупроводниковые терморезисторы *1*. При изменении концентрации измеряемого компонента газовой смеси, пропускаемой через камеру *2*, где помещен терморезистор, изменяются теплоотдача и температура терморезистора, что вызывает изменение его электрического сопротивления. Измерительная цепь таких газоанализаторов обычно представляет собой автоматическую мостовую цепь.

Выпускается несколько типов тепловых газоанализаторов. Газоанализаторы типа ТП применяются для измерения концентрации CO_2 или H_2 в пределах 0—10; 0—20; 0—30; 20—60; 40—80; 8—100% объемных в многокомпонентных смесях газов. Основная погрешность газоанализаторов $\pm 2{,}5\%$, запаздывание 1—2 мин.

Избирательность газоанализаторов может быть повышена, если применять метод сравнения теплопроводности анализируемой смеси с теплопроводностью сравнительной газовой смеси с определенными свойствами. Этот метод применен, в частности, в газоанализаторах типа ТКГ.

Магнитный метод широко используется для измерения концентрации кислорода в газовых средах, так как

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

из всех газов только кислород обладает наибольшей магнитной восприимчивостью На рис 8.26 показана схема измерительной цепи термомагнитного кислородомера. Датчик представляет собой кольцевую камеру с горизонтальной трубкой, на которой намотана нагревающая платиновая обмотка, разделенная на две секции r_1 и r_2. У одного из концов горизонтальной трубки расположены полюсные наконечники постоянного магнита. Парамагнитный газ всасывается из левой вертикальной трубки в горизонтальную трубку и в ней подогревается. Так как при нагревании газа его магнитная восприимчивость падает, то холодный газ, втягиваясь в магнитное поле, выталкивает нагретый газ. В результате в горизонтальной трубке газ движется слева направо со скоростью, пропорциональной концентрации кислорода в испытуемой газовой смеси.

Левая секция обмотки r_1 охлаждается холодной смесью, поступающей из камеры. В правую половину горизонтальной трубки смесь поступает уже нагретой. Обе секции обмотки включены в два соседних плеча измерительного моста. Для исключения погрешностей от влияния неизмеряемых компонентов, изменения температуры и напряжения питания в магнитных кислородомерах (типа МН, Щ-МК и др.) используются компенсационно-мостовые измерительные цепи, состоящие из измерительного и сравнительного мостов. Через чувствительные элементы измерительного моста пропускается анализируемая газовая смесь, через элементы сравнительного моста — газовая смесь известной концентрации (например, воздух). Магнитные кислородомеры применяются для измерения относительно больших концентраций кислорода (пределы измерений от 0—1 до 0—100% объемных). Основная погрешность 0,2—5%. Время запаздывания 10—90 с.

Емкостной, или диэлектрический метод измерений основан на зависимости диэлектрических свойств веществ от их состава и концентрации отдельных компонентов. При использовании этого метода измеряют емкость конденсатора, между обкладками которого находится испытуемое вещество, выполняющее роль диэлектрика. Метод широко применяется для измерения

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

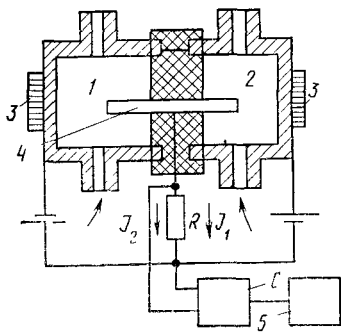


Рис. 8.27. Дифференциальный ионизационный анализатор газа

влажности газообразных сред, так как вода имеет диэлектрическую проницаемость, на порядок более высокую, чем у других жидкостей. Емкостной метод благодаря высокой чувствительности применяется для измерения концентрации газов, несмотря на то, что диэлектрические проницаемости различных газов отличаются лишь на 0,1—1%.

Ионизационные методы основаны на ионизации анализируемого вещества и измерении ионного тока, пропорционального концентрации определяемого компонента. Они широко применяются в газоанализаторах и вакуумметрах, а также для измерения концентрации аэрозолей, влажности газов и др. Существует множество методов ионизации газов. Наиболее широко распространены ионизация газов электрополем, возникающим вследствие автоэлектронной эмиссии (приборы с холодным катодом) и термоэлектронной эмиссии (приборы с накаленным катодом), электроразрядный способ ионизации, ионизация вследствие облучения радиоактивным и рентгеновским излучением, термическая ионизация молекул в пламени водорода.

На рис. 8.27 показана схема дифференциального ионизационного анализатора газов, состоящего из двух идентичных ионизационных камер *1* и *2*, через одну из которых пропускается чистый газ-носитель (гелий или водород), а через другую — газ-носитель с анализируемым компонентом газа. Камеры имеют общий коллектор ионов *4* и идентичные источники β-излучения *3*, выполненные в виде таблеток из Sr^{90}, Kr^{90}. Разностный ток

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ионизационных камер создает падение напряжения на высокоомном резисторе R, которое усиливается усилителем *6* и регистрируется самопишущим прибором *5*. Такие анализаторы имеют практически линейную характеристику, малую инерционность, высокую чувствительность и способны работать при температурах до 300°С

ГЛАВА 9. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЭЛЕКТРО-, ПНЕВМО- И ГИДРОАВТОМАТИКИ

§ 9.1. Основные требования к техническим средствам автоматики

На современном этапе при разработке технических средств автоматики (особенно в рамках ГСП) широко используются агрегатирование и блочно-модульный принцип.

Агрегатирование и блочно-модульный принцип— принцип формирования состава серийно изготовляемых средств автоматизации, максимальное удовлетворение запросов потребителей при ограниченной номенклатуре серийно выпускаемой продукции. Агрегатирование базируется на том, что сложные функции можно разложить на простейшие составляющие (так же, как, например, сложные вычислительные алгоритмы можно представить в виде совокупности отдельных простейших операторов). Другими словами, агрегатирование основывается на разложении общей задачи на ряд простейших однотипных операций, повторяющихся в тех или иных комбинациях в самых различных системах.

При анализе большого количества систем автоматизации можно выделить ограниченный набор простейших функциональных операторов, на комбинации которых строится практически любой вариант технической реализации этих систем. Таким образом формируется состав серийно изготовляемых средств автоматизации, который включает такие конструктивно завершенные и функционально самостоятельные единицы, как блоки, модули, приборы и механизмы.

Блок — конструктивное сборное устройство, выпол-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

няющее одну или несколько функциональных операций по преобразованию информации.

Модуль — унифицированный узел, выполняющий элементарную типовую операцию в составе блока или прибора.

Механизм исполнительный — устройство для преобразования управляющей информации в механическое перемещение с располагаемой мощностью, достаточной для воздействия на регулирующий орган объекта управления.

В соответствии с принципом агрегатирования системы автоматики создаются путем монтажа модулей, блоков, приборов и механизмов с последующей коммутацией каналов и линий связи между ними. В свою очередь, сами блоки и приборы создаются также путем монтажа и коммутации различных модулей. Модули же собираются из более простых узлов (микромодулей, микросхем, плат, устройств коммутации и т. п.), составляющих элементную базу технических средств. При этом блоки, приборы и модули изготовляют полностью в заводских условиях, тогда как монтаж и коммутация систем автоматизации полностью завершаются лишь на месте эксплуатации. Такой подход к построению блоков и приборов получил название **блочно-модульного принципа исполнения технических средств автоматизации.**

Применение блочно-модульного принципа не только позволяет проводить широкую специализацию и кооперирование предприятий в рамках отрасли, производящей средства автоматизации, но и способствует повышению ремонтопригодности и увеличению коэффициентов использования этих средств в системах управления. Обычно предприятия, выпускающие средства автоматизации промышленного назначения, специализируются на изготовлении комплексов или систем блоков и приборов, функциональный состав которых ориентирован на реализацию каких-либо крупных задач автоматизации. При этом в рамках отдельного комплекса все блоки и приборы выполняются совместимыми по интерфейсу, т. е. совместимыми по параметрам и характеристикам сигналов-носителей информации, равно как и по конструктивным параметрам и характеристикам устройств ком-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

мутации. Такие комплексы и системы автоматизации принято называть **агрегатными** или **агрегатированными.**

Значительное внимание уделяется вопросам унификации технических средств автоматизации. **Унификация** — сопутствующий агрегатированию метод стандартизации, также направленный на упорядочение и разумное сокращение состава серийно изготовляемых средств автоматизации. Унификация позволяет ограничить многообразие параметров и технических характеристик, принципов действия и схем, а также конструктивных особенностей исполнения средств автоматизации.

Сигналы—носители информации в средствах автоматизации могут различаться как по физической природе и параметрам, так и по форме представления информации. В рамках ГСП в серийном производстве средств автоматизации применяются следующие типы сигналов—носителей информации:

электрический сигнал (напряжение, сила или частота электрического тока);

пневматический сигнал (гидростатическое давление сжатого воздуха);

гидравлический сигнал (гидростатическое давление или перепад давлений жидкости).

Соответственно в рамках ГСП формируются электрическая, пневматическая и гидравлическая ветви средств автоматизации. Отдельно можно выделить средства автоматизации «прямого действия», которые для своей работы не требуют вспомогательной энергии. Наиболее развитой ветвью средств автоматизации является электрическая. В то же время широко используются и пневматические средства. Развитие пневматической ветви ограничивается относительно низкой скоростью преобразования и передачи пневматических сигналов. Тем не менее в области автоматизации пожаро- и взрывоопасных производств ТГС и СКМ пневматические средства находятся, по существу, вне конкуренции. Меньшее развитие получила гидравлическая ветвь средств ГСП; гидравлические средства применяются главным образом в котельных установках.

ГОСТ на типы и параметры сигналов—носителей информации унифицирует **систему внешних связей, или интерфейс средств автоматизации.** Такая унификация,

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

дополненная стандартами на устройства коммутации блоков друг с другом (в виде системы разъемов), создает предпосылки для максимального упрощения проектирования, монтажа, коммутации и наладки технических средств автоматизации ТГС и СКМ. При этом блоки, приборы и прочие устройства с одинаковым типом и диапазоном сигналов на входах—выходах стыкуются путем простого соединения разъемов.

В рамках агрегатированных средств автоматизации для внутренней связи (между блоками данного комплекса) обычно используется только один тип сигнала с одним диапазоном изменений параметров, но в состав комплекса включаются устройства преобразования для ввода — вывода внешних сигналов с другими типами носителей или диапазонами параметров.

Хорошо подобранный функциональный состав агрегатированных комплексов значительно упрощает проектирование технического обеспечения схем автоматизации, а тщательно продуманная система соединений резко снижает объем работы по коммутации и взаимозаменяемости блоков и модулей, что существенно облегчает наладку и ремонт.

Эффективность работы схем автоматизации ТГС и СКМ в целом в значительной мере определяется надежностью технических средств автоматики, из которых она состоит.

Надежность — это комплексная характеристика, которая может определяться количественно такими показателями, как безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтопригодность. Наиболее важной для функционирования систем автоматики компонентой надежности является безотказность технических средств.

К средствам автоматизации в большинстве случаев применимы такие показатели безотказности, как вероятность безотказной работы и средняя наработка до первого отказа.

Вероятность безотказной работы — это вероятность невозникновения отказа (т. е. вероятность непрерывной работы устройства) в пределах заданного промежутка времени. Так, вероятность непрерывной работы устройства, равная 0,9 за 10 тыс. ч, означает, что в среднем 10% таких устройств могут выйти из строя за задан-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ный промежуток времени, а в среднем 90% должны функционировать нормально.

Средняя наработка до первого отказа — это математическое ожидание наработки до первого отказа, т. е. оценка усредненного времени безотказной работы устройства.

Отказы в системах автоматики и переход к случайным (аварийным) режимам работы могут быть вызваны и неправильными, ошибочными действиями персонала, эксплуатирующего или обслуживающего технические средства автоматизации. Техническое исполнение средств может либо содействовать возникновению таких ошибок, либо как-то блокировать их появление, в связи с чем к средствам автоматизации должны предъявляться соответствующие требования.

Для снижения вероятности ошибочных действий персонала (а по оценкам ряда экспертов с ними связано до 25% всех аварий) необходимо прежде всего обеспечить «взаимопонимание» человека и системы управления, конкретно обеспечить правильность и своевременность восприятия и оценки ситуаций и выдачи команд.

Существует ряд общих, направленных на обеспечение такого взаимопонимания рекомендаций по системе управления в целом (система требований к языку «общения» человека с системой, к формам представления информации оператору, к оформлению пультов, щитов и т. п.). Имеется также и ряд частных рекомендаций к разработкам и техническому исполнению отдельных устройств. Отметим некоторые общепризнанные положения, такие, как целесообразность автоматической сигнализации полного отказа устройства или нежелательность установки в одном устройстве более двух взаимосвязанных органов настройки. Однако связанные с этим вопросы стандартизации и нормирования в настоящее время отработаны недостаточно, нет количественных технико-экономических показателей, аналогичных принятым в метрологии и теории надежности.

Обслуживание технических средств автоматизации направлено на сохранение их в исправном состоянии, т. е. в конечном счете на повышение их надежности. Обслуживание предусматривает проведение регламентных профилактических ремонтов, обнаружение и уст-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ранение всяких ведущих к отказам неисправностей, замену или восстановление вышедших из строя средств, выполнение правил нормальной эксплуатации.

Требования к средствам автоматизации, предусматривающие ограничение сложности обслуживания, регламентируют полную взаимозаменяемость серийно изготовленных средств (ГОСТ 12997—76) и определяют количественные показатели и требования к ремонтопригодности средств автоматизации (ГОСТ 27.002-83).

Наряду с этими производными от экономики ограничениями к средствам автоматизации предъявляются также и эргономические (т. е связанные с охраной здоровья и жизни людей) требования безопасности. В систему таких требований прежде всего входят ограничения на используемые в средствах энергетические потенциалы. Так, в измерительных цепях, информационных каналах связи и системах оперативного управления электрическое напряжение обычно не должно превышать 12 В, максимально допускаемое напряжение исполнительных устройств должно быть не более 220/380 В, а давление сжатого воздуха в пневматических системах управления не более 0,6 МПа. Целям безопасности служат также определенные ограничения на применение электрических средств автоматизации в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

§ 9.2. Технические средства электроавтоматики

Электрические средства автоматики, в том числе автоматического регулирования, широко применяются в системах ТГС и СКМ. Как уже отмечалось, основными их достоинствами (по сравнению с пневматическими и гидравлическими средствами) являются простота энергоснабжения, возможность преобразования регулируемых величин различной физической природы в электрический сигнал и передачи его на значительные расстояния, возможность формирования разнообразных алгоритмов функционирования с широким диапазоном изменения параметров настройки, удобства централизации управления, возможность построения сложных систем, в том числе многоуровневых систем управления с использованием ЭВМ и др.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

После выпуска первых универсальных электрических регуляторов произошли значительные изменения в элементной базе, конструктивном исполнении, функциональном составе, технических характеристиках и сигналах связи. Эти изменения отразились в смене нескольких поколений средств автоматизации.

Первое поколение средств автоматизации характеризуется применением электронных ламп для усиления и преобразования сигналов с использованием индивидуальных измерительных преобразователей с неунифицированными сигналами связи.

Второе поколение отличается применением полупроводниковых элементов и переходом к блочно-модульному принципу конструирования приборов с унификацией корпусов отдельных блоков и преимущественным использованием унифицированных сигналов связи (главным образом, токового сигнала 0—5 мА). Ко второму поколению относятся аппаратура серии РП-2, комплекс блоков под общим названием «Каскад» Московского завода тепловой автоматики (МЗТА) и др.

Третье поколение характеризуется использованием в качестве основной элементной базы интегральных микросхем. К этому поколению можно отнести агрегатный комплекс электрических средств регулирования (АКЭРС).

Наибольшее распространение в котельных установках среди технических средств автоматизации первого поколения получила аппаратура МЗТА. В процессе выпуска эта аппаратура несколько раз модернизировалась. Одна из последних модернизаций, относящаяся к первому поколению средств автоматизации, связана с выпуском комплекса средств, получившего общее наименование системы РПИБ по названию регулирующего прибора. РПИБ — регулирующий прибор импульсного действия с бесконтактным выходом, отрабатывающий пропорционально-интегральный закон интегрирования. В настоящее время этот прибор заменяется на Р25.

В связи с широким распространением этой системы целесообразно рассмотреть ее основные характеристики. Особенностью системы РПИБ является использование индивидуальных измерительных преобразователей с неунифицированными выходными сигналами. При этом

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

регулирующие приборы (релейно-импульсные РПИБ и корректирующие КПИ) выполняются в виде двух блоков, объединенных в одном корпусе: измерительного ИБ и регулирующего (электронного) РБ. Сочетание регулируемого и аналогового регулирующего блоков называется корректирующим прибором.

Измерительные блоки являются сменными и рассчитаны на работу с определенным видом измерительных преобразователей. В системе РПИБ имеется около 10 типов измерительных блоков. Выходные сигналы блоков приведены к одному виду — напряжению постоянного тока с линейным диапазоном измерения от —5 до +5 В, благодаря чему достигается унификация регулирующих блоков. Другие виды функциональных устройств имеют встроенные (несменные) измерительные цепи и рассчитаны на работу только с одним видом входного сигнала.

Основное достоинство рассматриваемой структуры комплекса средств автоматического регулирования с неунифицированными сигналами связи — повышенные показатели по надежности, что обеспечивается благодаря минимальному числу элементов, преобразований и связей на пути от регулируемой величины до регулирующего воздействия.

Система РПИБ включает в себя комплекс средств, позволяющих решать достаточно сложные задачи автоматического регулирования процессов в парогенераторных установках. По функциональному назначению в этом комплексе можно выделить четыре группы средств автоматического регулирования:

1) первичные измерительные преобразователи (*датчики*);

2) устройства статического и динамического преобразования информации (функциональные устройства);

3) устройства оперативного управления;

4) исполнительные устройства.

Первичные измерительные преобразователи автоматических систем регулирования по условиям работы и предъявляемым к ним требованиями отличаются от преобразователей информационных систем. Датчики систем регулирования работают в более узком диапазоне (в некоторой зоне вблизи номинального значения регу-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

лируемой величины). Однако они должны обладать высокой чувствительностью (коэффициентом передачи) и быстродействием и по возможности не иметь люфтов и других видов вариаций. Отмеченные особенности привели в свое время к разработке специальных модификаций датчиков, предназначенных только для работы в системах регулирования (табл. 9.1).

ТАБЛИЦА 9.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ С АППАРАТУРОЙ СИСТЕМЫ РПИБ

Измерительные преобразователи	Измеряемая величина	Выходной сигнал или параметр
Манометр МЭД	Давление	Изменение напряжения переменного тока
Дифманометр ДТ-2	Перепад давления, разрежение	То же
Дифманометры ДМ, ДММ	Расход, уровень	Изменение индуктивного сопротивления полуобмоток
Пирометр ТЭРА-50	Температура	Изменение напряжения постоянного тока
Термоэлектрические термометры ТПП, ТХА, ТХК	То же	То же
Термометры сопротивления ТСП, ТСМ	То же	Изменение активного сопротивления
Кислородомеры:		
КМК-58	Химический состав	Изменение напряжения переменного тока
Щ-МК-Н	То же	Изменение силы постоянного тока в пределах 0—5 мА
Солемер КСКВ	»	Изменение сопротивления рабочего плеча
Трансформаторы напряжения ТН и тока ДТТ-58	Электрическая мощность	Изменение напряжения переменного тока
Датчики перемещений:		
индуктивный	Линейное перемещение	Изменение индуктивного сопротивления полуобмоток
дифференциально-трансформаторный	То же	Изменение напряжения переменного тока
реостатный	Линейное или угловое перемещение	Изменение активного сопротивления рабочих плеч

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

К устройствам **статического преобразования информации** системы РПИБ, в первую очередь, относятся измерительные блоки регуляторов, выполняющие широкий круг функций: согласование входных параметров регулирующих блоков с характеристиками датчиков; масштабирование сигналов, поступающих от датчиков; формирование электрического сигнала, соответствующего заданному значению регулируемой величины, с возможностью его оперативного изменения; формирование сигнала рассогласования (в виде напряжения постоянного тока с линейным диапазоном изменения от —25 до +5 В), а также гальваническое разделение цепей датчиков и регулирующего блока.

Группу **устройств оперативного управления** составляют блоки управления, ручные задатчики автоматических регуляторов, а также индикаторы или указатели положения исполнительных механизмов. Все эти устройства размещаются обычно на оперативном пульте управления отдельно от регулирующих приборов. Назначение этих устройств.

а) переключение цепей управления исполнительным механизмом с возможностью установки одного из трех режимов автоматического управления исполнительным механизмом от регулирующего прибора; дистанционного управления исполнительным механизмом вручную с пульта управления; внешнего управления исполнительным механизмом;

б) включение исполнительного механизма в желаемом направлении («Меньше» — «Больше») в режиме дистанционного управления;

в) сигнализация срабатываний релейно-импульсного регулирующего прибора;

г) индикация положения исполнительного механизма, а также выходного сигнала корректирующего прибора;

д) ручное изменение задания с пульта управления.

Для релейно-импульсных регулирующих приборов РПИБ выпускались два вида блоков управления: БУ2/6 и БУ1/6. Блок управления БУ2/6 содержит следующие элементы:

1) переключатель на три положения для установки

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

требуемого режима управления исполнительным механизмом;

2) две кнопки для ручного дистанционного управления исполнительным механизмом («Меньше» — «Больше»);

3) две индикаторные лампочки (красную и зеленую) для сигнализации срабатывания регулирующего прибора.

В блоке управления БУ1/6 помимо перечисленных элементов установлен потенциометрический задатчик (R=25 Ом). В том случае, когда указанный встроенный задатчик использовать невозможно, применяются ручные выносные задатчики.

Все типы ручных задатчиков являются потенциометрическими и подключаются по трехпроводной схеме к измерительным блокам регулирующих или корректирующих приборов. Наиболее распространенным является задатчик типа ЗР-1, содержащий переменный резистор с сопротивлением 25 Ом (как БУ1/6). Другие типы задатчиков отличаются наличием добавочных ограничивающих резисторов (ЗР-2), установкой спаренных переменных резисторов (ЗР-3), а также номинальными сопротивлениями.

Для представления оператору информации о положении выходного вала исполнительного механизма в системе РПИБ используется индикатор положения ИПУ (унифицированный), который подключается к датчику положения, расположенному в исполнительном механизме. Индикатор ИПУ рассчитан на работу с датчиками, питаемыми переменным током (индуктивным, дифференциально-трансформаторным или реостатным), содержит измерительную ячейку, фазочувствительный выпрямитель (демодулятор) и магнитоэлектрический миллиамперметр, используемый в качестве указателя положения.

Группу **исполнительных устройств** в системах управления образуют пусковые устройства и исполнительные механизмы.

Пусковые устройства обеспечивают необходимое усилие мощности управляющих сигналов, поступающих от регулирующего блока при автоматическом регулировании или от оператора при ручном управле-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

нии. При использовании электрических исполнительных механизмов постоянной скорости управляющие сигналы носят характер импульсов с изменяющейся скважностью (отношением периода следования импульсов к их длительности) и одинаковой амплитудой. Это позволяет использовать для их усиления простые пусковые устройства, рассчитанные на дискретный сигнал управления.

Пусковые устройства могут быть контактные и бесконтактные. Каждый тип пускового устройства рассчитан на работу в комплекте с определенным типом исполнительного механизма.

Входные цепи пусковых устройств позволяют использовать обычно два вида управляющих сигналов:

1) активный сигнал управления в виде постоянного или пульсирующего тока напряжения 24 В;

2) пассивный сигнал управления в виде замыкания соответствующих входных зажимов с помощью бесконтактных или контактных ключей.

В состав электрических исполнительных механизмов обычно входят следующие элементы: асинхронный электродвигатель, редуктор, концевые и путевые выключатели, датчики положения, тормозное устройство, ручной привод. Широко применяются исполнительные механизмы типа МЭО. К исполнительным устройствам относятся также устройства изменения производительности вентиляторов и насосов (вариаторы, муфты, тиристорные станции и т. д.).

Для решения задач контроля и автоматического регулирования ТГС и СКМ в пределах электрической ветви ГСП разработаны и серийно выпускаются комплексы технических средств «Каскад» и АКЭСР. Комплексы обладают широкими функциональными возможностями, позволяющими строить разнообразные по сложности и структуре автоматические системы управления технологическими процессами.

Связь с измерительными преобразователями осуществляется с помощью унифицированного аналогового сигнала постоянного тока (преимущественно 0—5 мА). Основное достоинство токового сигнала по сравнению с сигналом напряжения — отсутствие влияния сопротивления линии связи $R_л$ на точность передачи

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

информации. Унифицированный сигнал связи может быть многократно использован несколькими потребителями.

Достоинством передачи аналоговых сигналов на постоянном токе является возможность сравнительно простыми средствами подавлять различные помехи, образующиеся на линии связи. Кроме того, различные статические и динамические преобразования сигналов более удобно выполнять на постоянном токе. В системах «Каскад» и АКЭСР линейные преобразования сигналов выполняются обычно с использованием операционных усилителей постоянного тока, как и в соответствующих узлах аналоговых вычислительных машин. Необходимый закон преобразования сигналов обеспечивается с помощью отрицательных обратных связей, вводимых в усилитель постоянного тока.

§ 9.3. Технические средства пневмо- и гидроавтоматики

Пневмоавтоматика охватывает технические средства регулирования и управления, использующие в работе различные эффекты газовой динамики. Носителем сигналов в устройствах пневмоавтоматики является обычно давление сжатого воздуха, изменяющееся в стандартном диапазоне 0,02—0,1 МПа. В историческом развитии технических средств пневмоавтоматики можно проследить четыре поколения.

Первое поколение — универсальные регуляторы приборного типа. До 40-х годов главной задачей автоматизации являлась стабилизация отдельных параметров — давления, расхода, температуры и пр. (например, в системах газоснабжения). С этой задачей успешно справлялись регуляторы, в которых в едином корпусе совмещались измерительная система, показывающее, регистрирующее, задающее и регулирующее устройства. Объединение всех функций в единой конструкции являлось по тем временам их достоинством, так как существенно упрощались монтаж и обслуживание. Основной недостаток универсальных регуляторов — узкие функциональные возможности, ограничивающие их применение.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

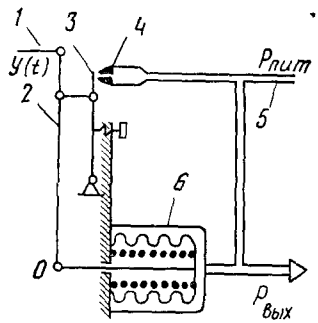


Рис. 9.1. Схема устройства, работающего по принципу компенсации перемещений
1 — тяга, *2* — рычаг, *3* — заслонка, *4* — сопло, *5* — дроссель, *6* — устройство жесткой обратной связи; *y (t)* — регулируемая величина, $P_{пит}$ — давление питания, $P_{вых}$ — выходной сигнал

Модификации таких регуляторов, выполненных на современной элементной базе, можно встретить и в настоящее время (например, малогабаритное пневматическое регулирующее устройство ПР.3.27М, встраиваемое в электронные самопишущие приборы типа КС-4). Подобные регуляторы работают по принципу компенсации перемещений, в соответствии с которым перемещение, поступающее на вход устройства, компенсируется перемещением, создаваемым давлением воздуха на выходе. В качестве примера приведена схема пневматического П-регулятора (рис. 9. 1).

Развитие промышленности, сопровождающееся усложнением технологических процессов, совершенствование ТГС и СКМ привели к необходимости создавать многоконтурные и многосвязные системы регулирования. Эти требования и определили направление развития пневмоавтоматики второго поколения.

Второе поколение — регуляторы, реализующие агрегатную структуру по принципу компенсации усилий.

В 50-х годах стал широко применяться агрегатный принцип построения пневмоавтоматики, согласно которому системы управления комплектовались из стандартных блоков и устройств, выполнявших определенные функции: измерение, регистрацию, установку задания, формирование регулирующего воздействия, суммирование, умножение на постоянный коэффициент. В СССР первая система средств, реализующая агрегатный принцип, известна как агрегатная унифицированная система (АУС).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

В набор АУС входили регулирующие блоки, задатчики, вычислительные блоки, преобразователи и вторичные приборы — показывающие и регистрирующие. Регулирующие и функциональные блоки АУС представляли собой единую жесткую конструкцию, состоящую из однотипных цилиндрических шайб с проложенными между ними мембранами из прорезиненного полотна, и работали по принципу компенсации усилий. Усилие, поступающее на вход устройства, компенсировалось усилием, создаваемым давлением воздуха на выходе. Между собой, а также с входными и выходными штуцерами камеры они соединялись каналами, проходящими в стенках шайб. Весь набор шайб скреплялся стяжными шпильками.

Принцип компенсации усилий в отличие от принципа компенсации перемещений позволил строить регулирующие и функциональные блоки так, что их работа практически не сопровождалась механическими перемещениями.

Агрегатная унифицированная система (АУС) считается одной из первых систем технических средств автоматизации в рамках ГСП. Входные и выходные параметры блоков АУС стандартизованы и представляют собой давление сжатого воздуха, изменяющееся в стандартном диапазоне 0,02—0,1 МПа, что дает возможность набирать блоки в любых сочетаниях и количествах. Блоки АУС взаимозаменяемы, просты в обслуживании и могут работать с любыми измерительными преобразователями (датчиками), имеющими стандартный пневматический выходной сигнал.

Третье поколение — универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА). При дальнейшем развитии промышленности возникла необходимость решать средствами пневмоавтоматики более широкий круг задач, используя как аналоговую, так и дискретную технику. Обычная номенклатура пневматических блоков АУС не удовлетворяла этим требованиям.

Для построения систем пневмоавтоматики в 60-х годах в СССР стал широко использоваться элементный и блочно-модульный принцип. При этом любое новое устройство пневмоавтоматики собиралось путем ком-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

мутации пневмоэлементов универсального назначения.

Идея элементного построения устройств промышленной пневмоавтоматики нашла воплощение в универсальной системе элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА). Элементы системы унифицированы; однотипные элементы могут применяться в различных приборах. Набор элементов УСЭППА является функционально полным, достаточным для построения любого управляющего устройства непрерывного действия, любой релейной схемы и любого управляющего устройства непрерывно-дискретного действия.

Функциональные возможности УСЭППА настолько широки, что позволяют не только реализовать все известные функции управления, но и создавать новые, ранее для пневмоавтоматики вообще недоступные: непрерывно дискретные регуляторы, сложные релейные схемы, системы централизованного контроля и управления, системы автоматической оптимизации.

Элементы УСЭППА просты по конструкции и технологии изготовления и сравнительно компактны, так как каждый элемент в системе выполняет простейшую функциональную операцию. Такие элементы достаточно дешевы, просты в наладке и имеют унифицированное расположение входов и выходов. Монтаж устройств осуществляется путем набора монтажных плат, выполненных из органического стекла, на которых печатным способом нанесены пневматические каналы. Связь между элементами осуществляется через отверстия в ножках и каналы в платах. Диапазон изменения сигналов стандартный 0,02—0,1 МПа. В качестве дискретных сигналов приняты 0 и 0,14 МПа (условно 0 и 1).

Принцип действия большинства элементов УСЭППА, так же как и блоков АУС, основан на компенсации усилий при малых механических перемещениях подвижных деталей (мембран).

Четвертое поколение — струйная пневмоавтоматика (пневмоника). Дальнейшее развитие пневмоавтоматики привело к созданию струйного принципа построения элементов и модулей. В качестве носителя энергии в струйных элементах используется воздух, в связи с чем струйную технику назвали пневмоникой.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Элементы пневмоники обладают высоким быстродействием и малыми габаритами. Элементы не содержат подвижных изнашивающихся частей. Для изготовления элементов пневмоники предложен технологический метод, аналогичный используемому в электронике методу печатного монтажа. По этому методу струйные элементы и коммуникации между ними получаются в виде углублений в плоских пластинах, что позволяет использовать такие высокопроизводительные процессы, как штамповка, пресс-литье, фототравление. На базе пневмоники представляется возможным реализовать узлы цифровой техники, такие, как сумматор, триггер, сдвигающий регистр.

Широкое внедрение струйных элементов затрудняется, во-первых, из-за низкого уровня входных и выходных сигналов, во-вторых, из-за невысокой помехоустойчивости. Чтобы использовать положительные качества струйных элементов, применяют комбинированную струйно-мембранную технику. Основные функции системы реализуются на быстродействующих и малогабаритных струйных элементах, а на выходе системы устанавливают мембранные усилители, усиливающие выходной сигнал как по давлению, так и по мощности.

Как и в пневмоавтоматике, в **гидравлических средствах** в качестве источника энергии и сигнала—носителя информации применяется давление рабочей среды. Однако в гидроавтоматике применяются несжимаемые жидкости, в то время как в пневматических средствах используются газообразные рабочие среды. Фактор сжимаемости среды сказывается на передаче информации в длинных линиях, а также при операциях с большими объемами рабочей среды при малой мощности источников. В пневматических средствах преобразования информации объемы рабочих сред и линий связи, как правило, малы и используемые газообразные среды ведут себя в первом приближении как несжимаемые жидкости. Поэтому для построения гидравлических средств преобразования информации можно использовать аналогичные пневматике принципы.

Для большинства пневмоэлементов УСЭППА можно построить их **гидравлические аналоги** (в том числе дрос-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

сельные сопротивления и сумматоры, мембранные усилители типа «сопло-заслонка» и мембранные элементы сравнения и т п.). Но элемент, эквивалентный пневмоемкости, будет иметь более сложную конструкцию, так как пневмоемкость построена с учетом сжимаемости рабочей среды. Пневмоемкость аккумулирует среду при повышении давления в постоянном объеме. Масса несжимаемой жидкости в постоянном объеме практически не зависит от давления. Поэтому для построения элемента, эквивалентного пневмоемкости, следует использовать камеру с переменным объемом, зависящим от давления рабочей среды.

В исполнительной части гидравлических систем автоматизации также можно использовать аналогичные типы исполнительных механизмов. Однако если для пневмоавтоматики типично применение подпружиненного мембранного исполнительного механизма или функционально аналогичного подпружиненного поршневого исполнительного механизма, то в гидроавтоматике общепромышленного назначения используются преимущественно поршневые исполнительные механизмы со свободным ходом поршня. При несжимаемой рабочей среде такие механизмы способны развивать большую удельную мощность (относительно массы двигателя развиваемая мощность гидравлического исполнительного механизма примерно в 10 раз выше, чем у электрического). Введение противодействующих пружин означает снижение полезной удельной мощности и, кроме того, уменьшение диапазона линейности характеристик исполнительного механизма.

Принцип действия поршневого исполнительного механизма основан на перепаде давления, поэтому для построения систем гидроавтоматики необходимо иметь преобразователи различных типов сигналовносителей информации в перепад давлений с двуполярной характеристикой. Обычно выходной каскад таких преобразователей строится на базе струйного или золотникового усилителя-преобразователя.

Струйный преобразователь перемещения (а точнее усилия) в перепад давления основан на принципе преобразования кинетической энергии струи жидкости, вытекающей из трубки-сопла, в потенциальную энергию

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

гидростатического давления жидкости при торможении ее в соплах-приемниках. При этом гидростатическое давление жидкости в каждом из сопел зависит от угла поворота струйной трубки, а между соплами возникает перепад давлений, примерно пропорциональный перемещению управляющего штока.

Такой преобразователь может использоваться также для суммирования двух сигналов с разными знаками; в этом случае перемещение струйной трубки происходит в результате взаимодействия двух взаимопротивоположных усилий.

Наряду со струйными преобразователями в гидроавтоматике применяются также преобразователи типа «сопло-заслонка» Так как преобразователи этого типа имеют нелинейную характеристику, то для построения линейных алгоритмов здесь целесообразно вводить функциональные обратные связи.

Струйные преобразователи обладают высокой чувствительностью к малым усилиям, но позволяют получать относительно маломощные сигналы перепада давлений (так как коэффициент полезного действия системы «струйная трубка — сопловая головка» и «сопло — заслонка» невелик).

В гидроавтоматике широкое применение находят имеющие более мощный выход золотниковые преобразователи. В таких преобразователях используется эффект резкого изменения сопротивления гидравлических линий при изменении положения золотника. Золотниковый преобразователь может иметь достаточно крутую статическую характеристику, что позволяет использовать его и для релейного управления исполнительным механизмом. В этом случае золотник просто переключает гидравлические линии, т. е. работает как распределитель потоков рабочей среды.

По сравнению со струйной трубкой золотник обладает большей массой и для его перемещения необходимо развивать большие усилия, поэтому в гидравлических системах регулирования эти преобразователи часто используются для построения двухкаскадных усилителей.

Гидравлический поршневой исполнительный механизм имеет характеристики линейного интегрирующего

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

звена, поэтому для построения на его базе И-алгоритма регулирования достаточно дополнительно осуществить лишь линейное преобразование рассогласования в достаточно мощный сигнал перепада давления. Эту операцию можно выполнить с помощью описанных выше преобразователей.

Система регулирования получается простой, если регулируемой величиной является давление, так как в этом случае просто реализуется функция преобразования давления в перемещение струйной трубки, заслонки или золотника. Вариант подобной автоматической системы регулирования давления на базе поршневого исполнительного механизма и двухкаскадного струйно-золотникового усилителя-преобразователя представлен на рис. 9.2 (при отключенной обратной связи).

Однако автоматическая система регулирования с И-алгоритмом, как правило, проигрывает в качестве регулирования (в сравнении с П-, ПИ-, ПИД-алгоритмами). Реализовать последнее можно на базе все той же системы (см. рис. 9.2) путем введения функциональных обратных связей.

В автоматических системах регулирования общепромышленного назначения часто применяется комбинированный вариант регулятора. В этом случае в исполнительной части САР используется гидравлический исполнительный механизм, а управляющая часть реализуется на серийных электрических (или иногда на пневматических) средствах. Необходимым элементом такого регулятора является пневмо- или электрогидропреобразователь.

Вариант электрогидравлического преобразователя с релейной характеристикой показан на рис. 9.3. Если сигнал U_2 на входе преобразователя отсутствует, то обмотки электромагнитов *6* обесточены и клапаны *1, 2* (находящиеся под давлением рабочей среды $P_{пит}$) расположены в нижнем положении. В этом случае перепад давлений на поршне *5* исполнительного механизма равен нулю, а его неконтролируемые перемещения под действием внешней нагрузки (со стороны регулирующего органа) блокируются шариковыми обратными клапанами *3, 4*. При подаче управляющего сигнала U_2 на одну из обмоток электромагнитов соединенный с его стержнем

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

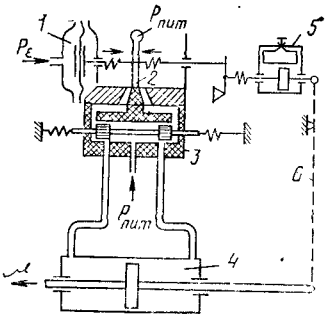


Рис. 9.2. Простейший вариант реализации П-, И-, ПИ-алгоритмов в САР с поршневым исполнительным механизмом

1 — преобразователь давления в усилие (манометр); *2* — струйный преобразователь; *3* — золотниковый усилитель; *4* — поршневой исполнительный механизм; *5* — блок обратной связи с динамикой реального дифференцирующего звена; *6* — жесткая обратная связь

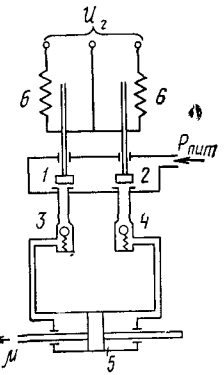


Рис. 9.3. Схема электрогидравлического преобразователя с релейной характеристикой

1, *2* — электромагнитные клапаны, *3*, *4* — шариковые клапаны; *5* — поршневой исполнительный механизм; *6* — обмотки электромагнита

клапан переместится и соединит соответствующую полость исполнительного механизма с линией питания. Тогда под действием возникшего перепада давлений (противоположная полость соединяется с линией слива) поршень начнет перемещаться.

В относительно простых схемах автоматизации ТГС и СКМ широко применяются несложные по конструкции и в эксплуатации, надежные, не требующие вспомогательной энергии регуляторы «прямого действия». Эти регуляторы предназначены главным образом для реализации схем регулирования температуры, давления и расхода в системах теплоснабжения, отопления и холодильной технике. Они осуществляют пропорциональный или интегральный закон регулирования; в качестве регулирующих органов используются двухседельные клапаны.

Подробное описание приборов автоматики дано в справочной литературе (Справочник под ред. Б. Д. Кошарского «Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины»).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ГЛАВА 10. ОСНОВЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

§ 10.1. Классификация и назначение систем телемеханики

Телемеханикой называют область техники, охватывающую теорию и практику устройств передачи информации и управления на расстоянии. В ряде случаев функционально телемеханические системы дополняют системы автоматики, совместно решая общую задачу контроля и управления ТГС и СКМ.

Следует различать две стадии телемеханизации· телемеханизацию централизованного контроля и телеавтоматизацию управления. В первом случае контроль и управление объектами, находящимися на расстоянии, сосредоточиваются в центральном пункте, однако само управление осуществляется человеком (диспетчерское управление). Для крупных объектов задачи диспетчерского управления настолько сложны, что возникают задачи автоматизации самого диспетчерского управления

При телеавтоматизации, т. е. органическом сочетании автоматизации и телемеханизации, из центрального пункта осуществляется автоматическая координация работ автоматизированных объектов, разделенных расстоянием и являющихся частью общей автоматизированной системы. В частности, телеавтоматизация может применяться совместно с управляющей машиной. В этом случае системы телемеханикн вводят в управляющую машину информацию о ходе производственного процесса на отдельных участках и передают этим участкам команды, выработанные управляющей машиной.

Устройства телемеханики, применяемые в системах ТГС и СКМ, выполняют следующие функции: телеизмерение (ТИ) — передачу на расстояние значений величин, характеризующих режим работы контролируемых установок; телеуправление (ТУ) — передачу на расстояние импульсов управления, воздействующих на исполнительные механизмы управляемых установок; телесигнализацию (ТС) — передачу на расстояние сигналов о состоя-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

нии контролируемых объектов или служебных сигналов другого назначения.

Телеизмерение может осуществляться с помощью систем ближнего действия (на расстояниях до 15 км) и систем дальнего действия (на расстояниях до сотен километров, особенно в системах газоснабжения и больших тепловых сетей). В системах ближнего действия, основанных на методе интенсивности, измеряемая величина преобразуется в значение силы тока или напряжения, передаваемое по линии связи. В системах дальнего действия измеряемая величина передается с помощью электрических импульсов постоянного тока или изменяющейся частоты переменного тока.

В системах ТГС и СКМ телеизмерение применяют для передачи значений параметров, характеризующих режим работы отдельных элементов и системы в целом на соответствующий диспетчерский пункт. К таким параметрам относятся: текущее значение температуры и влажности воздуха, давление газа, пара, горячей и холодной воды, расход воды, передаваемые по магистральным сетям; давление, развиваемое насосными агрегатами; давление в основных точках газовой, паровой или водяной сети, характеризующее состояние конкретной системы; уровень воды в резервуарах (баках-аккумуляторах) систем холодоснабжения и другие параметры.

Телеуправление позволяет с помощью передаваемых импульсов воздействовать на исполнительные механизмы управляемых объектов. Средства телеуправления используют для пуска и остановки на расстоянии (из диспетчерского пункта) насосных агрегатов, закрытия, открытия и регулирования степени открытия задвижек, включения и отключения вентиляторов и др. Возможность осуществления этих операций на расстоянии позволяет диспетчеру без помощи дежурного персонала быстро вводить в действие или выводить из работы соответствующие агрегаты, когда этого требует режим работы системы в условиях нормальной эксплуатации. Кроме того, в аварийных условиях средства телеуправления позволяют диспетчеру быстро производить необходимые переключения с целью локализации аварии (например, в газовых сетях).

Телесигнализация используется для автоматической

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

передачи сигналов о состоянии определяющих параметров ТГС и СКМ, насосных агрегатов, задвижек, фильтров и других агрегатов котельных установок, систем теплогазоснабжения. С помощью средств телесигнализации на мнемонической схеме системы, воспроизведенной на щите диспетчерского пункта, непрерывно указывается состояние элементов оборудования системы, а также любое изменение положения запорной или регулирующей арматуры либо изменение параметров как в процессе нормальной эксплуатации, так и во время предаварийных или аварийных ситуаций. Это позволяет диспетчеру ориентироваться при производстве оперативных переключений, особенно во время аварии, не прибегая к телефонным переговорам с обслуживающим персоналом.

Важнейшее значение в телемеханике имеют следующие понятия.

Канал связи, с помощью которого осуществляется передача сигналов на расстояния. Кроме проводов и кабелей к каналам связи относят усилители, коммутаторы и фильтры. Канал связи должен обеспечивать наименьшее искажение передаваемых сигналов. Следует различать понятия «канал связи» и «линия связи», поскольку по одной линии связи может быть создано несколько каналов связи для независимой передачи нескольких сообщений.

Сигнал — материальный носитель информации. Существует много методов создания сигналов в системах телемеханики, цель которых — уменьшить искажения, возникающие из-за помех и изменения параметров канала связи.

Помехоустойчивость определяет способность системы осуществлять передачу сигналов при наличии помех. Система считается достаточно помехоустойчивой, если расхождение между отправленным и полученным сигналом не превышает заданной величины.

Важное значение имеют **точность, быстродействие, пропускная способность и надежность** систем телемеханики.

Итак, основными непосредственными задачами телемеханики являются передача большого числа сообщений по одной или ограниченному числу линий связи путем

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

создания на этой линии каналов связи, преодоление технических затруднений, возникающих при передаче сигналов на расстояние вследствие действия различных помех, т. е. обеспечение надежности контроля и управления на расстоянии.

