

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Под редакцией проф. Л. Н. ПЛУЖНИКОВА

*Допущено
Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся по специальности
«Автоматизация и комплексная механизация
химико-технологических процессов»*



МОСКВА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1984

ББК 32.965+65.9(2)30

A22

УДК 65.011.56(075)

Л. Н. Плужников, А. В. Елин, А. В. Кочеров, А. Б. Кипнис,
Л. И. Пятов, В. Н. Наумов

Рецензенты:

кафедра автоматизации и комплексной механизации химико-технологических процессов Киевского технологического института легкой промышленности (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Ю. А. Скрипник),

д-р техн. наук, проф. В. С. Балакирев (Московский институт химического машиностроения)

Автоматизация технологических процессов легкой промышленности. Учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов»/ Плужников Л. Н., Елин А. В., Кочеров А. В. и др.; Под ред. Л. Н. Плужникова.— М.: Высш. шк., 1984. 368 с., ил.

Авторы указаны на обороте тит. л.

В пер.: 1 р. 20 к.

В пособии излагаются методы построения математических моделей типовых технологических процессов легкой промышленности, основные схемы управления этими процессами, вопросы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами, схемы регулирования промышленных установок основных технологических процессов, а также методика проектирования промышленных систем автоматизации.

А $\frac{2404000000-162}{001(01)-84}$ 128—84

ББК 32.965+65.9(2)30
6Ф6.5+6П9

© Издательство «Высшая школа», 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время легкая промышленность находится на стадии технического перевооружения, ускоренного внедрения новых интенсифицированных технологических процессов, осуществляемых на современном высокопроизводительном оборудовании с использованием средств комплексной механизации и автоматизации труда. Важнейшие подотрасли легкой промышленности — швейная, кожевенная, меховая, обувная, полимерных плечочных материалов и искусственной кожи. Каждая подотрасль объединяет существенно различающиеся производства, однако они связаны между собой и имеют общую машиностроительную базу. К основным видам продукции, выпускаемой предприятиями легкой промышленности, относятся такие товары широкого потребления, как одежда, меховые изделия, обувь, кожаногалантерейные изделия, фарфоровая посуда и др.

Технический прогресс определяется достижениями научных исследований, направленных на совершенствование технологических приемов, применение новых материалов, разработку агрегатированного оборудования с автоматическими устройствами в системе управления. По мере развития отраслевой техники управления роль автоматизации технологических процессов будет возрастать.

В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 гг. и на период до 1990 г. вопросам автоматизации уделяется большое внимание, в частности предусмотрено «развивать производство и обеспечить широкое применение автоматических манипуляторов (промышленных роботов), встроивших систем автоматического управления с использованием микропроцессоров и микро-ЭВМ, создавать автоматизированные цехи и заводы», предусмотрено также «в машиностроении для легкой и пищевой промышленности осуществить разработку и приступить к производству высокоэффективных систем машин и оборудования, обеспечивающих механизацию и автоматизацию технологических процессов...». Отмеченные положения нашли отражение в данном учебном пособии.

В последние годы на предприятиях легкой промышленности разрабатываются и внедряются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), позволяющие на высоком уровне решать задачи оперативного управления производством. Комплексное решение вопросов управления предприятием относится к сфере организационно-экономических систем управления, которые реализуются на основе применения современной вычислительной техники путем построения автоматизированных систем управления предприятиями (АСУП). Будет создана отраслевая автоматизированная система управления (ОАСУ), которая войдет составной частью в общегосударственную автоматизированную систему (ОГАС) сбора и обработки информации для учета, планирования и управления народным хозяйством.

Как показывает практика современного развития науки и тех-

чки, добиться высокой эффективности только за счет внедрения АСУП и ОАСУ не удастся, так как эффективность каждого конкретного производства определяется в значительной степени системой управления технологическими процессами. Поэтому в данном учебном пособии основное внимание уделяется автоматизации типовых технологических процессов. Для сложных технологических процессов, управление которыми требует обработки большого объема исходной информации с помощью ЭВМ, перспективно создание автоматизированных систем управления технологическими процессами. Вопросы построения АСУП, ОАСУ и ОГАС в пособии не рассматриваются, так как эти системы являются предметом изучения других учебных курсов.

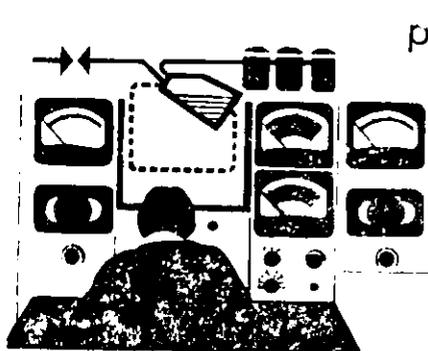
Материал учебного пособия делится на четыре части. В первой части рассматриваются особенности автоматизации производств легкой промышленности и излагаются основные методы построения математических моделей технологических процессов с целью их использования при проектировании автоматических систем управления. Во второй части описаны методы расчета локальных систем автоматического регулирования, наиболее широко применяемые в настоящее время; в третьей части — основы построения АСУ ТП, в четвертой части описаны типовые технологические процессы и промышленные системы их автоматизации. Завершающая глава этой части знакомит с методикой проектирования систем автоматизации и основной технической документацией при проектировании.

Материал пособия соответствует программе учебного курса «Автоматизация технологических процессов отрасли». Предполагается, что читатель знаком с технологическими процессами легкой промышленности, владеет основными методами теории управления и соответствующим математическим аппаратом, имеет представление об основах использования вычислительной техники. Из-за ограниченного объема учебного пособия авторы не смогли охватить все многообразие автоматических систем, применяемых в легкой промышленности.

В написании учебного пособия принимали участие Л. Н. Плужников (гл. 5, 6, 7, 8 и общее редактирование), А. В. Елин (гл. 1, 3, 4, 11, 12), А. В. Кочеров (гл. 2, 10 и совместно с А. В. Елиным § 1.1), А. Б. Кипнис (гл. 13), Л. И. Пятов, В. Н. Наумов (гл. 9).

Авторы выражают благодарность рецензентам книги и просят читателей замечания и пожелания по улучшению содержания учебного пособия направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Автоматизация производств легкой промышленности должна соответствовать современным требованиям к системам управления производственными комплексами, учитывать специфику технологии отрасли и реальные возможности применяемых средств контроля и управления.

Исходя из анализа технологии производств легкой промышленности, в этой части определяются этапы автоматизации и основные задачи развития систем управления технологическими процессами. Рассматриваются также вопросы обоснования экономической целесообразности автоматизации, основные принципы и подходы к построению автоматических систем.

Построение эффективной системы управления технологическим процессом возможно на основе анализа математической модели (рассматривается в главе 2) при использовании современных методов теории управления и оптимизации. Поэтому в данной части учебного пособия наряду с общими вопросами автоматизации технологических процессов рассматриваются методы получения математических моделей объектов управления с учетом специфики легкой промышленности.

В условиях создания агрегатированных комплексов оборудования и интенсификации непрерывно-поточных, дискретных и дискретно-непрерывных технологических процессов важное значение для предприятий приобретает централизация контроля и оперативного управления. При недостаточно широком применении локальной автоматизации централизация управления производством осуществляется путем диспетчеризации.

Однако при высоком уровне автоматизации отдельных операций и процессов возникает необходимость использовать централизованное управление на базе вычислительной техники. Такое управление получило название автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), оно рассматривается в части III.

Совершенствование средств автоматики и расширение их выпуска позволяет своевременно и качественно проводить механизацию и автоматизацию промышленных объектов, что имеет важное значение в ускорении технического прогресса и повышении эффективности общественного производства.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ



Развитие автоматизации технологических процессов легкой промышленности и актуальные научно-технические задачи, стоящие перед специалистами в этой области, определяются как тенденцией совершенствования применяемых и создания новых технических средств автоматики, так и технико-экономическими предпосылками целесообразности автоматизации основных промышленных объектов. В данной главе первоначально рассматриваются современное состояние технологии легкой промышленности и особенности отдельных производств, а затем перспективы автоматизации технологических процессов, при этом показывается, что многие задачи автоматизации для полного их решения требуют поэтапного осуществления системы управления технологическими процессами. В обосновании принимаемого варианта автоматизации центральное место занимает общая методика изучения управляемого объекта, построения системы управления и технической реализации схемы автоматизации. Показано, как по мере развития автоматизации сложных технологических процессов изменяется распределение функций управления между человеком-оператором и автоматическими устройствами.

§ 1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Постановка общей задачи автоматизации производства и задачи функций отдельным подразделениям службы управления должны соответствовать производственной структуре предприятия, учитывать специфику технологии и реальные возможности современных средств автоматического контроля и управления. Производственная структура предприятия определяется направленными связями между отдельными видами оборудования как первичными производственными единицами и между укрупненными производственными единицами: участками, комплексами машин, цехами. Понятие специфики технологии включает в себя вид и параметры сырья, характерные особенности получаемой продукции, способы обрабатывающего воздействия в технологических процессах, компоновку оборудования, стабильность связей входных и выходных характеристик обрабатываемого материала в отдельных объектах и стационарность процессов, свойства непрерывных, дискретных и полупрерывных процессов, агрессивность среды в рабочей зоне, пожаро- и взрывоопасность ее.

На автоматизацию технологических процессов легкой промышленности значительное влияние оказывают такие факторы, как многостадийность обработки материалов и многочисленные перемены при переходе с одного вида оборудования на другой, обычно сложные зависимости качественных показателей обработки от различных режимных параметров, отсутствие приборов измерения характеристик многих видов обрабатываемых материалов, сложные условия для установки устройств управления или регулирования в цехах с оборудованием для выполнения операций жидкостной обработки материалов, например ткани, кожи, меха. Кроме того, многие технологические процессы легкой промышленности еще не подготовлены к автоматизации. К ним относятся многочисленные традиционные процессы, связанные с ручными операциями, например обработка натуральных волокон (пряжение, ткачество), кожи и меха. Главное внимание до сих пор сосредоточивается на совершенствовании орудий труда при сохранении принципа технологических операций. Механические орудия труда прошли длинный путь развития от простейших механизмов, предназначенных для облегчения ручного труда, до современных машин, таких, как швейные и обувные полуавтоматы. Но как бы ни совершенствовались механизмы рабочей машины, механическая технология ограничивает повышение производительности труда даже при полной автоматизации этих производственных процессов.

Технологическими процессами, наиболее перспективными с точки зрения автоматизации, являются интенсифицированные процессы, осуществляемые на высокопроизводительном оборудовании, обычно непрерывного действия. К числу типовых технологических объектов легкой промышленности относятся: валковые машины, каландры и червячные машины производства изделий из полимера в пластическом состоянии; реакторы производства синтетических продуктов для легкой промышленности; приводные устройства и механизмы непрерывной подачи, перемещения (перемотки) и наматывания рулонных (либо нитевидных) материалов при осуществлении процессов вытягивания, дублирования, резания и др.); прессы, предназначенные для формования деталей обуви из пластмассы или сырой резиновой смеси, для горячей вулканизации и крепления низа к следу обувной заготовки, для влажно-тепловой обработки швейных изделий; машины для жидкостных обработок кожи, меха, нитей, ткани; сушильные установки. Самостоятельное значение имеют в качестве объектов автоматизации такие производственные комплексы, как мощные насосные станции, котельные установки и бойлерные, химические станции приготовления рабочих растворов, паст, установки кондиционирования воздуха, обработки и очистки сточных вод либо выбрасываемых газов, выпарные установки.

Рассмотрим классификацию технологических процессов легкой промышленности как объектов управления, установленную по нескольким критериям.

Основной критерий — вид выпускаемой продукции. Здесь различают объекты кожевенного, мехового, обувного, швейного производств, производства полимерных материалов и искусственных кож и т. д. Применяют и более узкую классификацию. Так, кожевенное производство делится на участки подготовки сырья, жидкостные операции обработки (отмочно-зольные, преддубильные, дубильные и красильно-жировальные операции), сушильно-увлажнительные и отделочные операции. В соответствии с этим классифицируются объекты.

Другой критерий — сущность физико-химических процессов, происходящих в объектах. Здесь различают массообменные, тепловые, гидродинамические, химические и механические процессы (объекты). Необходимо отметить, что производственные технологические процессы суть комплексы нескольких названных выше процессов. Например, жидкостные операции обработки кожи, меха являются комплексными гидродинамическими, массообменными и химическими процессами. Сушка материалов является комплексным тепловым и массообменным процессом. Однако при анализе технологического процесса как объекта управления заведомо упрощают модель объекта, отражая в ней лишь некоторый, существенный (приоритетный) процесс. Это удобно при анализе объекта, синтезе системы управления, но надо помнить о том, что модель объекта — это всегда лишь упрощенное представление технологического процесса.

Рассмотрим несколько примеров технологических процессов легкой промышленности с целью выявления их особенностей как объектов управления. При рассмотрении технологических процессов будем анализировать сущность процесса и его назначение, характеристику технологического оборудования, управляемые входные воздействия, выходные переменные и характеристику возмущений, обеспеченность объекта методами (приборами) автоматического измерения переменных.

Процессы хромового дубления в кожевенном производстве. Дубление (упрощенно) состоит в гидродинамическом проникновении дубящих соединений в структуру коллагена по капиллярам, диффузии этих соединений к центрам непосредственного реагирования в коллагене (массообменный процесс) с последующим химическим связыванием дубящих веществ и коллагена. В результате процесса дубления происходит упрочнение пространственной структуры коллагена за счет образования дубящими веществами поперечных связей между молекулярными цепями белковой структуры коллагена. Прочность этих связей зависит от природы дубящих соединений и режима дубления. Исследованиями установлено, что для различных дубящих соединений и различного типа кож существуют различные оптимальные (с точки зрения качества продукции) сочетания длительности процесса, начальных концентраций рабочих растворов и других переменных, которые в совокупности составляют технологический режим дубления.

Кожи дубят в подвесных барабанах (основной тип оборудова-

ния), шнековых аппаратах и других подобных агрегатах. Среднее время хромового дубления одной партии сырья массой 1400 кг (кожи для верха обуви) в барабане БХБ объемом 6,0 м³ составляет 6—8 ч.

Барабан вращается от специального электропривода с угловой скоростью 1,0—1,5 рад/с (для различных приводов). Предусмотрена возможность изменения направления вращения (реверсирование) барабана в ходе процесса дубления. Для загрузки и выгрузки полуфабриката на боковой поверхности барабана вырезан прямоугольный люк, закрываемый съемной деревянной крышкой.

Дубильные барабаны не обеспечены техническими средствами автоматизации (измерительными приборами и исполнительными устройствами). Процессом дубления управляют по жесткой временной программе, контролируют только начальный состав рабочего дубильного раствора. Согласно методике дубления [1], через определенные интервалы времени после начала процесса в барабан вводят различные добавки. В соответствии с этой методикой основными контролируемыми входными воздействиями являются: X_1 — жидкостный коэффициент (ЖК), т. е. отношение объема рабочего раствора к массе загруженного полуфабриката, л/кг; X_2 — основность первого дубителя, заливаемого в начале процесса дубления, %; X_3 — концентрация первого дубителя, г/л; X_4 — основность второго дубителя, заливаемого в барабан в середине процесса дубления, %; X_5 — концентрация второго дубителя, г/л; X_6 — продолжительность процесса дубления, ч; X_7 — угловая скорость вращения, рад/с; X_8 — температура раствора, °С.

Основные возмущения: неоднородность сырья (голя) и химикатов (хромовый экстракт, сульфид натрия и т. п.). Из характеристик сырья самая важная — массовая плотность V_1 (по площади шкуры), этот показатель в настоящее время не контролируется. Характеристики химикатов контролируют лабораторными методами контроля, обозначим их через Z_i .

Основные выходные переменные: Y_1 — температура сваривания, °С; Y_2 — содержание оксида хрома в коже, %; Y_3 — содержание оксида хрома в рабочем растворе, г/л; Y_4 — pH раствора; Y_5 — pH кожи (по срезу). Кроме этих количественных объективных показателей имеется ряд качественных показателей, определяемых субъективно. Один из них — глубина прокраса (продуба) голя, определяемая как интенсивность изменения цвета структуры голя по толщине.

Как показали исследования [2], колебания характеристик сырья при одних и тех же начальных условиях и продолжительности дубления приводят к существенно различному качеству полуфабриката. Это доказывает необходимость обеспечения барабанов средствами автоматизации (приборами и исполнительными устройствами) процесса дубления и разработки работоспособных математических моделей для анализа возможностей автоматизированного управления процессом дубления. На рис. 1.1 представлена формализованная схема процесса дубления в барабане как объекта управления.

Отметим особенности процесса дублирования в барабане как объекта управления:

процесс циклический, характеризуется большим числом входных воздействий и выходных переменных, т. е. является многомерным объектом;

процесс в настоящее время практически не обеспечен методами автоматического измерения переменных и техническими средствами автоматизации.

Процесс нанесения полимерного покрытия на основу. Этот процесс является одним из основных при производстве рулонных искусственных кож. Процесс нанесения покрытия производится на различном технологическом оборудовании; на рис. 1.2 показано ракельное наносное устройство.

Раствор полимера I в виде композиции (жидкость) заполняет емкость над проходящей по опорному барабану основой (ткань, пленка), уровень раствора полимера H , вязкость η . Основа 4 толщиной $b_{ос}$, огибая барабан 3 , проходит под раклей 2 со скоростью v и через зазор δ захватывает некоторое количество раствора полимера, которое образует покрытие толщиной $b_{п}$.

Основные входные управляемые воздействия: 1) зазор δ ; (X_1); 2) уровень раствора полимера H ; (X_2); 3) скорость движения основы v ; (X_3); 4) вязкость полимера η ; (X_4).

Основные контролируемые неуправляемые воздействия: 1) толщина основы $b_{ос}$; (Z_1); 2) характеристика полимера (сырье) $Z_{п}$.

Основная выходная переменная — толщина покрытия $b_{п}$; (Y).

В настоящее время ракельное наносное устройство обеспечивают измерительными преобразователями для контроля H ; (X_2), v ; (X_3), толщины основы $b_{ос}$; (Z_1) и покрытия $b_{п}$; (Y) — радионуклидным дифференциальным толщиномером. Вязкость η ; (X_4) контролируется лабораторными методами, возможно применение автоматических вискозиметров. Характеристики полимера определяют лабораторными методами.

Согласно технологическому режиму величины δ ; (X_1), v ; (X_3) и η ; (X_4) должны поддерживаться постоянными, следовательно, величиной $b_{п}$; (Y) можно управлять в основном за счет H ; (X_2).

Отметим особенности процесса нанесения покрытия в ракельном наносном узле:

процесс непрерывный, характеризуется высокой интенсивностью, небольшим числом входных воздействий и одной выходной переменной; в связи со случайным характером изменения толщины основы $b_{ос}$ толщина покрытия $b_{п}$ есть также случайная функция по длине рулона.

Процесс вулканизации резиновых изделий. Основное оборудование для проведения этого процесса — этажные вулканизационные прессы. Заготовки сырой резиновой смеси помещают в пресс-формы, размещенные между нагревательными плитами прессы, расположенными одна под другой в несколько этажей.

Вулканизация резиновой смеси осуществляется путем нагревания ее до температуры 160—180°С и выдержки в течение заданного

времени под давлением. Основные входные управляемые воздействия: X_1 — временной регламент процесса вулканизации; X_2 — расход тепловой энергии (пар или электроэнергия); X_3 — давление в гидроцилиндре.

Величина X_1 управляется от командного аппарата по жесткой программе, величины X_2 , X_3 контролируются автоматическими измерительными приборами. Возмущения — неконтролируемый отвод тепла от пресс-формы, осуществляется в основном за счет пе-

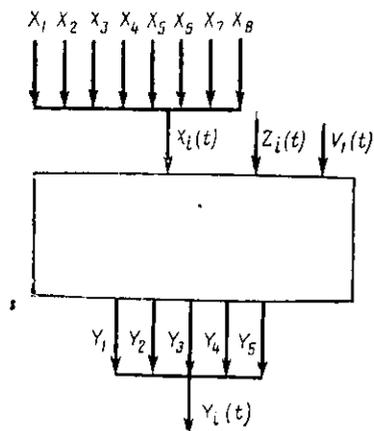


Рис. 1.1

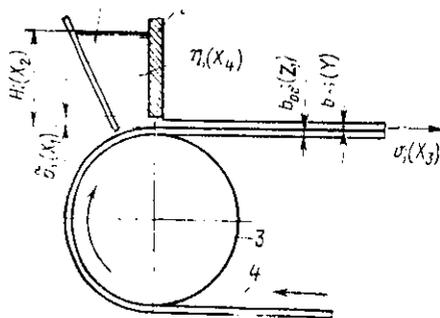


Рис. 1.2

риодического открытия и закрытия пресса (для выгрузки и загрузки), в результате чего средняя температура пресс-формы может существенно измениться по величине. Обозначим неконтролируемый отвод тепла от пресс-формы через V_1 .

Выходные переменные процесса: Y_1 — комплексный показатель физико-механических свойств резины (определяется лабораторными методами); Y_2 — средняя температура пресс-форм. Величина Y_1 не пригодна для оперативного управления процессом вулканизации, так как определяется после окончания процесса. Величина Y_2 по этой причине является основной выходной переменной процесса. В связи с косвенным характером зависимости Y_2 от Y_1 требуется периодически осуществлять выборочный контроль Y_1 и проверять его корреляцию с Y_2 .

Особенности процесса вулканизации: 1) процесс периодический, характеризуется тремя управляемыми входными воздействиями и двумя выходными переменными; 2) процесс характеризуется высокой интенсивностью, в связи с этим зона допуска на среднюю температуру пресс-формы относительно невелика; 3) оборудование (пресс) в достаточной мере обеспечено измерительными приборами и исполнительными устройствами.