Инженерные методы телемеханики базируются на получившей большое развитие современной теории информации, а также на математической теории анализа и синтеза релейно-контактных и бесконтактных схем.

§ 10.2. Основные понятия о преобразовании информации

При управлении системами ТГС и СКМ всегда возникает необходимость в оперативных сообщениях о ходе процесса, которые требуется передавать от одного устройства управления к другому. Если под сообщением понимать все то, что передается о ходе процесса, то под информацией понимается та часть сообщения, которая представляет новизну и ранее не была известна получателю (оператору или управляющей машине).

Рассмотрим **функциональную схему телемеханической системы** на примере системы телеизмерения (рис. 10.1). В исходном пункте контролируемая величина x измеряется датчиком *1* и преобразуется в однозначно связанную с x вспомогательную величину y_1, называемую **первичным сигналом.** Кодирующее устройство *2* шифрует первичный сигнал, делая его отличным от других возможных сигналов (телеизмерительный сигнал y_2).

Зашифрованный сигнал поступает в передающее устройство *3*, которое преобразует телеизмерительный сигнал в **линейный** (y_3), т. е. в сигнал, более удобный для передачи по линии связи. В приемном устройстве *4* линейный сигнал демодулируется, т. е. преобразуется в сигнал телеизмерения y_4, поступающий в декодирующее устройство *5*, которое расшифровывает сигнал, преобразуя его в выходной, воздействующий на индикаторы контролируемых параметров *6*, фиксирующие или регистрирующие их значения.

В системах телеуправления и телесигнализации передача информации производится аналогичным образом.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Рассмотрим задачи, решаемые основными узлами телемеханической системы.

Для образования телемеханического сигнала используются электромагнитные колебания в виде переменного тока или импульсов. **Импульсы**, используемые в телемеханике, показаны на рис. 10.2. Импульсы постоянного тока или напряжения называют видеоимпульсами (рис. 10.2, *а*) в отличие от радиоимпульсов или импульсов переменного тока, которые образуются при заполнении импульсов постоянного тока высокочастотными колебаниями (рис. 10.2, *б*).

На рис. 10.3 представлены основные признаки, которые позволяют один импульс отличить от другого: полярный (рис. 10.3, *а*) — положительный или отрицательный, число признаков $k=2$; амплитудный (рис. 10.3,*б*) — на практике используются только два признака: импульс есть (рис. 10.3,*в*) или импульса нет (рис. 10.3, *г*); по длительности импульса (рис. 10.3,*д*) и его положению (рис. 10.3, *е*) число признаков может быть больше двух. Разная частота заполнения радиоимпульса может быть одним из примеров частотного признака (рис. 10.3, *ж*).

При использовании гармонического колебания мы получаем непрерывный сигнал, при подаче информации с помощью импульсов—дискретный. Передача дискретных сигналов во многих случаях оказывается более удобной и надежной. Это объясняется следующим: дискретные сигналы в меньшей степени подвержены искажениям в процессе передачи; эти искажения легче обнаружить, информация, полученная в дискретной форме, достаточно просто вводится в вычислительное устройство и легко поддается цифровой индикации и т. д.

Советский ученый В. А. Котельников доказал теорему, играющую огромную роль в теории информации.

Если функция $f(t)$ непрерывна и частотный спектр ее не содержит составляющих с частотой, превышающей F, Гц, то она полностью определяется совокупностью ординат, отстоящих друг от друга на расстоянии $^1/_2 F$, с (рис. 10.4). Допущение, что частотный спектр функции $f(t)$ ограничен, не снижает ценности теоремы, так как это справедливо для большинства видов связи.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

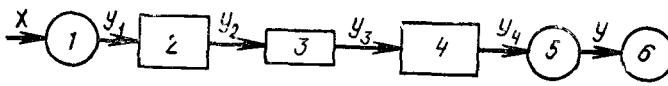


Рис. 10.1. Структурная схема телензмерения

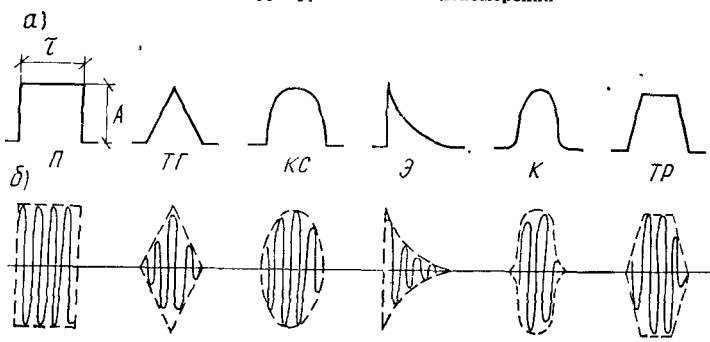


Рис. 10.2. Формы импульсов

а — видеоимпульсы, *б* — радиоимпульсы; П — прямоугольный; ТГ — треугольный, КС — синусоидальныи; Э — экспоненциальный, К — колокольный, ТР — трапецеидальный

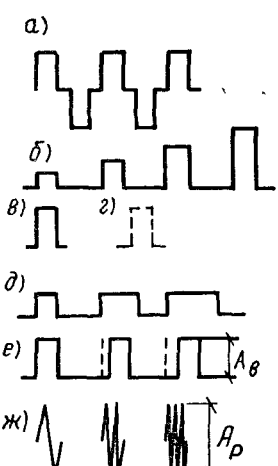


Рис. 10.3. Импульсные признаки

а — поляриые, *б* — *г* — амплитудные, *д* — по длительности, *е* — по фазе, *ж* — по частоте

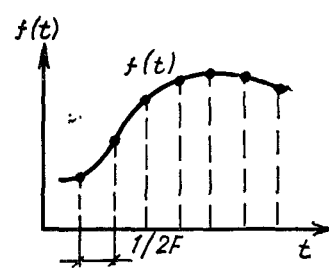


Рис. 10.4. График функции $f(t)$

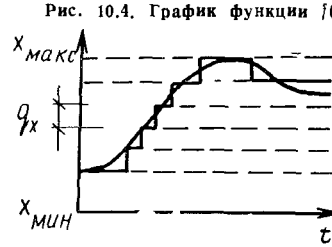


Рис. 10.5. Квантование функции $x(t)$ по уровню

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Согласно теореме Котельникова, нет необходимости передавать бесконечное множество всех значений непрерывно изменяющихся функций $f(t)$, достаточно передать лишь те ее значения, которые отстоят друг от друга на расстоянии $1/2\ F$, с.

Таким образом, передача непрерывной функции заменяется передачей ее отдельных значений. Точность передачи при этом не нарушается. Однако эти мгновенные значения, взятые через интервал $1/2\ F$, могут выражаться какими угодно числами.

Для практических целей передачи информации это представляет определенные неудобства, так как на приемной стороне возникает необходимость различения большого количества сигналов разнообразных уровней. В современных системах связи часто прибегают к передаче непрерывных функций определенным конечным числом разрешенных значений — уровней, отстоящих друг от друга на конечный интервал. Если мгновенное значение оказывается внутри интервала, то оно заменяется ближайшим разрешенным. Эта операция называется **квантованием по уровню** (рис. 10.5).

Диапазон изменения функции разбивается на N уровней

$$N = \frac{x_{\text{макс}} - x_{\text{мин}}}{q_x} + 1.$$

Интервал q_x называется **шагом квантования.** Переход с одного уровня на другой происходит при значении x, находящемся в середине шага квантования.

С математической точки зрения квантование — это обычное округление чисел, к которому мы постоянно прибегаем. Например, $\pi = 3{,}14$ или $3{,}14159$ в зависимости от требуемой точности. Квантование применяется для последующего кодирования.

Кодирование — это преобразование сообщения в дискретный сигнал в виде кодовых комбинаций. Обратный процесс (декодирование), осуществляемый на приемной стороне телемеханической системы, должен однозначно восстановить передаваемое сообщение.

В телемеханике для формирования сигналов применяется как одноэлементное, так и многоэлементное кодирование. Используя одноэлементое кодирование, мож-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

но получить ограниченное число сигналов (в соответствии с небольшим количеством признаков одного элемента). Однако оно широко используется в телеуправлении, так как большинство телеуправляемых объектов является двухпозиционным, т. е. для управления ими требуется передача только двух команд («включить» и «отключить»).

В тех случаях когда число управляемых объектов велико или каждому объекту необходимо передавать несколько сигналов, прибегают к многоэлементному кодированию. Сигнал, сформированный с помощью многоэлементного кодирования, обычно включает в себя не только содержание команды, но и адрес, т. е. номер объекта, которому передается команда.

При многоэлементном кодировании сообщение передается в виде кодовой информации, составленной из определенного числа символов или признаков. Количество признаков называют **основанием кода.** Если основание кода равно двум (например, 0 и 1), то такие коды называются **двоичными** (бинарными), или **двухпозиционными.** Коды, у которых основание больше или равно 3, называются **многопозиционными** (троичными, четверичными и т. п.). В настоящее время в подавляющем большинстве случаев применяются двоичные коды.

С точки зрения достоверности передаваемой информации, наиболее важной является классификация кодов по возможности обнаружения и исправления ошибок. По этому признаку коды можно разделить на помехонезащищенные (не обнаруживающие искажения) и помехозащищенные (обнаруживающие искажения и обнаруживающие и исправляющие искажения).

Отличительной особенностью **помехонезащищенных кодов** является наличие в их составе кодовых комбинаций, которые отличаются друг от друга лишь в одном разряде. Типичным кодом такого типа является двоичный код на все сочетания (табл. 10.1). Например, комбинации 101 и 001 отличаются лишь в старшем разряде. Если помеха исказит первую комбинацию в этом разряде и будет принят сигнал 001, то будет неясно, пришла это первая искаженная или вторая неискаженная комбинация. К помехонезащищенным относятся

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 10.1. ТРЕХРАЗРЯДНЫЙ ДВОИЧНЫЙ КОД НА ВСЕ СОЧЕТАНИЯ

Двоичный код	Десятичная система, Ом·мм²/м	Двоичный код	Десятичная система Ом·мм²/м
000	0	100	4
001	1	101	5
010	2	110	6
011	3	111	7

единично-десятичный, двоично-десятичный и другие коды (иногда их называют обыкновенными).

Помехозащищенные (корректирующие) **коды** делятся на две группы: коды с обнаружением ошибок и коды с обнаружением и исправлением ошибок. Построение помехоустойчивого кода связано с недоиспользованием кодовых комбинаций, приводящим к так называемой **избыточности.** Избыточность означает, что из исходных символов можно построить больше комбинаций, чем их используется в данном коде. При построении такого кода информационными являются не все символы, часть их (избыточные) выполняют контрольные функции.

К кодам с обнаружением ошибок относятся коды с проверкой на четность (или нечетность), распределительный, инверсный, корреляционный и др. Добавление избыточных элементов к этим кодам приводит к дальнейшему повышению помехоустойчивости и возможности получить коды с исправлением ошибок.

Образованный операцией кодирования телемеханический сигнал должен быть преобразован с целью придания ему некоторых физических свойств, необходимых для передачи по линии связи. Одним из методов такого преобразования является модуляция.

Модуляцией называется процесс изменения параметра переносчика информации в соответствии с передаваемым сообщением. В качестве переносчиков информации используются либо высокочастотное гармоническое колебание (при непрерывной модуляции), либо непрерывная последовательность импульсов (импульсная модуляция).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

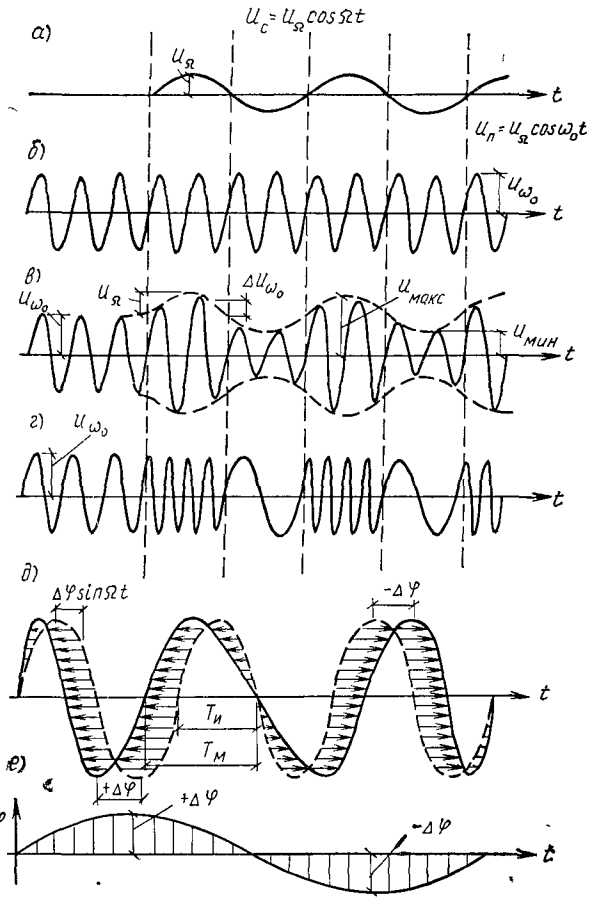


Рис. 10.6. Непрерывные модуляции

а — передаваемое сообщение; *б* — несущая частота (переносчик); *в* — амплитудная модуляция, *г* — частотная модуляция; *д* — фазовая модуляция, *е* — изменение фазы переносчика в соответствии с модулирующим сообщением

При непрерывных методах модуляции модулирующий сигнал воздействует на один из параметров несущего колебания:

$$u = U_{макс} \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где u — мгновенное значение гармонического колебания; $U_{макс}$ — амплитуда несущей; ω_0 — частота; φ — фазовый угол, или начальная фаза.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

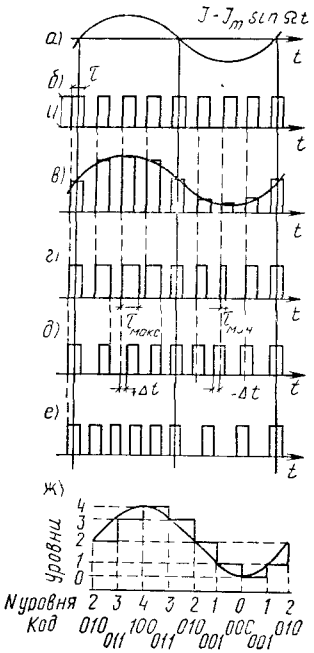


Рис. 10.7. Импульсные методы модуляции

а — передаваемое сообщение; *б* — переносчик сообщения; *в* — амплитудно-импульсная (АИМ), *г* — широтно-импульсная (ШИМ), *д* — фазо-импульсная (ФИМ); *е* — частотно-импульсная (ЧИМ); *ж* — кодо импульсная (КИМ)

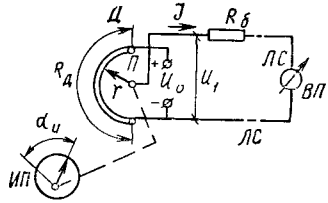


Рис. 10.8. Телеизмерительная схема интенсивности с реостатным датчиком

В зависимости от модулируемого параметра различают амплитудную модуляцию (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ) (рис. 10.6).

Серия импульсов характеризуется рядом параметров: амплитудой импульсов, длительностью импульсов, положением импульсов во времени, числом импульсов и т. д. В зависимости от того, какой параметр изменяется под воздействием сообщения при осуществлении импульсной модуляции, можно получить следующие виды модуляции: амплитудно-импульсную (АИМ), широтно-импульсную (ШИМ), фазо-импульсную (ФИМ), частотно-импульсную (ЧИМ), кодоимпульсную (КИМ) и т. д. (рис. 10.7).

Применение модуляции расширяет возможности передачи сообщений, что обусловлено следующими факторами:

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

а) увеличивается число сообщений, которые могут передаваться по одной линии связи путем использования частотного разделения сигналов;

б) повышается достоверность передаваемых сигналов при использовании помехоустойчивых типов модуляции;

в) повышается эффективность передачи, так как практически любой тип модуляции сопровождается перенесением спектра сигнала в более высокочастотную область.

Импульсная модуляция обладает бо́льшими возможностями повышения помехоустойчивости и эффективности передачи, чем непрерывная.

§ 10.3. Системы телеизмерения ближнего и дальнего действия

Системы телеизмерения предназначены для автоматических измерений параметров на расстоянии через каналы связи. Устройства телеизмерений принято называть по методу передачи сигналов через канал связи, т. е. по способу модуляции и кодирования, которыми передается значение измеряемого параметра.

В **системах ближнего действия** для передачи сигналов на расстояния до 15 км применяется амплитудная модуляция. Для уменьшения потери энергии в линии в качестве переносчика информации используется постоянный ток, так как в этом случае на уровне сигнала не будут сказываться индуктивность и емкость проводов. Такие системы называются *системами интенсивности*. В **системах дальнего действия** используются методы импульсной и частотной передачи сигнала, так как при изменении амплитуды сигнала вследствие затухания в линии связи частота сигнала и такие параметры, как длительность импульса или его задержка, в известных пределах не изменяются.

Рассмотрим две схемы телеизмерения (ТИ) ближнего и дальнего действия.

Телеизмерительная схема интенсивности тока ближнего действия с реостатным датчиком Д (рис. 10.8) основана на использовании перемещения ползунка П реостата R измерительным прибором ИП одновременно со стрелкой на угол $\alpha_и$. Изменение силы тока в линии связи ЛС, пропорциональное измеряемой величине, фик-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

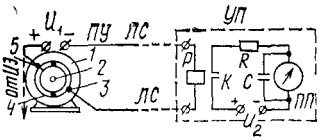


Рис. 10.9. Время-импульсная схема телеизмерения дальиего действия

сируется вторичным прибором ВП. Для снижения влияния изменения сопротивления линии связи ЛС включается балансное сопротивление $R_б$, значительно превышающее сопротивление проводов.

Так как для передвижения ползунка П требуется относительно большое усилие, эта схема применяется для измерения расхода, давления, уровня и других величин, при контроле которых измерительные приборы развивают значительные вращающие моменты.

Время-импульсная схема телеизмерения дальнего действия представлена на рис. 10.9. Принцип действия этой схемы основан на посылке сигналов в виде импульсов определенной продолжительности или на использовании пауз разной продолжительности между двумя импульсами.

Передающее устройство ПУ представляет собой синхронный двигатель *1*, на вал *2* которого насажены два медных полукольца *4*, изолированных между собой. От вала к полукольцам *4* прикасаются две металлические или графитовые щетки: одна из них *3* неподвижна, а другая *5* имеет кинематическую связь с измерительным прибором ИЭ. К щеткам подключается линией связи реле Р приемного устройства УП, использующего миллиамперметр ПП магнитоэлектрической системы

В процессе работы синхронный двигатель непрерывно вращается с постоянной скоростью. Когда щетка *5* находится в одной плоскости с щеткой *3* (как показано на рис. 10 9), вращающиеся полукольца *4* не могут замкнуть цепь питания линии связи ЛС от сети с напряжением *u;* линия связи ЛС обесточена При отклонении измеряемого параметра щетка *5* перемещается по полукольцу *4* к щетке *3*. В связи с этим в линию связи ЛС посылаются импульсы, продолжительность которых пропорциональна степени перемещения щетки *5* или величине измеряемого параметра.

В приемном устройстве УП реле Р при замыкании

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

своих контактов К посылает к прибору ПП импульсы тока или напряжения такой же продолжительности, как и импульсы в линии связи ЛС. Шкала прибора, измеряющая среднее значение импульсов тока, градуируется в единицах измеряемой величины. Сопротивление устройства УП ограничивает ток в цепи миллиамперметра, а конденсатор С является фильтром.

§ 10.4. Системы телеуправления и телесигнализации

Основным отличием систем **телеуправления** от систем дистанционного и местного управления является передача большого количества сигналов по значительно меньшему числу линий связи. Системы телеуправления обычно снабжаются обратной сигнализацией, осуществляемой по той же линии связи и подтверждающей выполнение объектами посылаемых им приказов, а также элементами, защищающими управляемые объекты от выполнения так называемых ложных, случайных приказов. Такие системы называются системами телеуправления и телесигнализации (ТУ и ТС).

Избирательностью называется способность систем телеуправления выбирать из большого количества посылаемых сигналов один какой-то сигнал определенного вида, требующийся для управления данным объектом.

В многопроводных системах телеуправления несколько различных сигналов посылается по нескольким линиям связи одновременно. Их основным достоинством является небольшой период времени, необходимый на передачу каждого отдельного сигнала, так как сигналы могут передаваться параллельно во времени.

В малопроводных системах телеуправления сигналы посылаются последовательно по времени (поочередно). Основное достоинство этих систем — экономичность вследствие сокращения числа линий связи.

Существующие устройства телеуправления по виду раздельной передачи сигналов или методу избирания и устройству линий связи можно разделить на три группы (рис. 10.10):

1) устройства телеуправления со схемным разделением сигналов, или многопроводные устройства;

2) устройства с частотным разделением сигналов;

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

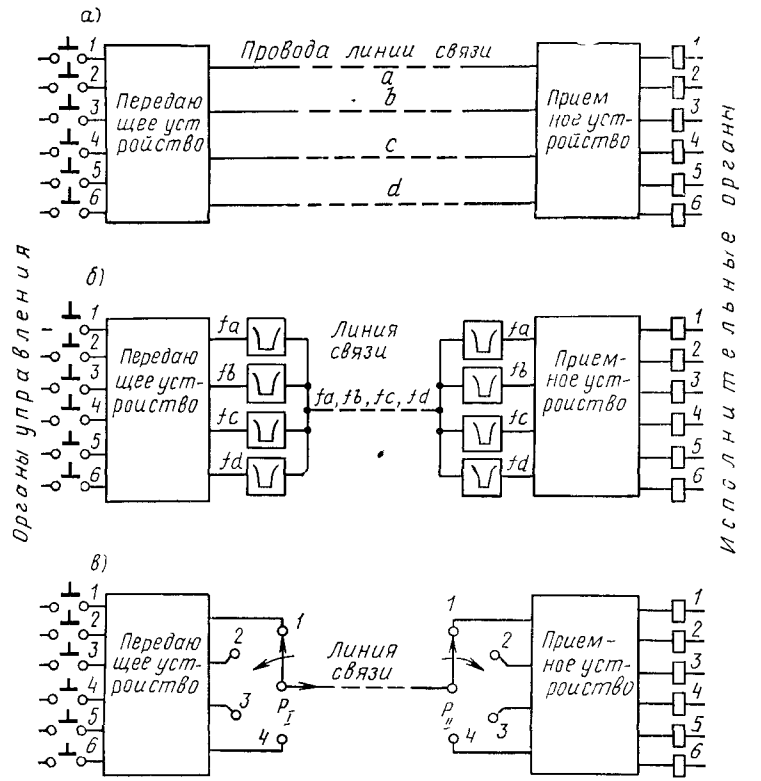


Рис. 10.10. Принципиальные схемы устройств телеуправления
а — многопроводное устройство с разделением сигналов по электрическим цепям, *б* и *в* — малопроводные устройства с частотным и временным разделением сигналов

3) устройства с временным разделением сигналов.

Многопроводные устройства ТУ-ТС (рис. 10.10, а) обычно применяют при сравнительно небольших расстояниях между пунктом управления и объектом управления. При наличии n самостоятельных проводов (кроме общего провода питания) по многопроводной системе можно передать сигналов $N=Kn$ (где K — число импульсных признаков; обычно $K=2\div4$).

В многопроводных устройствах передача всех импульсов может происходить одновременно, ибо для каждого импульса используется отдельная электриче-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Рис. 10.11. Схема шагового распределителя

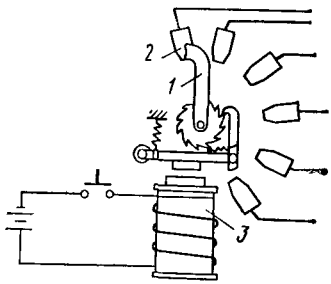
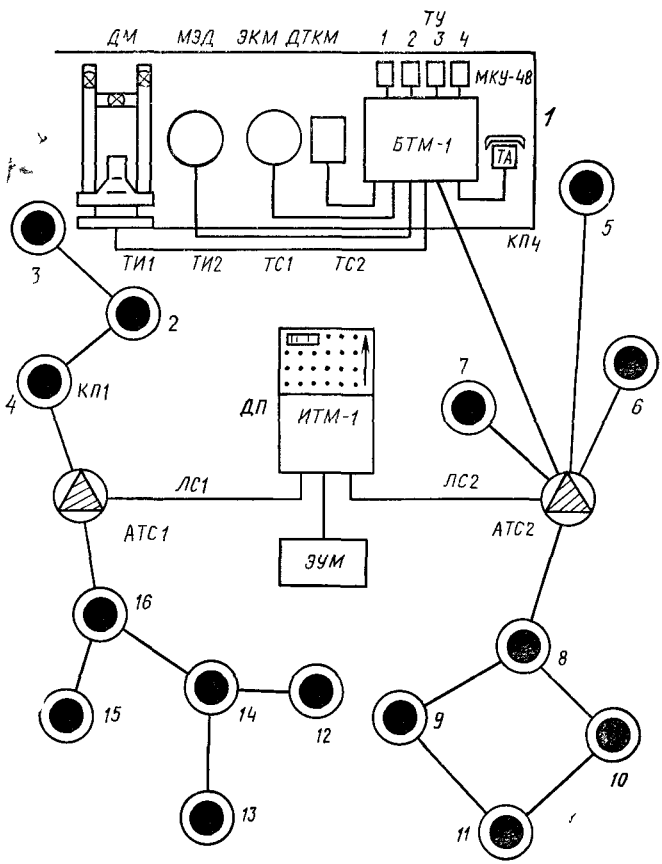


Рис. 10.12. Структурная схема устройства «Ритм 1»



Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ская цепь. Для разделения импульсов управления и сигнализации применяется амплитудный признак, при котором сила тока управления в несколько раз превышает силу тока сигнализации.

Малопроводные устройства ТУ-ТС с частотным разделением сигналов (рис. 10.10, *б*) обеспечивают передачу различных сигналов по одной линии связи за счет использования посылок тока разной частоты. В передающей части этих устройств имеется генератор синусоидальных колебаний разной частоты; в приемной части сигналы разделяются с помощью полосовых фильтров. Иногда для увеличения числа передаваемых сигналов вводят передачу каждого сигнала двумя частотами с соответствующей их комбинацией.

Малопроводные устройства ТУ-ТС с временным разделением сигналов (рис. 10.10, *в*) осуществляют передачу сигналов по одной линии связи в виде поочередной посылки импульсов с помощью распределителей. Два синхронно работающих распределителя P_1 и P_2 одновременно подключают линию связи к соответствующим управляющим и управляемым элементам схемы.

В качестве распределителей в системах телеуправления используются переключатели, приводимые в действие электродвигателями, электромагнитные шаговые распределители, релейные, катодные и бесконтактные переключатели.

Электромагнитные шаговые распределители (рис. 10.11) представляют собой контактное устройство, в котором перемещение щетки *1* по контактам *2* происходит последовательно с помощью электромагнитного провода *3*. Шаговые распределители широко применяются в системах телеуправления, так как они просты по устройству и имеют небольшую стоимость. Недостатками их являются относительно невысокая скорость переключения и наличие вращающихся частей.

В настоящее время применяют более совершенные бесконтактные переключатели, которые представляют собой цепочку бесконтактных элементов (например, триггерных ячеек), последовательно переключающихся при поступлении очередного импульса.

В качестве примера практического применения те-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

лемеханики в системах газоснабжения рассмотрим принцип работы устройства «Ритм-1».

Телемеханический комплекс «Ритм-1» предназначен для телемеханизации городских и промышленных систем газоснабжения. Он представляет собой телемеханическую систему циклического действия для рассредоточенных объектов контроля и управления.

К полукомплексу диспетчерского пункта (рис. 10.12), состоящему из информационно-телемеханической машины ИТМ-1 и цифропечатающей машины ЭЦМ-23, подключается шестнадцать полукомплексов контролируемого пункта КП, включающих блок телемеханики БТМ-1, датчики телеизмерения и телесигнализации, исполнительное реле и телефонный аппарат.

Информационно-телемеханическая машина ИТМ-1 имеет два линейных выхода, к каждому из которых может быть подключено до восьми КП при любой схеме соединения линий связи (цепочная, кольцевая, кустовая и древовидная) в зависимости от расположения объектов.

Универсальность применения обеспечивается разнообразием наборов операций на каждом КП. Все возможные варианты наборов операций приведены в табл. 10.2. Вся информация в системе передается двоичными

ТАБЛИЦА 10.2. ВАРИАНТЫ НАБОРОВ ОПЕРАЦИЙ

Вариант	Операция					Вариант	Операция				
	ТС	ТИ	ТУ	ТВ	ТФ		ТС	ТИ	ТУ	ТВ	ТФ
1 (основной)	2	2	4	2	1	5	2	0	6	2	1
2	2	2	5	1	1	6	2	0	7	1	1
3	2	1	5	2	1	7	4	0	6	2	1
4	2	1	6	1	1	8	4	0	7	1	1

кодами, которые воспринимаются оперативной памятью машины. Этим обеспечивается возможность непосредственной передачи информации на вход ЭВМ.

Комплекс «Ритм-1» имеет два режима работы: циклический и вызывной. Циклический опрос КП осуществляется каждые 3 мин и занимает 30 с. При этом осуществляется передача двух телесигнализаций: аварийной предупредительной и одного наиболее важного

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

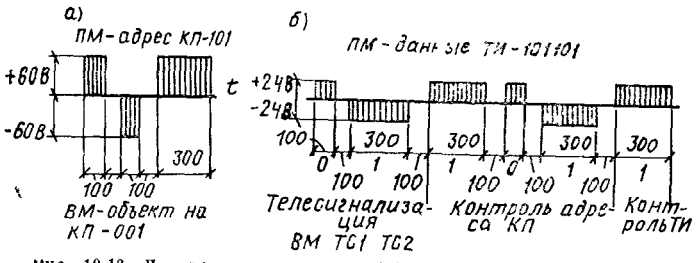


Рис. 10.13. Диаграмма командного (*а*) и известительного (*б*) сигналов ПМ и ВМ — полярная и временная модуляции

телеизмерения. На время опроса блокируются все операции по вызову, для которых отводится время в интервалах между опросами. При работе по вызову может осуществляться телеизмерение одной из двух величин, а однопозиционное телеуправление — одним из четырех объектов плюс телефонный вызов.

Включение КП и объекта на КП осуществляется командным сигналом, состоящим из трех импульсов с кодо-импульсной модуляцией по полярному и временному признакам. Полярный признак кодирует адрес КП, а временно́й — операции. После проверки кодов фиксируется командный сигнал, а затем на ДП передается известительный сигнал, имеющий два признака: полярный — для кодирования телеизмеряемой величины, временно́й — для кодирования сигналов состояния и контрольной проверки адреса КП и достоверности телеизмеряемой величины. Диаграммы командного и известительного сигналов представлены на рис. 10.13.

Телесигнализация аварийная ТС-1 и предупредительная ТС-2 передаются соответственно первым и вторым импульсами двухимпульсного контрольного и шестиимпульсного комплексного и известительного сигналов. Аварийный сигнал ТС-1 требует экстренного вмешательства персонала (сигналы о срабатывании предохранительного клапана, о загазованности помещения и т. п.). Предупредительные сигналы ТС-2 передают информацию об изменениях состояния, не требующих экстренного вмешательства (понижение температуры КП, понижение давления на входе или выходе и т. п.).

На информационно-телемеханической машине ИТМ аварийные сигналы воспроизводятся мигающим светом ламп, сопровождаемым звуковым сигналом.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При телеизмерении значение измеряемой величины передается шестиразрядным двоичным кодом. В комплексе «Ритм-1» для измерения давлений и расходов применяются серийные датчики ДМ (дифманометры мембранные) и МЭД (манометры с дифференциально-трансформаторной измерительной схемой). Сигнал датчика преобразуется в двоичный код. На ДП в информационно-телемеханической машине происходят обратное преобразование кода в десятичное значение телеизмеряемой величины и воспроизведение этого значения в виде трехразрядного десятичного числа. Возможно визуальное телеизмерение на трех световых проекционных табло (по вызову поворотом ключа ТИ). Циклический опрос каждые 30 мин сопровождается регистрацией ТИ на бланке цифропечатающей машины ЭЦМ-23.

Телеуправление осуществляется посылкой четырех командных сигналов, в которых номера объектов управления кодируются с использованием временного импульсного признака. Исполнение командного сигнала вызывает посылку сигнала исполнения, при котором зажигается соответствующая лампа на пульте управления.

В комплексе «Ритм-1» предусмотрено выполнение вспомогательных команд: защитный отказ при повреждении линии связи, неисправности аппаратуры и других неисправностях.

С помощью часового механизма создаются тактовые электрические импульсы через каждые 60 с. Часовой механизм может служить датчиком импульсов для других информационно-телемеханических машин на ДП для синхронизации работы всех импульсов.

«Ритм-1» допускает внеочередной опрос с телеизмерением основного параметра.

Комплекс «Ритм-1» отличается экономичностью линейных схем, универсальностью применения, простотой структуры и конструкции и низкой стоимостью.

Существуют и другие телемеханические комплексы («Район», «Обзор» и др.). Они могут использоваться автономно и могут являться базовыми элементами многоступенчатых систем диспетчерского контроля и управления.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

РАЗДЕЛ IV. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

ГЛАВА 11. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

§ 11.1. Содержание и состав проекта системы автоматизации технологического процесса

В соответствии с существующими инструкциями и сложившейся практикой проектирования проект системы автоматического управления технологическим процессом содержит графическую (чертежи и схемы) и текстовую части.

Графическая часть проекта включает:

1) функциональную схему технологического контроля, автоматического регулирования, управления и сигнализации, предназначенную для пояснения функций, выполняемых системой управления, использованных методов и законов контроля и регулирования;

2) чертежи общих видов щитов и пультов управления, содержащие упрощенное изображение щитов, пультов и приборов на них, общие габаритные размеры щитов и координаты расположения приборов;

3) принципиальные электрические, пневматические, гидравлические схемы автоматического управления, регулирования и сигнализации, предназначенные для получения детального представления о принципах работы системы, определения полного состава их функциональных частей и связей между ними, необходимые для разработки рабочей документации.

Для сложных систем управления дополнительно составляют:

а) схему взаимосвязей между пунктами контроля и управления, предназначенную для пояснения принципов информационной и функциональной связи между ними;

б) чертеж расположения щитов и пунктов контроля и управления, содержащий упрощенный план расположения технологического оборудования и нанесенных на нем щитов и пультов.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При выполнении рабочего проекта функциональные и принципиальные схемы разрабатываются повторно с учетом изменений технологической части проекта и замечаний по схемам автоматизации, сделанных при рассмотрении технологического проекта. При отсутствии изменений и замечаний эти схемы включаются в состав рабочих чертежей без переработки.

В процессе рабочего проектирования разрабатывают графические материалы:

1) принципиальные схемы питания приборов энергией, поясняющие принципы обеспечения аппаратуры энергией и ее защиты;

2) монтажные схемы щитов, пультов и соединительных коробок, содержащие упрощенное изображение щитов, пультов, соединительных коробок и расположенных в них приборов, электрических и трубных коммуникаций между ними и данные, необходимые для их монтажа;

3) схемы внешних электрических и трубных проводок, предназначенные для определения связей между аппаратурой, устанавливаемой на технологических агрегатах, щитами и пультами управления;

4) чертежи расположения аппаратуры, электрических и трубных проводок, предназначенные для определения относительного расположения технических средств системы управления и необходимых связей между ними;

5) чертежи установки аппаратуры, вспомогательных устройств, щитов и пультов управления, содержащие данные, необходимые для их монтажа.

При одностадийном проектировании в состав техноарабочего проекта входит полный комплект графических материалов.

§ 11.2. Исходные данные для проектирования

Исходные данные для проектирования содержатся в техническом задании на разработку системы автоматического управления технологическим процессом. Техническое задание подготовляется разработчиками технологического процесса или технологической установки, подлежащих автоматизации. В его создании должны

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

принимать участие будущие исполнители — проектировщики системы управления.

Задание на разработку системы содержит технические требования, предъявляемые к ней заказчиком. Кроме того, к нему прикладывается комплект материалов, необходимых для проектирования.

Основными элементами задания являются перечень объектов автоматизации — технологических агрегатов и установок, а также функции, выполняемые системой контроля и регулирования, обеспечивающей автоматизацию управления этими объектами. Задание содержит ряд данных, которые определяют общие требования и характеристики системы, а также описывают объекты управления. Эта часть задания состоит из трех разделов:

1) обоснование разработки;
2) условия эксплуатации системы;
3) описание технологического процесса.

Обоснование разработки содержит ссылки на плановые документы, определяющие порядок проектирования автоматизированного технологического процесса, плановые сроки проектирования, стадийность проектирования, допустимый уровень затрат на создание системы управления, технико-экономическое обоснование целесообразности проектирования автоматизации и оценку подготовленности объекта к автоматизации.

Описание условий эксплуатации проектируемой системы содержит условия протекания технологического процесса (пыле-, взрыво-, пожароопасность, содержание влаги, агрессивных примесей в окружающей среде, шум, вибрации и т п.), требования к степени централизации контроля и управления, к выбору режимов управления, к унификации аппаратуры автоматизации, условия ремонта и обслуживания парка приборов на предприятии, данные об источниках энергии для питания аппаратуры автоматики.

Описание технологического процесса включает:

а) технологические схемы процесса;

б) чертежи производственных помещений с размещением технологического оборудования;

в) чертежи технологического оборудования с указа-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

нием конструкторских узлов для установки датчиков контроля;

г) схемы электроснабжения;

д) схемы воздухоснабжения;

е) данные для расчетов систем контроля и регулирования;

ж) данные для расчета технико-экономической эффективности системы автоматизации.

§ 11.3. Назначение и содержание функциональной схемы

Функциональная схема автоматического контроля и управления предназначена для отображения основных технических решений, принимаемых при проектировании системы автоматизации технологических процессов. Она является одним из основных документов проекта и входит в его состав при разработке технической документации на всех стадиях проектирования.

В процессе разработки функциональной схемы формируются структура создаваемой системы и функциональные связи между объектом управления — технологическим процессом и аппаратурной частью системы — приборами управления и сбора информации о состоянии технологического процесса (рис. 11.1).

При создании функциональной схемы определяют:

1) целесообразный уровень автоматизации технологического процесса;

2) принципы организации контроля и управления технологическим процессом;

3) технологическое оборудование, управляемое автоматически, дистанционно или в обоих режимах по заданию оператора;

4) перечень и значения контролируемых и регулируемых параметров;

5) методы контроля, законы регулирования и управления;

6) объем автоматических защит и блокировок автономных схем управления технологическими агрегатами;

7) комплект технических средств автоматизации, вид энергии для передачи информации;

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

8) места размещения аппаратуры на технологическом оборудовании, на щитах и пультах управления.

Функциональная схема автоматического контроля и управления содержит упрощенное изображение технологической схемы автоматизируемого процесса или агрегата. Технологическая схема состоит из цепи устройств или агрегатов, расположенных в соответствии с технологическим процессом.

Оборудование на схеме показывается обычно в виде условных изображений, соединенных между собой линиями технологических связей, которые отражают направление потоков вещества или энергии.

На функциональной схеме изображаются системы автоматического контроля, регулирования, дистанционного управления, сигнализации, защиты и блокировок. Все элементы систем управления показываются в виде условных изображений и объединяются в единую систему линиями функциональной связи. Нанесенные на условные изображения буквенные обозначения отражают функции, выполняемые аппаратурой управления.

На функциональной схеме показывается также различная аппаратура управления: устройства, устанавливаемые на технологических агрегатах и потокопроводах: первичные приборы (датчики) и регулирующие органы; приборы, монтируемые около технологической аппаратуры (по месту), но не на щитах управления; блоки усилителей, преобразователи сигналов, магнитные пускатели, местные измерительные приборы, исполнительные механизмы; аппаратура, устанавливаемая на щитах и пультах управления; вторичные приборы, регуляторы, ключи управления, сигнальные лампы. Для изображения каждой группы приборов на схеме выделяется специальная зона (рис. 11.1).

Кроме того, на схеме даются текстовые пояснения, отражающие назначение и характеристики технологических агрегатов, величины контролируемых и регулируемых параметров, условия блокировки и сигнализации.

Функциональная схема автоматического контроля и управления — основной документ проекта, на котором показаны все системы управления процессом, принципы их построения и взаимосвязи, использованные методы контроля, поэтому в процессе работы над про-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

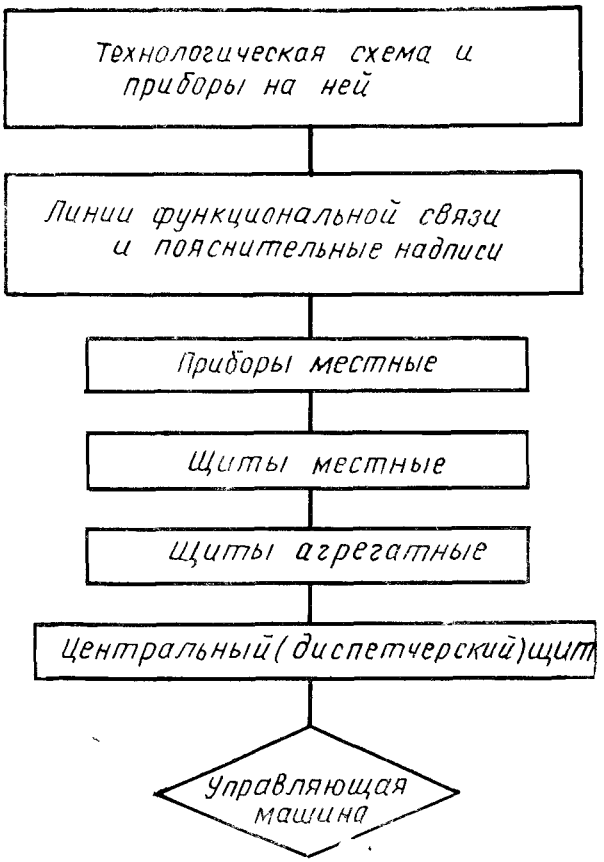


Рис. 11.1. Структура размещения зон функциональной схемы автоматического контроля и управления

ектом необходимо постоянно обращаться к схеме, чтобы все принципы, заложенные в систему управления при разработке функциональной схемы, были реализованы, а новые идеи, возникшие при работе над проектом, находили в ней отражение.

При обсуждении и анализе предполагаемой системы управления удобно пользоваться функциональной схемой, отражающей в концентрированном виде основное содержание проекта. В дальнейшем (в процессе монтажа, наладки и эксплуатации) изучение проекта на-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

чинается с подробного ознакомления с функциональной схемой. В соответствии с существующей практикой функциональная схема является основанием для составления заявочной спецификации на приобретение приборов и средств автоматизации.

В некоторых случаях, когда функциональная схема оказывается весьма насыщенной, ее можно разделить на несколько схем, выделяя системы управления отдельными агрегатами технологического процесса.

Стандартизация изображения функциональной схемы автоматического контроля и управления достигается применением ГОСТов ЕСКД на общие требования к выполнению схем (ГОСТ 2.701-76), правил обозначения на схемах технологического оборудования (ГОСТ 2.788-74 — ГОСТ 2.792-74 и др.), технологических коммуникаций (ГОСТ 2.791-74 и ГОСТ 3464-63), а также приборов и средств автоматизации.

В последнее время ряд организаций для построения функциональных схем использует обозначения по ОСТ 36-27-77 «Приборы и средства автоматизации. Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов», которые приняты с учетом функциональных признаков приборов (табл. 11.1). С 1986 г. вместо ОСТ 36-27-77 вводится в действие ГОСТ 21.404—85.

Измеряемые (управляемые) технологические параметры и функции, выполняемые прибором, обозначают буквами латинского алфавита.

При этом применяются следующие обозначения:

D — плотность;
F — расход;
G — размер, перемещение;
H — ручное воздействие;
K — время, временная программа;
L — уровень;
M — влажность;
N — резерв (аппаратура управления электродвигателей);
O — резерв;
P — давление;
Q — состав, концентрация;
R — радиоактивность;
S — скорость, частота;
T — температура;
U — несколько измеряемых величин;
V — вязкость;
X — перекомендованная резервная буква.