В настоящее время в различных подотраслях легкой промышленности можно выделить новые перспективные для автоматизации

прогрессивные технологические процессы и объекты. Важнейшими принципами прогрессивной технологии являются: применение оборудования непрерывного осуществления технологических процессов (вместо дискретных, прерывных); комплексное использование сырья и материалов, что позволяет устранить производственные отходы путем регенерации отработанных веществ для их повторного применения и полного использования побочных продуктов производства.

Одно из главных условий интенсификации промышленного производства и создания новой передовой технологии — электрификация производственных процессов, сопровождающаяся применением электродвигателей для выполнения силовых операций и использованием электроэнергии непосредственно в технологическом процессе. Важными достоинствами таких новых прогрессивных технологических процессов, как электролиз, электронагрев, сварка, плавка, обработка ультразвуком, токами высокой частоты и т. д., являются интенсификация промышленного производства, возможность перехода от циклической обработки к непрерывной, поточной.

Примером прогрессивной технологии, применяемой в различных отраслях промышленности, является окраска изделий, перемещаемых на транспортере в электростатическом поле высокой напряженности. Электрическое поле создается источником постоянного тока с напряжением до 140 кВ. Распылитель лакокрасочного материала подключается к отрицательному электроду источника, а окрашиваемое изделие — к положительному. Метод основан на движении частиц лакокрасочного материала, получивших отрицательный заряд, от распылителя к изделию. Окрашиваемая поверхность изделия покрывается ровным слоем без подтеков. Этот метод по сравнению с пневматическим методом окраски обеспечивает значительное сокращение потерь лакокрасочного материала (осаждение краски на изделие составляет 90% и более, расход краски уменьшается на 30—70%). Кроме того, внедрение этого метода позволяет полностью механизировать и автоматизировать процесс окраски изделий, а также значительно улучшить санитарно-гигиенические условия труда. В электрическом поле возможно окрашивание изделий из металла, резины, стекла, древесины и т. д.

Другим примером перспективного технологического процесса может служить газолазерный раскрой в швейной, обувной и кожгалантерейной подотраслях легкой промышленности. В этом случае используется принципиально новый режущий инструмент — луч лазера.

Важнейшее направление совершенствования производств легкой промышленности — распространение синтетических материалов и новых методов химической технологии. В текущем десятилетии предполагается создание высокопроизводительных агрегатов для производства клееных нетканых материалов, включая объемные. Будут разработаны агрегаты для получения нетканых материалов на основе холстов, образуемых непосредственно из полимерного сырья, а также установки для изготовления формованной одежды

и ее деталей непосредственно из полимерных материалов, волокон, растворов (минуя процессы изготовления тканей, их раскроя, пошива).

Открывается перспектива изготовления деталей обуви непосредственно из нетканых текстильных материалов. Будут созданы комплекты оборудования для изготовления обуви из полимерных материалов непосредственно на колодке, кожгалантерейных изделий — на специальных формах. Для автоматизации технологических процессов на новой технической основе важно дальнейшее совершенствование поточных линий для изготовления обуви с применением клеевого и литьевого методов крепления низа, а также метода горячей вулканизации.

Сочетание синтетических материалов и методов электрификации (помимо электропривода) технологических процессов открывает перспективы создания оборудования для новых способов соединения деталей швейных изделий путем сварки деталей с помощью токов высокой частоты, ультразвука, термоконтактным и другими методами.

Учитывая перспективы развития автоматизации технологических процессов, важно отметить такие направления совершенствования оборудования, как создание машин проходного типа для жидкостных операций обработки кож и меха. В настоящее время в швейном производстве на долю вспомогательных процессов приходится до 85% оперативного времени, поэтому совершенствуются широко применяемые петельные и пуговичные полуавтоматы, агрегаты и полуавтоматы для обработки по контуру воротников, манжет, клапанов карманов, автоматы для заготовки и настрачивания накладных карманов и т. п. Необходимость в комплексной механизации и автоматизации процессов изготовления отдельных видов одежды (например, мужских сорочек) обусловили создание ряда автоматических устройств, обеспечивающих выполнение таких операций, как обрезка верхних и нижних ниток в конце строчки, останов машин с фиксированным (верхним или нижним) положением иглы, сигнализация обрыва любой из ниток и пр. Для обработки деталей по контуру применяются швейные машины с числовым программным управлением (ЧПУ), у которых перемещение рабочих органов определяется заданной программой, и следящие системы, у которых положение рабочего органа автоматически определяется по положению следящего элемента, устанавливаемого по кромке либо изделия, либо шаблона. ЧПУ также успешно применяется в вышивальных полуавтоматах. Высокая производительность такого автоматизированного оборудования достигается в результате концентрации технологических операций на одной машине-агрегате.

Автоматизация сложных объектов, характерных для легкой промышленности, развивается путем последовательного совершенствования системы управления по мере более тщательного изучения динамики управляемого объекта и расширения возможностей современных технических средств автоматизации.

§ 1.2. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ АВТОМАТИЗАЦИИ

В наиболее общем определении автоматизация технологического процесса (оборудования) означает применение автоматических устройств и систем для выполнения функций управления этим процессом. Автоматизация действующего оборудования представляет собой внедрение технических средств, освобождающих человека от непосредственного участия в технологическом процессе с передачей выполняемых им функций автоматическим устройством. При этом в отличие от средств механизации, управляемых непосредственно рабочим, автоматические устройства самостоятельно выполняют функции управления исполнительными органами производственной машины, а участие рабочего-оператора в управлении технологическим процессом в результате автоматизации последнего становится опосредствованным.

Объективные причины, вызывающие необходимость применения автоматических устройств как самостоятельных функциональных блоков в схеме производственной машины или агрегата, объясняются потребностями: 1) получать информацию, необходимую для качественной и количественной оценки работы оборудования; 2) обеспечивать заданные пусковые и остановочные режимы; 3) предупреждать возникновение критических и аварийных ситуаций; 4) поддерживать заданные значения технологических переменных и режимных параметров, определяющих нормальное функционирование оборудования при действии случайных возмущений и внешних управляющих команд (задание может быть постоянным, изменяться во времени по определенной программе либо зависеть от отклонения других переменных); 5) оптимизировать ход технологического процесса с целью повышения его эффективности при непрерывно изменяющихся внешних условиях и внутренней структуры динамической модели управляемого объекта; 6) улучшать условия труда людей с изменением содержания этого труда, когда физические усилия передаются двигателям, а операции, требующие умственных напряжений, передаются устройствам системы управления.

В связи с тем что практическое осуществление автоматизации может быть сопряжено со значительными трудностями и может оказаться неприемлемым по современному состоянию техники, часто возникает необходимость предварительного рассмотрения предпосылок экономической целесообразности внедрения автоматических устройств. Целесообразность автоматизации технологического процесса выявляется исходя из экономических показателей, предварительно оцениваемых с учетом таких факторов, как: 1) степень механизации рассматриваемого процесса и возможность перехода на полностью механизированную технологию; 2) однородность сырья, стабильность источников энергии и материальных потоков, неизменность требований к режимам обработки материалов (деталей, изделий); 3) наличие и технические характеристики приборов, позволяющих осуществлять качественный анализ сырья, измерение

режимных параметров, контроль эффективности обрабатываемого воздействия на материал; 4) технические возможности осуществления управляющих воздействий и установки исполнительных механизмов; 5) возможность приобретения или изготовления в условиях предприятия автоматических регуляторов, предназначенных для поддержания заданных значений технологических и режимных параметров; 6) потребность в вычислительных, логических и запоминающих устройствах; 7) ориентировочная стоимость дополнительных механизмов и устройств, устанавливаемых в связи с автоматизацией (это, например, накопители, средства транспортировки и др.).

Автоматизация технологических процессов ведет к росту объема производства, уменьшению численности основных производственных рабочих, повышению производительности труда и снижению удельного расхода заработной платы на единицу продукции. Однако внедрение системы управления с автоматическими устройствами приводит к увеличению стоимости основных фондов и, следовательно, к дополнительным затратам на амортизацию, а также на текущий ремонт и обслуживание технических средств системы. При этом может возникнуть необходимость введения дополнительного обслуживающего персонала либо замсна имеющегося более квалифицированным. Годовой экономический эффект определяется по разности затрат сравниваемых вариантов с учетом экономии, получаемой по совокупности учитываемых факторов. В методиках расчета экономической эффективности от автоматизации принимается во внимание улучшение качества получаемой продукции и влияние автоматизации на сопряженные процессы.

Интенсификация технологических процессов и развитие техники вызывают необходимость применения новых способов и технических средств управления. В настоящее время вычислительная техника, применяемая в системах управления, позволяет охватить и перерабатывать в темпе технологического процесса значительный объем информации, что оказывает влияние на характер всей проводимой автоматизации технологических процессов предприятия и прежде всего при решении задач управления технологическими комплексами и группами машин, связанных между собой общими источниками энергии и материальными потоками.

Автоматизация отдельных технологических процессов является составной частью мероприятий по интенсификации работы промышленного предприятия отдельной отрасли и народного хозяйства в целом.

§ 1.3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

При автоматизации технологических процессов общую систему управления производством целесообразно строить путем последовательного объединения систем управления отдельными технологическими процессами, максимально удовлетворяя требованиям уни-

версальности, надежности и рационального использования новейших методов построения автоматических систем и технических средств. Поэтапная автоматизация предполагает получение наибольшей эффективности от внедрения автоматических устройств при небольших одновременных затратах, обращенных на самые перспективные участки технологического процесса.

Решение проблемы автоматизации технологических процессов упрощается путем распределения общей задачи управления по уровням иерархии подчиненности отдельных частей управляющей системы.

На нижней ступени располагаются локальные системы управления и соответствующие типовые технологические процессы, которые протекают в аппаратуре определенного класса и являются одновременно типовыми объектами управления. Основные функции управления на этой ступени определяются необходимостью обеспечения высокопроизводительной и безаварийной работы технологического оборудования.

Система управления технологическим процессом включает в себя технические средства локальной автоматизации, т. е.:

средства механизации, дополняющие автоматические устройства и предназначенные для местного или дистанционного ручного управления силовыми устройствами;

средства автоматического контроля, которые выполняют функции регистрации контролируемых величин процесса, сигнализации о достижении предельных значений выбранных величин, автоматической защиты, блокировки (т. е. фиксации рабочего положения элементов при изменении этого положения в результате управляющего воздействия), автоматического пуска и останова оборудования, автоматического учета выработки;

устройства логического управления отдельными исполнительными механизмами позиционного действия или их небольшими группами с осуществлением функций контроля предельных отклонений контролируемых величин, а также защиты и блокировки сложного технологического процесса;

устройства автоматического управления либо по задающему воздействию, либо по возмущению, действующие по разомкнутой цепи преобразования сигнала и формирования управляющего воздействия на объект;

автоматические регуляторы (автоматические системы регулирования), обеспечивающие поддержание заданного значения регулируемой переменной процесса путем формирования управляющего воздействия по отклонению этой переменной от заданного значения;

оптимизаторы (системы оптимизации), автоматически определяющие и поддерживающие оптимальный (в определенном смысле) режим протекания технологического процесса.