Дополнительные буквы: *D* — разность, перепад; *F* — соотношение; *J* — автоматическое переключение, обегание; *Q* — интегрирование, суммирование по времени.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА 11.1. ОБОЗНАЧЕНИЯ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ (ОСТ 36-27-77)

Наименование	Изображение
Первичный измерительный прибор (преобразователь, датчик), устанавливаемый по месту	
Прибор, устанавливаемый на щите	
Отборное устройство без постоянного подключения прибора	
Исполнительный механизм	
Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом	
Регулирующий орган	
Линия функциональной связи	

В схемах указываются следующие функциональные признаки приборов:

отображение информации: A — сигнализация; I — показание; R — регистрация;

формирование выходного сигнала: C — регулирование; S — включение, отключение, переключение, сигнализация (H и L — соответственно верхний и нижний пределы параметров).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

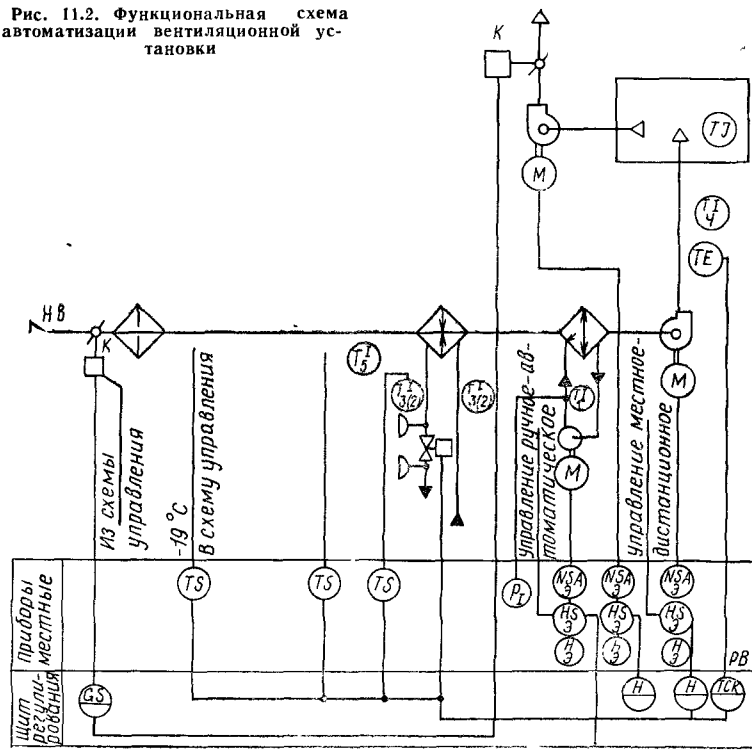


Рис. 11.2. Функциональная схема автоматизации вентиляционной установки

Для дополнительных обозначений, отражающих функциональные признаки приборов и преобразователей сигналов, используют буквы: E — чувствительный элемент (первичное преобразование); T — дистанционная передача; K — станция управления; E, P и G — соответственно электрический, пневматический и гидравлический сигналы. Функции преобразования сигналов обозначаются соответствующими математическими знаками: Σ, $\sqrt[n]{}$, lg, dx/dt, max, min и др.

Указанная методика построения функциональных схем полностью сохраняется и может быть развернутой или упрощенной. Обозначения технологических параметров и функциональных признаков записываются в верхней части круга. Порядок расположения буквенных обозначений (слева направо) должен быть следу-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ющим: обозначение основной измеряемой величины; обозначение, уточняющее (если необходимо) основную измеряемую величину; обозначение функционального признака прибора. Функциональные признаки также располагаются в определенном порядке, например, IRCSA. В нижней части круга или под чертой щитового прибора указывается номер позиции.

При условном обозначении приборов следует указывать лишь те признаки, которые являются существенными в данной системе контроля или управления. Например, при обозначении приборов контроля и управления температурным режимом могут быть применены следующие обозначения: TE — первичный преобразователь; TS — сигнализатор, переключатель блокировок; TA — сигнализатор (используются только лампы прибора); TC — регулятор; TIT — показывающий и преобразующий прибор; TJR — прибор регистрирующий с обегающим устройством; TIRC — прибор показывающий, регистрирующий, регулирующий.

На рис. 11.2. показан пример построения функциональной схемы с использованием условных обозначений по ОСТ 36-27-77.

ГЛАВА 12. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА И ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

§ 12.1. Основные положения

В современных требованиях к автоматизированным системам вентиляции (СВ) и кондиционирования воздуха (СКВ) содержатся два противоречивых условия: первое — простота и надежность эксплуатации; второе — высокое качество функционирования, например, качество стабилизации температуры приточного воздуха, минимум расхода энергии и т. д. Стремление к выполнению этих условий связано с 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 автоматичес-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

кого управления. Правильный выбор структуры системы кондиционирования воздуха и установочной мощности технологического оборудования — это лишь часть задачи разработки и проектирования.

Наиболее сложной составляющей процесса разработки является выбор режимов функционирования СКВ в годовом цикле работы. Известно, что годовое изменение параметров наружного воздуха предопределяет существенную нестационарность и нелинейность отдельных характеристик технологического оборудования. Это прежде всего сказывается на так называемых регулировочных характеристиках оборудования, что значительно усложняет задачу выбора методов и средств автоматического управления режимами работы технологического оборудования систем.

Основным принципом в технической организации автоматического управления СВ и СКВ является функциональное выделение и соответствующее конструктивное оформление иерархической структуры подлежащих выполнению задач защиты, регулирования и управления

Следует отметить, что перечисленные ранее функции автоматического управления, по крайней мере двух низших уровней, не являются новыми Существенно новыми для управления промышленными СВ и СКВ являются их группировка и обособленное функционально независимое конструктивное оформление. Предлагаемая структура технической реализации управления позволяет решать ряд вопросов, связанных с повышением эксплуатационных и надежностных характеристик автоматизированной системы, а также вопросов, связанных с последовательностью ввода в действие иерархической структуры и комплектацией ее средствами автоматического управления

Всякая промышленная СКВ должна быть снабжена элементами и устройствами автоматического пуска и останова, а также устройствами защиты от аварийных ситуаций. Этот **первый уровень** автоматизации СКВ подлежит обязательному выполнению и не может быть заменен (это касается защиты) ручным управлением с помощью оператора. Защита оборудования от аварий-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ных ситуаций должна решаться на наиболее надежных элементах автоматики.

Для непрерывного выполнения функций защиты следует использовать элементы, обладающие повышенной надежностью (свойствами минимальной интенсивности потока отказов). Поскольку при обеспечении защиты оборудования исключена возможность резервирования в форме ручного управления, допустимо применение поэлементного функционального резервирования средств автоматической защиты. При этом следует помнить, что работа автоматизированной СКВ без аварийных ситуаций будет только в том случае, когда оборудование и средства автоматической защиты обладают способностью выполнять заданные функции в течение требуемого 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 схемы ручного управления. Действительно, если имеет место отказ в работе локального контура автоматической стабилизации температуры воздуха на выходе из воздухоподогревателя, то совершенно правомерно использование органов ручного управления с автоматическими клапанами или ручных вентилей на трубопроводе теплоносителя.

Если оценивать надежность эксплуатации средств автоматического управления второго уровня, то следует иметь в виду, что в этом случае в отличие от первого уровня ущерб, возникающий вследствие отказа функции, зависит главным образом не от числа отказов (которые в первом уровне носят достаточно опасный характер), а от интервалов времени, в течение которых прекращается выполнение функций стабилизации. Поэтому для выполнения функций стабилизации следует использовать элементы, обладающие возможно наиболее высоким коэффициентом готовности.

Техническая реализация **третьего иерархического уровня** управления СКВ в настоящее время еще не получила широкого развития. Однако актуальность про-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

блемы 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.

Разработаны электрические (в отличие от механических муфт, дросселей и т. д.) средства изменения производительности вентиляторов и насосов; например, тиристорные устройства управления частотой вращения трехфазных асинхронных двигателей. Однако в силу ряда обстоятельств, в том числе из-за отсутствия необходимых проектных разработок, регулирование расходов перемещаемых сред путем изменения режимов работы вентиляторов и насосов не нашло широкого применения в СКВ. В то же время организация автоматического выбора и переключения технологических режимов работы оборудования уже имеет место в отдельных случаях и будет получать все большее распространение.

Решение задач третьего уровня управления связано с обработкой информации и формированием управляющих воздействий путем решения дискретных логических функций или проведения ряда определенных вычислений. Для реализации подобных задач потребуются элементы вычислительной техники, логические устройства. 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 элементы различия и главным образом уровень сложности выполняемых функций обусловливают целесообразность выделения третьего уровня управления СКВ.

Рассмотренная структура технической реализации автоматического управления системами промышленной вентиляции и кондиционирования воздуха позволяет более рационально решить задачи дистанционного управления. Очевидно, что вынесению на центральный пункт управления системами подлежат сигналы первого уровня и сигналы и команды, необходимые для выполнения функций третьего уровня. Причем третий

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

уровень функциональных задач управления может решаться только на центральном пульте. Вынесение промежуточной информации о работе 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 СКВ позволяет осуществить организацию эксплуатации систем в зависимости от специфики предприятия и его служб эксплуатации. Следует иметь в виду, что иерархическая структура управления СКВ предусматривает выполнение функциональных задач низшим уровнем независимо от более высших. Это качество позволяет организовать управление СВ и СКВ с различной степенью развития.

По тем или иным соображениям условий эксплуатации или возможностям капитальных вложений система автоматического управления может быть реализована только с устройствами пуска, останова и приборами и устройствами предварительной защиты, т. е. при наличии только низшего уровня управления. Остальные функции управления в той или иной мере осуществляются обслуживающим персоналом вручную. Первый уровень 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.

Регулирование систем кондиционирования воздуха основано на анализе стационарных и нестационарных тепловых процессов.

Изучение закономерностей изменения режима работы в течение годового периода эксплуатации связано в

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

основном с рассмотрением стационарных тепловых процессов, поскольку в этом случае изменение расчетных среднесуточных и среднемесячных значений возмущающих воздействий (например, температуры наружного воздуха, солнечной радиации и т. д.) происходит значительно медленнее по сравнению с переходными тепловыми процессами в помещении и системе. Анализ режимов работы и регулирования систем в этом случае проводится с целью оптимального выбора контуров регулирования и является исходным для определения годовых расходов теплоты и холода — важных показателей экономической эффективности систем кондиционирования воздуха.

Регулирование систем кондиционирования воздуха в течение коротких промежутков времени (в пределах нескольких часов или суток под влиянием нерегулярных возмущающих воздействий) определяется главным образом нестационарными тепловыми процессами, так как время изменения возмущающих воздействий соизмеримо со временем переходных тепловых процессов в помещении и системе. Анализ нестационарных тепловых процессов в расчетные (теплый и холодный) периоды года проводится с целью определения максимальной тепловой мощности систем кондиционирования воздуха, а также наиболее выраженной динамики ее изменения, что позволяет определить требуемые характеристики регулирующих устройств.

Самым невыгодным будет процесс регулирования при скачкообразном или близком к скачкообразному изменении возмущающих воздействий. В этом случае длительность и характер переходных тепловых процессов будут полностью определяться динамическими свойствами системы кондиционирования и помещения как объекта регулирования и характеристиками регулирующих устройств.

При рассмотрении вопросов режима СКВ прежде всего следует проанализировать ее работу в течение года и в расчетных летних и зимних условиях. Необходимо установить качественные и количественные изменения всех компонентов, определяющих процесс кондиционирования и работу отдельных элементов системы, в результате чего будут определены характеристики

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

расчетного режима работы СКВ и технологические приемы реализации этого режима. На основании анализа возможных наиболее невыгодных разовых возмущений будут выявлены технологические характеристики расчетного режима регулирования СКВ.

Совместное рассмотрение технологических приемов поддержания режима работы и регулирования СКВ, а также решения по оптимизации энергопотребления при заданной обеспеченности расчетных внутренних условий и разработка некоторых других специальных вопросов позволят определить технологическую схему управления СКВ. Дальнейшая задача состоит в автоматизации принятой технологической схемы управления СКВ, которая автоматически обеспечит заданный режим работы и регулирование отдельных элементов и системы в целом в оптимальном режиме.

Управление системами кондиционирования воздуха (СКВ) является более общим понятием и кроме рассмотренных ранее вопросов работы и регулирования включает также блокировку, выбор режимов работы (в том числе включения и выключения системы), защиты оборудования установок кондиционирования воздуха. Эффективное управление СКВ по выбранной схеме невозможно без ее автоматизации.

С помощью приборов и устройств автоматики, входящих в схему управления СКВ, решаются задачи командного пуска и остановки агрегатов, автоматического поддержания заданных режимов работы как отдельных, так и нескольких агрегатов системы. Приборы и устройства автоматики осуществляют контроль и сигнализацию предаварийных ситуаций, а также автоматическое выключение оборудования в случае аварии.

Раздельное или совокупное поддержание заданных режимов работы СКВ проводится приборами и устройствами автоматики, образующими как простые локальные контуры регулирования, так и сложные многоконтурные системы автоматического регулирования (САР). Качество работы СКВ определяется главным образом соответствием создаваемых параметров микроклимата в помещениях здания или сооружения их требуемым значениям и зависит от правильности выбора как тех-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

нологической схемы и ее оборудования, так и элементов системы автоматического управления этой схемы

§ 12.2. Автоматизация приточных камер

При регулировании теплопроизводительности приточных камер наиболее распространенным является способ изменения расхода теплоносителя Применяется также способ автоматического регулирования температуры воздуха на выходе из приточной камеры путем изменения расхода воздуха. Однако при раздельном применении этих способов не обеспечивается максимально допустимое использование энергии теплоносителя.

С целью повышения экономичности и быстродействия процесса регулирования можно применить совокупный способ изменения теплопроизводительности воздухоподогревателей установки. В этом случае система автоматического управления приточной камерой предусматривает выбор способа управления приточной камерой (местное, кнопками по месту, автоматическое со щита автоматизации), а также зимнего и летнего режимов работы; регулирование температуры приточного воздуха путем воздействия на исполнительный механизм клапана на теплоносителе; автоматическое изменение соотношения расходов воздуха через воздухоподогреватели и обводной канал; защиту воздухоподогревателей от замерзания в режиме работы приточной камеры и в режиме резервной стоянки; автоматическое отключение вентиляторов при срабатывании защиты от замерзания в режиме работы; автоматическое подключение контура регулирования и открытие приемного клапана наружного воздуха при включении вентилятора; сигнализацию опасности замерзания воздухоподогревателя; сигнализацию нормальной работы приточной камеры в автоматическом режиме и подготовки к пуску.

Система автоматического управления приточной камерой (рис. 12.1) работает следующим образом. Выбор способа управления производится поворотом переключателя *SA1* в положение «ручное» или «автоматическое», а выбор режима работы — переключателем *SA2* поворотом его в положение «зима» или «лето».

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

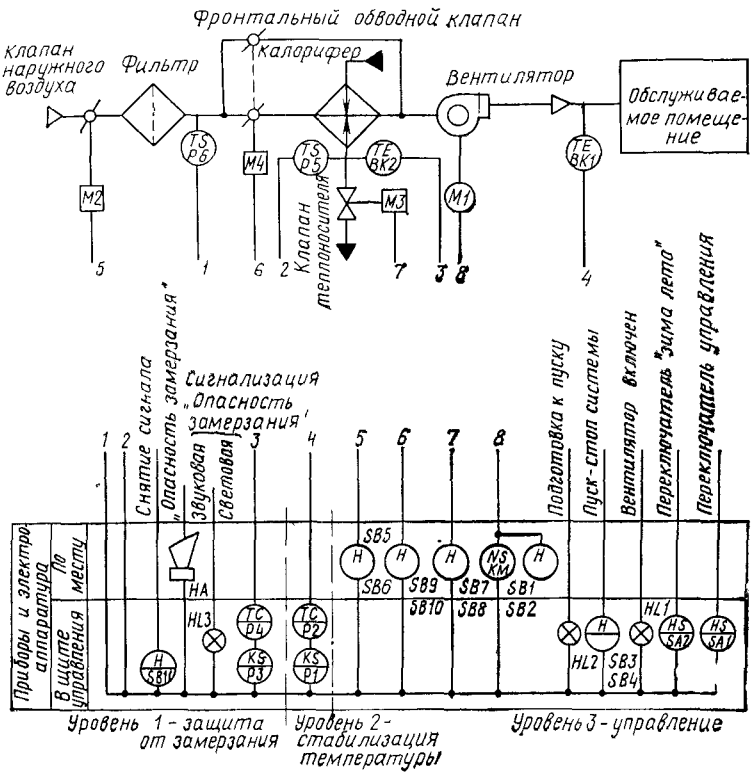


Рис. 12.1. Функциональная схема управления приточной камерой

Ручное местное управление электродвигателем приточного вентилятора *M1* производится кнопками *SB1* «Стоп» и *SB2* «Пуск» через магнитный пускатель *KM*; 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 *K5* и собственные конечные выключатели и исполнительным механизмом *M4* фронтально-обводного клапана кнопками *SB9*, *SB10*.

Включение — выключение электродвигателя *M1* вен-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

тилятора сигнализируется лампой *HL1* «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 *K1* и *K2*. При этом перед включением вентилятора промежуточные реле *K1*, *K3* и *K6* обеспечивают принудительное открытие клапана на теплоносителе, а после включения вентилятора промежуточное реле *K2* подключает контур регулирования температуры приточного воздуха и защиту от замерзания, а также открывает приемный клапан наружного воздуха.

Поддержание температуры приточного воздуха осуществляется 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 в трубопроводе теплоносителя. Управляющие сигналы через релейно-импульсный прерыватель *P3* подаются на исполнительный механизм *M4* фронтально-обводного клапана.

Защита воздухоподогревательной установки от замерзания обеспечивается датчиком — реле температуры теплоносителя *P5*, чувствительный элемент которого установлен в трубопроводе теплоносителя сразу за первой по ходу воздуха секцией подогрева, и датчиком—реле температуры воздуха *P6*, чувствительный элемент которого установлен в воздуховоде между приемным клапаном наружного воздуха и воздухоподогревательной установкой. В случае опасности замерзания через промежуточное реле *K6* производятся отключение электродвигателя *M1* приточного вентилятора, открытие клапана на теплоносителе и включение сигнализации, а также закрытие приемного клапана наружного воздуха. Возникновение опасности замерзания сигнализируется лампой *HL3* «Опасность замерзания» и звуковым сигналом *HA*.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Подготовка к пуску вентилятора после нажатия кнопки *SB4* сигнализируется лампой *HL2* (только для зимнего режима).

В системах промышленной вентиляции широко распространено использование группы приточных камер (ПК), работающих в режиме поддержания одинаковой температуры приточного воздуха. Известны два способа регулирования теплопроизводительности группы приточных камер: изменением расхода теплоносителя и изменением температуры теплоносителя при неизменных расходах теплообменивающихся сред.

Первый способ регулирования позволяет простыми средствами поддерживать заданную теплопроизводительность ПК минимальным количеством теплоносителя, обеспечивать гидродинамическую стабилизацию системы. Однако при его использовании необходимо принимать особые меры по защите теплообменников от замерзания, что особенно важно при наличии определенного запаса по площади поверхности нагрева.

В зарубежной практике широко применяется второй способ регулирования теплопроизводительности, который в отечественной практике не нашел достаточного распространения по ряду причин. Тем не менее этот способ завоевывает все большую популярность, так как позволяет минимальными средствами автоматически решать проблему защиты от замерзания. Кроме того, при его использовании исключаются перерасходы теплоты на воздушное отопление и вентиляцию помещений, т. е. уменьшаются суммарные за отопительный период расходы поступающего от ТЭЦ теплоносителя.

Системой автоматического управления группой приточных камер предусматривается регулирование теплопроизводительности воздухоподогревательных установок изменением температуры подаваемого теплоносителя при постоянном расходе воздуха и теплоносителя через них путем подмешивания части теплоносителя из обратной линии в подающую.

На рис. 12.2 представлена упрощенная функциональная схема системы. Группа воздухоподогревательных установок приточных камер $ПК1—ПК_{п}$, соединенных по теплоносителю параллельно, связана трубопровода-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

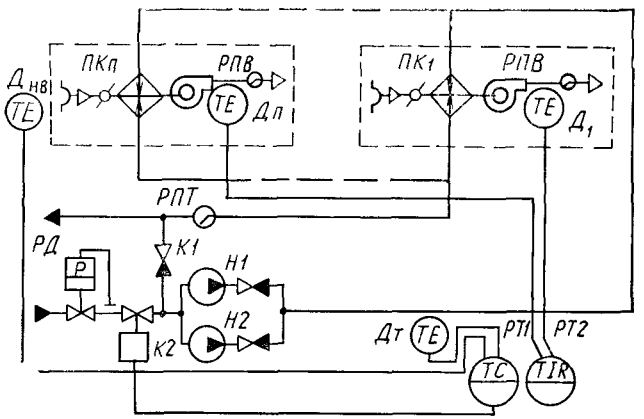


Рис. 12.2. Фуикциональная схема управления группой приточных камер

ми с узлом подготовки теплоносителя, 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 датчики *ДТ* 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 *Д1*—$Д_п$ и реле протока воздуха *РПВ*, установленные в каждой приточной камере. Сигнализатор *РТ2* конструктивно выполнен в виде регулирующего многоточечного моста *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 *ПК1*—$ПК_п$; запустить в соответст-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вующем направлении и остановить исполнительный механизм регулирующего клапана *К2*; запустить в соответствующем направлении и остановить исполнительные механизмы любого воздушного клапана.

В режиме автоматического управления система позволяет осуществить программный запуск и выключение приточных камер $ПК1—ПК_{п}$, 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» производится с дистанционного щита.

В режиме ручного управления при переводе переключателя выбора насоса в положение «О» управление двигателями насосов производится установленными по месту кнопками «Пуск» и «Останов». Там же установлены кнопки ручного управления электродвигателями вентиляторов, исполнительных механизмов клапана *К2* и воздушных приемных клапанов.

В режиме автоматического управления при переводе переключателей режима работы в положение «автомат» и выбора насоса в положение *1* и *2* 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

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

обесточиваются магнитные пускатели насоса и электродвигателей вентиляторов, закрываются воздушные приемные клапаны и клапан *К2* на теплоносителе.

§ 12.3. Анализ годового режима работы систем кондиционирования воздуха и выбор контуров регулирования

Разработка схем автоматизации систем кондиционирования микроклимата связана прежде всего с анализом работы в течение годового периода эксплуатации. Применительно к системам кондиционирования воздуха анализ режимов работы в течение года проводится аналитическим путем и графически с применением *I—d*-диаграммы (после выбора схемы обработки воздуха в расчетных зимних и летних условиях).

Рассмотрим работу системы кондиционирования воздуха круглогодичного действия на примере установки кондиционирования с первой рециркуляцией (рис. 12. 3). Схемой обработки воздуха в расчетный холодный период предусматриваются нагрев наружного воздуха сначала в утилизаторе *У*, а затем в воздухоподогревателе первой ступени *ВП1*, смешивание его с воздухом первой рециркуляции, адиабатическое увлажнение полученной смеси в оросительной камере, нагрев смеси в воздухоподогревателе второй ступени подогрева *ВП2* и выпуск ее в помещение (луч процесса $\varepsilon_{п.з}$). В расчетный теплый период происходят смешивание наружного воздуха с воздухом первой рециркуляции, политропическая осушка и охлаждение смеси в оросительной камере, затем нагрев смеси в воздухоподогревателе второй ступени подогрева *ВП2* и выпуск ее в помещение (луч процесса $\varepsilon_{п\,л}$).

В кондиционируемом помещении температура $t_в$ и относительная влажность $\varphi_в$ воздуха должны поддерживаться с заранее известной точностью в некоторых пределах в течение всего годового периода эксплуатации системы кондиционирования воздуха, что приводит к необходимости ее регулирования (рис. 12.3,*в*).

Регулирование по температуре точки росы. В настоящее время наиболее распространенным способом регулирования систем кондиционирования воздуха явля-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

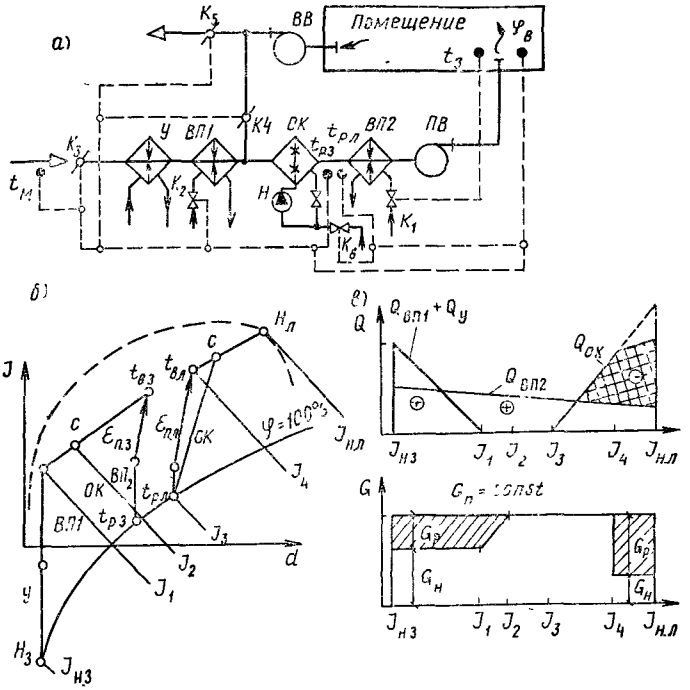


Рис. 12.3. Система кондиционирования воздуха с первой рециркуляцией круглогодичного действия

а — схема СКВ; *б* — процессы обработки воздуха в *I* — *d*-диаграмме; *в* — графики регулирования; ПВ — приточный вентилятор; ВВ — вытяжной вентилятор, Н — насос

ется способ точки росы, при котором относительная влажность воздуха в процессе обработки в оросительной камере приближается к $\varphi = 100\%$ (реально 90—95 %).

Относительное постоянство $\varphi_в$ в помещении обеспечивается путем стабилизации температуры точки росы $t_{т.р}$ приточного воздуха. Этот косвенный способ обеспечения $\varphi_в = \text{const}$ дает удовлетворительные результаты при незначительных колебаниях влаговыделений в помещении, а при значительных колебаниях для стабилизации $\varphi_в$ необходимо изменять влагосодержание приточного воздуха.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Регулирование $t_в$ осуществляется, как правило, изменением производительности воздухоподогревателя второй ступени подогрева.

В течение года параметры наружного воздуха изменяются в широких пределах. На I—d-диаграмме область этих изменений оконтурена пунктиром и линией $\varphi=100\%$. С изменением параметров наружного воздуха будет изменяться производительность теплообменных и смесительных аппаратов установки кондиционирования.

Анализ работы указанных аппаратов в течение года удобно выполнить с применением I—d-диаграммы (рис. 12.3,*б*). По мере увеличения энтальпии наружного воздуха от $I_{н.з}$ к I_1 теплопроизводительность воздухоподогревателя первой ступени подогрева необходимо уменьшать, так как в противном случае произойдет увеличение температуры точки росы $t_{т.р}$ приточного воздуха.

При $I_н=I_1$ воздухоподогреватель первой ступени подогрева должен быть выключен. При $I_1<I_н<I_2$ заданное значение $t_{т.р}$ может быть достигнуто путем увеличения соотношения объемов наружного и рециркуляционного воздуха. При $I_н=I_2$ через оросительную камеру должен проходить только наружный воздух, т. е. установка будет работать как прямоточная. В области $I_2<I_н<I_3$ оросительная камера работает в адиабатическом режиме, охлаждая и увлажняя только наружный воздух.

Вследствие увеличения влагосодержания приточного воздуха относительная влажность $\varphi_в$ в помещении будет увеличиваться и может выйти за пределы допустимых значений. Наиболее просто значение $\varphi_в$ можно уменьшить некоторым повышением температуры приточного воздуха и тем самым увеличением температуры $t_в$ в помещении. При $I_н=I_3$ значение $t_в$ в помещении должно соответствовать летнему режиму.

При $I_3<I_н<I_4$ в помещение подается только наружный воздух, который (для сохранения относительного постоянства $\varphi_в$) необходимо охлаждать с понижением энтальпии, для чего в оросительную камеру подается холодная вода от источника холодоснабжения. При $I_4<I_н<I_{н.л}$ для экономии холода использу-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ется рециркуляционный воздух; обработка воздуха осуществляется по схеме, рассмотренной для расчетного летнего периода.

Выполненный анализ позволяет построить графики регулирования работы теплообменных и смесительных аппаратов в кондиционере при годовых изменениях энтальпии наружного воздуха (рис. 12.3,*в*). Графики наглядно показывают изменение теплопроизводительности воздухоподогревателей первой $Q_{вп1}$ и второй $Q_{вп2}$ ступеней подогрева, холодопроизводительности $Q_{о.к}$ (с минусом), количества приточного $G_п$ (постоянно), наружного $G_н$ и рециркуляционного $G_р$ воздуха, принятую последовательность работы аппаратов и характерные точки смены режимов. Кроме того, они дают представление об энергетической эффективности принятой схемы тепловлажностной обработки воздуха.

Как видно из рис. 12.3,*в*, при $I_з<I_н<I_{п.л}$ режим работы системы кондиционирования воздуха энергетически не оправдан, так как одновременно потребляются теплота и холод. Фактически необходимые затраты холода при $I_4<I_н<I_{н.л}$ обозначены на рисунке крестообразной штриховкой.

Регулирование по оптимальному режиму. В последнее время начинают применять метод регулирования системы кондиционирования воздуха по оптимальному режиму (разработанный А. Я. Креслинем), позволяющий во многих случаях избежать повторного подогрева воздуха, охлажденного в оросительной камере, а также более рационально использовать теплоту рециркуляционного воздуха. В любой момент времени воздух в установке кондиционирования проходит тепловлажностную обработку в такой последовательности, при которой расходы теплоты и холода оказываются наименьшими.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлен ряд режимов, которые при определенных состояниях наружного и внутреннего воздуха, известном тепловлажностном балансе помещения и заданном относительном количестве подаваемого наружного воздуха могут быть названы оптимальными. Анализ производится графоаналитическим методом с применением I—d-диаграммы. Оптимальный режим обра-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ботки воздуха выбирается в зависимости от положения на I—d-диаграмме точки, характеризующей состояние наружного воздуха в данный момент.

Метод регулирования систем кондиционирования воздуха по оптимальному режиму энергетически более эффективен. Однако надо отметить, что реализация регулирования по методу оптимальных режимов требует более сложной автоматики, что сдерживает его практическое применение.

Метод количественного регулирования систем кондиционирования воздуха. Сущность метода заключается в регулировании тепло- и холодопроизводительности установок кондиционирования воздуха путем изменения расхода обрабатываемого воздуха.

Регулирование расхода воздуха осуществляется изменением производительности вентилятора путем изменения частоты вращения ротора электродвигателя, применения регулируемых гидравлических или электрических муфт (соединяющих электродвигатель с вентилятором), использования направляющих аппаратов перед вентиляторами.

Следует иметь в виду, что количественное регулирование осуществляется лишь в определенных пределах изменения расхода воздуха. Значительное сокращение расхода воздуха в процессе регулирования может привести к нарушению воздушного режима помещений или к несоблюдению гигиенических или технологических норм подачи свежего воздуха. В таких случаях возможно применение схем количественно-качественного регулирования.

Регулирование систем кондиционирования воздуха (см. рис. 12.3) обеспечивается с помощью контуров регулирования. Установленный в рабочей зоне помещения или в вытяжном канале чувствительный элемент терморегулятора воспринимает отклонения температуры. Терморегулятор управляет воздухоподогревателем второй ступени подогрева *ВП2* чаще всего путем регулирования подачи теплоносителя клапаном K_1.

Постоянство влажности воздуха в помещении обеспечивается двумя терморегуляторами точки росы, чувствительные элементы которых воспринимают отклонения температуры воздуха после оросительной камеры

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

или воды в ее поддоне. Терморегулятор зимней точки росы управляет последовательно клапаном K_2 воздухоподогревателя первой ступени подогрева $ВП_1$ и воздушными клапанами (заслонками) K_3, K_4, K_5. Терморегулятор летней точки росы управляет подачей холодной воды из холодильной установки в оросительную камеру с помощью клапана K_6.

Для более точного регулирования влажности воздуха применяют влагорегуляторы, чувствительные элементы которых устанавливают в помещении. Влагорегуляторы управляют клапанами K_2—K_6 в той же последовательности, что и терморегуляторы точки росы.

В системах с применением первой рециркуляции воздуха терморегулятор летней точки росы работает совместно с терморегулятором реверса воздушных клапанов. Чувствительным элементом этого терморегулятора является мокрый термометр $t'_м$, установленный в потоке наружного воздуха и работающий по следующей программе: при $I_н > I_4$ терморегулятор устанавливает клапаны K_3, K_4 и K_5 на режим минимальной подачи воздуха, при $I_2 < I_н < I_4$ клапаны K_3, K_4 и K_5 переводятся на режим подачи только наружного воздуха (см. рис. 12.3,*в*). Открытие и закрытие клапанов K_3 и K_5 дополнительно блокируется с пуском и остановкой приточного вентилятора.

Воздухоподогреватели первой ступени подогрева *ВП1* работают в наиболее неблагоприятном режиме; для предупреждения опасности их замерзания предусматривается автоматика защиты, функционирующая как во время работы приточного вентилятора, так и после его остановки. Два терморегулятора автоматики защиты контролируют температуру воздуха перед воздухоподогревателем первой ступени подогрева и температуру теплоносителя после него.

При сочетаниях температур, создающих угрозу замерзания воздухоподогревателя, они выключают приточный вентилятор. При остановленном приточном вентиляторе необходима дополнительная защита воздухоподогревателя от замерзания. Наиболее надежна схема, автоматически обеспечивающая периодический прогрев воздухоподогревателя.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Если направление луча процесса $\varepsilon_п$ в помещении в течение года меняется в широких пределах (от $\varepsilon_{п.з}$ до $\varepsilon_{п.л}$), анализ режима круглогодичного регулирования установок полного кондиционирования необходимо проводить с учетом этого изменения.

Из изложенного видно, что результаты анализа процессов обработки воздуха в расчетных условиях и их возможных изменений в течение года являются исходными для выбора основных контуров регулирования систем кондиционирования воздуха.

§ 12.4. Автоматизация процесса регулирования систем кондиционирования воздуха

При автоматизации процесса регулирования в пределах каждого контура возможны различные решения схем. Выбор схемы автоматизации связан с анализом кратковременных изменений режимов работы систем кондиционирования и определяется динамическими свойствами системы и предъявляемыми требованиями по точности регулирования, быстродействию и другим показателям.

Для систем кондиционирования различного назначения эти требования варьируются в довольно широких пределах. Например, для комфортного кондиционирования допустимы колебания $t_в$ до $\pm 1...1{,}5°C$, $\varphi_в$ до $\pm 10\%$; для технологического кондиционирования — $t_в$ до $\pm 0{,}5...1°C$, $\varphi_в$ до $\pm 5\%$; для специальных систем — $t_в$ до $\pm 0{,}1°C$, $\varphi_в$ до $\pm 2\%$. Регулирование систем кондиционирования осуществляется в течение всего периода эксплуатации.

По динамическим свойствам системы кондиционирования и обслуживаемые ими помещения относятся к объектам с распределенными параметрами, нестационарные процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Аналитическое решение таких уравнений крайне затруднительно, поэтому для инженерных расчетов пользуются упрощенными зависимостями, полностью справедливыми только для объектов с сосредоточенными параметрами.

Для больших помещений, особенно производственных с многоплановой технологией, необходимы разбивка объема помещения на зоны и позонное рассмотрение режимов работы, регулирование и управление тепловым ре-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

жимом. Элементы систем кондиционирования воздуха рассматриваются как инерционные объекты, работающие с запаздыванием.

Анализ результатов суточных измерений расчетных режимов работы систем кондиционирования с учетом нестационарности процессов, происходящих в них, позволяет определить тепловые нагрузки на системы и характер их изменения. Такой анализ выполняется по различным методикам, основанным на частных решениях исходной системы дифференциальных уравнений. Разработана методика, основанная на теории теплоустойчивости, положения которой применимы для количественной оценки динамических свойств помещений и элементов систем кондиционирования воздуха.

Средства автоматизации должны соответствовать требуемой точности поддержания параметров. Устройства автоматики принципиально могут обеспечить любую степень точности поддержания параметров, но бесполезно добиваться точного регулирования, если этого не требует функциональное назначение обслуживаемых помещений или если сама система кондиционирования не способна в необходимой мере реагировать на сигналы регуляторов.

Ни по практическим, ни по экономическим соображениям не следует выбирать устройства автоматики, обеспечивающие более точное регулирование, чем это требуется, и отягощать систему специальным сложным оборудованием. Системы кондиционирования воздуха эксплуатируются в течение многих лет, поэтому оптимальной будет простейшая система автоматики, дающая необходимый эффект.

Точность поддержания параметров зависит от принятого алгоритма регулирования, а также от места расположения чувствительных элементов датчиков температуры и влажности (особенно устанавливаемых в помещениях). Например, температуру с отклонениями $\pm 0{,}5°C$ нетрудно поддерживать в точке установки чувствительного элемента, однако на некотором расстоянии от датчика температура зависит от неконтролируемого и весьма сложного процесса лучисто-конвекционного и струйного теплообмена в помещении. Поэтому в некоторых случаях в помещениях должно быть установлено несколь-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

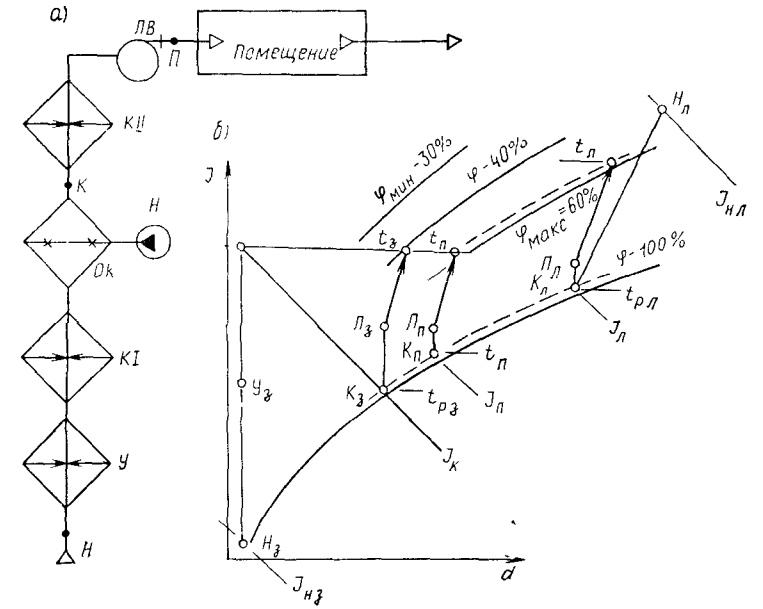


Рис. 12.4. Система комфортного кондиционирования воздуха (СККВ)
а — технологическая схема СККВ *б* — процессы обработки воздуха в *I — d* диаграмме

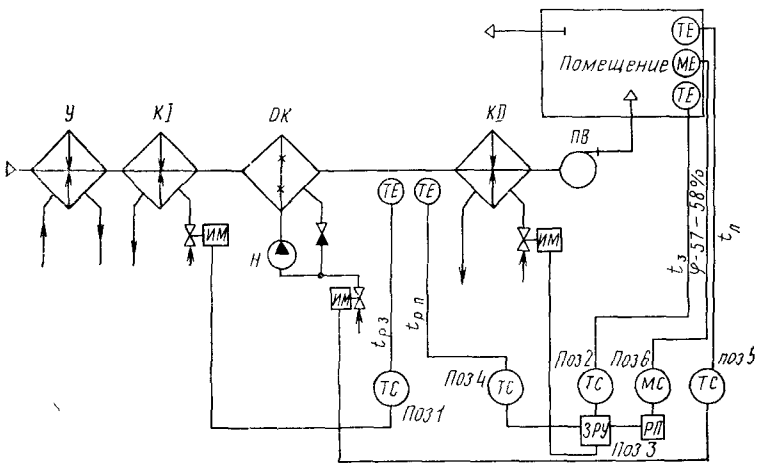


Рис. 12.5. Функциональная схема автоматизации системы комфортного кондиционирования воздуха

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ко датчиков, причем выбор места их расположения необходимо обосновать анализом теплового режима зоны помещения, в которой должны поддерживаться заданные параметры микроклимата. Та или иная схема регулирования должна быть выбрана на основе расчета надежности и обеспеченности заданных режимов и технико-экономического анализа.

В качестве примера рассмотрим САР установки комфортного кондиционирования воздуха, предназначенную для поддержания заданной температуры и влажности в помещении. Схема установки и процессы обработки воздуха для зимних и летних расчетных условий наружного климата приведены на рис. 12.4.

Для зимних условий обработка воздуха проводится по следующей схеме. Наружный воздух сначала подогревается в утилизаторе $У$ от точки $Н_з$ до точки $У_з$, а затем в воздухоподогревателе первой ступени от точки $У_з$ до значения $I_к$. В результате адиабатического увлажнения при постоянной энтальпии воздух приобретает параметры, соответствующие точке $К_з$. В воздухоподогревателе второй ступени воздух нагревается до точки $П_з$ и подается в помещение.

По мере повышения энтальпии наружного воздуха сокращается его нагрев в воздухоподогревателе первой ступени и при достижении энтальпии $I_к$ первой подогрев должен быть отключен. Наступает переходный режим, который характеризуется постоянной внутренней температурой $t_з$ и меняется в зависимости от энтальпии наружного воздуха и относительной влажности внутри помещения.

Исходя из условий комфортности допустимы колебания относительной влажности в пределах 40—60%. При энтальпии наружного воздуха выше $I_п$ в обслуживаемом помещении целесообразно поддерживать максимальную по комфортным условиям относительную влажность воздуха (до 60%), допуская при этом значительные колебания внугренней температуры. Поскольку колебания внутренней температуры связаны с изменением энтальпии наружного воздуха, в теплое время года создается некоторый «динамический» климат, характеризующийся лучшими условиями для самочувствия человека, чем стати-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ческий при постоянной температуре. Одновременно обеспечивается некоторая экономия расхода холода.

При энтальпии наружного воздуха $I_п$ предусматривается только адиабатическое увлажнение. В это время на воздухоподогреватель второй ступени воздействует установленный в помещении датчик относительной влажности φ, который при отклонении φ в бóльшую сторону увеличивает поступление теплоносителя в воздухоподогреватель.

Пунктирная линия на рис. 12.4 от $t_п$ до $t_л$ показывает, что датчик должен быть настроен на 57—58% во избежание увеличения относительной влажности свыше 60%. Это вызвано недопустимостью более высокой относительной влажности и желанием сохранить установленную рабочую разность температур между внутренним и приточным воздухом.

Летний режим работы системы кондиционирования начинается при достижении наружным воздухом энтальпии $I_л$. В это время потребуется подача холодной воды в оросительную камеру для поддержания параметров воздуха $K_л$. Для этого за оросительной камерой устанавливают датчики температуры, который по мере повышения температуры увеличивает подачу холодной воды в камеру.

Так как за форсуночной камерой температура воздуха неодинаковая, возможны выносы капель влаги и попадание их на датчик. Кроме того, учитывая отрицательное влияние лучистого тепла от воздухоподогревателя второго подогрева, регулирование целесообразно осуществлять датчиком температуры, установленным в помещении. Этот способ более рационален еще и потому, что учитывается теплоаккумулирующая способность помещения. Датчик температуры, установленный в помещении, настраивается на значение температуры, определяемой точкой $t_л$, и воздействует на подачу холодной воды в оросительную камеру.

На основе такой схемы обработки воздуха построена *САР* (рис. 12.5). В зимний период за оросительной камерой с помощью пропорционального регулятора поддерживается постоянная температура (поз *1*). Датчик, настроенный на температуру $t_{р з}$, воздействует на исполнительный механизм регулирующего органа на обратном

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

трубопроводе теплоносителя к воздухоподогревателю K_1 первого подогрева. Оросительная камера обеспечивает адиабатическое увлажнение наружного воздуха до 90—95%. По мере повышения энтальпии наружного воздуха уменьшается его подогрев и при энтальпии $I_к$ первый подогрев выключается.

Температура внутреннего воздуха регулируется двухпозиционным регулятором (поз. *2*). Датчик температуры, установленный в помещении и настроенный на поддержание температуры $t_з$, воздействует через запретно-разрешающее устройство (поз. *3*) на воздухоподогреватель $K_п$ второго подогрева.

Запретно-разрешающее устройство включается в цепь для переключения регулирования по температуре внутри помещения на регулирование по относительной влажности. Такое переключение должно быть произведено в тот момент, когда в помещении при $t_з$ относительная влажность приближается к 60%. К этому моменту за оросительной камерой температура воздуха повысится до $t_{р\,п}$, что повлечет за собой переключение схемы регулирования (поз. *4*). Для этого за оросительной камерой устанавливается второй датчик температуры с настройкой на $t_{р.п}$. Сигнал от этого датчика поступает на запретно-разрешающее устройство, которое производит переключение датчика температуры внутри помещения на датчик относительной влажности.

В теплое время года внутри помещения с помощью пропорционального регулятора (поз. *6*) поддерживается постоянная относительная влажность при изменяющихся значениях температуры. Датчик влажности, как и в зимнее время, через промежуточное реле *РП* и запретно-разрешающее устройство воздействует на воздухоподогреватель второй ступени. При увеличении относительной влажности свыше 60% включается второй подогреватель и температура достигает такого значения, при котором относительная влажность становится меньше 60% и соответствует определенной энтальпии наружного воздуха. Чем выше энтальпия, тем выше установившееся значение внутренней температуры.

Летний режим, при котором необходимо применение холодной воды, наступает при температуре внутри помещения, соответствующей средней летней комфортной. В

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

этот момент срабатывает второй датчик температуры, настроенный на $t_л$. Регулятор температуры (поз. 5) воздействует на подачу холодной воды в камеру орошения. В помещении стабилизируются сразу два параметра: температура и относительная влажность воздуха. На разные регулирующие органы воздействуют сразу два регулятора, что позволяет поддерживать относительную влажность с точностью $\pm 5\%$ и расходовать минимум холода.

§ 12.5. Современные схемы управления системами кондиционирования воздуха

Каскадное управление СКВ. Повышение точности стабилизации параметров микроклимата может быть достигнуто синтезом стабилизации с коррекцией по отклонениям *от заданных температуры и относительной* влажности воздуха в помещении. Это обеспечивается переходом от одноконтурных к двухконтурным каскадным системам стабилизации. Каскадные системы стабилизации, по существу, должны быть основными системами регулирования температуры и влажности воздуха.

Работа каскадных систем основана на регулировании не одним, а двумя регуляторами, причем регулятор, контролирующий отклонение основной регулируемой величины от заданного значения, воздействует не на регулирующий орган объекта, а на задатчик вспомогательного регулятора. Этот регулятор поддерживает на заданном уровне некоторую вспомогательную величину промежуточной точки объекта регулирования. Так как инерционность регулируемого участка первого контура регулирования незначительная, в этом контуре может быть достигнуто относительное большое быстродействие. Первый контур называется стабилизирующим, второй — корректирующим.

Функциональная схема каскадной системы стабилизации непрерывного действия для прямоточной СКВ показана на рис. 12.6. Стабилизация параметров воздуха осуществляется с помощью двухкаскадных систем.

Первая система обеспечивает стабилизацию температуры воздуха после воздухоподогревателя второго подогрева с коррекцией по температуре воздуха в объекте

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

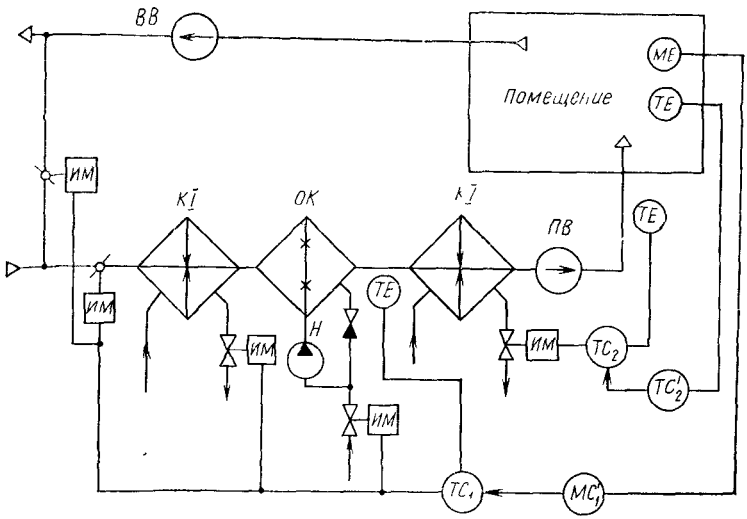


Рис. 12.6. Функциональная схема каскадной системы управления СКВ

регулирования (помещении) путем изменения расхода теплоносителя в воздухонагревателе (регулятор TC_2). Корректирующее воздействие осуществляется с помощью корректирующего регулятора TC'_2. Таким образом, система регулирования температуры воздуха после воздухонагревателя второго подогрева включает цепь регулирования температуры воздуха путем изменения расхода теплоносителя и цепь коррекции, изменяющую задание регулятора TC_2 в зависимости от изменения температуры воздуха в помещении.

Во вторую систему стабилизации входят чувствительный элемент температуры точки росы, установленный после камеры орошения, и регулятор TC_1, управляющий последовательно исполнительными механизмами клапанов оросительной камеры, воздухонагревателя первого подогрева и смесительно-регулирующих воздушных клапанов наружного и рециркуляционного воздуха.

Корректирующее воздействие на регулятор TC_1 осуществляется с помощью регулятора влажности MC'_1, датчик которого установлен в помещении.

Управление СКВ с использованием регулятора пере-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

менной структуры. Одной из разновидностей систем с существенно нелинейным регулированием является система с переменной структурой (СПС). В отличие от кибернетических систем, непрерывно самонастраивающихся в динамическом процессе, такие системы не имеют сложных вычислительных устройств и достаточно просто регулируются.

Под системой с переменной структурой принято понимать систему автоматического регулирования, в которой в зависимости от ее состояния в целях получения оптимальных динамических свойств (независимо от ее параметров) применяется специальная коммутация цепей, приводящая к изменению ее структуры. СПС следует рассматривать как существенно нелинейные системы. СПС являются дальнейшим развитием методов введения в нелинейные системы нелинейных корректирующих элементов и принудительного изменения некоторых их параметров (зоны нечувствительности, уровня выходного сигнала и т. д.).

Как показали исследования, использование переменных структур позволяет существенно улучшить динамические свойства систем, в частности качество переходных процессов. Системы с переменной структурой обеспечивают:

а) инвариантность регулятора к изменению динамических свойств объекта регулирования в широком диапазоне возмущений;

б) заданную степень точности регулирования без ухудшения качества динамических процессов;

в) увеличение быстродействия системы без ослабления демпфирования;

г) ослабление влияния существенно нелинейных элементов.

Все это достигается, начиная с некоторого момента времени, путем создания устойчивых (скользящих) режимов в системе. Применение регулятора с переменной структурой обеспечивает более высокое качество регулирования (по сравнению с аналоговыми регуляторами).

Управление СКВ с помощью микропроцессоров. Такое управление является наиболее совершенным методом. Система с микропроцессором реализует оптимальное (программированное) управление, рационально

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

использует все возможности системы и с высокой точностью поддерживает регулируемые параметры на заданном уровне.

Микропроцессор представляет собой вычислительное устройство на интегральных микросхемах, к которому для управления и сбора информации с помощью каналов подключаются датчики и исполнительные органы через аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи. В микропроцессоре используется управление с помощью заранее заданного алгоритма. Применение микропроцессоров позволит эффективно реализовать управление СКВ по методу оптимальных режимов.

§ 12.6. Автоматизация устройств утилизации выбросной теплоты

Одним из путей снижения энергозатрат в системах вентиляции и кондиционирования воздуха является утилизация теплоты или холода, содержащихся в воздухе, удаляемом из обслуживаемых помещений.

Для утилизации теплоты и холода выбросного воздуха в настоящее время широко используют воздухо-воздушные пластинчатые теплообменники. Эти теплообменники представляют собой кассету с набором пластин (гладких и гофрированных), образующих каналы, в которых в одном направлении проходит удаляемый теплый вытяжной воздух, а в другом направлении через соседний ряд каналов проходит приточный холодный воздух. Для предотвращения перетекания воздуха из одного потока в другой предусмотрены герметизирующие прокладки, закрывающие вход в каналы соответственно одного и другого потока. Теплообмен между потоками происходит через поверхность пластин.

При рассмотрении схем автоматизации теплообменника-утилизатора как автономного объекта регулирования функции управления 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 и типа воздухона-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

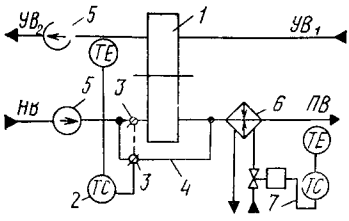


Рис. 12.7. Функциональная схема автоматического управления пластинчатым теплообменником

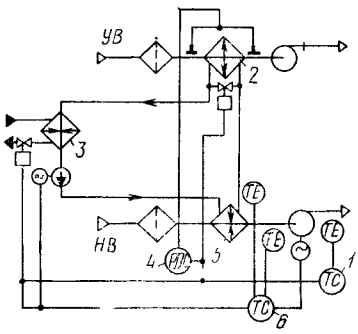


Рис. 12.8. Функциональная схема управления системой утилизации с подогревом промежуточного теплоносителя

1 — регулятор температуры приточного воздуха; *2* — теплоизвлекающий теплообменник; *3* — нагреватель промежуточного теплоносителя, *4* — регулятор защиты от обмерзания; *5* — теплоотдающий теплообменник; *6* — регулятор защиты от замерзания теплоносителя

гревателя (водяной, паровой, электрический) могут быть разработаны различные схемы управления.

На рис. 12.7 представлен вариант 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 теплообменника, вследствие чего снизится эффективность теплообмена и повысится 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 инее-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

образования. 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 можно ограничиться только схемой защиты от обмерзания. В том случае когда утилизатор представляет собой автономный объект, так называемый агрегат-утилизатор с приточно-вытяжными вентиляторами *5* и воздухонагревателем *6*, в схеме управления необходимо предусмотреть стабилизацию температуры приточного воздуха (ПВ). Температура приточного воздуха регулируется изменением расхода теплоносителя с помощью регулятора *7*.

В настоящее время разработаны типовые проектные решения системы утилизации теплоты с подогревом промежуточного теплоносителя. Вариант схемы управления системой утилизации приведен на рис. 12.8. Постоянная температура приточного воздуха поддерживается регулятором *1* путем изменения теплопроизводительности нагревателя *3* промежуточного теплоносителя и перепуска части теплоносителя в обвод теплоизвлекающего теплообменника *2*.

Защита теплообменника *2* от обмерзания осуществляется по перепаду давления воздуха регулятором *4*, а также путем перепуска части теплоносителя. Защита теплоизвлекающего теплообменника обеспечивается независимо от команды регулятора *1*.

В схеме предусмотрена защита от замерзания теплоносителя в теплоотдающем теплообменнике *5*. Здесь функции защиты выполняет регулятор *6*, датчики которого размещаются в потоке приточного воздуха и в обратном трубопроводе после теплообменника *5*. По сигналу любого из датчиков регулятор *6* дает команду на выключение приточного вентилятора, включение циркуляционного насоса (если он был остановлен) и полное открытие клапана на трубопроводе подачи горячей воды в нагреватель *3* промежуточного теплоносителя.

Весьма перспективны аппараты, в которых в одной конструкции совмещены различные функции обработки и перемещения воздуха. Таким аппаратом является теп-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ловой утилизатор-вентилятор (ТУВ) на базе тепловых труб.

Система регулирования 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. С помощью теплового утилизатора-вентилятора в системе осуществляется нагрев приточного воздуха за счет теплоты удаляемого воздуха, что позволяет значительно сократить расход тепловой энергии по сравнению с традиционной системой вентиляции.

Разработана и в настоящее время действует опытно-промышленная система кондиционирования микроклимата на базе ТУВ.

§ 12.7. Автоматизация автономных кондиционеров

Отечественная промышленность выпускает автономные кондиционеры типов КТА, КТ, КСИ, УВК и КВ, снабженные встроенной системой автоматики.

Кондиционер автономный КТА-2-5, предназначенный для круглогодичного технологического и комфортного кондиционирования воздуха, 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: КТА 2-5-01 — без приборов для регулирования влажности воздуха и КТА 2-5-02 — с приборами для регулирования влажности воздуха.

Схема автоматизации предусматривает работу кондиционера в трех режимах: охлаждение воздуха (без увлажнения), нагрев воздуха с увлажнением и вентиляция.

Выбор режима осуществляется переключателем, установленным на пульте управления кондиционером. Кондиционер включается в работу кнопкой, при этом срабатывает пускатель и включается электродвигатель приточного вентилятора. При работе кондиционера в режиме «охлаждение» датчик температуры через соот-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ветствующие пускатели включает электродвигатель вентилятора конденсатора и электродвигатель компрессора при температуре выше заданной и отключает при температуре ниже заданной.

При работе кондиционера в режиме «отопление» датчик температуры через промежуточное реле управляет магнитным 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 электродвигатель увлажнителя.

Пусковая и защитная электроаппаратура расположена в щите управления, а аппаратура управления и сигнализации — на пульте управления. Щит и пульт управления встроены в кондиционер.

Схема автоматизации **кондиционера КТА 1-2-0** 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 включается электродвигатель вентилятора и загорается сигнальная лампа.

Выбор режима работы и типа воздухонагревателя осуществляется соответствующим переключателем.

Поддержание температуры и влажности воздуха предусматривается датчиком температуры и регулятором относительной влажности.

Кондиционер автономный типа КТА-1-10 предназначен для круглогодичного технологического и комфортного кондиционирования воздуха в помещениях производственных и общественных зданий. В кондиционере осуществляются очистка воздуха от пыли, его охлаждение, нагрев и увлажнение. Кондиционер можно применять в системах кондиционирования воздуха крупных диспет-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

черских пунктов, центральных постов управления, лабораторных помещений, а также в системах комфортного кондиционирования залов заседаний, приемных и т. д.

Схема автоматизации 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 и типа воздухонагревателя (водяного или электрического) осуществляется соответствующими переключателями.

Когда кондиционер включается в работу, срабатывает магнитный пускатель и своими замыкающими контактами включает электродвигатели вентиляторов и подает питание в цепь управления кондиционером. При установке 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 электродвигатель увлажнительного устройства. Микропереключатель, на который воздействует поплавковый клапан, отключает пускатель и электронагреватель увлажнителя при отсутствии воды в бачке увлажнителя. При срабатывании реле давления, тепловых реле (аварийные режимы) кондиционер отключается.

Вся пусковая и защитная электроаппаратура распо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ложена в щите управления, а аппаратура управления и сигнализации — на панелях управления, которые встроены в кондиционер. Датчик температуры и датчик относительной влажности устанавливают в помещении, а регулятор относительной влажности размещают за пределами кондиционера.

Автономный кондиционер типа КТА1-25 предназначен для круглогодичного технологического и комфортного кондиционирования воздуха в помещениях производственных и общественных зданий. Кондиционер можно также применять для охлаждения электронно-вычислительных машин и машинных залов ЭВМ. Кондиционер при температуре окружающего воздуха 10—35°С работает продолжительное время, а при 35—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 и своими замыкающими контактами включает электродвигатель вентилятора, 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.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Регулирование относительной влажности воздуха осуществляется выносным регулятором влажности. Если относительная влажность воздуха в помещении меньше установленной на регуляторе, последний срабатывает и своим контактом подает питание в цепь катушки пускателя, который включает электродвигатель увлажнителя

При достижении в помещении относительной влажности, равной установленной на регуляторе, он срабатывает и своим контактом разрывает цепь питания катушки пускателя Пускатель отключает электродвигатель увлажнителя. Микропереключатель, на который воздействует поплавковый клапан, отключает пускатель и электродвигатель 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. При чрезмерном повышении или понижении давления реле разрывает цепь питания пускателя, который отключает компрессор и вентилятор.

Вся пусковая и защитная электроаппаратура расположена в щите управления, а аппаратура управления и сигнализации — на панели управления. Щит управления и панель управления встроены в кондиционер. Датчик температуры и датчик относительной влажности устанавливают в помещении, регулятор влажности — за пределами 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 всасывания; регулирование количества хладона, подаваемого в воздухоохладитель; сигнализацию включения вентилятора.

Пуск кондиционера в работу производится кнопкой управления, при этом включается вентилятор и подго-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

товляется цепь управления компрессором. Выбор режима управления компрессором осуществляется переключателем. В автоматическом режиме управление компрессором обеспечивается с помощью датчика температуры, который включает и отключает компрессор в зависимости от температуры воздуха в помещении.

Соленоидный вентиль открывается с пуском компрессора и обеспечивает доступ жидкого хладона к терморегулирующему вентилю. Во время остановки компрессора соленоидный вентиль предотвращает перетекание жидкого хладона из теплообменника в воздухоохладитель, вследствие чего исключается 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 по перегреву паров фреона на выходе из воздухоохладителя, 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 в блоке управления, силовая аппаратура — в силовом щите. Блок управления и силовой щит устанавливают внутри кондиционера. Датчик температуры размещают внутри кондиционера в канале рециркуляционного воздуха.

Автономный прямоточный кондиционер типа УКВ предназначен для создания комфортных гигиенических условий в операционных помещениях объемом до 175 м^3.

При температуре воздуха в кондиционируемом помещении ниже заданной датчик температуры через промежуточное реле замыкает цепь питания пускателя, который подает напряжение на электродвигатели. При повышении температуры воздуха в кондиционируемом помещении по команде другого датчика температуры включается цепь питания компрессора.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Относительная влажность воздуха в кондиционируемом помещении поддерживается с помощью выносного автоматического регулятора влажности, который управляет работой компрессора. Защита компрессора от аварийного повышения давления нагнетания и понижения давления всасывания осуществляется с помощью реле давления.

Датчики температуры и влажности размещены на блоке датчиков в обслуживаемом помещении. Аппаратура управления и сигнализации, пусковая и защитная аппаратура установлены в блоке автоматики. Блок автоматики размещается на стене помещения на высоте около 1,5 м от пола.

§ 12.8. Типовые решения автоматизации центральных неавтономных кондиционеров

В 1980—1981 гг. для проектировщиков систем автоматического управления кондиционированием воздуха были разработаны типовые проектные решения «Автоматизация, управление и силовое электрооборудование центральных кондиционеров». При использовании типовых решений исключается необходимость разработки функциональных схем автоматизации и принципиальных схем регулирования. Кроме того, не требуется разработка задания на изготовление щитов регулирования и управления, а также значительно сокращается неизбежный при проектировании объем согласований. На заводе-изготовителе упрощается производство щитов управления и регулирования, на объектах облегчаются монтаж, наладка и эксплуатация за счет 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, схемы размещения аппаратуры управления и силового электрооборудования на щитах и пультах управления. Типовые решения снабжены рекомендациями по составлению заданий на проектирование, а также содержат указания по привязке.

Для облегчения разработки проектов автоматизации

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

центральных кондиционеров предложена методика проектирования, основанная на использовании типовых унифицированных узлов. Технологическую схему обработки воздуха в кондиционере представляют 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 технологическому агрегату управляемой части системы.

На основе изучения традиционных технологических схем СКВ, содержащих камеры смешения, воздухоподогреватели первой и второй ступеней и форсуночные камеры орошения, выделено около 50 наиболее часто встречаемых вариантов структур. Все варианты структур управляемой части СКВ полностью реализуются заводской компоновкой, ограниченной тремя основными моделями кондиционера и дополнительными проектными решениями по схеме вентиляционной сети, а также размещением воздухоподогревателей второй ступени. Очевидно, большое число возможных сочетаний технологических агрегатов или вариантов структур управляемой части СКВ усложняет создание типовых решений.

Задача упрощается путем типизации отдельных функциональных узлов автоматизации. С этой целью в полном объеме автоматизации управления центральными неавтономными кондиционерами выделяются четыре группы задач: стабилизации, блокировки, управления и коррекции. Для выполнения этих задач предлагаются различные варианты функциональных узлов автоматизации.

В качестве *основного контура стабилизации* рассматривается узел регулирования температуры, даются варианты использования различных средств автоматики.

Под *устройством блокировки* понимаются средства автоматики, обеспечивающие нормальную работу кондиционера в режиме дистанционного управления. При-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

водятся варианты схем связи между стабилизирующими регуляторами и электрооборудованием вентиляторов, насосов, фильтров, а также исполнительными устройствами и параметрами наружного воздуха. Одной из разновидностей блокировки является схема защиты от замерзания.

В качестве задач *автоматической коррекции* рассматриваются случаи изменения температуры воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения в зависимости от температуры наружного воздуха, а также изменение заданной температуры точки росы в зависимости от требуемой относительной влажности воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения.

§ 12.9. Автоматизация СКВ, обеспечивающих энергосберегающую технологию обработки воздуха

С целью снижения расхода энергии в системах кондиционирования воздуха возникает необходимость разработки новых систем управления.

Представляет интерес система программно-параметрического управления, принятая к реализации в системах кондиционирования воздуха текстильных предприятий. 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 воздуха в данной системе исключено обязательное состояние обрабатываемого воздуха — состояние точки росы. Кроме того, при реконструкции системы предусмотрено последовательное воздействие регулятора температуры на воздухонагреватели первого и второго подогрева, т. е. после полного открытия клапана воздухонагревателя второго подогрева регулирующее воздействие переносится на воздухонагреватель первого подогрева, а регулирующее воздействие регулятора относительной влажности сохраняется на воздушный клапан обвода камеры орошения.

Такое регулирование позволяет поддерживать параметры микроклимата гребнечесального отделения шерс-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

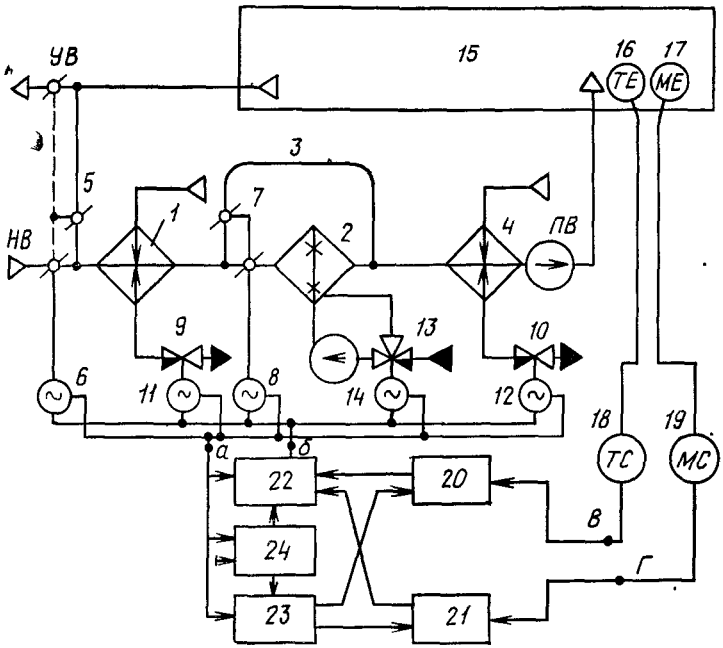


Рис. 12.9. Функциональная схема автоматизации СКВ, реализующей энергосберегающую технологию тепловлажностной обработки воздуха

ти при неполной загрузке технологического оборудования и в выходные дни, вследствие чего снижается количество брака шерсти при частичной загрузке оборудования и при возобновлении работы после выходных дней, так как часть сырья находится в цехе и к началу смены не успевает акклиматизироваться, хотя параметры микроклимата к этому времени соответствуют требованиям технологии.

Функциональная схема СКВ для реализации энергосберегающей технологии представлена на рис. 12.9. В состав СКВ входят воздухонагреватели первого и второго подогрева *1* и *4*, камера орошения *2* с обводным воздуховодом *3*, воздушные клапаны рециркуляции *5* и обводного воздуховода *7*, регулирующие клапаны на обратных трубопроводах теплоносителя *9* и *10*, трехходо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вой клапан *13* на трубопроводе холодоносителя, электрические исполнительные механизмы *6, 8, 11, 12, 14,* регуляторы температуры *18* и относительной влажности *19* кондиционируемого помещения *15* с датчиками *16* и *17* соответственно.

Для последовательного воздействия на различные регулирующие органы система дополнена коммутатором *22,* для снижения частоты вращения 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 в системе имеется дешифратор *23.*

Исходной информацией для работы системы является энергопотребление в секциях кондиционера, которое связано с 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 логический сигнал, который используется для настройки импульсных прерывателей, а также для оптической индукции режимов (на рис. 12.9 показаны только общие функциональные связи между дешифратором *23* и импульсных прерывателей, а также для оптической индиканых выходов дешифратора).

Программа работы системы закладывается конструктивно в коммутаторе и дешифраторе при монтаже, которые являются составными частями общего логического устройства управления, 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 программ работы (выполнить перестройку логической схемы устройства управления), что обеспечивается включением между выходами

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

исполнительных механизмов и входами коммутатора и дешифратора блока программного управления (блок *24*). Функции блока программного управления задаются алгоритмом управления совместно с функциями коммутатора и дешифратора.

В системе предусмотрены 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 предусматривали перестройку системы на реализацию других алгоритмов управления), с последующей заменой на устройства, реализованные на интегральных микросхемах.

Для регулирования температуры воздуха в цехе использовался регулятор типа РТ-3К с пределом регулирования 0—40°С — температура регистрировалась с помощью самопишущего уравновешенного моста переменного тока КСМ-2-003 с платиновым термометром сопротивления градуировки *22*. Для регулирования относительной влажности использовались регуляторы кварцевые В4-536У с датчиками ДОВП-1, для регистрации относительной влажности — устройства АСАТ-В-П с подогревными гигрометрами ГП-225 в комплекте с автоматическими потенциометрами типа КСП и многоточечный влагомер ВВ4-01.

Проведенные исследования на промышленно-экспериментальном объекте подтвердили соответствие теоретических расчетов режимов тепловлажностной обработки воздуха наблюдаемым при эксплуатации системы, а также выполнение разработанными средствами автоматизации заданных алгоритмов управления.

§ 12.10. Автоматизация холодильных установок

Для обеспечения неавтономных кондиционеров холодом применяют холодильные станции различной холо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

допроизводительности. Холодильные станции обычно комплектуются двумя или более холодильными установками, работающими с промежуточным холодоносителем, как правило, водой.

Рассмотрим автоматизацию отдельных элементов холодильных установок и холодильной станции в целом. Защита компрессора от повышенного давления на нагнетании и пониженного на всасывании осуществляется реле давления (рис. 12.10,*а*). Работу системы контролирует реле контроля смазки. Компрессоры большой холодопроизводительности охлаждаются водой. Для защиты их от перегрева в случае прекращения подачи охлаждающей воды устанавливают реле расхода. При отклонении какого-либо из параметров срабатывает соответствующее реле защиты, и компрессор останавливается. При остановке электродвигателя компрессора закрывается сблокированный с ним соленоидный вентиль трубопровода охлаждающей воды.

Защита испарителя холодильной установки (рис. 12.10,*б*) предусматривается во избежание замерзания воды в трубах испарителя. На трубопроводе выходящей из испарителя воды установлен датчик позиционного терморегулятора, настроенного на 1—3°С. При температуре воды ниже установленной размыкаются контакты регулятора и останавливается электродвигатель компрессора. Если внезапно прекратился приток воды через испаритель, регулятор вследствие инертности системы может не сработать даже при замораживании испарителя. Во избежание этого устанавливают реле расхода, которое при уменьшении протока воды до критического значения срабатывает и останавливает электродвигатель компрессора.

Схема автоматизации холодильной станции приведена на рис. 12.11. Для упрощения на схеме показана одна холодильная машина. Из бака *1* насосы подают воду на испарители холодильных машин, охлажденная вода сливается в бак *2* и насосами подается к кондиционерам, а затем снова сливается в бак *1*. На охлаждение конденсаторов вода подается из градирни.

Защита компрессора осуществляется реле *3, 4, 5*, а испарителя — реле *6* и *7*. Если какой-либо параметр отклонится от заданной величины, сработает соответству-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

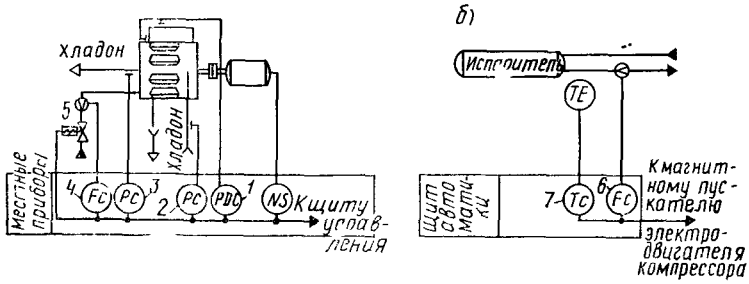


Рис. 12.10. Функциональная схема автоматической защиты компрессора и испарителя холодильной установки

1 — реле контроля смазки, *2, 3* — реле низкого и высокого давления *4* — регулятор расхода, *5* — соленоидный вентиль, *6* — реле расхода, *7* терморегулятор

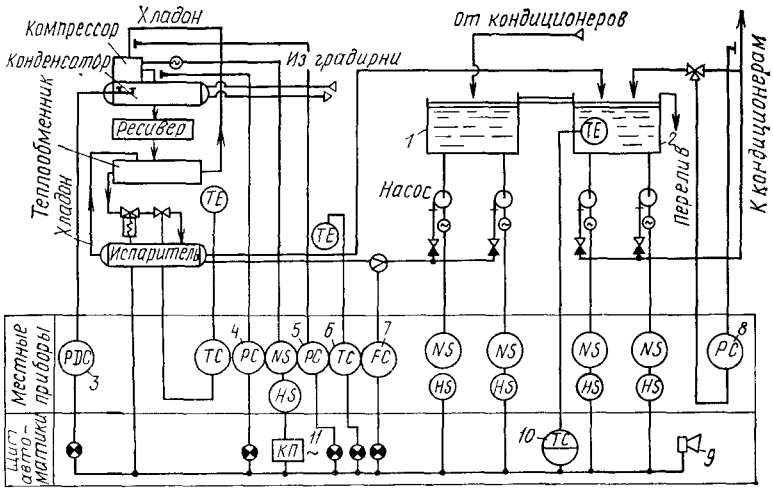


Рис. 12.11. Функциональная схема автоматизации холодильной станции

ющее реле, остановится компрессор, а через небольшой промежуток времени остановятся и насосы оборотного водоснабжения. На щите автоматики включится сигнальная лампа того узла, в котором произошла авария, и начнет подаваться звуковой сигнал *9*.

Температура воды в баке *2* регулируется терморегулятором *10*, настроенным на максимальную и минимальную температуру (например, 8 и 6°С). При температуре

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

воды 8°С последовательно через определенный промежуток времени с помощью командного прибора *11* включаются холодильные установки, причем компрессор холодильной установки включается только в том случае, если работают насосы, подающие воду в испаритель и конденсатор, и если все параметры, контролируемые приборами защиты, находятся в пределах нормы. При снижении температуры холодной воды до 6°С холодильные установки отключаются в той же последовательности.

Для поддержания постоянного давления воды, подаваемой к кондиционерам, установлен регулятор давления прямого действия *8*.

Для охлаждения конденсаторов холодильных машин требуется большое количество воды, поэтому с целью экономии водопроводной воды устраивают системы оборотного водоснабжения, в которых нагретая вода охлаждается в градирнях. Система оборотного водоснабжения (рис. 12.12) состоит из вентиляторных градирен, сборного бака, циркуляционных насосов и охлаждаемого оборудования (конденсаторов). Требуемая температура воды в сборном баке поддерживается путем включения определенного числа вентиляторов; электродвигатели технологического оборудования сблокированы с электродвигателями оборудования градирни.

При включении электродвигателя компрессора холодильной машины автоматически включается электродвигатель насоса *2*. Если температура воды в баке ниже температуры настройки регулятора, то ни один из осевых вентиляторов градирни не включится. Когда температура воды в баке превысит температуру настройки регулятора *8*, включится осевой вентилятор *3*. При дальнейшем повышении температуры до величины, превышающей значение настройки регулятора *7*, включится вентилятор *4*. Если температура воды в баке понизится, сначала отключится вентилятор *4*, а затем вентилятор *3*. После выключения электродвигателя компрессора отключаются электродвигатели насоса и вентилятора. Режим работы (ручной или автоматический) устанавливается оператором с помощью переключателя.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

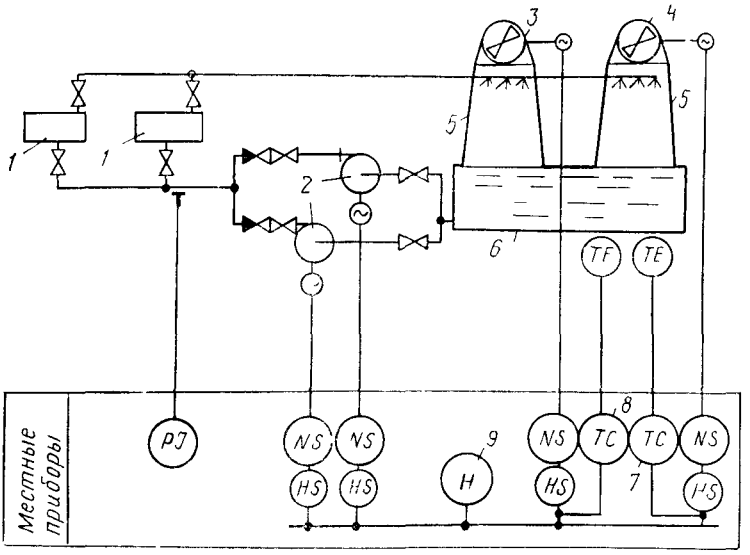


Рис. 12.12. Функциональная схема автоматизации системы охлаждения конденсаторов холодильной установки
1 — конденсаторы холодильных установок, *2* — насосы, *3*, *4* — вентиляторы, *5* — градирни; *6* — сборный бак-аккумулятор; *7*, *8* — регуляторы, *9* — переключатель

ГЛАВА 13. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

§ 13.1. Задачи и принципы автоматизации

Автоматизация водяных систем теплоснабжения способствует поддержанию заданных гидравлических и тепловых режимов в различных их точках. Основную роль в решении этих задач играют устройства автоматического регулирования и автоматической защиты.

Известно, что только центральный метод регулирования на ТЭЦ или в котельной не может обеспечить заданные гидравлические и тепловые режимы у многочисленных и разнородных потребителей теплоты, поэтому применяют несколько ступеней регулирования. Дополнительно к центральному вводят групповое регулирование на центральных тепловых пунктах (ЦТП), местное общее или позонное в индивидуальных тепловых пунк-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

тах (ИТП), а также индивидуальное регулирование непосредственно в месте потребления теплоты.

В тепловых сетях значительной протяженности с неблагоприятным рельефом местности устанавливают насосные перекачивающие подстанции, которые являются дополнительным объектом (ступенью) регулирования и защиты.

На теплоподготовительной установке ТЭЦ или котельной осуществляются регулирование давления воды перед сетевыми насосами, защита от повышения давления сетевой воды, регулирование температуры сетевой воды в подающем трубопроводе за основными подогревателями или пиковыми водогрейными котлами, регулирование уровня конденсата в подогревателях и защита их от переполнения конденсатом, регулирование деаэраторов подпиточной воды

На перекачивающей насосной подстанции автоматизируются сами насосы (автоматическая блокировка с основными сетевыми насосами, включение резерва и т. д), устройства подпитки и регулирования давления перед насосами, защита от повышения давления.

На ЦТП для систем отопления осуществляются регулирование температуры воды после насосов смешения по отопительному графику, регулирование температуры воды на нужды горячего водоснабжения; на абонентских вводах при наличии ЦТП — местное регулирование режима отпуска теплоты на отопление и местное регулирование воздухоподогревателей вентиляционных систем.

В зональных системах отопления целесообразно применять местное регулирование отдельных зон, позволяющее нейтрализовать возмущающие воздействия ветра и солнечной радиации.

При изменении в процессе регулирования расхода сетевой воды в каком-либо объекте неизбежно изменяются перепады давления на остальных объектах вследствие гидравлической разрегулировки, поэтому на каждом ЦТП или ИТП целесообразно предусматривать регулирование перепада давления. В ряде случаев на ИТП или ЦТП осуществляется регулирование давления в обратной линии тепловой сети для нормальной работы

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

систем отопления при зависимой схеме их присоединения.

§ 13.2. Автоматизация теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных

Схемами автоматизации предусматриваются:

1) управление подпиточными насосами и регулирование давления воды в обратном трубопроводе станции или на перемычке;

2) регулирование давления и уровня воды в теплофикационных деаэраторах;

3) регулирование теплопроизводительности сетевых подогревателей и их автоматическая защита,

4) автоматическое включение резервных сетевых насосов и защита от повышения давления сетевой воды.

Автоматизация подпиточных устройств. Подпиточные устройства поддерживают постоянное (или изменяющееся по определенному закону) давление воды во всасывающем коллекторе сетевых насосов. Для закрытых тепловых сетей с небольшими потерями давления воды в магистралях и благоприятном рельефе местности давление в точке подпитки при всех режимах (в том числе при остановленных сетевых насосах) поддерживается постоянным. Это достигается изменением подачи подпиточной воды (стока) из тепловой сети. Утечки воды в закрытой тепловой сети изменяются во времени и носят случайный характер. При аварийных ситуациях утечка воды значительно возрастает; в этом случае применяются резервные подпиточные насосы, которые включаются автоматически.

В открытых тепловых сетях расход подпиточной воды определяется переменным водоразбором на горячее водоснабжение.

Схема автоматизации подпиточных устройств при закрытой системе теплоснабжения приведена на рис. 13.1. Предусматривается поддержание постоянного давления в обратном коллекторе тепловой сети на станции перед сетевыми насосами регулятором подпитки (типа «после себя») Обычно используют П- или ПИ-регуляторы. Если статическое давление воды при остановленных сетевых насосах превышает давление в

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

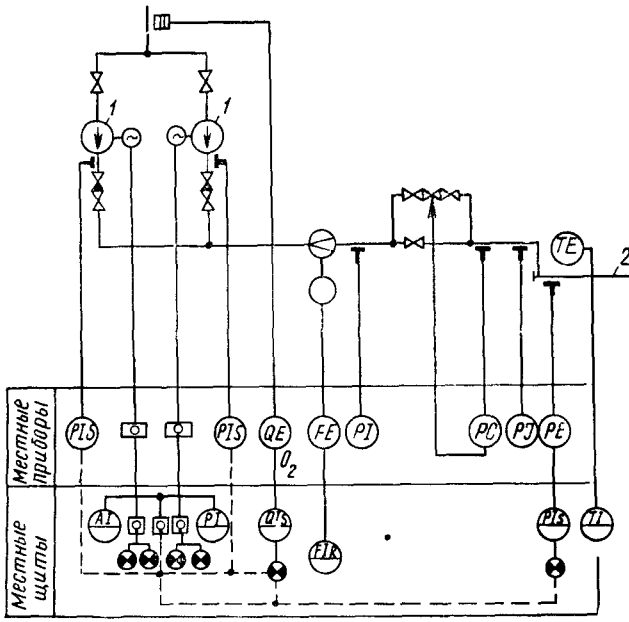


Рис. 13.1. Схема автоматизации подпитки при закрытой схеме теплоснабжения
1 — подпиточные насосы, *2* — обратный трубопровод

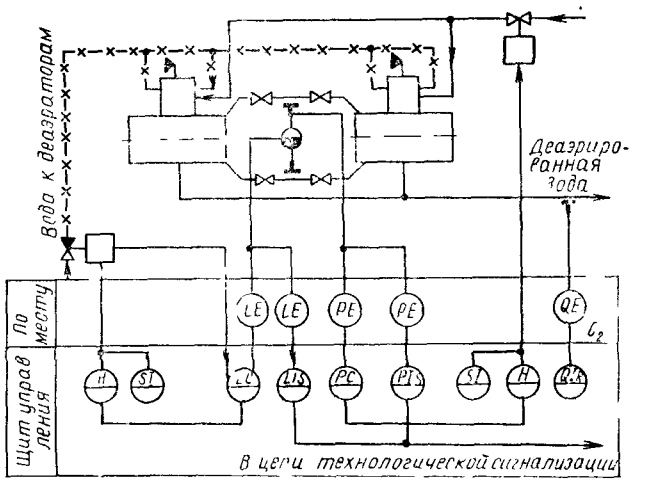


Рис. 13.2. Схема автоматизации установки с двумя деаэраторами

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

обратном коллекторе при работе насосов, то перестройка осуществляется вручную или автоматически путем применения специальных схем перестройки. Подпиточные насосы снабжены автоматикой включения резерва (АВР).

Автоматизация теплофикационных деаэраторов. При установке на станции на линии подпиточной воды вакуумного деаэратора осуществляется автоматическое регулирование уровня воды в деаэраторном баке (рис. 13.2). В установившемся режиме среднее значение уровня должно быть постоянным, а в переходных допускается колебание ±200 мм. По динамическим свойствам деаэраторный бак является интегрирующим звеном, для которого можно записать

$$T\frac{d\varphi}{dt} = k\lambda,$$

где $T = FH_0\rho/G$ — время разгона, с, F — площадь бака, м²; H_0 — номинальный уровень воды в баке, м; H — текущее значение уровня, м, $\varphi = H - H_0/H$ — относительное отклонение регулируемого уровня; $\lambda = G_{пр} - G_{ст}/G$ — относительное возмущающее или регулирующее воздействие, $G_{пр}$, $G_{ст}$ — приток и сток воды, кг/с; G — максимальный расход воды, кг/с; ρ — плотность воды, кг/м³; k — передаточный коэффициент

Решая уравнение, получим

$$\varphi = \frac{k\lambda t}{T}.$$

В атмосферном деаэраторе дополнительно предусматривается регулирование давления в колонке, что достигается изменением подачи пара в колонку деаэратора.

Относительное давление в колонке деаэратора можно рассматривать как апериодическое звено

$$T\frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k\lambda,$$

где φ — относительное отклонение давления, λ — относительное воздействие подачей пара; T — постоянная времени, с; $T \approx 180$—360°C

Для регулирования уровня и давления применяются ПИ-регуляторы.

Автоматизация сетевых подогревателей. При автоматизации сетевых подогревателей одной из основных

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

задач является регулирование температуры сетевой воды на выходе из подогревателей. Наиболее часто применяется центральное регулирование по отопительному графику с температурой воды в подающем трубопроводе 60—150°С. Минимальная температура 60°С обусловливается соблюдением гигиенических требований, предъявляемых к системам горячего водоснабжения.

При двухступенчатой последовательной схеме присоединения абонентских вводов возможно регулирование температуры сетевой воды по повышенному температурному графику (суммарной нагрузке). По метеорологическим данным требуемая температура сетевой воды устанавливается вручную задатчиком регулятора и поддерживается с точностью ±2°С.

Регулирование температуры сетевой воды за подогревателями осуществляется путем дросселирования греющего пара или перепуском части сетевой воды в обход подогревателей (рис. 13.3). Первый метод применяется при регулировании температуры сетевой воды за пиковыми подогревателями, второй метод — за основными подогревателями, когда выключены пиковые. При этом обеспечивается меньшее колебание давления греющего пара и уменьшается инерционность регулируемого объекта. В обоих случаях применяются ПИ-регуляторы.

Пароводяные подогреватели в первом приближении можно рассматривать как инерционные объекты с запаздыванием. Для подогревателей типа СП (с максимальным расходом пара 28 кг/с) постоянная времени $T \sim 50$ с и время запаздывания $\tau \sim 18$ с.

В основных и пиковых сетевых пароводяных подогревателях требуется поддерживать уровень конденсата в допустимых пределах исходя из условий оптимального теплообмена в подогревателе и исключения возможности заброса воды в трубопровод греющего пара. Допускаемое отклонение уровня конденсата ±200 мм. Участок регулирования подогревателя по уровню конденсата является интегрирующим звеном. Схема автоматического регулирования уровня конденсата и защиты подогревателей от переполнения представлена

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

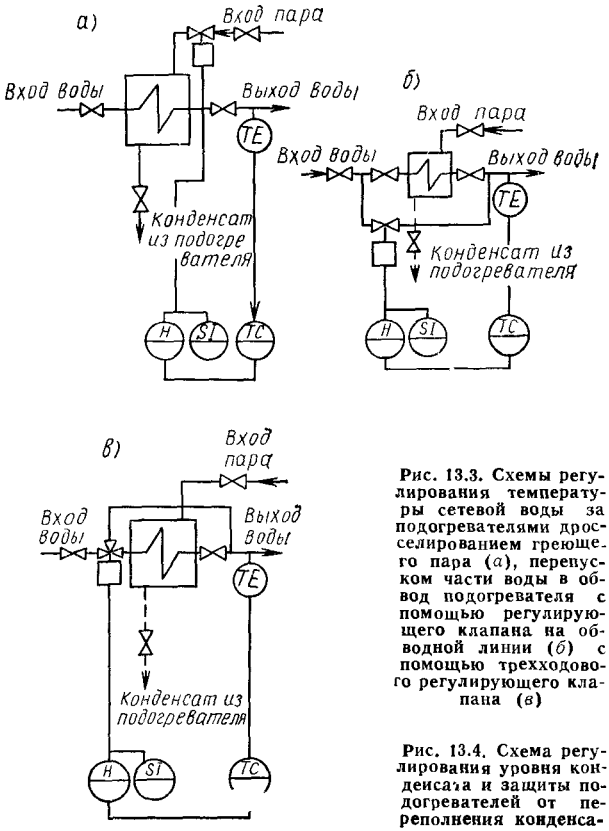
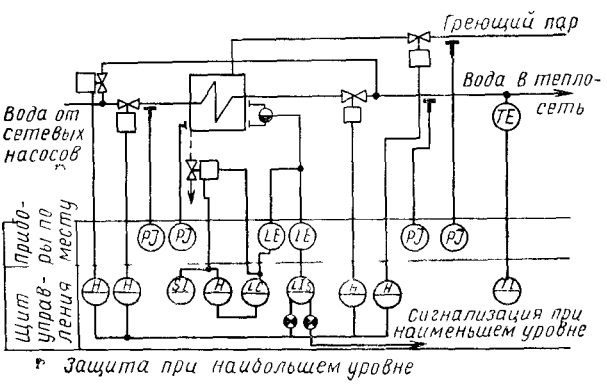


Рис. 13.3. Схемы регулирования температуры сетевой воды за подогревателями дросселированием греющего пара (*а*), перепуском части воды в обвод подогревателя с помощью регулирующего клапана на обводной линии (*б*) с помощью трехходового регулирующего клапана (*в*)

Рис. 13.4. Схема регулирования уровня конденсата и защиты подогревателей от переполнения конденсатом



Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

на рис. 13.4. Для регулирования уровня применяются ПИ-регуляторы.

Защита от переполнения конденсатом осуществляется путем автоматического закрытия задвижек на трубопроводах сетевой воды и пара и открытия задвижки на обводной линии. Одновременно с этим подаются световой и звуковой сигналы

Автоматизация включения резервных сетевых насосов и защита от повышения давления сетевой воды. В процессе эксплуатации тепловых сетей не исключена возможность остановки части сетевых насосов, в результате чего может повыситься давление в обратном трубопроводе до недопустимых пределов и возникнут повреждения отопительных систем при непосредственном их присоединении к тепловой сети. Поэтому предусматривается автоматическое включение резервных насосов при остановке рабочих.

Обычная схема автоматического включения резервного насоса предусматривает пуск его при закрытой задвижке на напорном трубопроводе с последующим автоматическим открытием задвижки. Однако при этом значительно растягивается время восстановления первоначального режима, который имел место до момента остановки рабочего насоса, и такой режим АВР не устраняет временного повышения давления в обратном трубопроводе сверх допустимых пределов. Поэтому рекомендуется резервный насос включать на частично открытую задвижку.

Характер изменения давлений при автоматическом переключении насосов существенно зависит от продолжительности времени между остановкой и включением электродвигателей переключаемых насосов. На рис. 13.5 приведены экспериментальные кривые изменения давлений.

При выключении насосов на 4 с давление в обратном коллекторе поднялось на 2,4 кгс/см^2 (0,24 МПа), при увеличении времени выключения насосов до 9 с — 2,9 кгс/см^2 (0,29 МПа).