В настоящее время достижение полной автоматизации технологических процессов на нижней ступени управления является

первоочередной задачей в решении проблемы автоматизации производства во многих отраслях промышленности.

На более высокой ступени располагаются системы управления такими крупными технологическими процессами, которые характеризуются большим объемом перерабатываемой информации и не могут управляться автоматическими устройствами без участия человека. В этом случае для обработки информации применяют ЭВМ, а функции по управлению распределяют между человеком-оператором и управляющей вычислительной машиной. Эта ступень управления представляет собой АСУ ТП. Она включает в себя в качестве подчиненных системы управления нижних ступеней. Внедрение ЭВМ в систему управления расширяет возможности осуществления сложных алгоритмов управления при большом числе переменных величин, характеризующих ход технологического процесса. Участие человека в сложной системе оперативного управления обеспечивает высокую эффективность последней, позволяет решить проблему надежности, устранить трудности, возникающие из-за неполноты сведений о характере технологического процесса.

Общая методика автоматизации технологических процессов. Методика состоит из трех частей исследования, которое проводится для обоснованного выбора принимаемого варианта технического осуществления автоматизации: 1) изучение свойств объекта управления для создания модели процесса; 2) выявление наиболее целесообразных способов управления; 3) техническое осуществление намеченной схемы автоматизации. Рассмотрим содержание каждой части.

Математическая модель технологического процесса создается на основе анализа физических или физико-химических закономерностей управляемого процесса с учетом размещения оборудования. Это проводится с целью разделения его на отдельные типовые элементарные составляющие, формулирования задач управления и определения динамических характеристик как отдельных частей, так и всего процесса в целом при различных возмущениях и управляющих воздействиях. Центральное место в этой работе занимает математическое описание управляемого процесса, т. е. составление модели процесса исходя из целевой направленности и особенностей задачи управления (см. об этом в гл. 2).

Разработка модели завершается составлением структурной схемы изучаемой динамической системы. Рационально составленная структурная схема технологического процесса позволяет выявить последовательность нарушения нормального хода процесса от разных причин, дать оценку допустимых отклонений контролируемых переменных, определить целесообразные варианты построения системы управления и принципы автоматизации этого технологического процесса при учете связей его с различными другими процессами и подразделениями служб предприятия.

Целесообразные способы управления определяются на основе анализа модели управляемого процесса с учетом характера возмущающих воздействий в условиях заданного конкретного производ-

ства. Составные части системы управления сначала представляют в виде блочной схемы, а затем прорабатывают с целью определения необходимых динамических характеристик отдельных функциональных блоков и параметров их настройки. Некоторые функции по управлению выполняются независимо друг от друга, а обозначающие их блоки в схеме управления располагаются параллельно. Это могут быть функции контроля и учета, регулирования величин, не имеющих взаимного влияния. Однако многие функции должны выполняться в установленной последовательности, поэтому обычно структура системы управления представляется в виде иерархии из нескольких уровней (ступеней или ярусов). Эти уровни отражают определенные этапы исполнения управляющих воздействий, передаваемых сверху вниз, и формирования сигналов исходной информации, передаваемой снизу вверх. Более подробно содержание этих уровней описывается в § 13.3.

Поиск рациональной схемы управления сложным объектом автоматизации сводится к решению задачи структурного синтеза, заключающейся в выборе принципа автоматизации, типа, структуры и технических характеристик управляющего устройства. Иногда задача сужается, и при заданной схеме необходимо выбрать лишь параметры управляющего устройства согласно определенным требованиям, предъявляемым в связи с особенностями технологического процесса. Многие варианты схем построения системы управления могут давать удовлетворительные результаты. Правильность назначения и сочетания всех элементов в единой системе управления определяется такими показателями, как возможность модернизации структуры при изменении условий работы и обеспечение работоспособности при выходе из работы одного или нескольких функциональных элементов.

Количество автоматизированных операций по управлению технологическим процессом определяет объем автоматизации. В автоматической системе управления технологическим процессом все операции по управлению выполняются с помощью автоматических устройств. Совершенство средств автоматизации с точки зрения качественных характеристик преобразования исходной информации в сигналы управления при осуществлении заданных функций определяет уровень автоматизации.

Разработанная система управления автоматизированным технологическим процессом представляется функциональной схемой системы управления или принципиальной схемой автоматизации. Функциональная схема отражает структуру и уровень автоматизации технологического процесса, т. е. оснащение его приборами и средствами автоматизации, организацию пунктов контроля, защиты и управления, применение средств сбора, обработки и передачи информации и др.

Техническая реализация намеченной схемы автоматизации и проектирование автоматических систем выполняются на основе инженерных расчетов наиболее простого надежного и эффективного

конструктивного воплощения выбранного способа контроля и управления.

При автоматизации промышленных объектов конкретного производства стремятся ограничить номенклатуру используемых технических средств, которые выбирают прежде всего из числа стандартных и специализированных элементов, эксплуатационные характеристики которых апробированы практикой. Многообразие требований, предъявляемых к автоматическим системам, порождает многообразие конструктивных исполнений элементов, необходимых для автоматизации технологических процессов.

Можно назвать следующие операции, выполняемые элементами автоматики: 1) получение сигнала информации; 2) усиление (преобразование) входного сигнала; 3) сравнение уровней сигналов; 4) передача контрольной и командной информации; 5) исполнение командной информации; 6) индикация контрольной информации; 7) вычисление по дискретным значениям исходных сигналов; 8) запоминание значений сигнала в заданные моменты времени; 9) распределение входного сигнала по отдельным цепям его передачи (переключение каналов связи); 10) преобразование входных сигналов в соответствии с функциями логики.

Проектирование автоматических систем в той или иной отрасли промышленности обычно ориентируется на использование определенных типов функциональных блоков, объединяющих несколько элементов и наиболее полно удовлетворяющих комплексу общетехнических и специальных (технологических) требований.

Элементы и блоки широкого назначения относятся к общепромышленным техническим средствам автоматизации. Важным направлением развития этих средств автоматики является Государственная система приборов и средств автоматизации (ГСП). Об особенностях этого направления автоматизации подробнее сказано в § 1.4.

Специальные (отраслевые) элементы и блоки автоматики предназначены для использования на оборудовании определенного класса, на конкретных технологических объектах отрасли. Важным требованием, предъявляемым к этим устройствам автоматики, является универсальность, т. е. возможность применения в различных условиях эксплуатации и для широкого ряда однотипных машин предприятия.

Основой для применения одного и того же прибора или регулятора в различных автоматических системах с разными датчиками служит идентичность параметров входного электрического сигнала. Например, три основных типа датчиков позволяют измерять и преобразовывать практически любой технологический параметр в электрический сигнал, подаваемый на вход измерительного прибора или регулятора. Давление, перепад давления, уровень и механическое перемещение воспринимаются датчиками перемещения. Датчик напряжения (э. д. с.) позволяет измерять такие переменные величины, как температура (термопара), скорость (тахогенератор) и рН (рН-метр). Датчики с выходным сигналом сопротивления

используют зависимость сопротивления от изменения регулируемой величины. Такого рода датчики позволяют измерять температуру (термометр сопротивления, терморезистор), вес (тензометрическая нагруженная ячейка), световой поток (фоторезистор), положение или угол (регулируемый потенциометр). Универсальное регулирующее устройство допускает подключение различных измерительных устройств и предназначено для работы с разными типами исполнительных устройств. Универсальное исполнительное устройство может быть использовано в автоматических системах управления различного назначения.

Технологические объекты легкой промышленности имеют специфические особенности, обусловленные характеристиками обрабатываемых материалов, режимными требованиями технологии и часто сложными условиями эксплуатации оборудования (агрессивность среды, запыленность окружающего воздуха, пожароопасность), поэтому при автоматизации этих объектов наряду с широким использованием технических средств общепромышленного назначения важное место отводится разработке и применению специальных средств автоматизации: датчиков, регулирующих и исполнительных устройств. К числу этих средств относятся датчики температуры вращающихся валов и барабанов, движущейся полимерной пленки, датчики влажности обрабатываемых материалов (ткани, кожи, меха и пр.), датчики концентрации рабочих растворов, регулирующие устройства с нестандартными законами регулирования, исполнительные устройства управления скоростью вращения вала приводного двигателя, машины для измерения площади кож, меховых шкур, лекал швейного производства и других плоских фигур. Оснащение отрасли специальными средствами автоматизации оказывает решающее влияние на уровень автоматизации технологических процессов. Создание специальных автоматических устройств, сочетание их с общепромышленными приборами и внедрение совершенных систем управления технологическими процессами — актуальная задача в области автоматизации производств легкой промышленности.

Рассмотрим основные варианты построения одноконтурных автоматических систем регулирования (АСР). В зависимости от вида совмещения регулирующего устройства и средств автоматического контроля применяют три варианта построения одноконтурных АСР, блок-схемы которых показаны на рис. 1.3. На этом рисунке *ОР* — объект регулирования, *Д* — датчик, *ИУ* — исполнительное устройство, *ИП* — измерительный прибор, *РУ* — регулирующее устройство, *ПИ* — преобразователь измерительный, *СЦК* — сигнал централизованного контроля.

АСР приборного типа показана на рис. 1.3, а. В этом случае измерительный прибор снабжается кроме основных функциональных элементов устройствами пропорционального преобразования показаний прибора в сигналы, передаваемые в схемы автоматических систем различного назначения, в том числе и в АСР. Главная особенность системы приборного типа заключается в том, что нару-

шение работоспособности измерительного прибора приводит к выходу из работы всех автоматических устройств системы управления, которые получают сигналы информации от этого прибора.

АСР аппаратного типа (рис. 1.3, б) имеет параллельные каналы получения и передачи сигналов контролируемой и регулируемой величины от двух близко расположенных датчиков, которые могут быть выполнены в одном защитном корпусе. В этом случае надежность

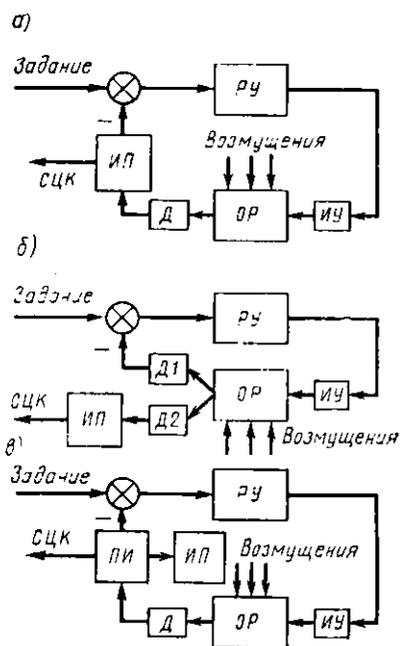


Рис. 1.3

АСР не зависит от надежности средств автоматического контроля. Кроме того, при нарушении работоспособности одной из систем контроля или регулирования ее функции частично выполняются другой системой и обслуживающим персоналом без останова технологического процесса. Таким образом, обе автоматические системы существенно дополняют друг друга как с точки зрения удобства проверки их работы, так и при исправлении в случае выхода из строя одной из них. Однако получение совокупности сигналов одной и той же величины с помощью нескольких датчиков может рассматриваться как недостаток, особенно при большом числе этих сигналов.

На рис. 1.3, в показана блок-схема АСР с использованием сигнала регулируемой величины, получаемого от измерительного преобразователя ПИ сигнала датчика. Измерительный преобразователь имеет несколько выходов для передачи сигналов этой величины к различным автоматическим устройствам, в частности к измерительному прибору. При этом выходные сигналы преобразователя должны быть унифицированы для достижения наибольшей универсальности технических средств получения информации и возможности применения различных типов вторичной аппаратуры. Унификация сигналов необходима во всех вариантах построения АСР, но применение дополнительного элемента — измерительного преобразователя — придает унификации особую важность в связи с необходимостью получения преимущества от применения измерительного преобразователя. Цепь измерительного преобразователя с датчиком должна быть достаточно надежной, чтобы могли быть обеспечены указанные достоинства рассмотренного варианта построения АСР.

Особое место в практике автоматизации технологических процессов занимают автоматические системы многоканального регу-

лирования. Многоканальное регулирование предполагает многократное использование одного регулирующего устройства, которое последовательно включается в цепь каждого датчика и соответствующего исполнительного устройства (т. е. имеется в виду временной способ разделения каналов). Практическая целесообразность применения такой системы регулирования определяется использованием общего на все каналы сложного и дорогостоящего функционального блока регулятора, когда изменение регулируемых величин происходит достаточно медленно и периодическое отключение каждого канала на небольшой интервал времени оказывает незначительное влияние на процесс регулирования.

Многоканальное регулирование одной и той же переменной технологических процессов называется многоточечным регулированием. Многоточечное регулирование наиболее выгодно применять при автоматизации многоместных машин, имеющих в легкой промышленности, например, при производстве нитей из синтетических волокон, а также вулканизационных процессов обувного производства. Более подробно этапы проектирования технических средств автоматизации и оформление соответствующей документации рассматриваются в гл. 13.

Распределение функций оперативного управления сложным технологическим процессом между человеком-оператором и автоматическими устройствами. В результате автоматизации технологического процесса участие человека в системе управления приобретает опосредствованный характер. При этом возникает проблема, относящаяся к области инженерной психологии, — определение рациональной степени автоматизации и оптимальное распределение функций оперативного управления сложным технологическим объектом между человеком-оператором и техническими средствами. В процессе управления следует рассматривать человека как составную часть динамической системы управления. Его производственная деятельность может быть определена инструкцией, задающей поведение в различных возможных ситуациях, с решением технических вопросов: сбор и обработка информации, порядок принятия решений, функции управления. Особенно важно правильно определить функции оператора при централизации управления сложным объектом и при применении ЭВМ. Человек в АСУ ТП выступает в роли наиболее ответственного управляющего звена, им осуществляется контроль за работой всех элементов системы и связь их в единое целое.

Совокупность психофизиологических особенностей человека наряду со специальными знаниями и умением, относящимися к данной трудовой деятельности, определяют его профессиональную пригодность. При этом учитывается скорость выбора необходимых показаний приборов, сохранение устойчивой работоспособности в определенных условиях, некоторые черты характера и свойства мышления. При решении задачи распределения функций управления целесообразно иметь в виду различные возможности их выполнения человеком и автоматическими устройствами.

Технические средства превосходят человека: 1) по физическим характеристикам (быстродействие, точность и пр.); 2) по надежности работы при выполнении повторяющихся стереотипных действий; 3) по способности выполнять одновременно несколько различных функций; 4) по возможности хранения информации в сжатой форме и отсутствию влияния ненужной информации и т. д. Если рассматриваемая функция по управлению осуществляется различными способами в зависимости от конкретной ситуации, то человек обычно имеет существенные преимущества перед техническими средствами автоматизации. Достоинства человека как элемента системы управления проявляются: 1) в способности реагировать на неожиданные события и непредвиденные ситуации; 2) в осуществлении гибких операций управления и различных способов действия; 3) в хранении большого количества информационных сведений, совершенствующихся по мере обучения и накопления опыта; 4) в умении отбирать, систематизировать полезные сведения из случайных данных и предвидеть развитие процессов по незначительному объему информации.

Анализируя существующие системы управления с участием человека в оперативном управлении технологическим процессом, можно выделить четыре варианта систем: децентрализованного контроля и управления; централизованного контроля и управления; автоматизированного оперативного управления; автоматического управления, укрупненные структурные схемы которых показаны на рис. 1.4. На этом рисунке: *Перв. инф.* — первичная информация, *Втор. инф.* — вторичная информация, *Вн. инф.* — внешняя информация, *Р* — рекомендации, *УЦК* — устройство централизованного контроля, *ПЩ* — приборные щиты, *К* — ключи, кнопки управления.

В системе децентрализованного контроля и управления (рис. 1.4, а) оператор выполняет все функции по обслуживанию локальных систем управления отдельными объектами последовательно в режиме «обходчика». Первичная информация, определяемая совокупностью значений переменных процесса, образуется и представляется с помощью средств контрольно-измерительной техники. К внешней информации могут быть отнесены изменяющиеся плановые задания по выпуску продукции, а также требования к данному технологическому процессу.

В системе централизованного контроля и управления (рис. 1.4, б) функции управления осуществляет оператор, находящийся в центральном информационно-диспетчерском пункте, куда сведена необходимая информация о ходе технологического процесса и где могут располагаться средства обработки и выбора информации, предназначенной для ориентирования в конкретных ситуациях. Вторичная информация образуется в результате обработки первичной, ее селекции, обобщения, сопоставления и т. д.

В системе автоматизированного оперативного управления (АСУ ТП) функции управления в определенной степени осуществляет человек с применением развитых технических средств и ЭВМ, подготавливающих информацию к виду, удобному для принятия реше-

ний по управлению (рис. 1.4, в). Задающая информация от оператора представляет собой указания по выполнению вычислительной машиной определенных расчетов, связанных, например, с выработкой управляющих воздействий, изменением критериев оптимизации и т. д. Более подробно различный уровень функций, выполняемых

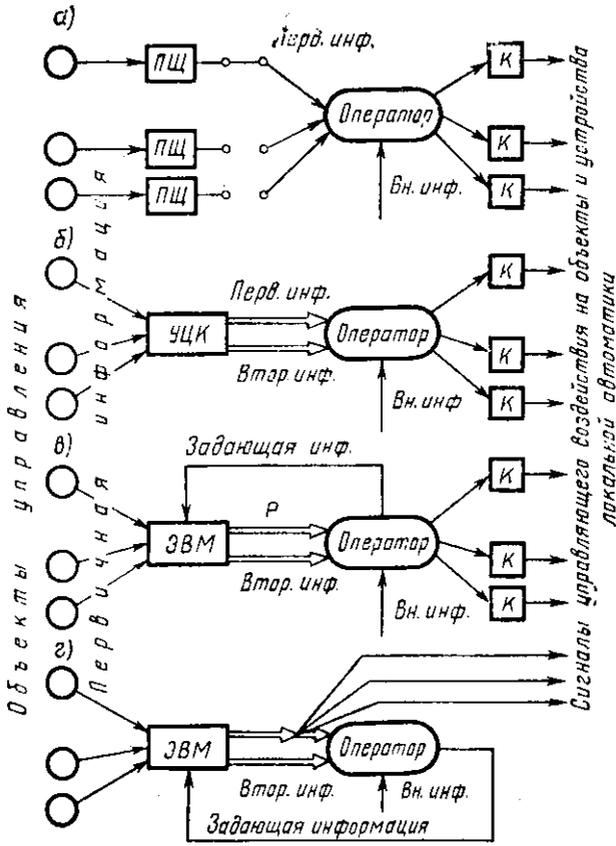


Рис. 1.4

АСУ ТП, рассматривается в гл. 5. По мере повышения объема и уровня автоматизации технологического процесса можно осуществить переход к полностью автоматическому управлению (рис. 1.4, г), где роль оператора сводится к наблюдению за работой системы, обслуживанию ЭВМ и изменению заданий по управлению.

§ 1.4. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ОТРАСЛИ

Развитие автоматизации технологических процессов отрасли тесно связано с внедрением новой технологии, модернизацией применяемого оборудования, расширением функциональных возмож-

ностей технических средств автоматизации в связи с последовательным улучшением качества приборостроительной продукции, заменой устаревших видов приборов современными, созданием принципиально новых автоматических устройств.

Для каждой стадии автоматизации должны быть намечены главные направления развития автоматизации технологических процессов с учетом известных общепринятых тенденций совершенствования технических средств автоматизации. Так, на стадии развития и внедрения локальных автоматических систем управления важной проблемой, характерной для легкой промышленности, является разработка технических средств специального назначения. Для последующих стадий важное значение приобретает применение в системах управления унифицированных систем контроля и регулирования и средств вычислительной техники.

При конструировании новых функциональных блоков и элементов автоматических устройств специального назначения основными критериями оценки, характеризующими целесообразность выбора того или иного варианта исполнения, в порядке значимости обычно являются: определяемый эффективностью функциональных возможностей технический уровень разработки, надежность, стоимость, габаритные размеры, технологичность изготовления, удобство эксплуатации и ремонта. Обычно в качестве элементной базы для создания новых автоматических устройств используют электронные приборы, усложнение задач управления приводит к увеличению количества и усложнению аппаратуры, и, как следствие, к увеличению вероятности нарушения нормальной работы автоматической системы. Непрерывная интенсификация технологических процессов и расширение фронта автоматизации создают проблему надежности, решение которой часто непосредственно связано с обеспечением других технических показателей качества.

Мероприятия по повышению надежности предусматривают на стадии проектирования, при изготовлении и в процессе эксплуатации автоматических устройств. В процессе проектирования стремятся создавать простые схемы электрических устройств автоматики, выполненные на основе элементов с высокими показателями надежности, при соблюдении мер защиты от неблагоприятного воздействия окружающей среды, снабженные средствами быстрого отыскания и устранения неисправностей, а также резервирования. В процессе эксплуатации предусматривается выполнение профилактических мероприятий на научной основе, прогнозирование отказов, тренировка и проверка элементов перед постановкой при замене.

Прогрессивными способами и техническими решениями повышения надежности являются применение высокочувствительных измерительных устройств, разработка принципиально новых схем преобразования сигнала с внедрением микроэлектронных усилительных приборов в конструкции регулирующих устройств, исполнение бесконтактных переключающих элементов на основе магнитных усилителей или тиристоров, управляющих вращением вала

двухфазного конденсаторного двигателя, перемещением штока электромагнита, подачей электроэнергии в нагреватель.