Следовательно, чем короче перерыв в работе насосов, тем меньше повышение давления в обратной линии теплосети и меньше вероятность гидравлического удара при аварийных остановках сетевых насосов.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

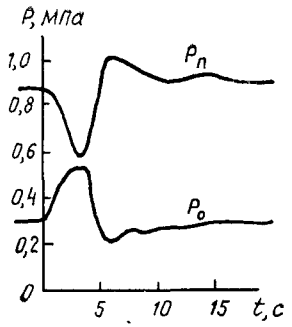


Рис. 13.5. Кривые изменения давления в подающем $P_п$ и обратном $P_о$ коллекторах ТЭЦ при кратковременном выключении двух насосов из четырех

§ 13.3. Автоматизация насосных подстанций

Основное назначение насосных подстанций — изменение давления в подающем или обратном трубопроводе за подстанцией, а также увеличение пропускной способности тепловой сети.

Автоматизацией насосной подстанции на подающей магистрали (рис. 13.6) предусматриваются:

1) блокировка насосных агрегатов (АВР);

2) блокировка электродвигателей насоса и задвижки на напорном патрубке насоса;

3) автоматическое включение резервного насоса при падении давления в напорном патрубке работающего;

4) автоматическое переключение на резервный источник электропитания;

5) сигнализация о неисправностях работы насосной подстанции (например, превышение допустимой температуры в подшипниках насосов, автоматическое включение резевного насоса, понижение давления воды за насосами и т. д.).

При автоматизации насосной подстанции на обратной магистрали (рис. 13.7) дополнительно предусматривается поддержание постоянного давления во всасывающем коллекторе насосной подстанции, так как постоянство давления во всасывающем коллекторе влияет на надежность работы отопительных систем.

Автоматическая защита от понижения давления воды во всасывающем коллекторе перекачивающей подстанции действует при аварийных ситуациях. В ука-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

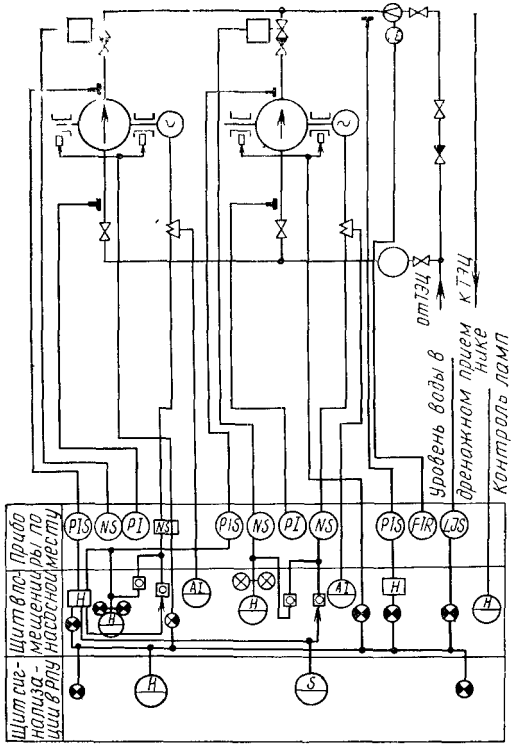


Рис. 13.6. Схема автоматизации насосной подстанции на подающей магистрали

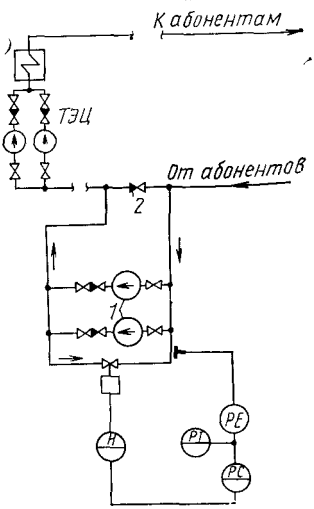


Рис. 13 7. Схема регулирования давления воды во всасывающем коллекторе насосной подстанции на обратной магистрали

1 — насосы подстанции; *2* — обратный клапан

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

занных условиях автомат рассечки разделяет тепловую сеть на две гидравлически независимые зоны: верхнюю (с высокой отметкой пьезометра после срабатывания защиты) и нижнюю (с низкой отметкой пьезометра).

Основной причиной резких и значительных по величине понижений давления воды во всасывающем коллекторе насосных подстанций на обратных трубопроводах является остановка насосов подстанции или сетевых насосов на станции, что может быть вызвано различными неисправностями, в том числе прекращением подачи электроэнергии. В связи с этим в схеме защиты используются не электрические, а гидравлические регуляторы давления, например РД-3А с регулирующим клапаном РК. Измерительно-управляющие приборы РД-3А автомата рассечки и регулятора давления получают импульс от давления на всасывающем коллекторе насосной подстанции. Регулирующие клапаны РК с мембранным приводом устанавливают на подающей магистрали подстанции.

Полное разделение тепловой сети на две гидравлические независимые зоны не требуется в том случае, когда давление в обратной магистрали во время остановки насосной подстанции не превышает допустимого предела при некотором сокращенном расходе воды, который можно обеспечить частичным прикрытием регулирующего клапана. В таких случаях целесообразно применять двухседельные регулирующие клапаны.

При частичном закрытии регулирующего клапана снижается вероятность возникновения гидравлического удара в подающем трубопроводе.

§ 13.4. Автоматизация узлов горячего водоснабжения

Основная задача автоматического регулирования систем горячего водоснабжения — поддержание постоянной заданной температуры воды в местах ее разбора. В идеальном случае это можно осуществить с помощью индивидуальных регуляторов температуры в каждом месте разбора горячей воды. Однако такое решение существенно усложнит эксплуатацию систем горячего водоснабжения и будет малоэффективным. В связи с этим индивидуальные регуляторы в местах разбора горячей воды устанавливают лишь в особых случаях.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Как правило, автоматически поддерживают постоянную температуру воды (60°С) на узлах горячего водоснабжения ЦТП. Постоянство температуры воды в местах разбора не гарантируется из-за остывания воды в разводящих трубопроводах. Указанный недостаток в значительной мере устраняется применением циркуляционных линий с насосами.

Для обеспечения качественного снабжения потребителей горячей водой необходима непрерывная работа циркуляционного насоса. Если работа насосов в ночное время не предполагается, то предусматривается их автоматическое выключение. При установке аккумуляторов для выравнивания графика отпуска теплоты на горячее водоснабжение предусматривается автоматическое управление зарядкой и разрядкой этих аккумуляторов. Выбор схемы автоматического регулирования температуры воды на горячее водоснабжение определяется принятой системой теплоснабжения (закрытая или открытая).

При закрытой системе теплоснабжения, когда на вводах горячего водоснабжения устанавливают водоводяные подогреватели, широко применяется схема регулирования температуры нагреваемой воды путем изменения количества сетевой воды (рис. 13.8, *а*, *б*, *в*) или путем разделения потока сетевой воды трехходовым регулирующим клапаном на два: поступающий поток направляется в подогреватель, а перепускаемый — по обводной линии (рис. 13.8, *г*).

При таком способе регулирования обеспечивается примерно постоянный расход сетевой воды, что исключает полностью или частично гидравлическую разрегулировку тепловой сети. Однако постоянство расхода сетевой воды приводит к завышению температуры воды в обратном трубопроводе тепловой сети в период малых нагрузок горячего водоснабжения. При теплоснабжении от ТЭЦ это нежелательно, так как на ТЭЦ снижается выработка электроэнергии на тепловом потреблении

При открытой системе теплоснабжения на узлах горячего водоснабжения отсутствуют водоводяные подогреватели; горячая вода к потребителю поступает непосредственно из тепловой сети. Температура воды, поступающей в систему горячего водоснабжения, регу-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

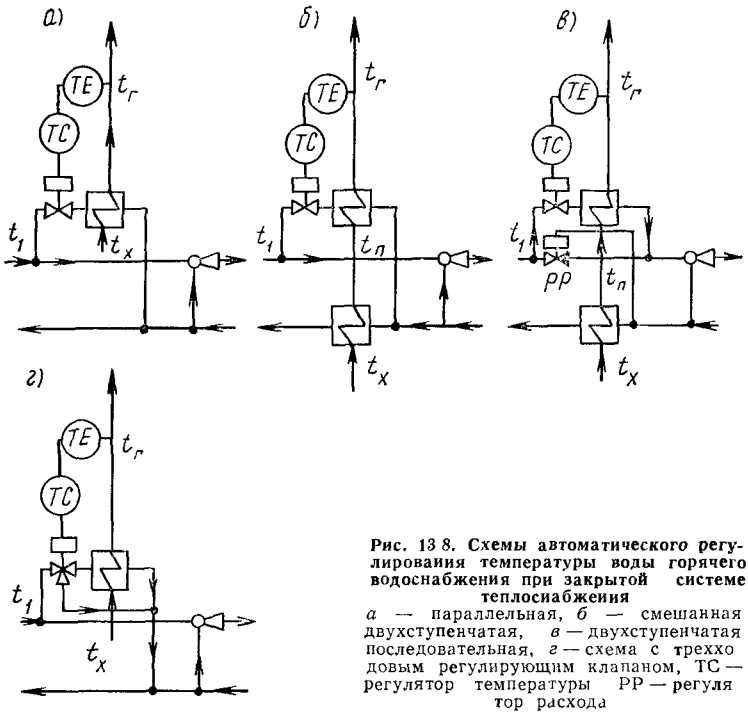


Рис. 13 8. Схемы автоматического регулирования температуры воды горячего водоснабжения при закрытой системе теплосиабжеиия

а — параллельная, *б* — смешанная двухступенчатая, *в* — двухступенчатая последовательная, *г* — схема с трехходовым регулирующим клапаном, ТС — регулятор температуры РР — регулятор расхода

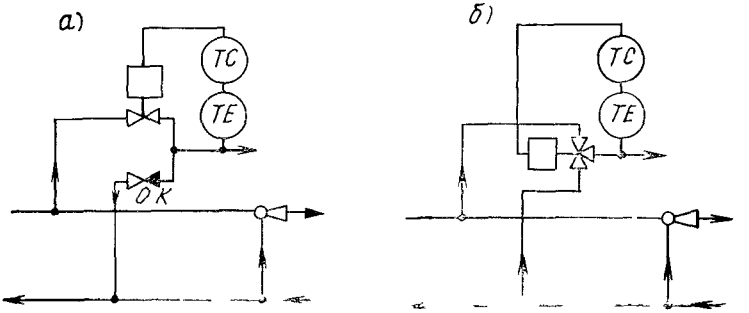


Рис. 13 9. Схемы автоматического регулированиия температуры воды горячего водосиабежиия при открытой системе теплосиабжения с двухходовым (*а*) и с трехходовым регулирующим клапаиом (*б*)

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

лируется смешением потоков воды из подающего и обратного трубопроводов тепловой сети.

Широкое распространение получили схемы с установкой регулирующего клапана на подающем трубопроводе и обратного клапана на обратном трубопроводе (рис. 13.9, *а*) и с применением трехходового клапана смешения (рис. 13.9, *б*).

Режим работы систем горячего водоснабжения отличается значительной неравномерностью расхода воды в течение суток, причем расход сетевой воды изменяется не только в течение суток, но и в течение года. Например, в системе горячего водоснабжения с параллельной схемой включения подогревателей при увеличении температуры воды в подающем трубопроводе тепловой сети с 70 до 150°С расход сетевой воды на горячее водоснабжение уменьшается примерно в 3,5 раза. При непосредственном водоразборе в открытых системах теплоснабжения увеличение температуры воды в подающем трубопроводе приводит к некоторому снижению ее расхода.

Водоводяные подогреватели горячего водоснабжения могут быть представлены апериодическими звеньями с запаздыванием. На рис. 13.10 приведены кривые разгона подогревателя (конструкция теплосети Мосэнерго) при скачкообразных изменениях расходов сетевой и нагреваемой воды. Анализ кривых показывает, что τ/T подогревателя колеблется в пределах $0{,}08<\tau/T<0{,}18$.

При двухступенчатой (последовательной или смешанной) схеме включения подогревателей горячего водоснабжения регулирующей ступенью является вторая по ходу движения нагреваемой воды. Так как число секций этой ступени обычно меньше, а температура на входе нагреваемой воды во вторую ступень больше, чем при одноступенчатой (параллельной) схеме включения подогревателя, то динамическая характеристика двухступенчатого подогревателя отличается от одноступенчатого. Исследованиями установлено, что при переводе подогревателей горячего водоснабжения с одноступенчатой на двухступенчатую схему T и τ снижаются в 1,6—1,7 раза.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

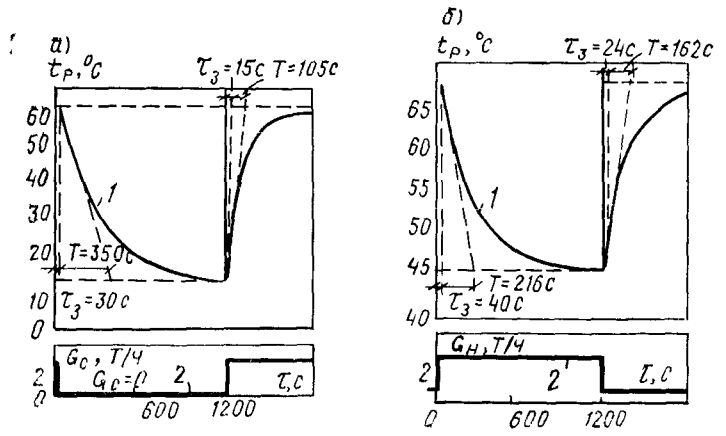


Рис. 13.10 Кривые разгона водоводяного подогревателя при скачкообразном изменении расхода сетевой воды (*а*) и подогреваемой (*б*)
1 — кривая разгона; *2* — скачкообразное изменение расхода

§ 13.5. Влияние неравномерности теплопотребления системой горячего водоснабжения на тепловой режим помещений при комбинированном способе подготовки теплоты на ЦТП

Потребление теплоты на горячее водоснабжение в жилых квартирах в течение суток имеет резко переменный характер. На ЦТП при комбинированном способе подготовки теплоты этот фактор существенно влияет на работу системы отопления и температурный режим обслуживаемых помещений. Колебания температуры воздуха помещений зависят не только от изменений потребления теплоты на горячее водоснабжение, но и от теплоаккумулирующих свойств основных элементов комплекса «ЦТП — абонент»: подогревателей, трубопроводов, нагревательных приборов и отапливаемых помещений. Наибольшей теплоаккумулирующей способностью обладают отапливаемые помещения зданий абонентов, однако в общей постановке задачи должна быть учтена и инерционность других элементов комплекса.

В МИСИ им. В. В. Куйбышева были проведены исследования ЦТП с двухступенчатой последовательной

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

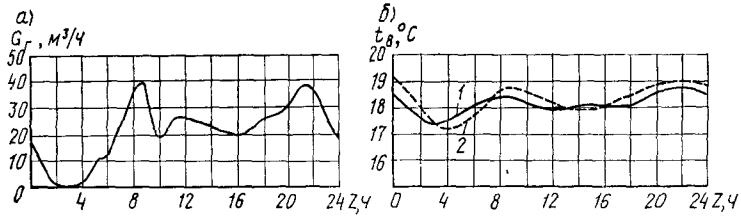


Рис. 13.11. Суточные изменения расхода воды в системе горячего водоснабжения (*а*) и температуры воздуха в отапливаемых помещениях (*б*)
1 — по экспериментальным данным; *2* — по результатам расчета

схемой включения абонентов. Комплекс «ЦТП — абонент» состоял из параллельно-последовательно соединенных элементов с различными динамическими свойствами, изменяющимися в течение отопительного периода в зависимости от условий работы. При колебаниях водоразбора в установках горячего водоснабжения изменялись параметры теплоносителя в системах отопления.

Используя зависимости гл. 7, была составлена программа расчета изменений температуры воздуха отапливаемых помещений при изменении расхода воды на горячее водоснабжение и выполнена серия расчетов на ЭВМ. Полученные данные сопоставлялись с результатами натурных испытаний, проведенных на одном из ЦТП г. Москвы.

Расчетная нагрузка отопления $Q_0 = 3{,}36$ МВт, отношение максимальной нагрузки горячего водоснабжения и расчетной нагрузки на отопление $\rho_г^{макс} = Q_г^{макс} / Q_0 = 0{,}9$. Число жителей — 3800 чел. ЦТП, работающий на повышенном температурном графике теплосети, обслуживает пять 9-этажных каркасно-панельных и два 5-этажных кирпичных жилых дома. Дома имеют однотрубную элеваторную систему отопления с нагревательными приборами — плинтусными конвекторами и радиаторами М-140.

Режим потребления горячей воды имеет четко выраженный периодический характер, который в первом приближении может быть представлен гармоническими колебаниями с периодом 12 ч или прерывистыми с периодом 24 ч.

Сопоставление расчетных и экспериментальных дан-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ных (рис. 13.11) показало хорошую сходимость результатов аналитического определения колебаний температуры контрольных помещений при переменном режиме горячего водоснабжения и данных термографирования. Была предложена новая схема автоматизации ЦТП, позволяющая улучшить режим отпуска теплоты на отопление.

§ 13.6. Автоматизация водяных систем отопления

Основная задача автоматизации водяных систем отопления — стабилизация температуры воздуха отапливаемых помещений. В последние годы все шире применяется программное регулирование отпуска теплоты на отопление, которое обеспечивает снижение температуры воздуха отапливаемых помещений административных и производственных зданий в ночное время суток и в выходные дни. Рассматривается вопрос о целесообразности программного регулирования температуры воздуха в жилых зданиях.

В закрытых тепловых сетях с параллельной и двухступенчатой смешанной схемами присоединения абонентов регулирование отпуска теплоты на отопление осуществляют по отопительному графику путем стабилизации перепада давления на отопительных вводах. (При неизменном гидравлическом сопротивлении системы отопления абонента постоянному перепаду давления соответствует постоянный расход сетевой воды.)

При такой автоматизации решается только одна частная задача регулирования отпуска теплоты на отопление, не допуская случаев гидравлической разрегулировки тепловой сети. Сущность гидравлической разрегулировки состоит в том, что колебания расхода сетевой воды на горячее водоснабжение (или вентиляцию) вызывают изменение разности давлений подающей и обратной линии тепловой сети, а следовательно, изменение расхода воды на неавтоматизированных отопительных узлах. Кроме того, при уменьшении расхода сетевой воды у части абонентов происходит гидравлическая разрегулировка в тепловой сети и увеличивается расход сетевой воды на отопление у другой части абонентов, и наоборот.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Более сложным является регулирование расхода сетевой воды на ЦТП с двухступенчатой последовательной схемой присоединения абонентов, так как в этом случае расход воды на отопление должен изменяться по определенному закону в зависимости от температуры воды в подающем трубопроводе.

При неблагоприятном рельефе местности и больших потерях напора в тепловой сети автоматизацией отопительных вводов или ЦТП предусматривается поддержание постоянного давления в обратном трубопроводе систем отопления высоких или высоко расположенных зданий. (Широко применяются регуляторы давления «до себя» прямого действия.) Благодаря автоматизации исключается возможность утечки воды из систем отопления указанных зданий при колебаниях гидравлического режима тепловой сети.

При остановке насосов на обратном трубопроводе подстанции и значительном возрастании давления в обратном трубопроводе автоматика защищает отопительную систему от повышенного давления.

Как уже отмечалось, качественный отпуск теплоты отопительным абонентам в системах централизованного теплоснабжения возможен лишь при применении нескольких ступеней регулирования: центральной, групповой, местной, пофасадной и индивидуальной. Указанные ступени не противопоставляются, а дополняют одна другую. На каждой предыдущей ступени снимается часть возмущающих воздействий и тем самым облегчается работа последующих ступеней. В конкретных системах теплоснабжения та или иная ступень регулирования может отсутствовать (например, ступень индивидуального автоматического регулирования в каждом отапливаемом помещении).

Применяются три способа автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление:

1) по отклонению температуры воздуха помещений;

2) по возмущению — изменению температуры наружного воздуха, скорости ветра, солнечной радиации;

3) комбинированный (по отклонению и возмущению)

Первый способ применяется при индивидуальном, а также местном (пофасадном) регулировании; второй—

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

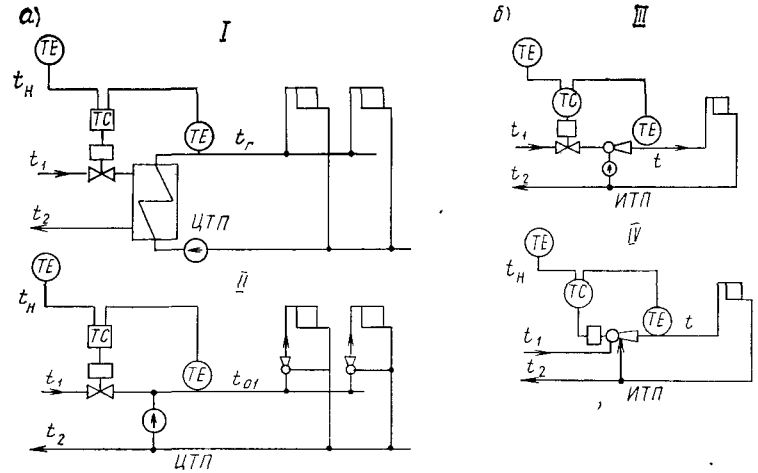


Рис. 13.12. Схемы группового (*а*) и местного (*б*) автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление по возмущению
I — независимое присоединение; *II* — с подмешивающими насосами на ЦТП; *III* — совместная работа элеватора и насоса, *IV* — элеватор с регулирующим соплом

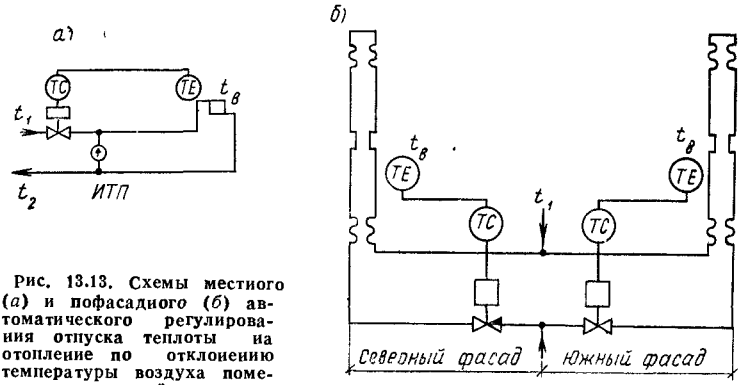


Рис. 13.13. Схемы местного (*а*) и пофасадного (*б*) автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление по отклонению температуры воздуха помещений

основной способ — при регулировании на ТЭЦ и в котельной, который может быть использован также при групповом регулировании на ЦТП; третий способ регулирования может применяться в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

§ 13.7. Схемы автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление

Групповое регулирование (на ЦТП). Принципиальные схемы группового автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление приведены на рис. 13.12, *а*. Применение этих схем практически исключает возможность вертикальной разрегулировки отопительных систем при значительных сокращениях расхода сетевой воды. Регулирование осуществляется ПИ-регулятором соотношения температур, который изменяет температуру воды в подающем трубопроводе за ЦТП в зависимости от температуры наружного воздуха в соответствии с отопительным температурным графиком.

Вместо датчика температуры наружного воздуха может применяться так называемый датчик метеоусловий, который представляет собой термометр сопротивления, помещенный в камеру в наружной стене одного из зданий. Снаружи камера закрыта прозрачной крышкой с отверстиями для пропуска солнечной радиации и обдува термометра сопротивления. Такой датчик учитывает не только изменение температуры наружного воздуха, но и скорость ветра, и величину солнечной радиации.

Для исключения влияния гидравлической разрегулировки тепловой сети на режим отпуска теплоты на отопление дополнительно устанавливают регуляторы перепада давления между падающей и обратной линией.

Местное регулирование. В схемах местного автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление (в ИТП) также можно использовать способ регулирования по возмущению. Можно применять также схемы с совместной работой элеватора и насоса и с регулируемым элеватором (рис. 13.12, *б*). Эти схемы позволяют увеличивать коэффициент смещения элеватора по мере снижения расхода сетевой воды.

В ИТП можно применить и способ регулирования по отклонению температуры воздуха в контрольных (представительных) помещениях здания. Наиболее эффективным является местное регулирование (рис. 13.13), которое может обеспечить значительную экономию

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

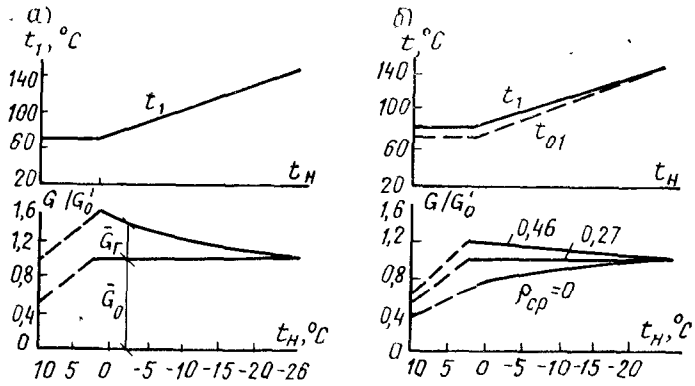


Рис. 13.14. Расходы воды при двухступенчатой последовательной схеме включения абонентов при отопительном (*а*) и повышенном (*б*) температурных графиках

$\bar{G}$, $\bar{G}_o$, $\bar{G}_г$, $\bar{G}'_o$ — относительные значения общего расхода сетевой воды, расхода сетевой воды на отопление, горячее водоснабжение, на отопление при параллельной схеме присоединения абонентов

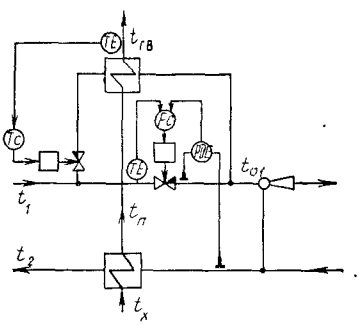


Рис. 13.15. Схема автоматического регулирования при двухступенчатом последовательном включении подогревателей горячего водосиабжения

теплоты. Представляет интерес опыт Челябинска по разработке и внедрению схем автоматического регулирования пофасадных (позонных) панельных бифилярных систем отопления (рис. 13.13, *б*). Схемой обеспечивается глубокое количественное регулирование систем панельного отопления без смешения. Применяются электронные П-регуляторы с электрическими исполнительными механизмами для перемещения регулирующего органа конструкции В. Т. Благих.

Регулирование отпуска теплоты на отопление в

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ИТП можно осуществлять двухпозиционным регулятором местных пропусков, который отключает систему отопления от тепловой сети при превышении заданной температуры воздуха в контрольных помещениях здания (опыт теплосети Мосэнерго).

Как показали исследования режима работы отопительных систем при двухступенчатой последовательной схеме присоединения и нормальном отопительном температурном графике, расчетный температурный режим в отапливаемых помещениях будет соблюдаться только при температуре наружного воздуха $t_н$, соответствующей точке излома температурного графика. При отклонении $t_н$ в ту или иную сторону и постоянном расходе сетевой воды будет перегрев помещений. Во избежание этого необходимо по мере понижения $t_н$ уменьшать расход сетевой воды $G_с$ на тепловом пункте.

Теоретическая зависимость $G_с = f_1(t_н)$, а также зависимость изменения температуры воды в подающем трубопроводе t_1 от $t_н$, т. е. $t_1 = f_2(t_н)$, для условий Москвы приведены на рис. 13.14, *а*. График построен при расчетной тепловой нагрузке отопительной системы $Q_о = 1$ Гкал/ч и средней тепловой нагрузке системы горячего водоснабжения $Q_г^{ср} = 0{,}27$ Гкал, т. е. $\rho_с^{ср} = Q_г^{ср}/Q_о = 0{,}27$. Как видно из графика, при расчетной $t_н = -26°С$ общий расход сетевой воды должен снизиться практически до расхода воды на отопление.

При двухступенчатой последовательной схеме присоединения абонентов в случае повышенного температурного графика (графика с регулированием по суммарной нагрузке отопления и горячего водоснабжения) будет иная картина с расходом сетевой воды, так как график строится для определенного по тепловой сети отношения $\rho_с^{ср} = (Q_г^{ср}/Q_о)_{сеть}$.

Величина $\rho^{ср}$ у отдельных абонентов может совпадать или не совпадать с величиной $\rho_с^{ср}$. Если $\rho^{ср} = \rho_с^{ср}$, то расход воды у такого абонента должен поддерживаться постоянным при любых $t_н$ ниже точки излома графика. Если $\rho^{ср} > \rho_с^{ср}$, то с понижением $t_н$ должен понижаться и расход сетевой воды у такого абонента.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При $\rho^{ср} < \rho_e^{ср}$ с понижением $t_н$ расход сетевой воды у абонента должен повышаться (рис. 13.14, *б*).

Таким образом, во избежание перегрева зданий при двухступенчатой последовательной схеме присоединения абонентов расход сетевой воды на вводах значительной части абонентов должен изменяться с изменением $t_н$ (и соответственно t_1). Такое изменение расхода G может быть обеспечено только с помощью автоматических регуляторов, работающих по отклонению температуры воздуха отапливаемых помещений или по изменению температуры воды t_1 в подающем трубопроводе сети (рис. 13.15).

Индивидуальное регулирование. Осуществляется в каждом отапливаемом помещении или на группу помещений с одинаковым температурным режимом. Как правило, применяют двухпозиционные или П-регуляторы прямого действия. Индивидуальное регулирование нейтрализует возмущающие воздействия, возникающие в отдельных помещениях вследствие внутренних тепловыделений, солнечной радиации и т. д.

§ 13.8. Автоматизация систем воздушного отопления и воздушных тепловых завес

Основная задача автоматизации **систем воздушного отопления** с 100 %-ной рециркуляцией воздуха — поддержание постоянной температуры воздуха отапливаемых помещений. В более сложных системах воздушного отопления дополнительно предусматривается снижение температуры воздуха отапливаемых помещений в отдельные часы суток и дни недели по заданной программе.

Наиболее распространенным способом регулирования температуры воздуха помещения является регулирование теплопроизводительности отопительного агрегата путем изменения расхода сетевой воды через воздухоподогреватель. На рис. 13. 16, *а* приведена схема автоматизации отопительного агрегата с вентилятором. При понижении температуры воздуха помещения ниже заданной срабатывает двухпозиционный регулятор и открывается клапан на линии теплоносителя (к воздухоподогревателю). Одновременно по команде это-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

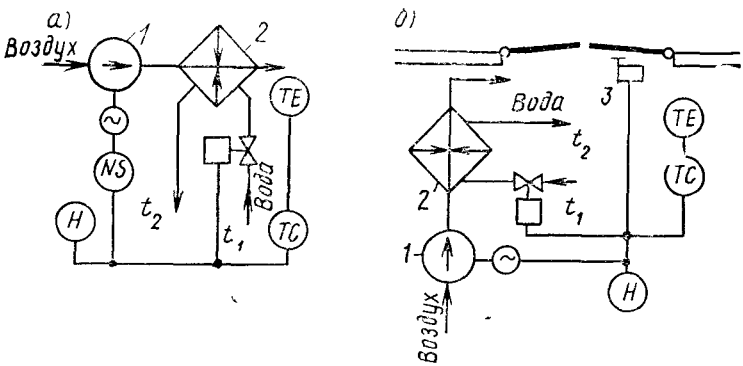


Рис. 13.16 Схема автоматизации установок воздушного отопления (*а*) и воздушно-тепловой завесы (*б*)
1 — вентилятор, 2 — воздухоподогреватель, 3 — концевой выключатель

го регулятора включается вентилятор. При достижении заданной температуры регулятор дает команду на закрытие клапана и выключение вентилятора. Схемой предусматривается также ручное управление.

Разновидностью установок воздушного отопления являются воздушно-тепловые завесы непрерывного и периодического действия. При автоматизации периодически действующих **установок воздушно-тепловой завесы** широко применяется схема на рис. 13.16, *б*. При открытии ворот (дверей) по команде концевого выключателя открывается клапан на линии теплоносителя к воздухоподогревателю и включается вентилятор. При открытых воротах температура воздуха в их зоне естественно снижается даже при включенной установке, которая продолжает работать и после закрытия ворот. При этом температура воздуха в зоне ворот постепенно повышается. Когда температура воздуха достигнет заданного значения, срабатывает двухпозиционный терморегулятор, который закрывает клапан на линии теплоносителя и выключает вентилятор.

Схемой предусматривается ручное управление воздушно-тепловой завесой. При условии кратковременного открытия ворот установка воздушно-тепловой завесы включается и выключается по команде концевого выключателя.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ГЛАВА 14. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

§ 14.1. Основные положения

Надежная, экономичная и безопасная работа котельной с минимальным числом обслуживающего персонала возможна только при наличии теплового контроля, автоматического регулирования и управления технологическими процессами, сигнализации и защиты оборудования

Объем автоматизации принимается в соответствии с СНиП II-35-76 и требованиями заводов — изготовителей тепломеханического оборудования. Для автоматизации применяются серийно выпускаемые приборы и регуляторы Проект автоматизации котельных разрабатывается на основании задания, составленного при выполнении теплотехнической части проекта Контроль и управление работой любой энергетической установки, в том числе котла, предусматривают следующие общие задачи:

а) обеспечение выработки в каждый данный момент необходимого количества теплоты (пара, горячей воды) при определенных его параметрах — давлении и температуре;

б) достижение экономичности сжигания топлива, рационального использования электроэнергии для собственных нужд установки и доведение потерь теплоты до минимума;

в) обеспечение надежности и безопасности, т. е установление и сохранение нормальных условий работы каждого агрегата, исключающих возможность неполадок и аварий как собственно агрегата, так и вспомогательного оборудования.

Автоматизация котельной может быть полной, при которой оборудование управляется дистационно с помощью приборов, аппаратов и других устройств без участия человека с центрального щита путем телемеханизации. Комплексная автоматизация предусматривает автоматическое управление основным оборудованием и наличие постоянного обслуживающего персонала. Иногда применяется частичная автоматизация только некоторых видов оборудования. Степень автомати-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

зации котельной определяется технико-экономическими расчетами.

При любой степени автоматизации обязательно соблюдение требований Госгортехнадзора СССР, предъявляемых к котлам разной производительности, давления и температуры. В соответствии с этим ряд приборов автоматики является обязательным, некоторые из них должны быть дублированы.

Автоматизацией котельной предусматривается контроль следующих параметров:

1) расхода пара, воды, топлива, иногда воздуха, дымовых газов;

2) давлений пара, воды, газа, мазута, воздуха и разрежения в элементах и газоходах котла и вспомогательного оборудования;

3) температур пара, воды, топлива, воздуха и дымовых газов;

4) уровня воды в барабане котла, циклонах, баках, деаэраторах, уровня топлива в бункерах и других емкостях;

5) качественного состава дымовых газов, пара и воды.

Принципиальная схема теплового контроля за работой парового котла со слоевой топкой показана на рис. 14.1.

Кроме приборов, выведенных на щит управления, часто применяется местная установка контрольно-измерительных приборов: термометров для измерения температур воды, пара, мазута; манометров и вакуумметров для измерения давления и вакуума; различных тягомеров и газоанализаторов. Приборы необходимы не только для эксплуатации, но и для периодических испытаний, проводимых после ремонтов или реконструкции.

В котельной подлежат автоматизации следующие процессы:

а) регулирование в определенных пределах заранее заданных значений величин, характеризующих протекание процесса;

б) управление — осуществление периодических операций (обычно дистанционно);

в) защита оборудования от повреждений вследствие нарушений процессов;

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

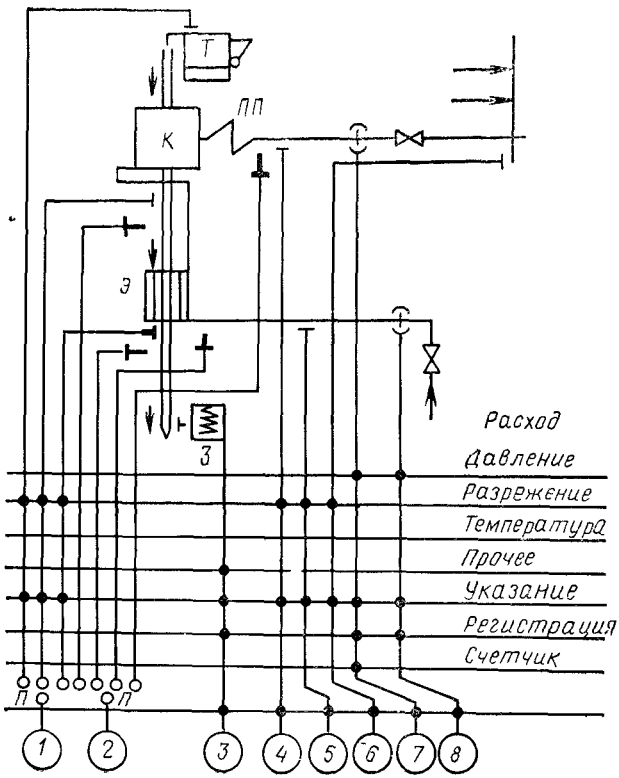


Рис. 14.1. Принципиальная схема теплового контроля работы котла со слоевой топкой

К — котел, Т — топка; Э — водяной экономайзер; ПП — пароперегреватель; П — переключатель: *1, 2, 3* — контроль разрежения, температуры, состава продуктов сгорания, *4, 5, 6* — контроль давлений, *7, 8* — контроль расхода

г) блокировка, которая обеспечивает автоматическое включение и выключение оборудования, вспомогательных механизмов и органов управления с определенной последовательностью в соответствии с технологическим процессом.

Применяется блокировка трех типов:

а) запретительно-разрешающая, предотвращающая неправильные действия персонала при нормальном режиме эксплуатации;

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

б) аварийная, вступающая в действие при тех режимах, которые могут привести к травмированию персонала и повреждениям оборудования;

в) замещающая, которая включает резервное оборудование взамен отключенного.

Системы автоматического регулирования (САР) решают задачи:

1) стабилизации, при которой управляющее воздействие остается неизменным при всех режимах работы объекта, т. е. поддерживаются постоянными давление, температура, уровень и некоторые другие параметры;

2) слежение (следящие системы), когда регулируемая величина или параметр изменяется в зависимости от значений другой величины, например при регулировании подачи воздуха в зависимости от расхода топлива;

3) программного регулирования, когда регулируемый параметр изменяется во времени по заранее заданной программе, например при циклических процессах (пусках и остановах оборудования).

В общем случае система автоматического регулирования барабанного парового котла состоит из следующих подсистем: процесса горения, температуры перегрева пара, питания (уровня воды в барабане) и водного режима.

Задачами регулирования процесса горения в топке котла являются поддержание расхода топлива в соответствии с расходом пара или теплоты, обеспечение подачи воздуха в топочное устройство в соответствии с расходом топлива для его экономичного сжигания и, наконец, регулирование давления дымовых газов на выходе из топки.

Зная количество теплоты по расходу пара, горячей воды или топлива, можно поддерживать расход воздуха пропорциональным расходу топлива, т. е. осуществлять схему «топливо — воздух». Эту схему целесообразно применять при сжигании природного газа и жидкого топлива, для которых теплоту сгорания можно считать постоянной во времени и можно измерить их расход. Соотношение между поступлением топлива и воздуха при стационарном процессе может контролироваться по разрежению в топочной камере.

При переходных процессах может быть расхождение

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

между количеством теплоты, выделенной сгоревшим топливом и воспринятой в агрегате. Эта разница пропорциональна скорости изменения давления пара во времени $a\frac{dp}{dt}$, где a — коэффициент, учитывающий степень изменения скорости и называемый условно «импульсом по теплоте». Поэтому при использовании импульса по расходу пара D вводят корректирующий импульс по теплоте $a\frac{dp}{dt}$, тогда суммарный импульс имеет вид: $D+a\frac{dp}{dt}$.

При колебаниях величины a экономичность процесса не будет сохраняться, если не вводить дополнительную корректировку. В связи с этим предложена схема регулирования «пар — воздух», в которой подача топлива регулируется по импульсу от давления пара, а регулятор воздуха получает импульс от алгебраической суммы импульсов по расходу пара, топлива и воздуха.

Регулирование количества удаляемых дымовых газов обычно ведется по разрежению в топочной камере. При нескольких котлоагрегатах устанавливают главный регулятор, получающий импульс по заданному расходу теплоты, который подает корректирующие импульсы на регуляторы топлива или воздуха каждого из котлоагрегатов.

Кроме процесса горения в паровых котлах обязательно автоматически регулируют подачу воды в барабан по импульсам от уровня воды, расхода пара и расхода питательной воды.

§ 14.2. Системы автоматического регулирования процессов в котлах

Рассмотрим некоторые структурные схемы автоматического регулирования процессов в паровых и водогрейных котлах. Для паровых котлов с естественной циркуляцией необходима подача топлива в соответствии с нагрузкой по импульсу постоянства давления в барабане котла *I* (рис. 14.2).

При нескольких паровых котлах имеется регулятор давления в общем паропроводе, поддерживающий оп-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

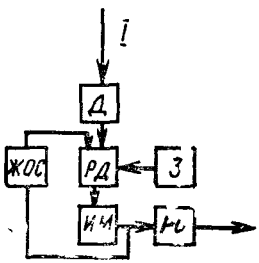


Рис. 14.2. Схема регулятора топлива Д — датчик; РД — усилитель, З — задатчик; ИМ — исполнительный механизм, РО — регулирующий орган; ЖОС — жесткая обратная связь

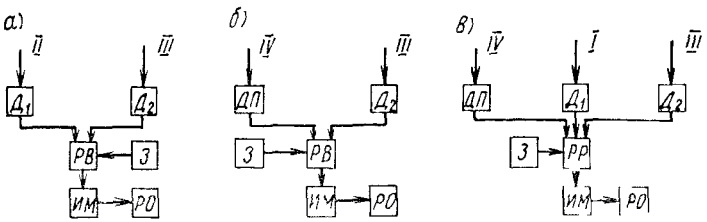


Рис. 14.3. Схемы регуляторов воздуха по расходу газа (*а*) для котлов, работающих на мазуте или твердом топливе (*б*), и паровых котлов, работающих на газе и мазуте (*в*)

I — сигнал по расходу пара из котла; *II* — сигнал по расходу газа на котел; *III* — сигнал по расходу воздуха на котел; *IV* — сигнал от датчика перемещения исполнительного механизма регулятора топлива

ределенное соотношение между общим расходом пара и производительностью отдельных котлов.

При работе котла на газе наиболее часто используется схема «топливо — воздух» (рис. 14.3,*а*). В этой схеме регулятор получает два импульса по измеряемому расходу газа *I* или его давлению перед горелками *II* от датчика $Д_1$ и по давлению воздуха в коробе перед горелками *III* котла $Д_2$.

При работе котла на мазуте из-за трудностей измерения его расхода один датчик ДП (рис. 14.3,*б*) получает импульс от перемещения выходного звена исполнительного механизма *IV*, а второй — по давлению воздуха аналогично схеме на рис. 14.3,*а*. Давление и вязкость мазута, направляемого к горелкам, необходимо поддерживать постоянными, контролируя подогрев мазута.

При сжигании твердого топлива в топках с пневмозабрасывателями и механическими решетками

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

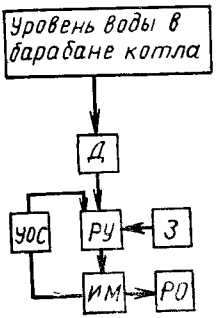


Рис. 14.4. Схема регулятора питания котла водой
УОС — устройство обратной связи; РУ — регулятор уровня

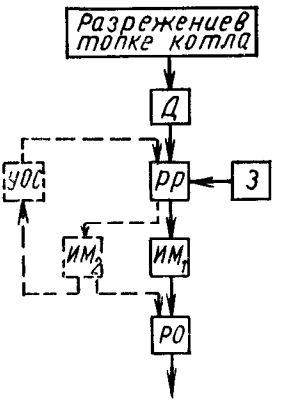


Рис. 14.5. Схема регулятора разрежения в топке
РР — регулятор разрежения, пунктиром показана упругая обратная связь от электрического исполнительного механизма $ИМ_2$ при установке дымососа за пределами здания котельной

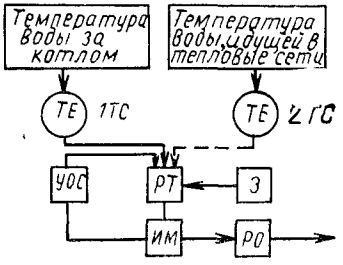


Рис. 14.6. Схема регулятора температуры воды за водогрейным котлом

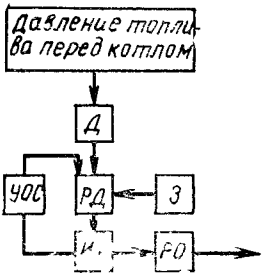


Рис. 14.7. Схема регулятора давления топлива перед горелками котлов типа ПТВМ с естественной тягой

(рис. 14.3,*б*) регулятор воздействует на плунжер забрасывателя.

Если паровой котел работает с постоянной нагрузкой, но с частыми переходами с газа на мазут и обратно, целесообразно использовать схему «пар — воздух» (рис. 14.3,*в*). Особенностью схемы является наличие импульса от измерения расхода пара и давления воздуха с корректировкой исчезающим импульсом от ре-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

гулятора топлива. При этой схеме не требуется менять настройку регулятора при переходе с одного топлива на другое, но при работе котла с колебаниями производительности не всегда обеспечивается требуемый при этом избыток воздуха.

В паровых и комбинированных пароводогрейных котлах необходимо регулировать питание, т е. подачу воды в соответствии с количеством отдаваемого пара и размером непрерывной продувки, что осуществляется регулятором питания. Наиболее простым является одноимпульсный регулятор с датчиком от уровня воды в барабане (рис 14.4). Эта схема с упругой обратной связью УОС широко используется в котлах малой, иногда средней мощности, работающих с постоянными нагрузками.

В крупных котлах к импульсу по уровню воды в барабане котла добавляются импульсы от датчиков приборов, измеряющих расходы питательной воды и пара.

Для поддержания постоянства разрежения в топочной камере, что необходимо для безопасности обслуживающего персонала и предотвращения больших присосов воздуха в топку, используется одноимпульсный астатический регулятор, воздействующий на направляющий аппарат дымососа (рис. 14.5).

Для водогрейных котлов, работающих в базовом режиме, применяются САР, поддерживающие постоянную температуру воды на выходе из котла (рис 14 6). Регулятор по импульсу от датчика *1ТС* поддерживает заданную температуру воды за котлом, воздействуя на регулирующий орган на газопроводе или мазутопроводе, идущих к горелкам котла. При работе водогрейного котла в переменном режиме регулятор получает импульс от датчика *2ТС,* измеряющего температуру воды, поступающей в тепловые сети потребителя, как показано на рис. 14 6 пунктиром

Водогрейные котлы типа ПТВМ, не имеющие дымососов и работающие с естественной тягой, регулируются изменением числа включенных горелок, обычно вручную со щита управления котла.

Для поддержания приблизительного соответствия между расходом воздуха и топлива следует обеспечивать

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

постоянное давление топлива перед горелками (рис. 14.7). Однако и при этой схеме трудно обеспечить экономичность сжигания топлива, получаемую при регуляторе «топливо — воздух».

§ 14.3. Автоматика безопасности котлов

Автоматика безопасности предусматривает осуществление следующих процессов

а) контроль за правильным выполнением предпусковых операций: включение тяго-дутьевых устройств, заполнение котла водой и т. д.;

б) контроль за нормальным состоянием основных параметров (при пуске и работе котла);

в) дистанционный розжиг запальника со щита управления,

г) автоматическое прекращение подачи газа к запальникам после кратковременной совместной работы запальника и основной горелки (для проверки горения факела основных горелок);

д) автоматическое прекращение подачи топлива в аварийных режимах.

Прекращение подачи газообразного и жидкого топлива предусматривается при повышении давления пара в барабане котла, понижении давления воздуха (в смесительных горелках), повышении и понижении давления воздуха (в смесительных горелках), повышении и понижении давления газа, уменьшении разрежения в топке, повышении или понижении уровня воды в барабане, погасании факела в топке, при неисправности самой аппаратуры автоматики безопасности.

В котлах со слоевым сжиганием твердого топлива предусматривается отключение тяго-дутьевых устройств

Сигнализация котлоагрегата и вспомогательного оборудования предусматривается при прекращении подачи топлива, повышении давления пара и колебаниях уровня воды в барабане, повышении температуры воды за водогрейным котлом, колебаниях температуры мазута, давления газа, понижении давления питательной воды и для контроля состояния электродвигателей, управляемых со щита автоматизации.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Кроме автоматического управления паровых и водогрейных котлов при комплексной автоматизации котельных автоматизируются работа деаэраторов, аппаратов химической водоподготовки, редукционно-охладительных и редукционных установок, контролируется положение уровня в баках для жидкого топлива, бакахаккумуляторах; автоматически регулируются давление в общем напорном мазутопроводе и температура воды перед водоподготовкой, за теплообменниками для сетевой воды и воды для горячего водоснабжения.

В полностью автоматизированных установках с защитами и блокировками применяется телемеханизация, т. е. автоматический пуск, регулирование и остановка объекта, осуществляемые дистанционно с помощью приборов, аппаратов или других устройств без участия человека. При телемеханизации на центральный пункт управления, откуда контролируется работа находящихся на значительном расстоянии теплоснабжающих установок, выносятся главные приборы, по которым можно проверять работу основного оборудования, и ключи управления.

Автоматизация работы котельных агрегатов помимо повышения надежности и улучшения условий труда обеспечивает определенную экономию топлива. При автоматизации регулирования процесса горения и питания агрегата экономия топлива составляет около 1—2%, при регулировании работы вспомогательного котельного оборудования — 0,2—0,3% и при регулировании температуры перегрева — 0,4—0,6%. Однако общие затраты на автоматизацию не должны превышать 10% стоимости установки.

ГЛАВА 15. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Решение проблемы газоснабжения на современном этапе развития техники связано с внедрением счетно-решающих устройств, средств автоматики и телемеханики в городское хозяйство. Комплексное применение этих средств приводит к созданию АСУ процессами газораспределения и газопотребления, которые обеспечат оптимальные и эффективные производственные и технологические режимы в городском газоснабжении.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Для правильного решения задач, связанных с вопросами автоматического регулирования и управления городскими системами газоснабжения, необходимо учитывать особенности нестационарных процессов газопередачи в газораспределительной сети и, в первую очередь, в городских газопроводах высокого и среднего давления. С этой точки зрения особое значение приобретает методика аналитических расчетов и моделирования динамических характеристик городских газовых сетей.

Основная задача системы автоматического регулирования — поддержание требуемого давления газа во времени в различных точках городской газовой сети. Эта задача может быть успешно решена путем анализа неустановившегося движения газа в распределительных газопроводах. Известно, что нестационарные процессы передачи газа по газопроводам выражаются весьма сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Аналитическое решение в полной постановке возможно только с применением ЭВМ. Для приблизительных инженерных расчетов можно воспользоваться представлением газопровода в виде апериодического звена с запаздыванием.

Регулирование давления газа осуществляется на газораспределительных станциях (ГРС) и газорегуляторных пунктах (ГРП).

§ 15.1. Автоматизация ГРС (ГРП)

Газораспределительная станция состоит из следующих узлов: входных газопроводов, пылеуловительных установок, установок редуцирования газа первой и второй степени, одоризационных устройств, емкостей для сбора конденсата, выходных газопроводов, устройств управления и защиты.

Редуцирование газа осуществляется с помощью систем пневмоавтоматики по одной из четырех схем (рис. 15.1). Первая схема предусматривает двухступенчатое редуцирование с помощью двух регуляторов, во второй схеме используется один регулятор с двумя исполнительными механизмами, в третьей в качестве второй ступени редуцирования применяют дроссель постоянного сечения, в четвертой схеме предусмотрены

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

два дросселя на дневной и ночной режимы работы; переключение дросселей осуществляется дистанционно из диспетчерского пункта.

Закон регулирования регулятора давления газа выбирают с учетом динамических свойств газовой сети, характера режима газопотребления (возмущающее воздействие на САР давления газа) и допустимой статической ошибки регулирования. Применяют П или ПИ-регуляторы На ГРС устанавливают, как правило, ПИ-регуляторы, так как режим газопотребления резко переменный. На ГРП, который обслуживает ограниченное число потребителей с заранее известной газовой нагрузкой, устанавливают П-регуляторы (рис. 15.2).

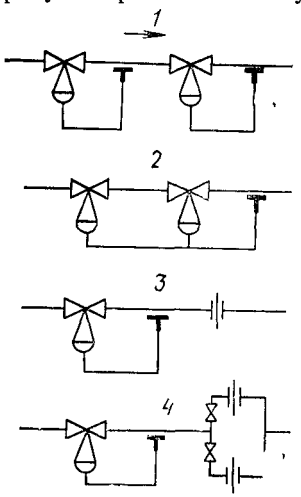


Рис. 15 1. Схемы редуцирования газа

Если режим газопотребления носит особо резкопеременный характер, целесообразно применять двухимпульсные регуляторы давления газа (рис. 15.3), которые реагируют сначала на изменение расхода газа, а затем на изменение давления, что улучшает качество процесса регулирования.

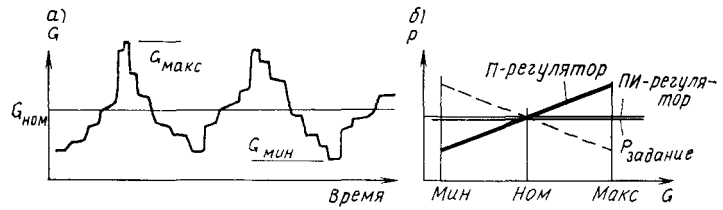


Рис. 15.2. Режим газопотребления (*а*) и статические характеристики САР с П и ПИ-регуляторами давления газа (*б*)

Изменение заданий (установок) регуляторам или переключение дросселей осуществляется вручную, дистанционно оператором или автоматически по заданной программе или с применением ЭВМ.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

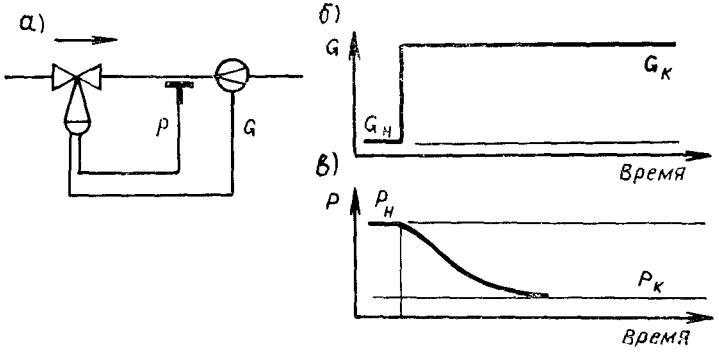


Рис. 15.3. Двухимпульсное регулирование давления газа
а — схема двухимпульсного регулятора, *б* и *в* — возмущение по расходу и давлению газа

Схемой автоматизации ГРС или ГРП кроме регулирования давления газа предусматриваются:

1) контроль давления газа до и после узлов редуцирования, температуры и расхода газа;

2) сигнализация падения давления газа;

3) автоматическая защита (применяются предохранительные клапаны и автоматические отсекатели);

4) дистанционное переключение или отключение узлов редуцирования.

Для контроля и управления работой ГРС (ГРП) применяют системы телемеханики (например «Ритм-1», «Защита-2» и др.).

Упрощенная функциональная схема автоматизации ГРС представлена на рис. 15 4.

§ 15.2. Автоматизация газоиспользующих установок

К газоиспользующим установкам относятся промышленные газовые печи и сушильные установки, котлоагрегаты (паровые и водогрейные), промышленные газовые воздухонагреватели (газовые калориферы), газовое оборудование жилых и гражданских зданий.

Автоматизация газоиспользующих установок предусматривает:

1) местное (дистанционное) управление;

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

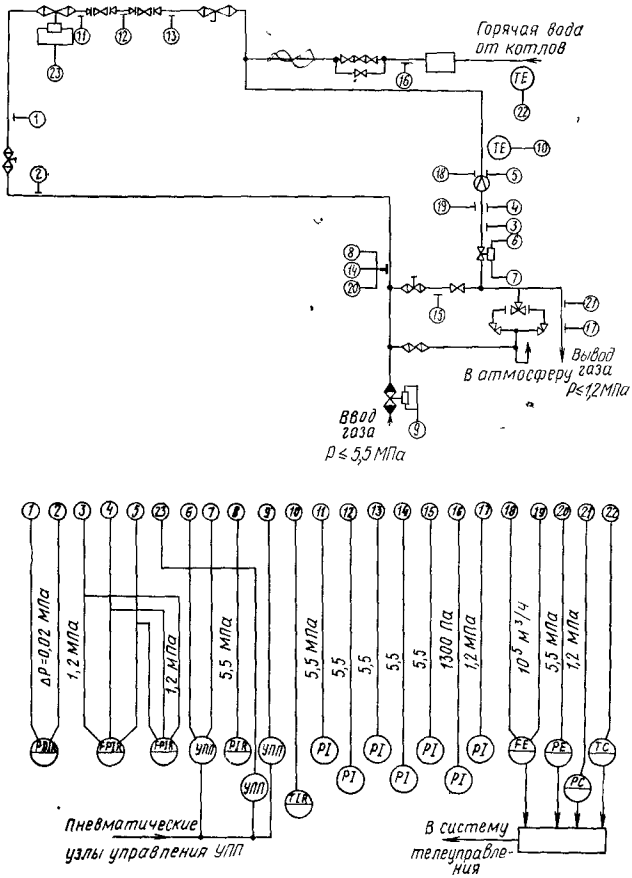


Рис. 15.4. Фуикциональиая схема автоматизации ГРС

2) автоматический розжиг горелок;
3) регулирование давления и расхода газа;
4) автоматический контроль и защиту.

Вопросы автоматизации газоиспользующих установок рассмотрим на примере промышленной газовой печи (рис. 15.5). Пространство печи разделено на *n* зон. Температурный режим каждой зоны стабилизируется соответствующим регулятором температуры *1*, датчик *2* которого устанавливают в рабочей части зоны.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

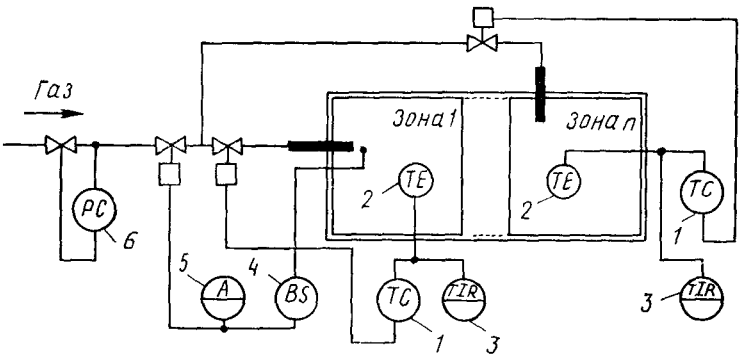


Рис. 15.5. Функциональная схема автоматизации промышленной газовой печи

Автоматический контроль (и регистрация) температуры зоны осуществляется вторичными приборами *3*. Схемой предусматривается автоматическая защита. При отрыве пламени или погасании факела любой горелки срабатывают автомат защиты *4* и система аварийной сигнализации *5*.

Давление газа перед горелками регулируется регулятором *6*. Обычно применяются П-регуляторы прямого действия.

ГЛАВА 16. ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

§ 16.1. Задачи диспетчерского управления

Диспетчеризация автоматизированных систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата предусматривает:

1) централизованное оперативное управление работой отдельных систем;

2) централизованный контроль основных параметров, характеризующих работу систем в целом;

3) централизованную сигнализацию работы систем как в нормальных режимах, так и в предаварийных и аварийных ситуациях.

Диспетчеризация должна обеспечивать:

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

а) повышение оперативности контроля и управления;

б) полное или частичное сокращение дежурного персонала у оборудования и местных щитов автоматизации;

в) экономию всех видов энергии;

г) оперативное устранение неисправностей и ликвидацию аварий.

Целесообразность диспетчеризации определяется технико-экономическими соображениями. Следует иметь в виду, что завышение объема диспетчеризации приводит к дополнительным затратам и усложняет эксплуатацию систем.

Диспетчеризация систем ТГС и СКМ осуществляется с применением телемеханики по одно-, двух- и трехступенчатой схеме В последнем случае имеются один центральный и несколько местных диспетчерских пунктов.

На пультах управления объем диспетчерского контроля должен предусматривать замер основных регулируемых параметров Диспетчерский контроль осуществляется, как правило, по вызову Установку регистрирующих контрольно-измерительных приборов на диспетчерском пункте следует предельно ограничивать; автоматические регуляторы выносить на диспетчерский пункт не рекомендуется. На пункт диспетчера рекомендуется выносить один общий сигнал о включении той или иной установки (например, кондиционера, холодильной машины) и сигнал аварийной ситуации.

Пункты управления оснащаются щитовыми устройствами — щитами и пультами управления

§ 16.2. Щиты и пульты управления

Щитовые устройства представляют собой комплексные конструкции из металлических каркасов и плоскостей с установленными на них измерительными приборами и средствами автоматизации, сигнальными устройствами, средствами управления и мнемоническими схемами. Основное назначение щитов автоматизации – централизация средств контроля и управления агрегатом, технологической установкой или целым комплек-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

сом установок. Одновременно они являются несущей конструкцией для установки приборов и средств автоматизации, подводящих электрических проводов и кабелей, трубных проводок, вспомогательной аппаратуры.

По назначению щиты делятся на оперативные (основные) и вспомогательные. Оперативные щиты служат для непосредственного контроля и управления технологическими процессами. На них монтируют приборы, необходимые оператору для выполнения этих функций. Вспомогательные щиты предназначены для общего контроля и наблюдения за работой агрегатов и установок, для регистрации (записи) отдельных параметров в целях учета и последующего анализа этой работы, а также для дублирования в необходимых случаях оперативного контроля, защиты и управления По объему обслуживаемого оборудования щиты делятся на местные, агрегатные (индивидуальные и групповые), блочные и центральные (диспетчерские).

На местном щите устанавливают аппаратуру контроля и управления, необходимую для оператора, находящегося около технологического оборудования. Агрегатный щит предназначен для установки аппаратуры контроля и управления одним агрегатом или группой однотипных агрегатов, расположенных в одном помещении. Блочный щит предназначен для обслуживания взаимосвязанных технологических агрегатов, сблокированных в единую комплексную установку Центральный щит обеспечивает контроль и управление технологическим процессом в целом.

Выбор щитов определяется принятой системой управления.

Измерительные приборы, автоматические регуляторы, аппаратуру управления и сигнализации, вспомогательные устройства устанавливают на щитах и пультах.

По конструктивному оформлению щиты делят на шкафные и панельные (полногабаритные и малогабаритные), пульты — на приставные и отдельно стоящие.

Стандарт предусматривает ряд вспомогательных элементов, позволяющих собирать составные многосекционные щиты и пульты разной конфигурации. К таким

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

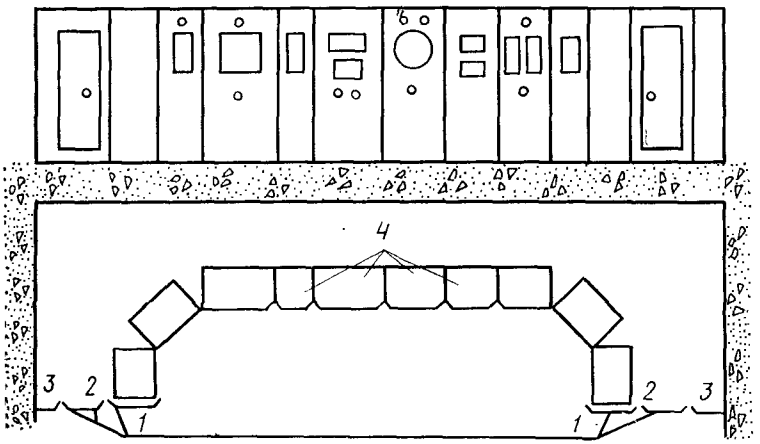


Рис. 16.1. Пример построения многопанельного каркасного щита
1 — торцевая панель; 2 — панель с дверью; 3 — вспомогательная панель; 4 — щиты управления

элементам относятся панели с дверьми, угловые вставки к панельным и шкафным щитам и пультам.

Основная высота щитов 2200 мм. Щиты высотой 2400 и 2000 мм применяют только в особых случаях, например, когда приходится сочетать щиты системы автоматизации со щитами, изготовленными не по ГОСТу, или при установке щитов в помещениях пониженной высоты.

Длина щита определяется числом и размещением стандартных секций шириной 1200, 1000, 800 или 600 мм. Глубина шкафного щита зависит от глубины примененных стандартных секций и выбирается из того же ряда величин. Глубина панельного щита определяется взаимным расположением панелей.

Шкафный щит представляет собой сборную конструкцию каркасного типа, изготовленную из унифицированных деталей. Основными элементами шкафного щита являются: каркас, придающий щиту жесткость; плоская передняя панель, являющаяся несущей конструкцией для установки приборов и аппаратуры; рама с дверьми, сварное основание, а также боковые и задняя стенки щита.

Стандартные секции шкафных щитов можно исполь-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

зовать самостоятельно или объединять, образуя коридоры.

Панельный щит с каркасом представляет собой каркасную конструкцию, состоящую только из передней плосконесущей панели, рамы и стяжек. Плоский панельный щит — это плоская универсальная несущая панель, которую крепят к индивидуально изготовленному несущему каркасу.

Многопанельные щитовые конструкции собирают путем объединения основных и вспомогательных панелей (рис. 16.1).

Для монтажа отдельных приборов применяют шкафные малогабаритные щиты — конструкции сварного типа с передней дверью. Дверь щита рассчитана на установку в ней аппаратуры. Шкафные малогабаритные щиты можно устанавливать на подставке или крепить к стене. Малогабаритные панельные щиты представляют собой навесную плоскую панель.

Пульты используют для организации рабочих мест диспетчерского персонала или операторов технологических процессов.

Щиты и пульты систем автоматизации располагают в специальных щитовых помещениях, предназначенных для диспетчерского или оперативного пунктов управления, в производственных помещениях и около технологических установок снаружи здания. Панельные щиты (открытые) предназначены для установки в щитовых помещениях, куда имеет доступ только персонал, обслуживающий систему автоматизации.

Щиты шкафные (защищенные) можно устанавливать непосредственно в производственных помещениях. Около наружных установок размещают щиты специальных конструкций, например обогреваемые, которые приспособлены для эксплуатации в соответствующих условиях.

Исполнение щитов, пультов и устанавливаемых в них приборов должно соответствовать условиям окружающей среды. Защищенные щиты можно устанавливать в нормальных (сухих) помещениях и в помещениях с незначительно повышенной влажностью. В цехах сырых, жарких, пыльных, с химически активной средой

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

можно применять щиты защищенного исполнения с уплотнением. Однако в таких случаях аппаратуру лучше устанавливать в специально выделенных щитовых помещениях.

При выборе места установки щита в производственном помещении необходимо учитывать условия работы оператора у автоматизированного агрегата. При расположении щита управления около технологической установки контроль за работой ведется не только по показаниям приборов, но и путем визуального наблюдения за ней. Поэтому щит управления необходимо размещать таким образом, чтобы оператору было удобно вести наблюдение за приборами. В то же время щит управления не должен быть расположен в зоне непосредственного обслуживания технологического процесса, там, где выполняются загрузка или разгрузка агрегата, ремонтные и монтажные работы, так как это может мешать обслуживанию. В таких местах наиболее вероятно повреждение щита приборов управления.

Около щита необходимо создать зону обслуживания и свободные проходы. Ширина зоны определяется требованиями техники безопасности. Ширина проходов для обслуживания щитов, установленных в производственных помещениях, 800 мм.

Щитовые помещения могут быть выделены или в свободной части производственных цехов (застекленные операторские), или в изолированных комнатах производственных зданий, пристройках и т. п. Место размещения пункта управления выбирают с учетом особенностей технологического процесса, норм и противопожарных требований, удобства управления автоматизированным объектом, простоты обслуживания системы. Между пунктом управления и производственным помещением необходимо обеспечить удобное сообщение.

Щитовые помещения не должны подвергаться вибрации, производственному шуму и воздействию магнитных полей. Вибрации, магнитные поля, создаваемые оборудованием и электротехническими установками, могут вызывать дополнительную погрешность приборов. Через щитовые помещения не рекомендуется прокладывать трубопроводы отопления, вентиляции и трубо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

проводы вредных жидкостей и газов; паропроводы и газопроводы прокладывать запрещается.

В щитовых помещениях делают неэлектропроводные полы и предусматривают воздушное отопление. В помещениях пунктов управления должны быть обеспечены достаточная освещенность, температура воздуха в пределах 20±4°С, влажность 60±10%, избыточное давление 2—3 мм вод ст. (20—30 Па). Содержание пыли в воздухе не должно превышать 2 мг/м^3.

§ 16.3. Расположение аппаратуры на щитах и пультах

Аппаратура, размещаемая на щитовых конструкциях пункта управления, определяется функциональной схемой автоматизации.

На фасадной стороне щитов размещают показывающие, самопишущие и регулирующие приборы, переключатели, аппаратуру световой сигнализации и управления. При установке пультов на них выносят ключи и кнопки оперативного управления, сигнальную аппаратуру и некоторые измерительные приборы. Обычно для размещения приборов применяют пульты с приборной приставкой.

Компоновку приборов и аппаратуры на щите выполняют с учетом следующих правил:

1) приборы располагают таким образом, чтобы каждая панель или группа панелей отображали определенный участок технологического процесса и относились к одному агрегату;

2) приборы можно концентрировать по функциональному признаку (панель измерительных приборов, регуляторов и т. п.);

3) можно объединять приборы, контролирующие определенный технологический параметр как одного агрегата, так и ряда агрегатов технологического процесса (панель расходомеров, газоанализаторов).

Соблюдение указанных правил позволяет оператору, анализируя ход технологического процесса, как бы двигаться вдоль цепи аппаратов, останавливая внимание на информационных моделях определенных агрегатов.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При компоновке приборов на панелях необходимо также учитывать их функции:

1) приборы, контролирующие наиболее важные, ответственные параметры процесса, располагают в зоне «эффективного вида» оператора;

2) приборы, используемые наиболее часто, также необходимо сконцентрировать в зоне «эффективного вида»;

3) приборы, контролирующие работу одного объекта, рекомендуется объединять на щите в компактную группу, зрительно четко выделяемую на фоне общего приборного комплекса;

4) размещение аппаратуры должно соответствовать зрительному маршруту снятия показаний с приборов, принятому согласно алгоритму контроля; при этом приборы размещают слева направо и сверху вниз

При установке приборов и аппаратуры управления на фасадных сторонах щитов (рис. 16.2) высоту их размещения от уровня пола принимают по табл. 16.1

ТАБЛИЦА 16.1. ВЫСОТА РАЗМЕЩЕНИЯ АППАРАТУРЫ НА ЩИТАХ (БЕЗ ПУЛЬТОВ)

Средства автоматизации	Высота, мм
Сигнальная аппаратура дальнего обзора	2000—2100
Показывающие приборы, не требующие постоянного обслуживания	1500—2000
Самопишущие приборы оперативного контроля, регулирующие приборы, требующие постоянного обслуживания	1100—1600
Индикаторы, указатели положения, сигнальная аппаратура ближнего обзора	850—1200
Аппаратура управления (переключатели, ключи кнопки, панели управления)	600—1100

Внутри шкафных щитов и за панельными щитами размещают неоперативную аппаратуру систем контроля и регулирования, а также вспомогательные устройства: сигнализаторы, командные аппараты, фильтры и редукторы, трансформаторы, источники и стабилизаторы питания, автоматическеие выключатели, предохранители, реле и др

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Приборы, схемы питания сжатым воздухом и электроэнергией и вспомогательную аппаратуру размещают на боковых и задних стенках шкафных щитов. При размещении вспомогательной аппаратуры внутри шкафного коридорного щита целесообразно на стенках каждой секции собрать всю аппаратуру, обеспечивающую системы контроля и управления, находящиеся на передних панелях соответствующих секций. Такое размещение существенно упростит построение монтажно-коммутационных схем и уменьшит число монтажных связей между секциями.

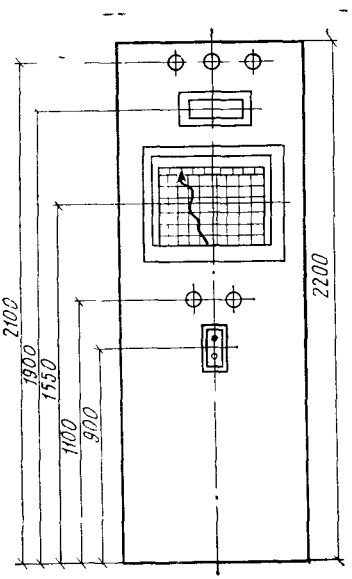


Рис. 16.2. Пример размещения приборов и аппаратуры на фасаде щита

Вспомогательную аппаратуру в панельных щитах размещают на стене или на специальных панелях, установленных за панелями фасада щита. В этом случае аппаратуру защиты и управления, схемы питания располагают на отдельных панелях, группируя по назначению и величине напряжения.

Глубину щита выбирают таким образом, чтобы обеспечить удобство и безопасность обслуживания в процессе эксплуатации расположенных в щитах систем автоматизации. Проходы обслуживания щитов и пультов при длине щитов более 7 м должны иметь два выхода.

§ 16.4. Построение мнемонических схем системы управления

Мнемоническая схема (мнемосхема) — условное графическое отображение технологических процессов, поточно-транспортных линий, энергетических и других систем. Она выполняется на щите или пульте управления

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

как комплекс символов, изображающих элементы технологических агрегатов с их взаимными связями.

Наглядно отображая структуру управляемого процесса, мнемосхема облегчает оператору запоминание схем объектов, взаимозависимость между ними. Мнемоническая схема, совмещенная с лампами и табло системы сигнализации, органами управления, малогабаритными измерительными приборами, образует информационную модель конкретной системы ТГС и СКМ. Мнемосхемы целесообразно использовать в тех случаях, когда управляемые объекты имеют сложные схемы с большим числом контролируемых параметров.

Мнемосхемы в зависимости от назначения делятся на *операторские и диспетчерские,* отличающиеся степенью подробности отображения отдельных управляемых объектов, что обусловлено разным характером оперативных единиц, с которыми приходится иметь дело оператору и диспетчеру.

По конструктивным признакам символов, изображающих технологическое оборудование, мнемосхемы делятся на *мимические (несветящиеся), световые и полусветовые.* Мимическая схема выполняется символами в в виде цветных накладных пластин соответствующей формы, изображающих оборудование и связи между ними. Рядом с изображением элементов оборудования располагают сигнальные лампы.

Световая мнемосхема выполняется высвечиваемыми символами различных цветов. Обычно такие символы представляют собой матовые или цветные панели, освещенные изнутри. В полусветовых схемах освещаются только отдельные символы агрегатов и узловые точки технологических потоков. Лампы освещения являются элементами системы сигнализации.

Условные обозначения на мнемосхеме располагаются в соответствии с последовательностью технологических операций или имитируют действительное расположение оборудования. При создании мнемосхем технологических комплексов агрегаты следует располагать в последовательности, соответствующей стадиям управляемого процесса.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

При компоновке мнемосхем учитывают последовательность стадии в решении оператором задач управления, оценку изменений в системе сигнализации схемы, принятие решения, выбор органов управления и контроль за выполнением принятого решения. В мнемосхему включаются лишь те элементы, которые играют существенную роль в управлении, т. е. на мнемосхеме не должно быть избыточной информации.

Элементы, наиболее существенные для оператора, могут выделяться размером, цветом и светом. Соединительные линии на мнемосхеме делают прямыми и сплошными. При этом надо стремиться, чтобы они были как можно короче и имели наименьшее число изломов и пересечений. На линиях обязательно указывают стрелками направления потоков.

С появлением электронных устройств отображения для воспроизведения необходимого набора мнемосхем используют электронно-лучевые трубки. Это весьма удобно, так как в зависимости от конкретной ситуации может быть воспроизведена вся схема или ее определенный участок.

РАЗДЕЛ V. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

ГЛАВА 17. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

§ 17.1. Обобщенная структура управляющих функций АСУ ТП

Наиболее полные в функциональном отношении комплексы технических средств используются в автоматизированных системах управления технологическими про-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

цессами (АСУ ТП). Эти сложные системы предназначены для реализации экономически целесообразных алгоритмов управления технологическим процессом и обеспечивают возможность активного участия в управлении человека-оператора.

АСУ технологическим процессом имеет единую конечную цель — обеспечение максимальной экономической эффективности процесса (например, при производстве запланированного количества продукции обеспечение минимизации приведенных затрат).

Для достижения этой цели на технологическом объекте предусматривается (рис. 17.1) ряд управляющих или регулирующих входов-воздействий μ. Значения этих входов могут варьироваться в известных пределах, и задача АСУ состоит в том, чтобы исходя из поставленной конечной цели устранять неопределенности состояний μ. Другими словами, устройства АСУ должны для каждого текущего момента времени определять оптимальные значения входов $\mu^{\text{опт}}(t)$, обеспечивающие достижение максимума эффективности процесса $Э$. Для этого в системе управления осуществляются преобразования априорной и текущей информации о состояниях объекта и технологического процесса.

Наилучший вариант решения такой задачи предполагает использование многоуровневой (иерархической) структуры преобразования информации в системе управления.

Для реализации программ на низшем уровне иерархии АСУ ТП используется логическое управление (ЛУ) (рис. 17.2). При наличии рассогласования реального поведения параметра y_i с предписанным ему программой оптимальным происходит лишь дискретное изменение состояний ряда воздействий μ. При этом каждое воздействие непосредственно управляется устройством, реализующим логическую операцию «ИЛИ», и поэтому может находиться только в одном из двух возможных состояний.

Взаимосвязь между множеством различных воздействий с одним или несколькими параметрами y_i, а также условные взаимосвязи приводят к необходимости построения сложных систем логического управления. Однако все они строятся на базе комбинаций простейших логических функций («ИЛИ», «И», «НЕ», и т. п.).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Таким образом, обобщенная структура управления включает функции (см. рис. 18.2) автоматического регулирования и логического управления на низшем и оптимизации управляющих программ и алгоритмов на высшем уровнях иерархии. Такие функции АСУ ТП принято называть **управляющими.**

Наряду с этим в составе управляющих функций часто упоминают и такие, как технологические защиты, дискретное управление, резервирование. В рамках принятых определений эти функции носят частный характер и входят в состав логического управления. Так, защита фактически реализует логические операции по локализации нарушения режимов технологического объекта управления и блокировке развития возникающих при этом аварийных ситуаций.

Дискретное управление задвижками и ключами при включении резервных устройств для восстановления утраченных функций также осуществляется с помощью логических операций.

Автоматическое регулирование производится по известным типовым алгоритмам, и реализация этой функции АСУ ТП обычно не вызывает затруднений принципиального характера. Функции логического управления и оптимизации, напротив, в общем случае имеют нетиповой характер. Для их автоматизации требуется большой объем априорных формализованных сведений о протекающих процессах и их взаимосвязях и соотношениях с экономической эффективностью. Если все эти процессы и взаимосвязи изучены слабо, то записать сколько-нибудь обоснованные алгоритмы логического управления и соответственно автоматизировать их выполнение не представляется возможным.

Тогда эти управляющие функции выполняет человек-оператор. Кроме того, он же выполняет ряд функций, автоматизация которых просто нецелесообразна по экономическим соображениям, как, например, автоматизация редко используемых функций переключения вспомогательных исполнительных устройств в процессах подготовки к операциям пуска — останова оборудования. При этом работу оператора в АСУ обеспечивает подсистема оперативно-диспетчерского управления (ОДУ). В рамках этой подсистемы оператор не только восполняет отсут-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ствие ряда автоматических функций по управлению технологическим процессом, но, кроме того, осуществляет контроль работы и диагностику состояний автоматических средств, а также обеспечивает резервирование выполняемых ими функций при отказах.

Таким образом, реализация иерархической структуры управления (см. рис. 17.1) частично возлагается на оператора, выполняющего часть функций автоматического регулирования, логического управления и осуществляющего некоторые программы оптимизации. Кроме того, опытный оператор может справляться и с такими сложными для автоматических систем задачами, как диагностика или распознавание предаварийных ситуаций, выявление предполагаемых причин аварий и принятие решений в определенных ситуациях.

Однако человек плохо справляется с большими потоками разнородной информации, поэтому предварительная обработка, упорядочение, выделение существенной для управления части информации входят также в функции АСУ. Эти функции АСУ принято называть **информационными.**

К информационным функциям АСУ ТП можно отнести:

1) систематический автоматизированный контроль параметров объекта и сигнализацию отклонений y от заданных значений u;

2) вычисление комплексных (в том числе технико-экономических и экономических) показателей функционирования объекта;

3) диагностирование состояний технологического оборудования и средств АСУ;

4) вывод данных на устройства отображения информации;

5) запоминание, хранение и вывод на регистрацию информации, полезной для корректировки будущих действий оператора, а также отчетной информации.

Для реализации структуры (см. рис. 17.2) следует построить ряд управляющих контуров. В каждом управляющем контуре низшего уровня АСУ ТП можно выделить (рис. 17.3):

а) средства получения информации (для получения текущей информации о параметрах y в виде сигнала, из-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

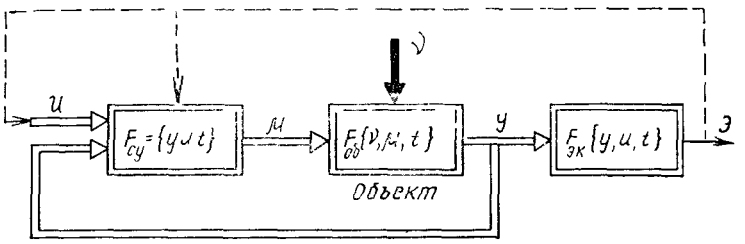


Рис. 17.1. Обобщенная математическая структура системы управления
y — выходные параметры объекта управления, μ — регулирующие или управляющие воздействия, u — возмущающие воздействия, ν — программы заданного (желаемого) состояния объекта

менения которого отображают реальные изменения параметров объекта с достаточной точностью);

б) средства преобразования информации (для преобразования текущей и априорной информации в управляющие сигналы-команды в соответствии с заданным оператором);

в) исполнительные устройства (для преобразования управляющих сигналов-команд в достаточно мощные энергетические воздействия μ, т. е. для исполнения команд).

Для построения высших уровней АСУ необходима реализация более сложных управляющих контуров. Так как выходные сигналы высших уровней АСУ носят чисто информационный характер, то исполнительные устройства здесь, как пра-

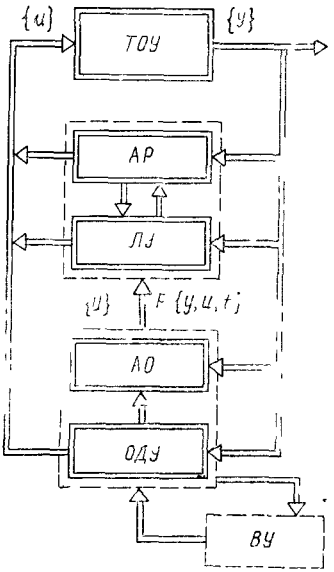


Рис. 17.2. Структура управляющих функций АСУ ТП
ТОУ — технологический объект управления, АР — автоматическое регулирование ЛУ — логическое управление, АО — автоматическая оптимизация, ОДУ — оперативно-диспетчерское управление, ВУ — высшие уровни АСУ

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вило, отсутствуют. Для реализации высших уровней АСУ необходимы средства преобразования информации, а также средства хранения информации, что обусловлено спецификой работы высших уровней иерархии АСУ, гребующей накопления и осреднения информации для выбора оптимальных программ и алгоритмов управления низшего уровня.

Наконец, как для высших, так и для низших уровней АСУ необходимы средства передачи информации или средства связи. На низшем уровне АСУ ТП можно ограничиться пассивными кабельными линиями связи с передачей сигналов без каких-либо промежуточных преобразований. В таком случае каждый сигнал должен иметь свой отдельный канал связи, но при этом стоимость системы кабельных соединений даже для низшего уровня АСУ получается довольно значительной. В связи с этим на высших уровнях АСУ используются более сложные системы связи с применением средств телемеханики и вычислительной техники для упорядочения, редуцирования, сжатия и скоростной передачи больших потоков информации по минимальному числу каналов связи.

Перечисленные типы средств обеспечивают реализацию автоматической части АСУ ТП. Аналогичные средства необходимы и для построения подсистем оперативно-диспетчерского управления.

Для включения в управляющий контур АСУ человека-оператора требуются средства отображения информации (показывающие приборы, индикаторы, табло, мнемосхемы, дисплеи и т. п.), а также средства ввода информации (ключи, кнопки, клавиши и т. п.).

Средства получения информации, средства преобразования и хранения информации и исполнительные устройства существенно различаются как по назначению и принципам действия, так и по уровням используемых энергетических потенциалов, условиям эксплуатации и другим предъявляемым требованиям. Поэтому средства получения информации будем выделять в измерительную часть АСУ, средства преобразования, хранения и отображения — в информационно-управляющую часть АСУ (с дополнительным выделением в рамках этой части информационной и управляющей подсистем). Соответ-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

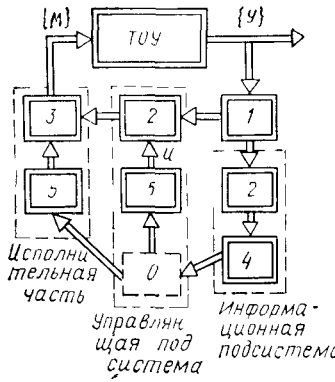


Рис. 17.3. Обобщенная структура технических средств АСУ ТП
1 — средства получения информации, *2* — средства преобразования информации, *3* — исполнительные устройства *4* — средства отображения информации, *5* — средства ввода информации **О** — оператор

ственно исполнительные устройства отнесем к исполнительной части АСУ.

§ 17.2. Характеристика средств измерительной, исполнительной и информационно-управляющей части АСУ ТП

Входящие в состав **измерительной части** АСУ ТП первичные измерительные преобразователи (в частности, датчики) предназначены для выдачи сигнала — носителя информации пропорционально изменениям выходных параметров объекта. При этом оптимальным алгоритмом преобразования информации или основным уровнем измерения обычно является линейная функция.

Основное требование к средствам измерительной части АСУ ТП — обеспечение необходимой точности измерений. Невыполнение этого требования рассматривается как фактический отказ средств.

Выходной сигнал первичных преобразователей в подавляющем большинстве случаев является аналоговым. При этом тип энергии носителя сигнала, как правило, тот же, что и в информационно-управляющей и исполнительной частях АСУ ТП (в связи с этим не требуется вводить вторичные измерительные преобразователи для согласования различных типов сигналов).

Первичные измерительные преобразователи располагают обычно вблизи точек измерения параметров, т. е. рассредоточены по контрольному объекту и часто рабо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

тают в неблагоприятных условиях при высокой температуре, влажности, уровне вибрации и т. п.

В состав **исполнительной части** АСУ ТП входят устройства, влияющие на ход физических процессов в объекте управления (путем воздействия на запорные и регулирующие органы — клапаны, шиберы, задвижки, вентили и т. п.). К ним относятся исполнительные механизмы (т. е. устройства для привода запорной и регулирующей арматуры) и усилители мощности сигнала-команд, поступающих из информационно-управляющей части АСУ.

По типу энергии, используемой для привода, исполнительные механизмы можно разделить на электрические, пневматические и гидравлические.

Усилители мощности исполнительных устройств управляют подводом энергии к приводу исполнительного механизма в соответствии с управляющими сигналами-командами. Усилители мощности также бывают электрическими, пневматическими и гидравлическими. Могут быть и комбинированные усилители (например, электрогидравлический для управления гидравлическим приводом при электрических управляющих сигналах). Электрические усилители мощности предназначены для включения и отключения двигателя исполнительного механизма в соответствии с поступающими командами. В таком случае эти усилители называются пусковыми устройствами.

Основное требование к исполнительной части АСУ ТП — надежность исполнения управляющих сигналов-команд. Для выполнения этого требования исполнительные механизмы и усилители должны прежде всего развивать достаточную мощность. Второе условие надежного исполнения команд — безотказность самих исполнительных устройств и прежде всего исполнительных механизмов, расположенных вблизи запорно-регулирующих органов и поэтому часто работающих в тяжелых условиях.

Средства **информационно-управляющей части** для низшего уровня АСУ ТП могут быть электрическими, пневматическими и гидравлическими, аналоговыми и дискретно-цифровыми (последние в основном электрические). На высших уровнях АСУ применяются глав-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ным образом электрические средства вычислительной техники.

Основное требование к информационно-управляющей части АСУ — реализация заданных алгоритмов преобразования информации в управляющей подсистеме АСУ ТП таким образом, чтобы обеспечить выполнение заданной программы для всего управляющего контура в целом. Таким образом, алгоритмы преобразования информации в управляющей части зависят не только от свойств и особенностей объекта управления, но и от реальных свойств и особенностей измерительных преобразователей и исполнительных устройств.

Устройства информационно-управляющей части АСУ ТП обычно сосредоточены на некотором удалении от технологического объекта в помещениях с условиями, близкими к нормальным условиям эксплуатации.

§ 17.3. Области применения ветвей средств для автоматизации процессов в системах теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата

Электрическая энергия является наиболее доступным и удобным видом энергии для выполнения механических работ, поэтому *электрические исполнительные устройства* наиболее широко применяются в схемах управления технологическими процессами. Однако электрический привод имеет и существенные недостатки, что резко ограничивает или исключает его применение на ряде производств. Надежность работы электродвигателя заметно снижается в условиях горячих цехов или цехов с повышенной влажностью, а также при высоком уровне вибрации. На базе электродвигателя трудно построить компактный исполнительный механизм большой мощности. И, наконец, дешевые электродвигатели общепромышленного назначения нельзя применять на взрыво- и пожароопасных участках производств.

Информационно-управляющая часть АСУ ТП с электрическими исполнительными устройствами обычно основана на базе электрической ветви средств автоматизации, которые по сравнению со средствами пневмати-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ческой и гидравлической ветвей обладают следующими преимуществами:

1) относительная простота конструкции и низкая стоимость изготовления средств преобразования информации (в условиях высокоразвитой электротехнической промышленности);

2) удобство монтажа, наладки и эксплуатации (простота ремонтов, высокая надежность пассивных линий связи, тривиальность соединений при коммутации схем, простота подключения измерительных устройств при контроле исправности);

3) отсутствие ограничений в пространственном расположении устройств, причем информационно-управляющая часть АСУ может быть удалена от объекта на значительные расстояния;

4) высокая скорость передачи и преобразования информации.

Исполнительная часть АСУ ТП в пожаро- и взрывоопасных цехах химических производств, как и на ряде других производств, строится на базе пневматических исполнительных механизмов. *Пневматические мембранные исполнительные механизмы* являются простейшими устройствами, применяемыми для привода запорных и регулирующих органов, что определяет высокую надежность и относительно невысокую стоимость пневматической исполнительной части АСУ ТП. Пневматические исполнительные механизмы могут надежно работать в цехах с повышенной влажностью, а также в химических цехах. Находят применение и пневматические поршневые исполнительные механизмы.