Наряду с достоинствами современных микроэлектронных устройств в отношении повышенной надежности, малых размеров и веса необходимо учитывать такие их особенности, как концентрация в небольшом объеме тепла, выделяемого за счет потерь энергии в электрических цепях, «паразитные» влияния между слоями и переходами пленочной или полупроводниковой структуры, перемонтируемость схемы. Кроме того, в электронных автоматических устройствах обычно имеются элементы, несовместимые с полупроводниковой технологией (конденсаторы большой емкости, трансформаторы и др.).

Развитие пневматической ветви ГСП обуславливается рядом особенностей пневматических средств автоматизации, определяющих область их применения. Главной особенностью их является то, что в качестве носителя сигналов и источника энергии используется сжатый воздух [3]. Необходимость иметь источник питания и высокой надежности систему подачи сжатого воздуха, осушенного и очищенного от пыли и масла, со стабилизированным давлением существенно ограничивает область применения пневматических систем автоматизации. Кроме того, пневмопроводы характеризуются существенной собственной инерционностью и скоростью передачи сигналов давления, значительно меньшей скорости распространения звука. К достоинствам пневматических АСР относится простая реализация стандартных законов регулирования с широкими диапазонами изменения параметров настройки. Пневматическим исполнительным устройствам свойственны простота конструкции, низкая стоимость, высокая мощность и достаточное быстродействие. Благодаря этому пневмопроводы используются не только в пневматических регуляторах, но и как исполнительные механизмы в комбинированных электронно-пневматических системах управления. Современные пневматические регуляторы строятся по агрегатному принципу из устройств с унифицированными входными и выходными сигналами. Основой пневматической ветви ГСП является универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА).

В основе построения ГСП лежит применение определенных принципов, дающих возможность рационально строить из ограниченного количества видов технических средств разнообразные системы контроля, регулирования и управления технологическими процессами. Одной из важнейших задач, решаемых созданием ГСП, является разработка ограниченной номенклатуры унифицированных устройств, способных удовлетворить потребности промышленных предприятий. ГСП предусматривает информационное, энергетическое, конструктивное, метрологическое, эксплуатационное сопряжение между изделиями приборостроительной промышленности.

Для обеспечения информационной сопряженности унифицируют сигналы: электрические, пневматические, вещественные (диаграм-

мы, перфоленты, перфокарты, бланки и др.). Конструктивная сопряженность приборов предусматривает унификацию присоединительных размеров, разработку общих принципов конструирования изделий. При конструировании принят блочно-модульный принцип. Применение его позволяет создать рациональный минимум конструктивных элементов. Нормируются метрологические характеристики изделий: виды погрешностей, классы точности, погрешности совокупности звеньев и систем и т. д. Принципы построения ГСП и технические требования к изделиям приведены в основополагающем ГОСТ 12997—76 «Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Общие технические требования. Методы испытаний».

По функциональному признаку технические средства ГСП в соответствии с ГОСТ 12997—76 разделяются на следующие группы: устройства получения нормированной информации о состоянии технологического процесса; средства преобразования информации для передачи по каналам связи; средства преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления; средства преобразования и передачи команд управления; устройства использования командной информации для воздействия на процесс. Устройства получения нормированной информации о состоянии процесса (датчики) включают в себя первичные измерительные и нормирующие преобразователи. Первичные измерительные преобразователи преобразуют контролируемую переменную в выходную физическую величину (перемещение, усилие и т. д.), называемую естественным выходным сигналом; при этом нормирующий преобразователь преобразует его в унифицированный. В этом случае измерительный и нормирующий преобразователи объединяются в одну конструкцию. Если на выходе первичного измерительного прибора выдается пневматический или электрический сигнал (например, термо-э. д. с. термопары), то применяют нормирующий преобразователь, представляющий собой конструктивно самостоятельное устройство.

Средства преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления получают информацию от датчиков. Полученная информация отражается на шкалах вторичных приборов, подвергается логической или математической обработке и направляется на регулирующие устройства. Автоматические регуляторы осуществляют регулирование различных переменных величин по определенным законам.

Каждая из ветвей ГСП — электрическая, пневматическая и гидравлическая — имеет свои регулирующие устройства и функциональные блоки.

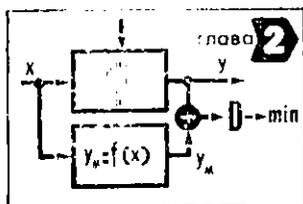
Главными факторами, определяющими создание совершенных автоматических устройств и систем управления, являются научно обоснованные принципы их построения при проектировании, выбор оптимальных вариантов сочетания различных типов элементов и устройств, образующих функциональные блоки и автоматические системы, всемерное развитие творческой инициативы специалистов,

занимающихся решением задач автоматизации технологических процессов.

Развитие вычислительной техники открывает широкие перспективы совершенствования систем управления технологическими процессами. Средства вычислительной техники непрерывно обновляются, парк ЦВМ пополняется новыми типами машин, удовлетворяющих требованиям автоматизации промышленного производства. В 70-х годах появились и находят быстрое распространение мини- и микро-ЭВМ, предназначенные для использования в качестве управляющих вычислительных машин (УВМ). Мини- и микро-ЭВМ характеризуются ограниченным объемом памяти, малой длиной слова (8—16 разрядов), малыми габаритами, относительно развитым математическим обеспечением, наличием интерфейса (устройства сопряжения) и периферийного оборудования. Микро-ЭВМ — самое дешевое устройство обработки информации с микропрограммным управлением, пригодно для выполнения относительно небольшого объема вычислений и несложного управления, перспективно для применения в локальных системах управления простыми технологическими процессами. Микро-ЭВМ будут использоваться в приборах в качестве встроенных средств обработки информации в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика производства хромовых кож разных толщин для верха обуви из шкур крупного рогатого скота (разработана ЦНИИКП, утверждена 5.VI.75 г.). М., ЦНИИТЭИлегпром, 1975.
2. Видревич Л. Я. и др. Оптимизация процесса дубления с помощью экспериментально-статистических методов. — Кожевенно-обувная промышленность, 1977, № 6.
3. Штейнберг Ш. Е. и др. Промышленные автоматические регуляторы. М., 1973.



ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ОБЪЕКТУ

Трудоемкость автоматизации технологических процессов (объектов) во многом определяется степенью имеющейся у нас информации об объектах, прежде всего об их статических и динамических характеристиках. Наиболее полная информация об этих характеристиках содержится в математических моделях объектов. Если модель объекта известна, то возможен априорный расчет систем автоматического управления (оценка качества управления для

различных законов регулирования, расчет параметров настройки регуляторов и т. п.), обоснованный выбор технических средств автоматизации.

Для большинства технологических процессов легкой промышленности математические модели не разработаны, поэтому при проектировании систем автоматизации необходимо проводить специальные исследования объектов для получения (расчета) их моделей. Разработка математических моделей объектов является частью общей задачи идентификации модели объекту. Задачи идентификации решаются различными методами. Ниже рассматриваются некоторые вопросы идентификации: основные термины и определения, постановка основных задач, краткая характеристика некоторых методов решения частных задач идентификации. Предпочтение отдается статистическим методам разработки моделей, в частности методу наименьших квадратов (МНК). Изложение методов иллюстрируется числовыми примерами.

Изучая материал этой главы, необходимо учитывать, что нет универсального метода разработки моделей, пригодного для всех встречающихся типов объектов. Каждый из известных методов имеет свои ограничения, поэтому важно представлять себе возможности использования методов с учетом постановки задач для конкретного объекта.

§ 2.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Математическая модель объекта (в дальнейшем — просто модель) есть математическая форма представления (записи) преобразования объектом входных воздействий в выходные переменные (рис. 2.1, а):

$$\vec{Y}(t) = \Phi \{ \vec{X}(t), \vec{Z}(t), \vec{V}(t) \}, \quad (2.1)$$

где $\vec{Y}(t)$ — вектор выходных переменных; Φ — оператор объекта; $\vec{X}(t)$ — вектор контролируемых управляющих входных воздействий; $\vec{Z}(t)$ — вектор контролируемых неуправляющих входных воздействий; $\vec{V}(t)$ — вектор неконтролируемых входных воздействий.

Идентификация модели [1] есть определение структуры и параметров оператора Φ , обеспечивающих заданное (по выбранному критерию идентификации) совпадение выходных переменных модели и объекта при одинаковых входных воздействиях.

Под *структурой модели объекта* понимается тип оператора Φ . Например, оператор Φ может быть в виде: 1) линейного дифференциального уравнения n -й степени; 2) дифференциального уравнения в частных производных; 3) системы линейных дифференциальных уравнений; 4) системы нелинейных дифференциальных уравнений; 5) системы конечно-разностных уравнений; 6) системы регрес-

сионных уравнений; 7) передаточной функции; 8) весовой функции и т. д.

В модели объекта учитываются не все входные воздействия и выходные переменные объекта, а лишь существенные (приоритетные) сигналы, вопрос отбора которых рассматривается в § 2.2.

Для автоматического управления особо важное значение имеет модель объекта для каналов управляющих входных воздействий $\vec{X}(t)$, т. е.

$$\vec{Y}(t) = \Phi \{ \vec{X}(t), \vec{V}^*(t) \}, \quad (2.2)$$

где $\vec{V}^*(t)$ — вектор всех неуправляющих входных воздействий.

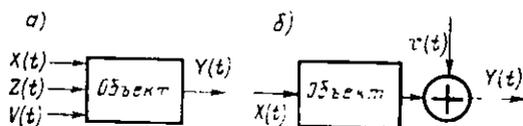


Рис. 2.1

Для линейного объекта выполняется принцип суперпозиции; тогда можно представить модель в виде (рис. 2.1, б)

$$\vec{Y}(t) = f \{ \vec{X}(t) \} + \vec{v}(t), \quad (2.3)$$

где $\vec{v}(t)$ — возмущения (шум) объекта, под которым понимается сумма всех неуправляющих входных воздействий, приведенных к выходу объекта, плюс ошибки измерения.

В общем случае $\vec{v}(t)$ есть многомерная случайная функция. Для стационарных линейных объектов математическое ожидание вектора $\vec{v}(t)$ равно постоянному значению $M \{ \vec{v}(t) \} = \text{const}$. При идентификации модели объекту принимают

$$M \{ \vec{v}(t) \} = 0. \quad (2.4)$$

Условие (2.4) справедливо только в том случае, если оператор $f \{ \vec{X}(t) \}$ правильно отражает существенные характеристики объекта, т. е. если модель адекватна объекту. Условие (2.4) является необходимым для получения несмещенной оценки модели объекта.

При известных параметрах модели и известном векторе $\vec{X}(t)$ по уравнению (2.3) можно рассчитать оценку вектора выходных переменных модели

$$\vec{Y}_m(t) = f \{ \vec{X}(t) \}. \quad (2.5)$$

В связи с неизбежными упрощениями, необходимыми для разработки модели (учет ограниченного числа входных управляющих

воздействий, упрощение начальных и граничных условий работы объекта и т. п.), оценка вектора $\hat{Y}(t)$ всегда отличается от соответствующего вектора объекта $\vec{Y}(t)$.

Величина $\vec{e}(t)$, определяемая из уравнения

$$\vec{e}(t) = \vec{Y}(t) - \hat{Y}_m(t), \quad (2.6)$$

есть погрешность (ошибка) модели по отношению к объекту. В соответствии с (2.3)

$$\vec{e}(t) = v(t). \quad (2.7)$$

В задачах идентификации для расчета модели используют не погрешность $\vec{e}(t)$, а средний квадрат ошибки

$$I = M \left\{ \left[\vec{Y}(t) - \hat{Y}_m(t) \right]^2 \right\} = M \left\{ \vec{e}^2(t) \right\}. \quad (2.8)$$

Параметры модели определяют из условия

$$I \rightarrow \min. \quad (2.9)$$

Здесь I — критерий идентификации. Для заданной структуры модели ее параметры, обеспечивающие минимум I , считаются оптимальными с точки зрения задачи идентификации модели объекту.

Часто идентификацию модели объекту проводят из условия

$$I \leq I_{\text{доп}}, \quad (2.10)$$

где $I_{\text{доп}}$ — допускаемое (заданное) значение среднего квадрата ошибки.

Обозначим через I_{min} минимальное значение критерия идентификации в заданном классе структуры модели. Если выполняется условие

$$I_{\text{min}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (2.11)$$

то идентификация модели объекту в заданном классе структуры возможна. Если это условие не выполняется, то заданная структура не обеспечит идентификации модели объекту и тогда выбирают другую структуру модели, например дополняют ее новыми входными воздействиями, вводят нелинейные слагаемые и т. п.

Если условие (2.10) не задано, то после расчета параметров модели, обеспечивающих условие (2.9), необходима специальная проверка адекватности полученной модели объекту.

Выше были перечислены примеры типов моделей, т. е. типов оператора $f\{\}$ в (2.3). Рассмотрим некоторые основные типы моделей на примере стационарного одномерного [один вход $X(t)$ и один выход $Y(t)$] линейного объекта, для которого векторное уравнение (2.3) преобразуется в скалярное уравнение

$$Y(t) = f\{X(t)\} + v(t). \quad (2.12)$$

Наиболее полная информация об объекте отражается в модели типа дифференциального уравнения n -го порядка. Для линейного стационарного объекта получим

$$T_n^n Y_m^n(t) + T_{n-1}^{n-1} Y_m^{n-1}(t) + \dots + T_1 Y_m^1(t) + Y_m(t) = \\ = k [\tau_n^m X^m(t) + \tau_{n-1}^m X^{m-1}(t) + \dots + \tau_1 X^1(t) + X(t)] \quad n > m, \quad (2.13)$$

где $T_1, T_2, \dots, T_n; \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m; k$ есть параметры модели (2.13), индекс « n » в $Y_m(t)$ есть порядок производной $Y_m(t)$. Зная параметры модели и величины $X(t)$, можно рассчитать $Y_m(t)$, решая уравнение (2.13) относительно $Y_m(t)$.

Равносильное с уравнением типа (2.13) отображение объекта можно задать в виде передаточной функции

$$W_m(p) = Y_m(p) / X(p) = k (\tau_n^m p^m + \dots + \tau_1 p + 1) / (T_n^n p^n + \dots + T_1 p + 1). \quad (2.14)$$

Модель объекта можно задать в виде частотной характеристики

$$W_m(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.15)$$

где ω — круговая частота; $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ — модуль и фаза частотной характеристики соответственно.

Модель объекта можно задать в виде весовой (импульсной) функции $w_m(t)$, представляющей собой реакцию объекта, находящегося при нулевых начальных условиях, на входное воздействие $X(t)$ в виде дельта-функции $\delta(t)$:

$$w_m(t) = L^{-1} [W_m(p)], \quad (2.16)$$

где $L^{-1}[\]$ — символ, означающий обратное преобразование Лапласа (переход от изображения к оригиналу).

Для физически реализуемых моделей функция $w_m(t)$ должна удовлетворять условию

$$w_m(t) = 0 \text{ при } t < 0; \int_0^{\infty} |w_m(t)| dt < \infty \text{ при } t > 0. \quad (2.17)$$

Модель объекта можно задать в виде переходной характеристики $h(t)$, которая представляет собой реакцию объекта (при нулевых начальных условиях) на входное воздействие $X(t)$ в виде единичного скачка:

$$h(t) = L^{-1} [W_m(p) / p]. \quad (2.18)$$

Модели объектов, описываемые выражениями типа (2.13) — (2.18), являются примерами динамических моделей, отражающих поведение объекта в переходных процессах и в установившемся режиме.

В ряде практических приложений автоматизации требуется только статическая модель объекта, которую для рассматриваемого случая можно представить в виде

$$Y_m = k X, \quad (2.19)$$

где k — коэффициент передачи объекта (параметр модели).

Модель объекта разрабатывается на основании априорных сведений об объекте (характер процессов, тип оборудования и т. п.) и по результатам наблюдений (регистрации) входных воздействий и выходных переменных объекта. При этом часто организуется (если это возможно) специальное экспериментальное исследование для разработки модели объекта.

Назовем исходными данными об объекте все априорные данные и полученный массив экспериментальных результатов. Тогда для разработки модели объекта необходимо дать алгоритм идентификации: процедуру вычислений параметров модели по заданным исходным данным, учитывающую принятый критерий идентификации [обычно в виде выражения (2.8) и условий (2.9), (2.10)], заданную структуру модели, а также начальные и граничные условия.

Объект следует считать *идентифицируемым*, если существует сходящаяся за конечное число шагов процедура вычисления (алгоритм идентификации) параметров его модели.

Достаточным условием идентифицируемости объекта является его *наблюдаемость*. Согласно [2], наблюдаемость объекта есть его свойство, позволяющее вычислять любую переменную модели с погрешностью, не превышающей заданную, после конечного числа наблюдений. Свойство наблюдаемости связано с измерением существенных входных управляющих воздействий $X(t)$ и выходных переменных $Y(t)$ объекта.

В гл. 1 при рассмотрении примеров объектов легкой промышленности отмечалось, что некоторые существенные выходные переменные объектов не контролируются. Это приводит к невозможности идентификации объектов. Трудоемкость идентификации зависит от принятой структуры модели. Например, разработка модели, описываемой выражением типа (2.19), значительно проще, чем выражением типа (2.13) или (2.14).

Выбор структуры модели (идентификация в широком смысле) для общего случая не формализован. Можно лишь перечислить основные принципы, которыми руководствуются при выборе структуры модели, а именно: знание сущности физических и химических процессов, происходящих в объекте; конечные цели использования модели (управление в статическом или в переходных режимах, диагностика нарушений режима, оптимизация технологии и т. п.); возможность проведения экспериментального исследования на объекте; наличие и возможность вычислительной базы.

Один и тот же объект для различного сочетания конкретных требований может описываться разными по структуре моделями.

Введем понятие оптимального алгоритма идентификации, считая, что для заданной структуры модели при одних и тех же исходных данных оптимальным алгоритмом идентификации является алгоритм, позволяющий за минимальное время рассчитать параметры модели, обеспечивающие условие (2.10): $I \leq I_{\text{доп}}$. Следовательно, критерием оптимальности алгоритма идентификации является его быстродействие, т. е. минимальное число итераций (вычислений).

Разработка моделей связана со статистическими методами обработки экспериментальных данных по выборкам наблюдений объекта на конечном интервале времени. Экспериментальные данные обычно представляют собой непрерывную или дискретную запись измерений $X(t)$, $Y(t)$ во времени; в общем случае — это реализации случайных процессов.

Известно, что существуют два принципиально различных подхода к разработке моделей объекта: первый подход основан на предположении детерминированной (неслучайной) связи X и Y , второй подход более общий основан на предположении, что X и Y есть случайные величины (процессы).

Для стационарного случайного процесса, обладающего свойством эргодичности, при достаточно большом значении интервала наблюдений $[0, t_n]$ выборочные значения параметров процесса, рассчитанные по реализациям на интервале $[0, t_n]$, можно использовать для характеристики процесса в целом. Выборочные значения параметров процесса тогда будут оценками соответствующих параметров процесса как генеральной совокупности. Назовем основные статистические характеристики случайного процесса.

Оценка математического ожидания $M\{Y\}$ в виде среднего значения \bar{Y} на интервале $[0, t_n]$:

в непрерывной форме

$$M\{Y\} \approx \bar{Y} = (1/t_n) \int_0^{t_n} Y(t) dt; \quad (2.20)$$

в дискретной форме

$$M\{Y\} \approx \bar{Y}_i = (1/N) \sum_{i=1}^N Y(i \cdot \Delta t), \quad (2.21)$$

где i — текущее дискретное значение точек реализации ($i=1, 2, \dots, N$); $N=t_n/\Delta t$ — общее число точек реализации; Δt — шаг дискретности регистрации.

Оценка дисперсии $D(Y)$ в виде выборочной дисперсии $S_n^2(Y)$: в непрерывной форме

$$D(Y) \approx S_n^2(Y) = (1/t_n) \int_0^{t_n} [Y(t) - \bar{Y}]^2 dt; \quad (2.22)$$

в дискретной форме

$$D(Y) \approx S_n^2(Y_i) = [1/(N-1)] \sum_{i=1}^N [Y(i \cdot \Delta t) - \bar{Y}_i]^2. \quad (2.23)$$

Величины $S_n(Y)$, $S_n(Y_i)$ есть выборочные средние квадратические отклонения для процесса $Y(t)$ на интервале $[0, t_n]$.

Оценка корреляционной функции $R_y(\tau)$ для централизованного процесса $y(t)$ имеет вид:

в непрерывной форме

$$R_y(\tau) \approx [1/(t_n - \tau)] \int_0^{t_n} y(t) y(t + \tau) dt, \quad (2.24)$$

где $y(t)$, $y(t + \tau)$ — центрированные значения $Y(t)$, $Y(t + \tau)$; τ — корреляционный сдвиг;

в дискретной форме

$$R_y(\tau_i) \approx [1/(N - k)] \sum_{i=1}^N y(i \cdot \Delta t_n) y(i \cdot \Delta t_n + k \cdot \Delta \tau), \quad (2.25)$$

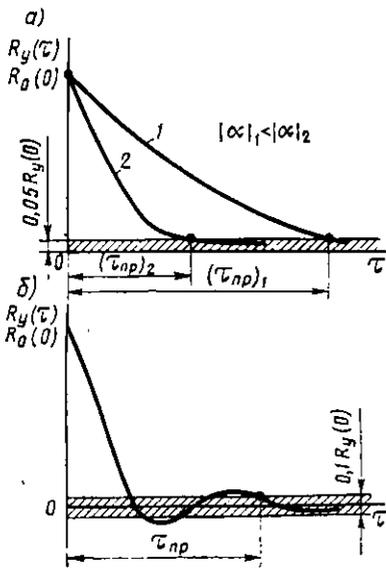


Рис. 2.2

(2.26) имеется периодическая составляющая, определяемая параметром β .

Крутизна кривой $R_y(\tau)$ (см. рис. 2.2, а) определяется величиной показателя степени $|\alpha|$. Чем больше $|\alpha|$, тем круче кривая.