Информационно-управляющая часть АСУ ТП с пневматическими исполнительными устройствами основана обычно на пневматических средствах, но только на низшем уровне иерархии, т. е. в пределах функций автоматического регулирования и логического управления. Высшие уровни иерархии АСУ строятся, как правило, на электрических средствах.

Современные пневматические средства преобразования информации отличаются высокой пожаро- и взрывобезопасностью и имеют высокую степень надежности, но только при надежной и качественной работе источни-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ков питания, так как носитель информации — сжатый воздух — должен быть сухим и чистым.

Недостатками пневматических средств являются сложность оперативных измерений давления воздуха при проверке работоспособности, необходимость применения специальных компрессорных установок питания с устройствами для высококачественной очистки воздуха, относительно малая скорость передачи и преобразования информации (ограничиваемая скоростью звука), которая не имеет особого значения для АСУ ТП низших уровней, так как лишь ограничивает длину пассивных линий связи (не более 300 м). Для обработки больших потоков информации на высших уровнях АСУ целесообразно применять более быстродействующие электрические средства вычислительной техники.

Гидравлические исполнительные механизмы позволяют с большой скоростью и усилием надежно и просто реализовать преобразование управляющих сигналов-команд в перемещение регулирующих органов, они надежно работают в неблагоприятных условиях (при высокой влажности, повышенных температурах, вибрациях и т. п.). Поэтому для привода регулирующих клапанов на ТЭЦ и районных котельных применяются исключительно гидравлические исполнительные механизмы.

Однако для гидравлических систем требуются более тщательная герметизация линий связи и специальные емкости для хранения рабочей среды (воды либо специальных негорючих масел). Гидравлические исполнительные механизмы не рекомендуется использовать там, где могут нормально работать обычные электрические или пневматические исполнительные механизмы. Гидравлические средства регулирования применяют лишь для реализации простейших функций автоматического регулирования и защиты и только в тех контурах управления, где используются гидравлические исполнительные механизмы.

§ 17.4. Основные принципы построения информационно-управляющей части АСУ ТП

Информационно-управляющая часть АСУ ТП может быть выполнена как на аналоговых средствах, так и на дискретно-цифровых средствах вычислительной техники.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

В первом случае каждый канал передачи информации имеет свой индивидуальный набор средств, а техническая структура АСУ ТП строится по принципу локальных (т. е. отдельных, конструктивно независимых) схем управления. При этом может быть очень значительным общее число устройств автоматизации в АСУ ТП сложных производств. Во втором случае все операции по преобразованию информации могут выполняться одной или несколькими цифровыми ЭВМ (с поочередным обслуживанием различных каналов преобразования и передачи информации), и техническая структура АСУ ТП строится по принципу централизации схем управления.

К моменту появления программируемых средств вычислительной техники структура низшего уровня АСУ ТП основывалась на аналоговых средствах и строилась соответственно по принципу локальных схем. При этом функции высших уровней АСУ выполнял человек-оператор, и, таким образом, эти функции были реализованы по необходимости централизованно.

При серийном производстве специализированных информационно-управляющих ЭВМ в принципе можно отказаться от локальных схем. Однако переход к столь крайним формам централизации нецелесообразен, так как резко снижается живучесть автоматизированного технологического комплекса в целом. Ведь отказ ЭВМ в таком случае равносилен полной потере управления объектом с последующим аварийным остановом технологического процесса. Очевидно, какой-то минимум информационных и управляющих функций должен сохраняться практически в любых ситуациях, и наиболее надежным и целесообразным решением на современном этапе является частичное сохранение принципа локализации при построении схем АСУ ТП.

В настоящее время все наиболее ответственные управляющие контуры АСУ ТП, связанные с защитой объекта от аварий и их последствий, выполняются, как правило, локальными и на аналоговых средствах. Сохранены и локальные каналы получения, преобразования и отображения информации о главных параметрах состояния технологического объекта. Все остальные управляющие функции на низшем уровне АСУ ТП (т. е. бо́льшая часть логического управления и автоматическое

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

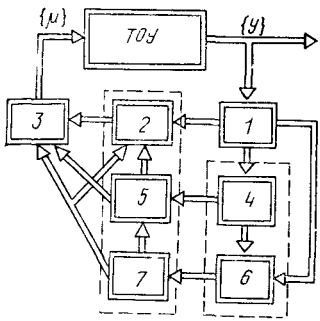


Рис. 17.4. Обобщенная техническая структура АСУ ТП с использованием ЭВМ

1 — средства получения информации, *2* — локальные аналоговые средства преобразования информации, *3* — исполнительные устройства, *4* — информационный вычислительный комплекс, *5* — управляющий вычислительный комплекс *6* — локальные и централизованные средства отображения информации *7* — средства оперативного управления

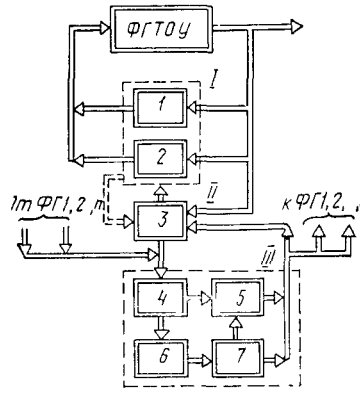


Рис. 17.5. Обобщенная техническая структура АСУ ТП с функционально-групповым управлением

I — первый уровень иерархии (управление отдельными механизмами и регуляторами), *II* — второй уровень иерархии (управление функциональной группой), *III* — третий уровень иерархии (общегрупповое управление), *1 2* — локальные схемы управления группой на аналоговых средствах *3* — централизованная схема управления группой (на микро ЭВМ), *4*, *5* — общегрупповые информационно вычислительные и управляющие комплексы, *6 7* — средства отображения информации и оперативного управления

регулирование), а также вспомогательные и второстепенные информационные каналы могут выполняться как локально, так и централизованно.

Применительно к системам ТГС и СКМ все автоматические подсистемы управления и каналы информации целесообразно строить по основным параметрам на локальных схемах с аналоговыми средствами (рис. 17.4). При этом на долю информационно-управляющих машин (класса мини-ЭВМ) фактически остается лишь информационное обеспечение оператора по вспомогательным и второстепенным параметрам, а также расчет комплексных и технико-экономических показателей.

С появлением более дешевых микро-ЭВМ появились и новые возможности частичной централизации на низших уровнях управления. Все множество управляющих

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

контуров и информационных каналов можно разделить на ряд функциональных групп, каждая из которых будет обеспечивать управление частью технологического объекта с относительно самостоятельной функциональной значимостью. В пределах каждой такой группы все или бóльшая часть функций преобразования информации могут выполняться на одной-двух микро-ЭВМ. При этом на долю локальных аналоговых средств можно по-прежнему оставить лишь особо важные контуры управления и сохранить мини- или микро-ЭВМ на высшем уровне управления (рис. 17.5). Системы управления, построенные по такому принципу, называются распределенными.

Применение принципа распределенных систем обеспечивает повышение степени централизации управления с сохранением необходимой живучести автоматизированного технологического комплекса в целом, так как при отказе микро-ЭВМ может быть потеряно автоматическое управление лишь одной функциональной группой, а не всем объектом (технологическим процессом). При этом снижается не только общее число средств автоматизации, но и число информационных связей с высшими уровнями АСУ ТП. В норме вся информация, необходимая для управления данной группой, не выходит за ее рамки.

Современное промышленное производство средств автоматизации ориентируется в основном на изготовление агрегатированных комплексов средств. При этом в серийном производстве находятся как комплексы аналоговых средств, так и комплексы средств вычислительной техники. Агрегатированный функциональный состав средств в рамках каждого комплекса обычно рассчитан на полную реализацию какой-либо крупной части, подсистемы или функции АСУ ТП, т. е. позволяет строить в рамках этой части, подсистемы, функции управляющие и информационные контуры самого различного назначения, сложности и конфигурации.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ГЛАВА 18. УПРАВЛЯЮЩИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В АСУ ТП

§ 18.1. Назначение и структура управляющих вычислительных комплексов

При использовании вычислительных машин для контроля и управления технологическими процессами обработка вводимых данных и выдача результата подвержены жестким ограничениям, обусловленным темпом развития процессов в контролируемом или управляемом объекте.

Такие машины, как говорят, работают в реальном масштабе времени, т. е. обрабатывают поступающую информацию с объекта настолько быстро, что результат обработки удается использовать для управляющего воздействия. Вычислительные машины, включаемые тем или иным способом в контур управления, называются *управляющими вычислительными комплексами* (УВК).

При разработке современных комплексов широко используется *принцип агрегатирования*, в соответствии с которым комплексы компонуются из набора автономных функциональных модулей и блоков с унифицированными сопряжениями, выполняющих определенные функции по обработке или хранению информации, преобразованию сигналов, выводу информации и т. п.

Набор блоков и модулей получил название *агрегатной системы средств вычислительной техники* (АСВТ). Такой принцип построения позволяет получать конфигурации, приспособленные к объектам с различной технологией. Все модули выполняются совместимыми по характеристикам информационных и управляющих сигналов, по кострукциям элементов и узлов, а также по организации обмена информацией между ними в различных режимах работы.

Обобщенная схема УВК, построенного по агрегатному принципу, приведена на рис. 18.1. Основным звеном обработки информации и центральным управляющим органом комплекса является процессор (Пр). Процессор выполняет команды программы и организует обращение к оперативному запоминающему устройству (ОЗУ), которое предназначено для хранения информации, непо-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

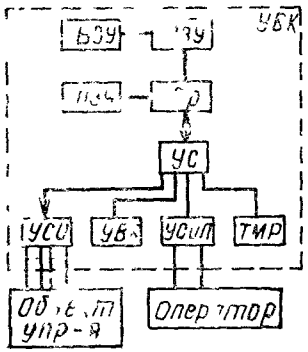


Рис 18 1 Структурная схема управляющего вычислительного комплекса

средственно используемой в процессе вычислений Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) в рабочем режиме процессора допускают лишь считывание хранимой информации Занесение информации в ПЗУ производится обычно в процессе его изготовления В зависимости от типа запоминающих элементов различают трансформаторные и полупроводниковые интегральные ПЗУ

Оперативная память часто оказывается недостаточной для хранения всех необходимых данных В этом случае к процессору (как правило, через ОЗУ) подключаются внешние запоминающие устройства (ВЗУ) в виде накопителей на магнитной ленте (НМЛ) и на магнитных дисках (НМД)

Связь управляющего вычислительного комплекса с измерительными преобразователями и исполнительными механизмами осуществляется с помощью устройств связи с объектом (УСО)

Информация с внешних носителей (перфолент, перфокарт, печатающих устройств) вводится и выводится с помощью устройства ввода-вывода (УВВ). Устройства связи с оперативным персоналом (УСОП) обеспечивают связь комплекса с оператором-технологом. Для обеспечения работы в реальном масштабе времени УВК оснащаются устройством счета реального времени — таймером (ТМР).

Все устройства, кроме процессора и памяти, называются *внешними периферийными.* Обмен информацией между процессором и внешними устройствами обеспечивается с помощью устройств сопряжения (УС)

Все функции управляющих вычислительных комплексов в АСУ ТП независимо от особенностей объекта управления можно разделить на информационные и управляющие.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

К *информационным функциям* относятся циклический опрос параметров и их первичная обработка (линеаризация, масштабирование и др), избирательный контроль, сигнализация отклонений технологических параметров, регистрация срабатывания защит, цифровая регистрация результатов, расчет и анализ обобщенных технико-экономических показателей (ТЭП), диагностика состояния основного оборудования и средств АСУ ТП

К *управляющим функциям* относятся оптимизация хода технологического процесса, автоматизированные пуски и остановы технологического оборудования, непосредственное цифровое регулирование, а также обеспечение связи с вышестоящими иерархическими уровнями АСУ

Для быстрого реагирования на сигналы различных устройств управляющие вычислительные комплексы имеют средства для прерывания выполняемой программы, перехода к программе обслуживания этих устройств и возвращения к прерванной программе При работе УВК формируются сигналы прерываний различного характера

1) прерывания от внешних устройств (таймера, кнопки запроса на пульте), в том числе и от объекта управления, формируемые в тех случаях, когда канал или внешнее устройство не могут начать операцию ввода-вывода или в момент окончания ввода вывода,

2) прерывания по программе, происходящие в тех случаях, когда они заранее предусмотрены программистом или когда требуется немедленный переход к другой программе Эти прерывания формируются также при нарушении порядка выполнения операции или команд, защиты памяти, переполнения разрядной сетки и т п.,

3) прерывания от схем контроля УВК, происходящие в случае обнаружения ошибки в работе системы

Каждой причине прерывания соответствует значение приоритета 1, 2, 3, Приоритет 1 присваивается причине, которая принимается процессором в первую очередь, и т д

Прерывание по отдельным причинам может быть

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

запрещено аппаратурным способом (с помощью определенной кнопки на пульте управления) или программным способом.

§ 18.2. Структура программного обеспечения управляющих вычислительных комплексов

Управляющие вычислительные комплексы, как и универсальные ЭВМ, работают по принципу программного управления вычислительным процессом. Все основные приемы и методы составления программ, используемые в технике программирования для универсальных ЭВМ, применимы и для УВК. Отличиями являются лишь методика подготовки программ, их реализация на машинах.

Программирование задач для УВК имеет следующие особенности:

1) необходимость реализации алгоритмов контроля и управления в реальном масштабе времени, т. е. преобразование входной информации в искомый результат должно быть выполнено в строго фиксированные, ограниченные сроки;

2) обеспечение стабильности программ в течение достаточно большого промежутка времени;

3) большое разнообразие решаемых задач, связанных между собой общими переменными;

4) необходимость обмена информацией с достаточно большим числом внешних устройств, состав и тип которых зависят от конкретной системы управления;

5) повышенные требования к различного рода сбоям и ошибкам.

При рассмотрении программного обеспечения УВК надо исходить из назначения АСУ ТП как системы человек-машина, обеспечивающей автоматизированный сбор и обработку информации и управление технологическим процессом. С этой точки зрения целесообразно рассмотреть содержание терминов «математическое обеспечение АСУ» и «программное обеспечение АСУ». Совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач управления и обработки информации с применением вычислительной техни-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ки принято называть *математическим обеспечением* (МО), а совокупность программ для реализации этих задач и обеспечение функционирования всех устройств УВК называют *программным обеспечением* (ПО).

Программное обеспечение разделяют на специальное и общее.

Специальное программное обеспечение разрабатывается пользователями машины при создании конкретной системы.

Общее программное обеспечение представляет собой совокупность программ, предназначенных для автоматизации подготовки программ, организации контроля вычислительного процесса в УВК при его работе в системе управления.

Практика разработки АСУ ТП различных объектов показала, что специальные программные обеспечения, в свою очередь, также целесообразно разделить на две группы: *программное обеспечение функционирования управляющего вычислительного комплекса и технологическое программное обеспечение.*

Выделение из специального программного обеспечения программ функционирования связано с тем, что современные агрегатированные средства вычислительной техники позволяют создавать разнообразные, в том числе многопроцессорные и многомашинные информационные или управляющие вычислительные комплексы, используя в них средства различных изготовителей. Поставщик в таких случаях не может предусмотреть всех возможных конфигураций УВК и разработать полное программное обеспечение.

Технологическое же программное обеспечение, непосредственно привязанное к объекту, учитывает все его особенности; в частности, оно должно изменяться при изменении технологической схемы объекта, исключении или добавлении новых точек замеров и т. п.

Общее программное обеспечение обычно называют *системой программного обеспечения (СПО)*, которая разрабатывается и поставляется совместно с комплексом технических средств заводом-изготовителем.

Система программного обеспечения представляет собой совокупность программных средств, предназначенных для эффективного применения управляющего

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

вычислительного комплекса, облегчения использования его для разнообразных целей, уменьшения трудоемкости эксплуатации, автоматизации процесса подготовки программ (автоматизации программирования), упрощения связи комплекса с оператором и объектом при решении задач автоматизированного управления.

§ 18.3. Агрегатная система средств вычислительной техники на микромодульной основе АСВТ-М

Принцип агрегатирования получил наиболее полное воплощение при построении вычислительных комплексов Единой системы электронных вычислительных машин ЕС ЭВМ и управляющих вычислительных комплексов АСВТ. Дальнейшее развитие принцип агрегатирования находит в новой серии малых машин СМ ЭВМ. Разработка больших интегральных схем (БИС) с более высоким уровнем интеграции привела к созданию микро-ЭВМ, все более широко применяемых для решения различных задач автоматизации.

Единая система машин (ЕС ЭВМ) по составу периферийного оборудования и элементной базе относится к вычислительным машинам третьего поколения. Машины ЕС ЭВМ широко применяются на уровнях более высокого ранга многоступенчатых АСУ предприятиями, объединениями, отраслями и т. д. На базе ЕС ЭВМ создаются также системы, предназначенные для решения разнообразных научно-технических задач реализации измерительно-информационных систем для сбора и обработки большого количества данных и др.

В состав ЕС ЭВМ входит ряд машин различной мощности и производительности с быстродействием от 10 000 до 4,5 млн. операций в 1 с, с объемом оперативной памяти от 8 до 16 324 Кбайт

Управляющие вычислительные комплексы агрегатной системы первоначально строились на дискретных полупроводниковых элементах АСВТ-Д Дальнейшее развитие и совершенствование АСВТ-Д привело к созданию агрегатной системы средств вычислительной техники на микромодульной основе АСВТ-М,

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Структура комплексов АСВТ-М представляет собой набор агрегатных устройств с унифицированными внешними связями, из которых можно компоновать различные УВК с заданными параметрами, начиная с простейших систем сбора информации до сложных многопроцессорных управляющих систем.

Основной номенклатурной единицей технических средств АСВТ-М является агрегатный модуль. *Агрегатный модуль* — это изделие, которое имеет унифицированные внешние связи, выполняет какие-либо функции по обработке или хранению информации, коммутации передач, преобразованию физических сигналов и т. п. и является элементарной единицей при компоновке управляющего комплекса проектным путем.

В состав АСВТ-М входят информационные комплексы М-40, М-60; управляющие вычислительные комплексы М-6000, М-7000, М-400 и ЭВМ М-4030, применяющиеся в качестве верхнего звена иерархических АСУ ТП. Технические средства АСВТ-М позволяют создавать АСУ различной сложности: от централизованных систем контроля отдельных агрегатов и установок до сложных АСУ крупными предприятиями и комбинатами.

Для использования технических средств АСВТ-М в составе АСУ ТП рекомендуется применять

а) на уровне технологических установок и агрегатов — информационные комплексы М-40 и М-60,

б) на уровне технологических процессов или сложных объектов — однопроцессорные УВК, в первую очередь комплексы М-6000, М-7000; при этом реализуются системы группового программного и прямого цифрового управления, в ряде случаев с оптимизацией параметров;

в) на уровне производств и цехов — многопроцессорные комплексы М-6000, М-7000, М-400· к задачам оптимального управления здесь добавляются технико-экономические и диспетчерские задачи и усложняются сами алгоритмы управления;

г) на уровне предприятий по классам задач реального времени — вычислительные комплексы М-4030, свя

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

занные с объектом управления через УВК низших уровней (комплексы М-40, М-400, М-6000).

§ 18.4. Микропроцессоры и микро-ЭВМ

В распоряжение разработчиков АСУ ТП поступил новый класс средств вычислительной техники, использующий большие интегральные схемы (БИС). К этому классу относятся микропроцессоры и микро-ЭВМ.

Микропроцессором называют функционально законченное устройство обработки цифровой информации, управляемое хранимой в памяти программой и конструктивно выполненное в виде одной или нескольких БИС. Микропроцессор по своим логическим функциям и структуре напоминает упрощенный вариант процессора обычных ЭВМ и оперирует с коротким словом от 4 до 16 разрядов.

Микро-ЭВМ представляет собой комплекс устройств, выполненных на БИС, состоящий из микропроцессоров, устройств памяти и средств связи с периферийными устройствами (интерфейс).

В структуре микропроцессора можно выделить три основные части: центральный процессор, постоянную память микропрограмм и блок управления.

Центральный процессор содержит арифметико-логическое устройство (АЛУ), сверхоперативную память на регистрах, а также функциональные регистры. Схема АЛУ выполняет команды сложения, вычитания, логического «И», логического «ИЛИ», сложения по модулю 2 и команды сдвигов. Более сложные команды реализуются с помощью подпрограмм.

Из-за ограниченного количества выводов корпуса БИС (18—42) не удается реализовать интерфейс микропроцессора с высокой пропускной способностью. Поэтому микропроцессоры имеют так называемый общий интерфейс, обслуживающий как внешнюю оперативную память, так и периферийные устройства. В микропроцессоре с корпусом на 40 выводов для интерфейса выделяется 30—34 вывода (например, 16 адресных линий — адресная шина, 8 информационных линий — информационная шина и 6—10 адресных линий — управляющая шина).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

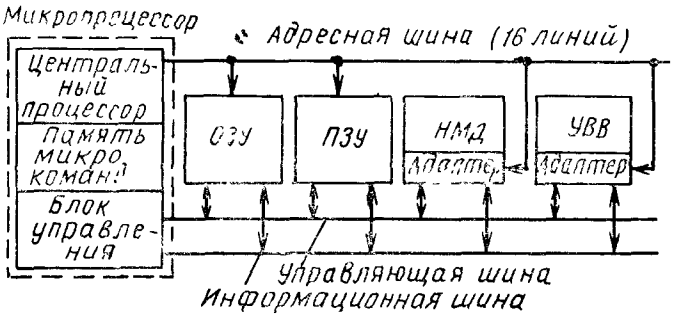


Рис. 18.2. Структура микро ЭВМ

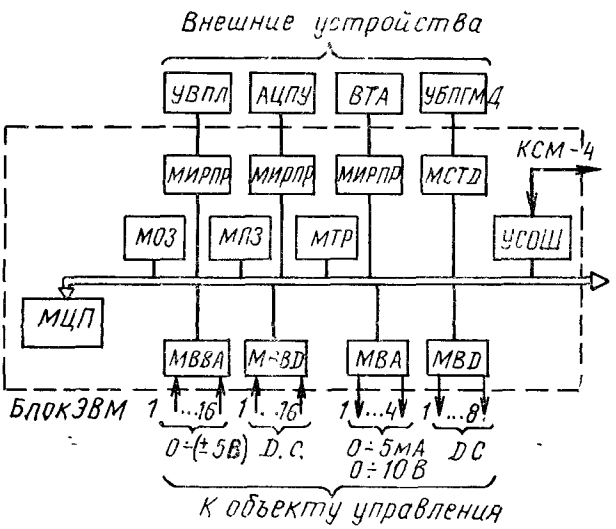


Рис. 18.3. Структурная схема микро-ЭВМ СМ-1800

На рис. 18.2 приведена структура микро-ЭВМ общего назначения. В состав микро-ЭВМ входят постоянная (ПЗУ) и оперативная (ОЗУ) память на БИС, а также внешние запоминающие устройства (накопители) на гибких магнитных дисках (НМД) и устройства ввода-вывода (УВВ).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

По вычислительным характеристикам микро-ЭВМ приближаются к современным малым ЭВМ, а по ряду эксплуатационных показателей (размеры, потребляемая мощность, надежность) их превосходят. Однако из-за малого числа подключаемых периферийных устройств применение микро-ЭВМ в настоящее время ограничивается системами с небольшим числом источников и потребителей информации. Подготовка и отладка программ для микро-ЭВМ затруднена из-за небольшой емкости оперативной памяти и ограниченного набора периферийных устройств.

В настоящее время разработана и осваивается 8-разрядная агрегатированная микро-ЭВМ СМ-1800, предназначенная для управления производственными процессами и агрегатами. Конструктивный и функциональный состав СМ-1800 переменный и определяется потребностями заказчика. Общий максимальный объем оперативной и постоянной памяти составляет 64 Кбайта.

Структурная схема микро-ЭВМ СМ-1800 представлена на рис. 18.3. Логическая и арифметическая обработка информации, а также управление внешними устройствами осуществляются модулем центрального процессора (МЦП). Процессор содержит 2 Кбайта постоянной и 1 Кбайт оперативной памяти

Память микро-ЭВМ выполнена в виде оперативного запоминающего модуля (МОЗ) емкостью 32 Кбайта, построенного на элементах полупроводниковой динамической памяти, и постоянного запоминающего модуля (МПЗ) емкостью 4 Кбайта, построенного на микросхемах. Отсчет времени осуществляет таймер (ТР).

В качестве внешних устройств в СМ-1800 используются устройства внешней памяти на гибких магнитных дисках (УВПГМД), видеотерминал алфавитно-цифровой (ВТА), устройство печатающее алфавитно-цифровое (АЦПУ), устройство ввода и вывода перфоленточное (УВПЛ) и устройство связи с общей шиной (УСОШ), осуществляющее связь между микро-ЭВМ и машинами СМ ЭВМ, имеющими выход на интерфейс «общая шина» (СМ-3, СМ-4).

Перечисленные внешние устройства подсоединяются к процессору с помощью специальных модулей связи: модуля сопряжения с накопителем на магнитном диске

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

(МСГД), модулей связи с радиальным параллельным интерфейсом (МИРПР) для подключения видеотерминала, печатающего устройства и перфоленточного устройства ввода-вывода.

В состав устройств связи с объектом входят модули ввода аналоговых (МВвА) и дискретных (МВвД) сигналов (ДС) и соответственно модули вывода аналоговых (МВА) и дискретных (МВД) сигналов.

Следует отметить, что появление высоконадежных малых ЭВМ и микро-ЭВМ как технической базы управляющих вычислительных комплексов в значительной степени будет способствовать широкому внедрению АСУ ТП в системах ТГС и СКМ.

§ 18.5. Экономическая эффективность автоматизации

Выбор уровня автоматизации технологического процесса обосновывается технико-экономическим анализом ожидаемых последствий автоматизации. Современное развитие приборостроения позволяет реализовать систему управления практически любой сложности Однако применение аппаратуры для контроля и регулирования с весьма высокой точностью требует больших затрат на приобретение и эксплуатацию Такие системы могут внедряться только при гарантированном достижении экономического эффекта от автоматизации.

Расчет экономического эффекта от внедрения автоматизации производственных процессов в строительстве, как и от внедрения любой новой техники, проводится согласно типовым методикам, утвержденным Госпланом СССР, Госстроем СССР и АН СССР.

Экономический эффект определяется по формуле

$$Э = (C_1 П + E_н K_1) - (C_2 П + E_н K_2) = (C_1 - C_2)\, П - E_н (K_2 - K_1),$$

где Э — годовой экономический эффект; C_1, C_2 — себестоимость единицы продукции соответственно до и после автоматизации, K_1, K_2 — сумма капитальных вложений в производство продукции до и после автоматизации, $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $П$ — годовой объем продукции, принятый за эталон, часто соответствует объему продукции, выпускаемой после внедрения автоматизации ($П_2$).

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Эффективность системы автоматизации определяется в результате сравнения сумм приведенных затрат на производство продукции на автоматизированном и неавтоматизированном оборудовании и характеризуется ростом годовой прибыли за счет снижения себестоимости продукции $(C_1 - C_2)П$

Второе слагаемое первой части формулы определяется величиной дополнительных капитальных затрат на создание системы автоматического управления $(K_2 - K_1)$.

Нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений определяет часть годовой прибыли, расходуемую на внесение платы за фонды, оплату процентов за банковский кредит и другие обязательные платежи. Для разных отраслей народного хозяйства коэффициент различен, но для внедрения систем автоматизации принято единое значение $E_н = 0{,}3$, что соответствует примерно трехлетнему сроку окупаемости капитальных вложений.

Снижение себестоимости продукции, или годовой экономический эффект автоматизации, определяется путем оценки повышения эффективности производства и снижения эксплуатационных расходов на ведение технологического процесса. В то же время необходимо учесть эксплуатационные расходы, связанные с функционированием созданной системы управления.

Снижение себестоимости продукции зависит от источников эффективности и расходов:

$$Э_г = (C_1 - C_2)\,П_2 = \Delta Э_п + \Delta Э_э - P_э =$$
$$= (\Delta Э_{п.п} + \Delta Э_{с.б} + \Delta Э_{у.с}) + (\Delta Э_м + \Delta Э_{эн} + \Delta Э_з) -$$
$$- (P_{об} + P_{а.о}),$$

где $Э_г$ — годовой экономический эффект; $\Delta Э_п$, $\Delta Э_э$, $\Delta Э_{п\,п}$ — экономия вследствие повышения эффективности производства, снижения эксплуатационных расходов, повышения производительности технологического процесса; $\Delta Э_{св}$, $\Delta Э_{у\,с}$, $\Delta Э_м$, $\Delta Э_{эн}$, $\Delta Э_з$ — экономия в результате снижения брака выпускаемой продукции, улучшения сортности продукции, снижения расхода сырья и материалов, снижения расхода энергии, зарплаты основных производственных рабочих; $P_э$ — эксплуатационные расходы; $P_{об}$ — расходы на обслуживание средств контроля и автоматического управления; $P_{а\,о}$ — амортизационные отчисления на средства контроля и автоматизации.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Расходы на эксплуатацию системы автоматизации не всегда можно рассчитать в процессе проектирования по отдельным составляющим, поэтому широко распространен метод определения расходов по укрупненным показателям. Средства, затрачиваемые на обслуживание средств контроля и автоматизации, складываются из затрат на заработную плату персонала, текущих затрат на материалы, запасные части и энергию, а также накладных расходов (на охрану труда, оплату труда административно-хозяйственного и вспомогательного персонала, транспорт, общестроительные расходы и т. п.). Для упрощения расчетов материальные затраты и накладные расходы принято выражать в долях заработной платы производственного персонала, обслуживающего систему контроля и автоматизации:

$$P_{об} = k\,(1 + m + n)\,З_{о.п};$$

$$З_{о.п} = \sum_{1i} З_{о\,п\,1} N_{1i}.$$

где $k = 1{,}01—1{,}02$ — коэффициент, учитывающий затраты на резервный фонд контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры; $m = 0{,}12—0{,}6$ — коэффициент материальных затрат; $n = 0{,}7—1{,}0$ — коэффициент накладных расходов; $З_{о\,п}$ — заработная плата персонала, обслуживающего аппаратуру; $З_{о\,п1}$ — стоимость 1 чел.-ч работника 1-го разряда; N_{1i} — норма времени на обслуживание i-го прибора работником 1-го разряда.

Таким образом, имея укрупненные нормы времени на обслуживание контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры и перечень необходимого для реализации разрабатываемой системы парка приборов, можно определить расходы на ее эксплуатацию.

Амортизационные отчисления на измерительные и регулирующие приборы и устройства на различных предприятиях составляют 8—12,5% стоимости системы автоматизации

$$P_{а.о} = a\,K/100,$$

где K — сумма капитальных затрат на автоматику; a — установленная норма амортизации от первоначальной стоимости автоматизации, %

Капитальные затраты, необходимые для создания системы автоматизации, заложены в смету, в которой учитывается стоимость оборудования, материалов и

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

строительно-монтажных работ с соответствующими начислениями. Для расчетов капитальных затрат определяют стоимость основной аппаратуры автоматизации: приборов, регуляторов, электроаппаратуры и щитов. Стоимость же материалов и монтажа определяется долей стоимости основного оборудования

$$K = (1 + b) \sum_i C_i,$$

где $b = 0{,}5—1{,}1$ — стоимость монтажа и материалов в долях стоимости основного оборудования; C_i — стоимость i-го прибора, регулятора, электроаппарата, системы контроля и регулирования.

При определении капитальных затрат необходимо учитывать стоимость проведения проектных и научно-исследовательских работ, обеспечивающих создание оцениваемой системы управления.

Одновременно с расчетом экономического эффекта, который дает абсолютную оценку целесообразности создания системы автоматизации, желательно определить экономическую эффективность капиталовложений, т. е. произвести расчет времени окупаемости капитальных затрат

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_2 - K_1}{(C_1 - C_2)\, П_2} = \frac{K}{Э_{\text{г}}}.$$

Время окупаемости определяется как частное от деления дополнительных капитальных вложений в систему автоматизации на годовой экономический эффект Время окупаемости не должно превышать нормативного срока окупаемости $T_{\text{ок}} \leqslant T_{\text{ок.н}}$, который для средств автоматизации составляет 3—4 года. Обычно этот показатель меньше срока окупаемости капиталовложений для технологического оборудования, так как средства автоматизации имеют меньший срок службы и быстрее морально стареют.

Известно, что народнохозяйственный эффект автоматизации существенно выше эффекта для предприятия, который обычно имеют в виду, оценивая системы управления. Народнохозяйственный эффект дополнительно учитывает экономию капитальных вложений. Если применение системы автоматического управления позволяет увеличить выпуск продукции, то для ее выпуска

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

можно не строить новые производственные мощности, т. е. переход на автоматизированное производство эквивалентен строительству новых производственных мощностей на сумму

$$\Delta K = K_{\text{у}} \frac{\Delta x_{\text{п}}}{100} П_{\text{г}},$$

где ΔK — экономия капитальных затрат; $K_{\text{у}}$ — удельные капитальные вложения на единицу продукции; $\Delta x_{\text{п}}$ — увеличение производительности технологического оборудования, %.

Показатели экономической эффективности автоматизации процессов в системах ТГС и СКМ различны в зависимости от местных условий и уровня автоматизации. Для систем автоматизации теплоснабжения, газоснабжения и вентиляции срок окупаемости затрат не превышает 3—4 года. Внедрение автоматического регулирования процесса горения на современных мощных котельных установках дает экономию топлива 1—3%, а в небольших котельных может достигать 10—15%. Применение регуляторов местных пропусков в системе теплоснабжения обеспечивает экономию теплоты до 2,5%.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ТАБЛИЦА I.1. СРЕДНИЕ ЗА РАБОЧУЮ ЧАСТЬ СУТОК КОЭФФИЦИЕНТЫ $\overline{\Omega}_c$ ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИ ДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Продолжительность рабочей части суток, ч	$\overline{\Omega}_c$	Продолжительность рабочей части суток, ч	$\overline{\Omega}_c$
2	0,37	10	0,41
4	0,42	12	0,32
6	0,43	14	0,26
8	0,42	16	0,2
		18	0,14

ТАБЛИЦА I.2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРЕРЫВИСТОСТИ $\Omega_{тр}$ ДЛЯ ТРАНСМИССИОННЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОТЫ

Время начала $z_н$ или конца $z_к$ рабочей части суток, ч	$\Omega_{тр\ н}$, $\Omega_{тр\ к}$	Время начала $z_н$ или конца $z_к$ рабочей части суток, ч	$\Omega_{тр\ н}$, $\Omega_{тр\ к}$
0 00	3,82	7 00 или 17 00	—0,99
1 00 или 23 00	3,69	8 00 или 16 00	—1,91
2 00 или 22 00	3,31	9 00 или 15 00	—2,7
3 00 или 21 00	2,7	10 00 или 14 00	—3,31
4 00 или 20 00	1,91	11 00 или 13 00	—3,69
5 00 или 19 00	0,99	12 00	—3,82
6 00 или 18 00	0		

ТАБЛИЦА I.3. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРЕРЫВИСТОСТИ ДЛЯ ПОТОКОВ ТЕПЛОТЫ ОТ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ $\Omega_в$ И СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА Ω_c

Время, ч		Значения Ω_c при продолжительности рабочей части суток или $\Omega_в$ при продолжительности теплопоступления, ч								
до поступления	после поступления	2	4	6	8	10	12	14	16	18
—24	0	—1,001	—1,69	—2,09	—2,23	—2,15	—1,89	—1,48	—0,98	—0,46
—23	1	—0,79	—1,64	—2,17	—2,45	—2,48	—2,3	—1,95	—1,5	—0,98
—22	2	—0,27	—1,27	—1,96	—2,36	—2,51	—2,43	—2,16	—1,75	—1,26
—21	3	0,08	—0,71	—1,56	—2,1	—2,37	—2,4	—2,22	—1,88	—1,42
—20	4	0,27	0	—1,0	—1,69	—2,3	—2,24	—2,2	—1,88	—1,49
—19	5	0,39	0,47	0,32	—1,17	—1,71	—1,98	—2,0	—1,83	—1,49
—18	6	0,47	0,73	0,46	—0,5	—0,66	—1,63	—1,78	—1,7	—1,43

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Продолжение табл 1 3

Время ч		Значения Ω_c при продолжительности рабочей части суток или $\Omega_в$ при продолжительности теплопоступления, ч								
до поступления	после поступления	2	4	6	8	10	12	14	16	18
—17	7	0,51	0,89	0,97	0,18	—0,02	—1,20	—1,17	—1,5	—1,32
—16	8	0,52	0,99	1,25	0,98	0,70	—0,70	—1,10	—1,25	—1,17
—15	9	0,52	0,3	1,41	1,5	1,49	—0,14	—0,68	—0,95	—0,98
—14	10	0,50	1,02	1,48	1,75	1,95	0,48	—0 21	—0,61	—0,75
—13	11	0,46	0,98	1,49	1,88	2,1	1,16	0,32	—0,22	—0,49
—12	12	0,41	0,91	1,43	1,89	2,21	1,89	0,89	0,2	—0,2
—11	13	0,34	0,80	1,32	1,83	2,2	2,3	1,51	0,7	0,12
—10	14	0 27	0,67	1,17	1,7	2,08	2,43	2,15	1,56	0,47
—9	15	0,18	0,52	0,98	1,5	1,89	2,4	2,47	1,68	0,84
—8	16	0	0,35	0,75	1,25	1,61	2,24	2,51	2,24	1,24
—7	17	—0 03	0,15	0,49	0,95	1,28	1,98	2,37	2,45	1,66
—6	18	—0,14	—0,01	0,20	0,61	0,88	1,63	2,1	2,36	2,1
—5	19	—0,27	—0,2	—0,12	0,22	0,43	1,20	1,71	2,10	2,18
—4	20	—0,40	—0,55	—0,47	—0,2	—0,08	0,71	1,23	1,69	1,96
—3	21	—0,54	—0,81	—0,84	—0,66	—0,63	0,14	0,66	1,17	1,56
—2	22	—0,69	—1,09	—1,24	—1,16	—1,23	—0,48	0,02	0,54	1,0
—1	23	—0,85	—1,39	—1,66	—1,68	—1,87	—1,16	—0,70	—0,18	0,32

ТАБЛИЦА 1.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРЕРЫВИСТОСТИ $\Omega_{S,\,D}$ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ ОТ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ЧЕРЕЗ ОКНА

Время, ч, относительно максимума теплопоступления		Значения $\Omega_{S,\,D}$ при продолжительности теплопоступлений, ч								
до $z^{макс}_{S,\,D}$	после $z^{макс}_{S,\,D}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18
—24	0	—0,54	—0,88	—1,18	—1,37	—1,48	—1,54	—1,55	—1,52	—1,48
—23	1	—0,15	—0,41	—0,65	—0,83	—0,96	—1,03	—1,07	—1,06	—1,03
—22	2	0,5	0,03	—0,05	—0,2	—0,34	—0,44	—0,50	—0,54	—0,54
—21	3	0,18	0,28	0,42	0,38	0,29	0,19	0,10	0,03	—0,02
—20	4	0,26	0,45	0,68	0,82	0,83	0,77	0,69	0,60	0,52
—19	5	0,29	0,58	0,84	1,06	1,22	1,25	1,21	1,12	1,02
—18	6	0,32	0,67	0,93	1,20	1,72	1,57	1,61	1,56	1,47
—17	7	0,34	0,71	0,97	1,26	1,51	1,72	1,85	1,88	1,81
—16	8	0,34	0,69	0,97	1,26	1,52	1,75	1,92	2,03	2,03
—15	9	0,31	0,63	0,93	1,25	1,47	1,70	1,88	2,02	2,08
—14	10	0,29	0,55	0,86	1,22	1,36	1,58	1,75	1,89	1,97
—13	11	0,27	0,47	0,76	0,99	1,21	1,39	1,55	1,67	1,75
—12	12	0,22	0,40	0,64	0,83	1,01	1,16	1,29	1,38	1,43
—11	13	0,16	0,34	0,49	0,64	0,77	0,88	0,96	1,02	1,04
—10	14	0,11	0,26	0,33	0,42	0,50	0,55	0,59	0,52	0,57
—9	15	0,06	0,14	0,14	0,17	0,19	0,19	0,16	0,12	0,04
—8	16	—0,01	—0,01	—0,06	—0,1	—0,15	—0,22	—0,30	—0,41	—0,53
—7	17	—0,1	—0,19	—0,29	—0,40	—0,52	—0,66	—0,81	—0,96	—1,05
—6	18	—0,18	—0,38	—0,52	—0,71	—0,91	—1,13	—1,33	—1,45	—1,48
—5	19	—0,25	—0,56	—0,78	—1,05	—1,33	—1,59	—1,75	—1,8	—1,81
—4	20	—0,34	—0,72	—1,05	—1,41	—1,73	—1,94	—2,05	—2,06	—2
—3	21	—0,45	—0,88	—1,33	—1,72	—1,98	—2,12	—2,17	—2,14	—2,06
—2	22	—0,54	—1,05	—1,55	—1,85	—2,03	—2,11	—2,13	—2,08	—1,98
—1	23	—0,64	—1,13	—1,51	—1,73	—1,86	—1,91	—1,91	—1,86	—1,77

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Пример расчета тепловой нагрузки на систему кондиционирования воздуха. Требуется рассчитать среднюю за время работы и почасовую тепловую нагрузку на систему кондиционирования воздуха, обслуживающую помещение проектного зала в Москве для теплого периода года. В помещении в течение рабочей части суток продолжительностью 9 ч (с 7 до 16 ч) по истинному времени поддерживается $t_в = 24°C$. В помещении постоянно находятся 50 чел. Масса оборудования $G_{об} = 2500$ кг, $C_{об} = 2{,}3$ кДж/(кг·°С), площадь поверхности оборудования $F_{об} = 150$ м². Коэффициент конвективного теплообмена на поверхностях ограждений и оборудования $\alpha_{к\,i} = \alpha_{к\,об} = 2{,}5$ Вт/(м²·°С).

Характеристики ограждений помещения:

наружная стена $F = 24$ м²; $k = 1{,}17$ Вт/(м²·°С); $y = 3{,}16$ Вт/(м²××°С);

двойное окно $F = 30$ м²; $k = 3{,}26$; $y = 5{,}58$;

потолок $F = 144$ м²; $y = 6{,}78$;

пол $F = 144$ м²; $y = 6{,}4$;

внутренние стены $F = 162$ м²; $y = 8{,}66$.

Тепловые потоки, составляющие нагрузку на систему:

тепловыделения от людей (по явному теплу) $Q_в = 3284$ Вт, $\rho_в = 0{,}75$;

теплопоступления от солнечной радиации через окна:

а) максимальное за сутки теплопоступление от прямой солнечной радиации $Q_S^{макс} = 4937$ Вт, время максимума $z_S^{макс} = 15$ ч, продолжительность теплопоступлений $\Delta z_S = 10$ ч;

б) максимальное за сутки теплопоступление от рассеянной солнечной радиации $Q_D^{макс} = 2068$ Вт, время максимума $z_D^{макс} = 12$ ч, продолжительность действия $\Delta z_D = 16$ ч.

Трансмиссионный тепловой поток через наружные ограждения; среднесуточное значение $Q_{тр\,о} = 51$ Вт; амплитуда $A_{Q_{тр}} = 518$ Вт; доля конвективного теплового потока $\rho_{тр} = 0{,}3$.

Решение:

1 Определим величины относительных показателей теплоусвоения $y_п$ и конвективного теплообмена $\overline{\Lambda}_п$ помещения.

Сумма произведений коэффициентов теплопередачи на площади наружных ограждений равна:

$$\Sigma K_о F_о = 1{,}17 \cdot 24 + 3{,}26 \cdot 30 = 126 \text{ Вт/°С}.$$

Показатель теплоусвоения помещения по формуле (2 23)

$$y_п = 3{,}16 \cdot 24 + 5{,}58 \cdot 30 + (6{,}78 + 6{,}4)\,144 + 8{,}66 \cdot 162 + + 0{,}037 \cdot 2500 \cdot 2{,}3 = 3757 \text{ Вт/°С}.$$

По формуле (2.44)

$$\overline{y}_п = 3757/126 = 29{,}82.$$

Показатель конвективного теплообмена по формуле (2 31)

$$\Lambda = 2{,}5\,(24 + 302\,144 + 124 + 162 + 150) = 1635 \text{ Вт/°С}.$$

По формуле (2.45)

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

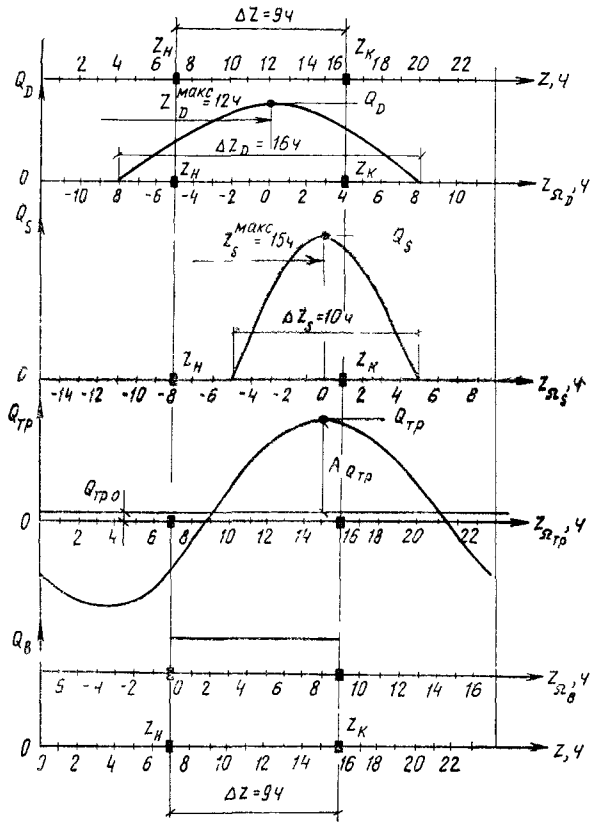


Рис. I.1. Схема к определению коэффициентов прерывистости

$$\Lambda_{\text{п}} = 1635/126 = 13.$$

2. Определим средние за рабочую часть суток значения коэффициентов прерывистости

Для системы кондиционирования воздуха при продолжительности рабочей части суток $\Delta z = 9$ ч по табл. I 1 $\bar{\Omega}_{\text{с}} = 0{,}415$.

Для тепловыделений от внутренних источников (людей) при продолжительности тепловыделения 9 ч по табл. I 3 получим:

а) для времени начала рабочей части суток (рис II 1) $z_{\text{н}}$, которое совпадает с времеием начала теплопоступления $z_{\text{в н}} = 0$, значение $\Omega_{\text{в н}} = -2{,}19$,

б) для времеии конца рабочей части суток $z_{\text{к}}$, совпадающего с концом тепловыделения $z_{\text{в к}} = 9$, значение $\Omega_{\text{в к}} = 1{,}5$.

По формуле (2.46)

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\bar{\Omega}_в = \frac{1,5 + 2,19}{9} = 0,415.$$

Значения $\bar{\Omega}_в$ и $\bar{\Omega}_с$ совпадают, так как совпадают продолжительность работы системы и продолжительность теплопоступления, а также время начала и конца рабочей части суток и теплопоступлений от внутренних источников

Для трансмиссионного теплового потока по табл 1 2 для времени начала работы $z_н = 7$ ч, $\Omega_{тр\,н} = -0,99$, для времени конца рабочей части суток $z_к = 16$ ч, $\Omega_{тр\,к} = -1,91$

По формуле (2 46)

$$\bar{\Omega}_{тр} = \frac{-1,91 + 0,99}{9} = -0,102.$$

Для теплопоступления от прямой солнечной радиации при его продолжительности $\Delta z_S = 10$ ч по табл 1 4·

а) для времени начала рабочей части суток, т. е за 8 ч до максимума теплопоступления ($z_S^{макс} = 15$ ч) $z_{S\,н} = 7 - 15 = -8$, $\Omega_{S\,н} = -0,15$;

б) для времени конца рабочей части суток, т е через 1 ч после максимума теплопоступления, $z_{S\,к} = 16 - 15 = 1$, $\Omega_{S\,к} = -0,96$

По формуле (2.46)

$$\bar{\Omega}_S = \frac{-0,96 + 0,15}{9} = -0,083$$

Для теплопоступления от рассеянной солнечной радиации при его продолжительности 16 ч по табл 1 4

а) для времени начала рабочей части суток, т е за 5 ч до максимума теплопоступления ($z_D^{макс} = 12$ ч), $z_{D\,н} = 7 - 12 = -5$, $\Omega_{D\,н} = -1,80$,

б) для времени конца рабочей части суток, т е через 4 ч после максимума теплопоступления, $z_{D\,к} = 16 - 12 = 4$; $\Omega_{D\,к} = 0,6$

По формуле (2 46)

$$\bar{\Omega}_D = \frac{0,6 + 1,80}{9} = 9,121.$$

3 Определим коэффициенты нагрузки по формуле (2 41)

Знаменатель формулы (2 41) одинаков для всех тепловых потоков, составляющих тепловую нагрузку, и равен

$$m + \frac{\bar{\Omega}_с}{\bar{y}_п} + (1 - 0,5\,m)/\bar{\gamma}_п = 0,375 + 0,415/29,82 + \\ + (1 - 0,5\ 0,375)/13 = 0,45,$$

где по формуле (2 34)

$$m = 9/24 = 0,375.$$

Коэффициент нагрузки для внутренних тепловыделений

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\eta_в = -\frac{0{,}375 + 0{,}415/29{,}82 + (1 - 0{,}5\ 0{,}375)\ 0{,}75/13}{0{,}45} = -0{,}965$$

Так как внутренние тепловыделения постоянны в течение рабочей части суток, то по формуле (2 42) $\bar{Q}_{в\,o} = 9/24 = 0{,}375$, а $\bar{Q}_{л\,m} = 1$ по формуле (2 43).

Прежде чем рассчитывать коэффициент нагрузки для трансмиссионного потока теплоты, определим $\bar{Q}_{тр\,o}$ и $\bar{Q}_{тр\,m}$ Максимальная величина трансмиссионного теплового потока через наружные ограждения при принятом гармоническом характере изменения потока теплоты в течение суток

$$Q_{тр} = Q_{тр.o} + A_{Q_{тр}} = 51 + 518 = 569 \text{ Вт}.$$

По формуле (2.42) $\bar{Q}_{тр\,o} = 51/569 = 0{,}09$ Среднее за рабочую часть суток значение теплового потока можно определить по формуле

$$Q_{тр.т} = Q_{тр\,o} - \frac{7{,}64}{\Delta z} A_{Q_{тр}} \sin 7{,}5 \cdot \Delta z \cos 7{,}5\ (z_н + z_к - 6) =$$

$$= 51 - \frac{7{,}64}{9}\ 518 \sin 7{,}5 \cdot 9 \cos 7{,}5\ (7 + 16 - 6) = 298 \text{ Вт}.$$

По формуле (2.43) $Q_{тр\,m} = 298/569 = 0{,}524$ Коэффициент нагрузки для трансмиссионного теплового потока

$$\eta_{тр} = -\frac{0{,}09 - 0{,}102/29{,}82 + (0{,}524 - 0{,}5 \cdot 0{,}09)\ 0{,}3/13}{0{,}45} = -0{,}2.$$

При определении коэффициентов прерывистости для потоков теплоты от прямой и рассеянной солнечной радиации следует иметь в виду, что в формуле (2 41) $\rho_j = 0$ Величины $\bar{Q}_{S\,o}$ и $\bar{Q}_{D\,o}$ для принятой полукосинусондальной формы изменения во времени суток теплопоступлений от солнечной радиации определим по формуле

$$\bar{Q}_{S;\,D\,o} = 0{,}64\ \frac{\Delta z_{S;\,D}}{24}.$$

Тогда

$$\bar{Q}_{S.o} = 0{,}64\ \frac{10}{24} = 0{,}27;\quad \bar{Q}_{D\,o} = 0{,}64\ \frac{16}{24} = 0{,}425.$$

Коэффициенты нагрузки равны:
для потока теплоты от прямой солнечной радиации

$$\eta_S = -\frac{0{,}27 - 0{,}083/29{,}82}{0{,}45} = -0{,}483;$$

для потока теплоты от рассеянной солнечной радиации

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

$$\eta_D = -\frac{0{,}425 + 0{,}121/29{,}82}{0{,}45} = -0{,}953.$$

4. Определим среднюю за рабочую часть суток тепловую нагрузку на СКВ, которая с учетом формулы (2.40) равна:

$$Q_c = Q_в\,\eta_в + Q_{тр}\,\eta_{тр} + Q_S\,\eta_S + Q_D\,\eta_D = 3284\,(-0{,}965) +$$

$$+ 569\,(-0{,}2) + 4937\,(-0{,}483) + 2068\,(-0{,}953) = -7639 \text{ Вт}.$$

5. Рассчитаем тепловую нагрузку на систему для отдельных часов рабочей части суток. Почасовые значения тепловой нагрузки определяем с учетом формулы (2.47), которая для условий рассматриваемого примера имеет вид:

$$Q_{в.z} = Q_c \left[1 - \frac{\bar{\Lambda}_п}{\bar{\gamma}_п\,\rho_c}\,(\bar{\Omega}_{c,z} - \bar{\Omega}_c)\right] - (Q_{тр.z} - Q_{тр.m})\,\frac{\rho_{тр}}{\rho_c} -$$

$$- (Q_{в.z} - Q_{в.m})\,\frac{\rho_в}{\rho_c} - \frac{\bar{\Lambda}_п}{\bar{\gamma}_п\,\rho_c}\left[Q_{тр}\,(\bar{\Omega}_{тр,z} - \bar{\Omega}_{тр}) +\right.$$

$$\left. + Q_в\,(\bar{\Omega}_{в.z} - \bar{\Omega}_в) + Q_S\,(\bar{\Omega}_{S,z} - \bar{\Omega}_S) + Q_D\,(\bar{\Omega}_{D,z} - \bar{\Omega}_D)\right].$$

Коэффициенты прерывистости $\bar{\Omega}_{j.z}$ определяют по формуле (2.48), в которую подставляют значения $\Omega_{j.z+1}$ и $\Omega_{j\,z}$ по табл. I.2—I.4. Так, для теплового потока, вносимого системой, и для совпадающего с ним по времени потока теплоты от людей значения $\Omega_{c\,z}$, $\Omega_{в\,z}$ и $\Omega_{c\,z+1}$, $\Omega_{в\,z+1}$ принимаются по табл. I 3 для продолжительности рабочей части суток 9 ч (теплопоступления от внутренних источников). Для первого часа работы системы (от 7 до 8 ч) $\Omega_{c\,z} = -2{,}19$ (0 ч после начала теплопоступления), а $\Omega_{c\,z+1} = -2{,}47$ (1 ч после начала теплопоступления).

Для начала второго рабочего часа (от 8 до 9 ч) $\Omega_{c\,z} = -2{,}47$ и совпадает со значением $\Omega_{c\,z+1}$ для предыдущего (первого) часа работы. Для второго рабочего часа $\Omega_{c\,z+1} = -2{,}44$ (2 ч после начала теплопоступления). Таким образом, для каждого последующего часа работы $\Omega_{c\,z} = \Omega_{c\,z+1}$ для предыдущего часа работы.

Аналогично определяют значения $\Omega_{в\,z}$ и $\Omega_{в\,z+1}$, которые в данном случае совпадают со значениями $\Omega_{c.z}$ и $\Omega_{c\,z+1}$. Значение Ω_z, Ω_{z+1} и $\bar{\Omega}_z$ рассмотренных потоков теплоты от системы и внутренних источников для всех часов работы системы приведены в табл. II.1.

Коэффициенты $\Omega_{тр\,z}$ и $\Omega_{тр\,z+1}$ определяют по табл. I 2. Для первого часа работы системы $\Omega_{тр\,z} = -0{,}99$ (для $z_н = 7$ ч), а $\Omega_{тр.z+1} = -1{,}91$ соответствует концу первого часа работы Для второго часа работы $\Omega_{тр\,z} = \Omega_{тр\,z+1} = -1{,}91$ первого часа работы, а $\Omega_{тр\,z+1}$ принимается по табл. I.2 равной —2,7. Для всех часов работы значения $\Omega_{тр\,z}$, $\bar{\Omega}_{тр\,z+1}$ и $\bar{\Omega}_{тр\,z}$ приведены в табл II.1.

Коэффициеиты $\Omega_{S.z}$, $\Omega_{S.z+1}$ и $\Omega_{D\,z}$, $\Omega_{D.z+1}$ определяют по табл. I.4. Для потока теплоты от прямой солнечиой радиации коэффициенты принимают по табл. I.4 для продолжительности теплопос-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

тупления $\Delta z_S = 10$ ч с учетом времени максимума теплопоступления $z_S^{\text{макс}} = 15$ ч. Начало первого часа работы системы (7 ч) соответствует —8 ч до наступления максимума теплопоступления. Поэтому $\Omega_{S\,z} = -0{,}15$. Конец первого часа работы системы соответствует —6 ч до наступления максимума теплопоступления и $\Omega_{S\,z+1} = -0{,}52$ и т. д. Значения $\Omega_{D.z}$ и $\Omega_{D.z+1}$ определяют по той же табл. I.4 для продолжительности теплопоступления $\Delta z_D = 16$ ч и времени максимума $z_D^{\text{макс}} = 12$ ч. Коэффициенты прерывистости для потоков теплоты от прямой и рассеянной солнечной радиации в различные часы рабочей части суток приведены в табл. II.1.

При определеиии коэффициентов $\Omega_{j.z}$ и $\Omega_{j.z+1}$ по табл. I.2—I.4 можно отметить одио общее для всех коэффициентов правило. Значеиие $\Omega_{j.z}$ для первого часа работы всегда совпадает с велнчиной $\Omega_{j\,\text{н}}$, которая определялась ранее при расчете средних за рабочую часть суток коэффициентов прерывистости $\overline{\Omega}_j$. Значение $\Omega_{j\,z+1}$ принимается следующим за $\Omega_{j\,z}$ в соответствующей таблнце. Для следующего расчетного часа величина $\Omega_{j.z}$ равна $\Omega_{j\,z+1}$ для предыдущего часа и т. д.

Таким образом, тепловая нагрузка для часов рабочей части суток определяется по формуле

$$Q_{\text{с}.z} = -7639\left[1 - \frac{13}{29{,}82}\,(\overline{\Omega}_{\text{с}\;z} - 0{,}415)\right] - (Q_{\text{тр}.z} - 298)0{,}3 - \\ - \frac{13}{29{,}82}\,[569\,(\overline{\Omega}_{\text{тр}.z} + 0{,}102) + 3284\,(\overline{\Omega}_{\text{в}.z} - 0{,}415) + \\ + 4937\,(\overline{\Omega}_{S.z} + 0{,}083) + 2068\,(\overline{\Omega}_{D.z} - 0{,}121)].$$

Почасовые значения трансмиссионного теплового потока следует рассчитывать по формуле

$$Q_{\text{тр}.z} = Q_{\text{тр}.0} + A\,Q_{\text{тр}}\cos 15\,(z - 15),$$

подставляя в нее значение z, среднее за рассматриваемый час (например, 7,5; 8,5; 9,5 и т. д.).

Расчет величин $Q_{\text{тр}\,z}$ и $Q_{\text{с}.z}$ сведен в табл. II.1.

ТАБЛИЦА II.1. К РАСЧЕТУ ПОЧАСОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕРЫВИСТОСТИ $\Omega_{j,z}$ И ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА СИСТЕМУ

Величины	Значения величин для часов рабочей части суток								
	7—8	8—9	9—10	10—11	11—12	12—13	13—14	14—15	15—16
$\Omega_{\text{с}.\,z+1}$; $\Omega_{\text{в}.\,z+1}$	—2,47	—2,44	—2,24	—2	—1,44	—0,58	0,08	0,84	1,5
$\Omega_{\text{с}.\,z}$; $\Omega_{\text{в}.\,z}$	—2,19	—2,47	—2,44	—2,24	—2	—1,44	—0,58	0,08	0,84
$\overline{\Omega}_{\text{с}.\,z}$, $\overline{\Omega}_{\text{в}.\,z}$	—0,28	0,03	0,2	0,24	0,56	0,86	0,66	0,76	0,66
$\Omega_{\text{тр}.\,z+1}$	—1,91	—2,7	—3,31	—3,69	—3,82	—3,69	—3,31	—2,7	—1,91

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Продолжение табл. II.1

Величины	Значения величины для часов рабочей части суток								
	7—8	8—9	9—10	10—11	11—12	12—13	13—14	14—15	15—16
$\Omega_{\text{тр. }z}$	−0,99	−1,91	−2,70	−3,31	−3,69	−3,82	−3,69	−3,31	−2,7
$\overline{\Omega}_{\text{тр. }z}$	−0,92	−0,79	−0,61	−0,38	−0,13	0,13	0,38	0,61	0,79
$\Omega_{S.\,z+1}$	−0,52	−0,91	−1,33	−1,73	−1,98	−2,03	−1,86	−1,48	−0,96
$\Omega_{S.\,z}$	−0,15	−0,52	−0,91	−1,33	−1,73	−1,98	−2,03	−1,86	−1,48
$\overline{\Omega}_{S.\,z}$	−0,37	−0,39	−0,42	−0,4	−0,25	−0,05	0,17	0,38	0,52
$\Omega_{D.\,z+1}$	−2,06	−2,14	−2,08	−1,86	−1,52	−1,06	−0,54	0,03	0,6
$\Omega_{D.\,z}$	−1,80	−2,06	−2,14	−2,08	−1,86	−1,52	−1,06	−0,54	0,03
$\overline{\Omega}_{D.\,z}$	−0,24	−0,09	0,07	0,27	0,35	0,45	0,53	0,51	0,57
$Q_{\text{тр. }z}$	−147	−17	−19	249	366	462	530	565	565
$Q_{\text{с}}$	−7613	−7271	−7001	−6984	−7129	−7542	−8022	−8390	−8754

Приложение III

Пример расчета годового изменения тепловой нагрузки на систему кондиционирования воздуха

Требуется рассчитать среднюю за рабочую часть суток тепловую нагрузку на систему кондиционирования воздуха (см. прил. II) для всех месяцев года. Исходные данные для расчета приведены в табл. III.1 в виде среднемесячных значений тепловых потоков, составляющих тепловую нагрузку на систему. Тепловые потоки, проходящие через наружные ограждения, определены по среднемесячным средним многолетним значениям параметров наружного климата. Тепловыделения от искусственного освещения в период с апреля по сентябрь приняты в размере 25% максимальных. Принято, что в течение этих же месяцев используется солнцезащита в виде светлых штор с внутренней стороны.

Тепловыделения от дежурной системы отопления для месяцев отопительного сезона, приведенные в табл. III.1, рассчитаны по формуле

$$Q_{\text{с. о}} = Q^{\text{р}}_{\text{с. о}} \frac{t_{\text{т}} - t_{\text{в}}}{82{,}5 - 16},$$

где $Q^{\text{р}}_{\text{с. о}} = 6{,}37$ кВт — расчетная нагрузка на систему отопления при $t_{\text{в}} = 16$°С; $t_{\text{т}}$ — средняя температура теплоносителя в системе отопления, соответствующая отопительному графику центрального качественного регулирования при средней месячной температуре наружного воздуха, °С, $t_{\text{в}}$ — температура воздуха в помещении, °С.

Система отопления конвекторная ($\rho_{\text{с. о}} = 0{,}85$) и работает круглосуточно.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Решение.

1. Определим коэффициенты нагрузки для отдельных тепловых потоков, пользуясь данными примера прил. II.

Коэффициент нагрузки для трансмиссионного теплового потока в январе

$$\eta_{\text{гр}} = \frac{0,97 - 0,102/29,82 + (0,96 - 0,5 \cdot 0,97)\ 0,45/13}{0,45} = -2,17,$$

где $\bar{Q}_{\text{гр.о}} = \dfrac{-3,8}{-3,8-0,1} = 0,97;$

$$Q_{\text{тр.т}} = -3,8 - \frac{7,64}{9}\ 0,1 \sin 7,5 \cdot 9 \cdot \cos 7,5\ (7 + 16 - 6) = -3,75;$$

$$Q_{\text{тр т}} = \frac{-3,75}{-3,8-0,1} = 0,96.$$

Для остальных месяцев года значения $\eta_{\text{тр}}$ приведены в табл. III.2.

Коэффициент нагрузки для теплового потока, вносимого системой отопления, определим по формуле (2 41). Так как система работает круглосуточно, $\bar{\Omega}_{\text{с.о}} = 0$

$$\eta_{\text{с.о}} = -\frac{1 + 0,5\ 0,85/13}{0\ 45} = -2,3.$$

Коэффициент нагрузки для теплопотерь от инфильтрации, которые примем неизменными в течение суток, определим по аналогичной формуле, учитывая, что инфильтрационный поток теплоты является конвективным:

$$\eta_{\text{и}} = -\frac{1 - 0.5/13}{0,45} = -2,3.$$

Коэффициент нагрузки для теплопоступлений от людей будет различным для месяцев года, так как доля конвективной теплоотдачи $\rho_{\text{в}}$ зависит от температуры внутреннего воздуха Для зимних месяцев при $t_{\text{в}} = 20°\text{C}$ величина $\rho_{\text{в}} = 0,5$:

$$\eta_{\text{в}} = -\frac{0,375 + 0,383/29,82 + (1 - 0,5 \cdot 0,375)0,5/13}{0,45} = -0,93.$$

Для $t_{\text{в}} = 24°\text{C}$ величина $\eta_{\text{в}}$ определена в прил. II, для $t_{\text{в}} = 22°\text{C}$ величины $\eta_{\text{в}}$ приведены в табл. III.2 при $\rho_{\text{в}} = 0,63$.

Коэффициент нагрузки для прямой солнечной радиации для января равен·

$$\eta_{S} = -\frac{0,19 - 0,083/29,82}{0,45} = -0,43,$$

где $\bar{Q}_{S,0} = 0,637\ \dfrac{7.2}{24} = 0,19.$

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА III.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА СКВ

Величины	Значения величин для месяцев года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	20	20	20	22	24	24	24	24	24	22	20	20
Тепловые потоки, составляющие тепловую нагрузку, кВт:												
среднесуточный трансмиссионный	—3,8	—3,7	—3,1	—2,3	—1,6	—1,03	—0,7	—1	—1,7	—2,2	—2,8	—3,5
амплитуда трансмиссионного потока	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1
от системы отопления $Q_{с\,о}$	4,2	4,1	3,5	2,1	—	—	—	—	—	2,1	3,1	3,9
от людей $Q_в$	4,25	4,25	4,25	3,65	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,65	4,25	4,25
от инфильтрации $Q_и$	—0,94	—0,92	—0,77	—0,56	0	0	0	0	0	—0,55	—0,69	—0,86
от искусственного освещения $Q_{осв}$	2,88	2,88	2,88	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	2,88	2,88	2,88
от прямой солнечной радиации Q_S	0,8	2,8	5,5	3,4	2,5	2,5	2,5	2,8	2,6	2,8	2,7	0,9
от рассеянной солнечной радиации Q_D	1,2	1,9	2,7	2	2	2,1	2,1	2	1,8	1,8	1,1	1
Продолжительность теплопоступлений от прямой солнечной радиации Δz_S, г	7,2	8	8,6	9,4	10	10,3	10	9,4	8,6	8	7,2	7,0
То же, от рассеянной Δz_D, г	8	10	12	14	16	17	16	14	12	10	8	7,2
Использование солнцезащиты	—	—	—	+	+	+	+	+	+	—	—	—

Электронная библиотека http://lgv.khstu.ru/

ТАБЛИЦА III 2. КОЭФФИЦИЕНТЫ НАГРУЗКИ И СРЕДНЯЯ ТЕПЛОВАЯ НАГРУЗКА НА СКВ ДЛЯ МЕСЯЦЕВ ГОДА

Тепловой поток	Значения коэффициентов нагрузки для месяцев года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Трансмиссионный $\eta_{тр}$	—2,17	—2,17	—2,1	—1,97	—1,79	—1,59	—1,29	—1,58	—1,9	—1,97	—2,17	—2,17
От системы отопления $\eta_{с\,о}$	—2,3	—2,3	—2,3	—2,3	—	—	—	—	—	—2,3	—2,3	—2,3
От людей $\eta_{в}$	—0,93	—0,93	—0,93	—0,95	—0,97	—0,97	—0,97	—0,97	—0,97	—0,95	—0,93	—0,93
От искусственного освещения $\eta_{осв}$	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93	—0,93
От инфильтрации $\eta_{и}$	—2,3	—2,3	—2,3	—2,3	—	—	—	—	—	—2,3	—2,3	—2,3
От прямой солнечной радиации η_{S}	—0,43	—0,47	—0,51	—0,55	—0,59	—0,61	—0,59	—0,55	—0,51	—0,47	—0,43	—0,41
От рассеянной солнечной радиации η_{D}	—0,47	—0,59	—0,71	—0,83	—0,94	—0,99	—0,94	—0,83	—0,71	—0,59	—0,47	—0,42
Тепловая нагрузка на СКВ $Q_{с}$ кВт	—7	—8,57	—11,54	—7,21	—5,1	—6,45	—7,09	—6,1	—3,69	—8,35	—7,99	—7,03

Электронная библиотека http://lgy.khstu.ru/

Для остальных месяцев года значения η_S и η_D приведены в табл. III.2. В расчете η_S и η_D значения $\overline{\Omega}_S$ и Ω_D приняты по прил. II.

2 Определим тепловую нагрузку на СКВ для месяцев года (табл III.2)

$$Q_c = Q_{гр}\,\eta_{гр} + Q_{с\ о}\,\eta_{с.о} + Q_в\,\eta_в + Q_и\,\eta + Q_{осв}\,\eta_{осв} + \\ + Q_S\,\eta_S + Q_D\,\eta_D .$$

Как видно из табл III 2, в течение года тепловая нагрузка на СКВ существенно меняется. Величины Q_c для февраля, марта, октября и ноября превышает расчетную величину (см. прил II) для расчетных летних условий, что связано со значительными теплопоступлениями от системы отопления и приводит к необходимости выбора расчетной мощности СКВ в переходный период года. Во избежание превышения нагрузки на СКВ по сравнению с расчетной летней следует уменьшить тепловыделения от системы отопления.

3. Определим требуемые тепловыделения от системы отопления $Q^{тр}_{с.о}$, приняв нагрузку на СКВ в течение отопительного периода $Q_c = 7$ кВт.

Для месяцев года $Q^{тр}_{с.о}$ вычислим по формуле

$$Q^{тр}_{с.о} = \frac{1}{\eta_{с\ о}}\,(7 - Q_{гр}\,\eta_{гр} - Q_в\,\eta_в - Q_и\,\eta_и - Q_{осв}\,\eta_{осв} - \\ - Q_S\,\eta_S - Q_D\,\eta_D)$$

Результаты расчета сведены в табл III.3

Как видно из табл III 3, при комбинированном (за счет изменения расхода и температуры теплоносителя) отпуске теплоты можно сократить расход теплоты на отопление на 46% При этом холодильная нагрузка на СКВ в переходный период года значительно сократилась (по сравнению с данными табл. III.2), что позволяет определить установочную мощность системы кондиционирования воздуха не по переходному, а по теплому периоду года и, таким образом, уменьшить капитальные вложения и эксплуатационные затраты на СКВ.

ТАБЛИЦА III.3. ТРЕБУЕМАЯ НАГРУЗКА НА СИСТЕМУ ОТОПЛЕНИЯ $Q^{тр}_{с\ о}$

Месяцы отопительного периода	Нагрузка на систему отопления $Q_{с\ о}$, кВт	Относительный расход теплоносителя, %	Месяцы отопительного периода	Нагрузка на систему отопления $Q_{с\ о}$, кВт	Относительный расход теплоносителя, %
X	1,51	36	II	3,42	81
XI	2,67	64	III	1,52	36
XII	3,89	100	IV	1,19	28
I	4,2	100			

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины / Под ред. Б. Д Кошарского. — Л.: Машиностроение, 1976. — 880 с.

Архипов Г. В., Архипов В. Г. Автоматизированные установки кондиционирования воздуха. — М · Энергия, 1975. — 201 с.

Балашов Е. П., Пузанков Д. В. Микропроцессоры и микропроцессорные системы. — М Радио и связь, 1981. — 328 с.

Баясанов Д. Б., Ионин А. А. Распределительные системы газоснабжения. — М.. Стройиздат, 1977. — 407 с.

Беляев Г. Б., Кузищин В. Ф., Смирнов Н. И. Технические средства автоматизации в теплоэнергетике. — М.: Энергоиздат, 1982. — 320 с.

Богословский В. Н. Строительная теплофизика. — М.: Высшая школа, 1982. — 415 с.

Богословский В. Н. Тепловой режим зданий. — М.: Стройиздат, 1979. — 248 с.

Богословский В. Н., Кокорин О. Я., Петров Л. В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. — М.: Стройиздат, 1984. — 416 с.

Бузников Е. Ф., Роддатис К. Ф. Производственные отопительные котельные. — М.· Энергоатомиздат, 1984. — 248 с.

Гинзбург В. М., Калмаков А. А. Проектирование систем автоматики в строительстве. — Изд. МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1982. — 108 с.

Гуров А. М., Починкин С. М. Автоматизация технологических процессов — М.· Высшая школа, 1979. — 380 с.

Емельянов А. И., Капник О. В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. — М.. Энергоатомиздат, 1983. — 399 с

Ионин А. А. Газоснабжение. — М.· Стройиздат, 1981. — 415 с.

Кондиционеры: Каталог-справочник / ЦНИИТЭстроймаш. — М', 1981. — 314 с.

Костырко К., Околович-Грабовска Б. Измерение и регулирование влажности в помещениях (пер. с польск.). М.: Стройиздат, 1982. — 211 с.

Креслинь А. Я. Основы оптимизации и энергопотребления системами кондиционирования воздуха. Дис. на соиск. уч. степени д-ра техн наук (рукопись), 1982 — 330 с.

Лобачев П. В., Шевелев Ф. А. Расходомеры для систем водоснабжения и канализации. — М.· Стройиздат, 1976. — 304 с.

Меклер В. Я., Раввин Л. С. Автоматическое регулирование санитарно-технических и вентиляционных систем. — М.: Стройиздат, 1982. — 224 с

Нефелов С. В., Давыдов Ю. С. Техника автоматического регулирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Стройиздат, 1984. — 328 с

Новицкий П. В. Электрические измерения неэлектрических величин. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Основы автоматизации управления производством / И. М. Макаров, Н. Н. Евтихиев, Н. Д. Дмитриева и др. — М.: Высшая школа, 1983. — 504 с.

Рубчинский В. М., Шкроботов В. П. Автоматизация установок кондиционирования воздуха.— М.: ЦНИИТЭприборостроения, 1977.— 123 с.

Рымкевич А. А., Халамайзер М. Б. Управление системами кондиционирования воздуха. — М.: Машиностроение, 1977. — 279 с.

Сафонов А. П. Автоматизация систем централизованного теплоснабжения. — М.: Энергия, 1974. — 272 с.

Серов Б. П., Корольков Б. П. Динамика парогенераторов. — М: Энергоиздат, 1981. — 406 с.

Сладков С. П. Автоматизация и телемеханизация газового хозяйства. — М.: Стройиздат, 1977. — 293 с.

Сотников А. Г. Системы кондиционирования воздуха с количественным регулированием. — Л.: Стройиздат, 1976. — 166 с.

Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В. И. Манюк, Я. И. Каплинский, Э. Б. Хиж и др. — М.: Стройиздат, 1977. — 268 с.

Теплоснабжение / А. А. Ионин, В. Н. Братенков, Б. М. Хлыбов, Е. Н. Терлецкая — М.: Стройиздат, 1982.—406 с.

Ужанский В. С., Каплан А. Г., Вольская Л. С. Холодильная автоматика. — М.: Пищевая пром-сть, 1981.—464 с.

Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. — М.: Энергия, 1984. — 422 с.

Чистович С. А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления. — Л.: Стройиздат, 1975. — 158 с.

Юрманов Б. Н. Автоматизация систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. — Л.: Стройиздат, 1976. — 232 с.

Bielecki A, Chorowski B Automatyzacja urzadzen wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Wroclaw, 1974.

Chmielnicki W, Kolodziejczyk L. Automatyzacja i dynamika procesow w inzynierii sanitarnej. Panstwowe wydawnictwo naukowe. Warszawa, 1981.

Dümmel. Messen + Regeln in der Heizungs, Lüftungs und Sanitärtechnik. Berlin. DDR, 1984.

Johnson C. D. Process Control Instrumentation Technology. USA, 1977.

Marcus A. Automatic industrial Controls. USA, 1976.

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматизация систем ТГС и СКМ 324
Автоматизированные системы управления 427
Автоматический контроль 219
— мост 234
— потенциометр 236
— прибор дифференциально-трансформаторный 238
Автоматическое регулирование 81
Агрегатирование и блочно-модульный принцип 283
Агрегатная система средств вычислительной техники 441
Алгоритм регулирования 353

Б

Блок 283
Блокировка аварийная 406
— замещающая 406
— запретительно-разрешающая 405
Быстродействие прибора 224

В

Влажность 253
Внешнее запоминающее устройство 442
Возмущающее воздействие 19
Время измерения 224
— регулирования 142
Вторичный прибор 231, 233

Г

Газоанализаторы емкостные 281
— ионизационные 282
— магнитные 280
— тепловые 280
— электрохимические 278
Гигрометры хлористо-литиевые 256
Гидравлическая регулировка тепловой сетн 395
Гидроавтоматика 299
Графики регулирования 349

Д

Датчики 86, 230,
— генераторные 241
— параметрические 241
Динамические характеристики воздухонагревателя 187
— — звеиа 122
— — парогенератора 198
— — помещения 175
Динамический микроклимат 33
Дискретиое управление 429
Диспетчеризация систем 417
Дистанционное управление 336

З

Задатчик 87
Защита воздухонагревателя 342
— — испарителя 376
— — компрессора 376
Звено 107
— линейное 109
— нелинейное 112
— пропорциональное 124
— устойчивое апериодическое 125

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

— — интегрирующее 125
— — колебательное 125
Зонирование систем отопления вертикальное 61
— — — горизонтальное 61

И

Избыточность кода 312
Измерение влажности 254
— давления 259
— расхода 264
— температуры 243
— теплового излучения 252
— уровня 274
Измерительное преобразование 228
Измерительный преобразователь 229
Импульс 308
Интерфейс 285, 448
Информация 221
Исполнительные устройства (элементы) 129, 293

К

Канал связи 306
Каскадное управление 358
Катарометр 280
Квантование 310
Класс точности 223
Классы тепловлажностных нагрузок 77
Кодирование 310
Коды помехозащищенные 312
— помехонезащищенные 311
Комбинированная система отопления 72
Комплексный коэффициент усиления 122
Контур регулирования 89, 338
Коэффициент усиления 110
Кулонометрический измеритель влажности 258

Л

Линия связи 306
Логическое управление 428
Логометр 232

М

Манометры жидкостные 259
— колокольные 261
— мембранные 262
— поплавковые 261
— пружинные 261
— сильфонные 263
— электрические 264
Метод гигроскопический 255
— измерения 229
— прямого преобразования 231
— точки росы 255
— уравновешивания 231
Механизм исполнительный 284
Микроклимат помещения 28
— — динамический 33
Микропроцессор 90, 350
МикроЭВМ 448
Мнемоническая схема 425
Модуль 284
Модуляция 312

Н

Надежность 224, 289, 335
Неэнтропийный принцип передачи информации 222

О

Обеспечение математическое 445 —

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

— программное 445
Обратная связь 154
— — гибкая 164
— — жесткая 159
— — комбинированная 168
— — отрицательная 155
— — положительная 155
Объект автоматизации 326
— автоматического регулирования 85, 127
— с распределенными параметрами 352
— с сосредоточенными параметрами 352
Оперативное диспетчерское управление 429
— запоминающее устройство 441
Оптимизация управления 336
Ошибка регулирования 142

П

Первичный прибор 230
Передаточная функция 115
Перерегулирование 142
Переходная характеристика 118
Пневмоавтоматика 295
Пневмоника 298
Погрешность абсолютная 223
— вероятная 226
— относительная 223
— приведенная 223
— систематическая 224
— случайная 225
Показатель теплопоглощения 44
— теплоусвоения 36
Помехоустойчивость 306
Постоянное запоминающее устройство 442
Преобразующе - усилительное устройство 87
Проектирование автоматизации — 324
Процессор 441
Психрометр 254
Пульт управления 421
Пьезосорбционный датчик 259

Р

Расходомеры 264
— переменного перепада давления 265
— постоянного перепада давления 268
— тепловые 292
— ультразвуковые 271
— электромагнитные 269
Регулирование СКВ 338
— — количественное 350
— — по температуре точки росы 346
— — по оптимальному режиму 349
Регулирующее воздействие 19
— орган 213
— элемент 128
Регулятор переменной структуры 359
Режим функционирования 334
Резервирование 335, 429
Рефлектометр 253
Ротаметр 268

С

Сигнал 306
Система автоматического контроля 220
Системы автоматического регулирования 81

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

— астатические 105
— замкнутые 88
— несвязанного регулирования 89
— непрерывные 95
— непрямого действия 93
— прерывистые 95
— прямого действия 91
— разомкнутые 88
— релейные 96
— связанного регулирования 89
— статические 103
Система телеуправления и телесигнализации 317
— интенсивности 315
— ТГС и СКМ 13
Снижение энергозатрат в СКВ 361
Статические характеристики вентилятора 212
— — компрессора 212
— — насоса 208
— — помещения 173
— — регулирующих органов 213
Структура иерархическая 334
Схема монтажная 325
— принципиальная 324
— структурная 127
— телеизмерения ближнего действия 315
— — дальнего действия 315
— функциональная 324, 334

Т

Телеизмерение 305
Телемеханика 304
Телесигнализация 305, 317
Телеуправление 305, 317
Тепловая нагрузка на систему 46
Тепловой баланс помещения 46
— режим 34
Теплообмен конвективный 34
— лучистый 34
— струйный 34
Термометры жидкостные 243
— манометрические 246
— механические 243
— сопротивления 247
— термоэлектрические 250
— электроконтактные 243
Термоанемометр 272
Типовые решения автоматизации 370

У

Унификация 285
Управляющий вычислительный комплекс 441
Уровнемеры акустические 276
— гидростатические 275
— поплавковые 274
— электрические 277
Устойчивость САР 130
Устройства оперативного управления 292
— статического преобразования 292

Ф

Фотоэлектрические датчики 253
Функции управляющих вычислительных комплексов 443
Функциональная схема автоматизации 324, 334
— — телемеханической системы 307
Фотоэлектрические датчики 253

Ц

Цена деления шкалы прибора 224

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Централизованные городские системы газоснабжения 17
Центральные тепловые пункты 15

Ч

Частотные характеристики амплитудные 120
— — амплитудно-фазовые 121
— — звена 120
— — фазовые 120
Чувствительность прибора 223

Ш

Шаг квантования 310
Щит управления 418

Э

Экономическая эффективность автоматизации 451
Электролитические датчики влажности 256
Энтальпия 254
Энтропия 221

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Стр

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Раздел I. Системы теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата как объекты автоматизации 13

Глава 1 Управляемая система теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 13
§ 1 1 Централизованные системы теплоснабжения и газоснабжения 13
§ 1 2 Система кондиционирования микроклимата 18

Глава 2 Процессы, формирующие микроклимат помещения 28
§ 2 1 Параметры микроклимата помещений 28
§ 2 2 Тепловой режим помещения 34
§ 2 3 Тепловая нагрузка на системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха 46

Глава 3 Режим работы системы кондиционирования микроклимата в течение года 51
§ 3 1 Годовое изменение параметров наружного климата и тепловой нагрузки на СО, СВ и СКВ 52
§ 3 2 Режим работы центральных систем водяного отопления 56
§ 3 3 Режим работы систем кондиционирования воздуха и приточной вентиляции 65
§ 3 4 Режим работы систем кондиционирования воздуха с минимальным расходом энергии 75

Раздел II. Автоматическое регулирование процессов 8[illegible]
Глава 4 Основы автоматического регулирования процессов 8[illegible]
§ 4 1 Основные понятия Классификация систем автоматического регулирования 8[illegible]
§ 4 2 Системы автоматического регулирования прямого и непрямого действия 91
§ 4 3 Непрерывные и прерывистые системы автоматического регулирования 95
§ 4 4 Статические и астатические системы автоматического регулирования 102

Глава 5 Переходные процессы в системах автоматического регулирования 107
§ 5 1 Типы звеньев и их характеристики 107
§ 5 2 Статические характеристики звеньев 109
§ 5 3 Операционные методы в задачах автоматического регулирования 112
§ 5 4 Переходные и частотные характеристики звеньев 118
§ 5 5 Динамические характеристики звеньев 122
§ 5 6 Структурная схема систем автоматического регулирования 127
§ 5 7 Устойчивость систем автоматического регулирования 130

Глава 6 Качество процессов регулирования 141
§ 6 1 Показатели качества процессов регулирования 141

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Стр.

§ 6.2. Средства улучшения качества процессов регулирования 144
§ 6.3. Последовательное и параллельно-согласное включение корректирующих устройств 145
§ 6.4. Параллельно-встречное включение корректирующих устройств (дополнительные обратные связи) . . . 154
§ 6.5. Комбинированная обратная связь 168
Глава 7. Динамика процессов в основных элементах систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата . 173
§ 7.1. Статические и динамические характеристики помещения 173
§ 7.2. Динамические свойства теплообменных и смесительных аппаратов систем кондиционирования воздуха и вентиляции 183
§ 7.3. Динамические свойства трубопроводов и воздуховодов 193
§ 7.4. Динамика переходных процессов в парогенераторах 199
§ 7.5. Статические характеристики насосных, вентиляторных и компрессорных установок 208
§ 7.6. Статические характеристики регулирующих органов 213
Раздел III. Технические средства автоматизации 219
Глава 8. Автоматический контроль сред в системах теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 219
§ 8.1. Назначение автоматического контроля. Требования к контрольно-измерительным приборам. Погрешности измерений 219
§ 8.2. Вторичные приборы систем автоматического контроля 233
§ 8.3. Первичные преобразователи (датчики) 241
Глава 9. Технические средства электро-, пневмо-, гидроавтоматики 283
§ 9.1. Основные требования к техническим средствам автоматики 283
§ 9.2. Технические средства электроавтоматики 288
§ 9.3. Технические средства пневмо- и гидроавтоматики 295
Глава 10. Основы телемеханики систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 304
§ 10.1. Классификация и назначение систем телемеханики 304
§ 10.2. Основные понятия о преобразовании информации 307
§ 10.3. Системы телеизмерения ближнего и дальнего действия 315
§ 10.4. Системы телеуправления и телесигнализации . . 317
Раздел IV. Автоматизация систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 324
Глава 11. Основы проектирования автоматизации систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата . 324
§ 11.1. Содержание и состав проекта системы автоматизации технологического процесса 324
§ 11.2. Исходные данные для проектирования 325
§ 11.3. Назначение и содержание функциональной схемы 327

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Стр.

Глава 12. Автоматизация систем вентиляции, кондиционирования воздуха и холодильных установок 333
§ 12.1. Основные положения 333
§ 12.2. Автоматизация приточных камер 340
§ 12.3. Анализ годового режима работы систем кондиционирования воздуха и выбор контуров регулирования 346
§ 12.4. Автоматизация процесса регулирования систем кондиционирования воздуха 352
§ 12.5. Современные схемы управления системами кондиционирования воздуха 358
§ 12.6. Автоматизация устройств утилизации выбросной теплоты 361
§ 12.7. Автоматизация автономных кондиционеров . . . 364
§ 12.8. Типовые решения автоматизации центральных неавтономных кондиционеров 370
§ 12.9. Автоматизация СКВ, обеспечивающих энергосберегающую технологию обработки воздуха 373
§ 12.10. Автоматизация холодильных установок . . . 375
Глава 13. Автоматизация систем теплоснабжения . . . 379
§ 13.1. Задачи и принципы автоматизации 379
§ 13.2. Автоматизация теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных 381
§ 13.3. Автоматизация насосных подстанций 387
§ 13.4. Автоматизация узлов горячего водоснабжения . 389
§ 13.5. Влияние неравномерности теплопотребления системой горячего водоснабжения на тепловой режим помещений при комбинированном способе подготовки теплоты на ЦТП 393
§ 13.6. Автоматизация водяных систем отопления . . . 395
§ 13.7. Схемы автоматического регулирования отпуска теплоты на отопление 398
§ 13.8. Автоматизация систем воздушного отопления и воздушных тепловых завес 401
Глава 14. Автоматизация котельных установок 403
§ 14.1. Основные положения 403
§ 14.2. Системы автоматического регулирования процессов в котлах 407
§ 14.3. Автоматика безопасности котлов 411
Глава 15. Автоматизация систем газоснабжения 412
§ 15.1. Автоматизация ГРС (ГРП) 413
§ 15.2. Автоматизация газоиспользующих установок . . 415
Глава 16. Диспетчеризация систем теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 417
§ 16.1. Задачи диспетчерского управления 417
§ 16.2. Щиты и пульты управления 418
§ 16.3. Расположение аппаратуры на щитах и пультах . 423
§ 16.4. Построение мнемонических схем системы управления 425
Раздел V. Управление системами теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 427
Глава 17. Автоматизированные системы управления процес-

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Стр

сами в системах теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 427
§ 17 1 Обобщенная структура управляющих функций АСУ ТП 427
§ 17 2 Характеристика средств измерительной, исполнительной и информационно управляющей части АСУ ТП 433
§ 17 3 Области применения ветвей средств для автоматизации процессов в системах теплогазоснабжения и кондиционирования микроклимата 435
§ 17 4 Основные принципы построения информационно управляющей части АСУ ТП 437
Глава 18 Управляющие вычислительные комплексы в АСУ ТП 441
§ 18 1 Назначение и структура управляющих вычислительных комплексов 441
§ 18 2 Структура программного обеспечения управляющих вычислительных комплексов 444
§ 18 3 Агрегатная система средств вычислительной техники на микромодульной основе АСВТ М 445
§ 18 4 Микропроцессоры и микро ЭВМ 448
§ 18 5 Экономическая эффективность автоматизации 451
Приложения 456
Список литературы 469

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/

Учебник

Андрей Алексеевич Калмаков Юрий Яковлевич Кувшинов
Светлана Сергеевна Романова Сергей Александрович Щелкунов

**АВТОМАТИКА
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
СИСТЕМ
ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ
И ВЕНТИЛЯЦИИ**

Редакция литературы по инженерному оборудованию
Зав редакцией Н В Соболева
Редактор Н А Хаустова

Технический редактор М В Павлова
Корректор Г Г Морозовская
ИБ № 3328

Сдано в набор 01 11 85 Подписано в печать 16 05 86 Т 13431
Формат 84×108/32 Бумага книжно журнальная Гарнитура «Литературная»
Печать высокая Усл печ л 25,2 Усл кр -отт 25,2 Уч изд л 25 29
Тираж 22 000 экз Изд № AI 575 Заказ № 526 Цена 1 р 30 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 2

Электронная библиотека http://tgv.khstu.ru/