Для идентификации моделей важное значение имеет определение предельного интервала корреляции $\tau_{пр}$, за пределами которого можно считать соседние значения y_i , y_{i+1} некоррелированными. Обычно величину $\tau_{пр}$ определяют из условия

$$R_y(\tau) \leq 0,05 R(0), \text{ для всех } \tau \geq \tau_{пр}. \quad (2.28)$$

На рис. 2.2, а, б показано определение $\tau_{пр}$ для заданных типов $R_y(\tau)$. На рис. 2.2, а показаны две $R_y(\tau)$ с одинаковыми значениями $R_y(0) = D_y$, но с разными значениями параметров α . С увеличением α значение $\tau_{пр}$ уменьшается.

Для характеристики статистической связи двух случайных стационарных сигналов, например $X(t)$ и $Y(t)$, используется взаимная

где $\Delta \tau$ — шаг дискретности корреляционного сдвига; Δt_n — шаг отбора выборочных пар y_i , y_{i+k} (обычно $\Delta \tau = \Delta t_n$; $N = t_n / (\Delta t_n)$; $\tau_i = k \cdot \Delta \tau$, $k = 0, 1, 2, \dots$).

Для получения достоверной оценки $R_y(\tau)$ необходимо выполнение условия $N > 250 - 400$ [8].

На рис. 2.2 показаны два типа корреляционных функций, которые аппроксимируются следующими формулами:

для рис. 2.2, а

$$R_y(\tau) = D_y e^{-|\alpha| \tau}, \quad (2.26)$$

где α — параметр корреляционной функции; D_y — дисперсия $Y(t)$, определяемая по (2.22);

для рис. 2.2, б

$$R_y(\tau) = D_y e^{-|\alpha| \tau} \cos \beta \cdot \tau, \quad (2.27)$$

где в дополнении к формуле

корреляционная функция $R_{xy}(\tau)$, оценка которой в непрерывной форме

$$R_{xy}(\tau) \approx [1/(t_n - \tau)] \int_0^{t_n} x(t) y(t + \tau) dt; \quad (2.29)$$

в дискретной форме

$$R_{xy}(\tau_i) \approx [1/(N - k)] \sum_{i=1}^N x(i \cdot \Delta t_n) y(i \cdot \Delta t_n + k \cdot \Delta \tau), \quad (2.30)$$

где $x(t)$, $y(t)$ — центрированные значения $X(t)$, $Y(t)$; $\Delta \tau$ — шаг дискретности корреляционного сдвига; Δt_n — шаг отбора выборочных пар $X(t)$, $Y(t + \tau)$. Обычно $\Delta t_n = \Delta \tau$; $N = t_n / \Delta t_n$.

Известно, что для стационарного случайного процесса его математическое ожидание и дисперсия есть величины постоянные, не зависящие от начала отсчета t_0 интервала наблюдения $[t_0, t_0 + t_n]$; корреляционная функция центрированного процесса зависит только от корреляционного сдвига τ и при $\tau \rightarrow \infty$ функция $R(\tau) \rightarrow 0$.

Объект считается стационарным, если $Y(t)$ отвечает указанным выше свойствам стационарности при условии, что $X(t)$ есть стационарный случайный процесс. Все перечисленные выше статистические характеристики определяются по заданным реализациям $X(t)$, $Y(t)$. Вопрос о выборе шага дискретности измерения Δt и интервала выборки t_n (минимального времени реализации) для $Y(t)$ или $X(t)$ обсуждается в § 2.3.

Выражение (2.8) для вычисления критерия идентификации изменяется в связи с конечным интервалом наблюдения $[0, t_n]$ объекта и модели, а именно преобразуется к виду:

в непрерывной форме

$$I(Y) = (1/t_n) \int_0^{t_n} [Y(t) - Y_m(t)]^2 dt, \quad (2.31a)$$

в дискретной форме

$$I(Y) = (1/N) \sum_{i=1}^N [Y(i \cdot \Delta t) - Y_m(i \cdot \Delta t)]^2, \quad (2.31b)$$

где $N = t_n / (\Delta t)$.

Названные статистические характеристики кроме оценки стационарности объекта непосредственно используются в некоторых типах (структурах) моделей объектов. Так, в основе некоторых экспериментально-статистических методов разработки моделей объектов лежит интегральное уравнение Винера—Хопфа [2]

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} R_x(\tau - t) w(t) dt \quad 0 < \tau < \infty, \quad (2.32)$$

где $w(t)$ — весовая функция объекта.

Модель объекта, определенная в виде $\omega(t)$ из уравнения (2.32), удовлетворяет условию $I(Y) \rightarrow \min$, где $I(Y)$ определяется по (2.31а). Для решения прикладных задач вместо уравнения (2.32) используют уравнение

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{t_n} R_x(\tau-t) \omega(t) dt \quad 0 \leq \tau \leq t_n. \quad (2.33)$$

Уравнения (2.32), (2.33) являются интегральными уравнениями Фредгольма первого рода; задача нахождения $\omega(t)$ из (2.33) относится к классу некорректно поставленных задач [2]. В задачах идентификации при ограниченном частотном спектре входного воздействия $X(t)$ некорректность приводит к тому, что получаемая система линейных уравнений (в дискретной форме)

$$R_{xy}(\tau_i) = \sum_0^N R_x(\tau_i - t_i) \omega(t_i) \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; \quad N = t_n / (\Delta t) \quad (2.34)$$

является неустойчивой из-за плохой обусловленности системы (об обусловленности систем линейных уравнений см. также § 2.4). Плохая обусловленность приводит при малых ошибках в $R_{xy}(\tau)$, $R_x(\tau)$ к большому разбросу получаемых значений $\omega(t)$; часто найденная $\omega(t)$ в результате решения (2.34) оказывается физически нереализуемой.

Для получения устойчивого решения системы (2.34) проводят регуляризацию этой некорректно поставленной задачи, используя различные приемы, изложение которых выходит за рамки данной книги. Один из распространенных приемов заключается в использовании специальных входных воздействий испытательных сигналов с заранее известной корреляционной функцией. Например, если входное воздействие есть белый шум (абсолютно случайный процесс), то $R_x(\tau)$ для него есть дельта-функция, т. е. $R_x(\tau) = k \cdot \delta(\tau)$. Тогда система (2.34) примет вид

$$R_{xy}(\tau) = k \cdot \omega(\tau), \quad (2.35)$$

и задача идентификации объекта весовой функцией $\omega(\tau)$ перестает быть некорректной. Однако возможно только приближенно реализовать входное воздействие типа белого шума, т. е. физически реализуемый входной сигнал имеет $R_x(\tau)$, отличающийся от дельта-функции. Поэтому и для такого подхода к идентификации объекта моделью некорректность влияет на погрешность расчета $\omega(t)$.

Хорошим приближением к белому шуму являются псевдослучайные двочные сигналы, полученные с помощью специальных генераторов [2].

При разработке моделей, как правило, стремятся получить ее в линейной форме или в форме, допускающей ее линеаризацию. Это связано с наличием эффективного математического аппарата расчета линейных систем. Далее исследуют возможность идентификации объекта стационарной моделью, т. е. моделью с постоянными во времени параметрами.

Большинство производственных объектов с точки зрения описания их моделями являются квазистационарными и, как правило, нелинейными системами. Понятие квазистационарности отражает тот объективный факт, что объекты могут считаться стационарными только на ограниченном интервале времени $[0, t_{ст}]$. На рис. 2.3 показаны примеры реализаций выходных переменных $Y(t)$ для двух разных типов нестационарных процессов, квазистационарных на интервале $[0, t_{ст}]$.

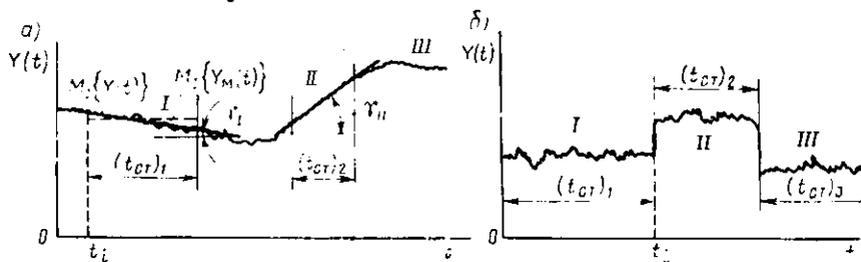


Рис. 2.3

Реализация $Y(t)$, показанная на рис. 2.3, а, характеризуется непрерывным медленным смещением среднего значения \bar{Y} во времени (тренд или дрейф). Реализация, показанная на рис. 2.3, б, характеризуется скачкообразным изменением \bar{Y} от одного интервала времени к другому. Такая реализация характерна для объектов с циклическим режимом работы или при изменении задания автоматического регулятора. Процессы с реализацией типа, показанного на рис. 2.3, б, не обладают свойствами эргодичности, т. е. для них нельзя заменять множество реализаций одной достаточно длинной реализацией.

Выбор величины $t_{ст}$ определяется из заданного допустимого смещения оценки математического ожидания $\Delta_d[M(Y)] = \Delta_d[\bar{Y}]$ при сдвиге по временной оси и зависит от крутизны $\text{tg } \gamma$ изменения (дрейфа) математического ожидания $M(Y) \approx \bar{Y}$. Для реализации типа, показанного на рис. 2.3, а, имеем

$$|\bar{Y} - \bar{Y}_m| \leq \Delta_d |\bar{Y}|, \quad (2.36)$$

где \bar{Y}_m — среднее значение выходной переменной модели объекта, которая считается стационарной на участке $t_{ст}$, т. е. $\bar{Y}_m = \text{const}$, при $t \in [0, t_{ст}]$. Для участка II (рис. 2.3, а) величина $(t_{ст})_II$ будет меньше, чем для участка I величина $(t_{ст})_I$, так как $\text{tg } \gamma_I < \text{tg } \gamma_{II}$, т. е. чем больше крутизна, тем меньше участок квазистационарности $[0, t_{ст}]$ (при постоянном значении $\Delta_d[\bar{Y}]$). Квазистационарность объектов вынуждает проводить новые расчеты параметров моделей при переходе от одного интервала времени $[t_i, t_i + t_{ст}]$ к другому.

Учет фактической нелинейности и нестационарности объектов приводит к необходимости применения диапазонных моделей, т. е.

моделей, адекватных объекту на ограниченном диапазоне входных воздействий $[X_{\min}, X_{\max}]$ и интервале времени $[t_i, t_i + t_{\text{ст}}]$. При известном типе нелинейности $Y_M = f\{X(t)\}$ и известном законе смещения параметров этой модели во времени можно априори рассчитать параметры диапазонных моделей в зависимости от положения объекта в пространстве X и Y . Если априорная информация о нелинейности объекта и его нестационарности отсутствует, то применяется адаптивная идентификация, основанная на использовании информации о текущих значениях входных воздействий $X(t)$ и выходных переменных $Y(t)$ объекта для уточнения (корректировки) модели по диапазонам.

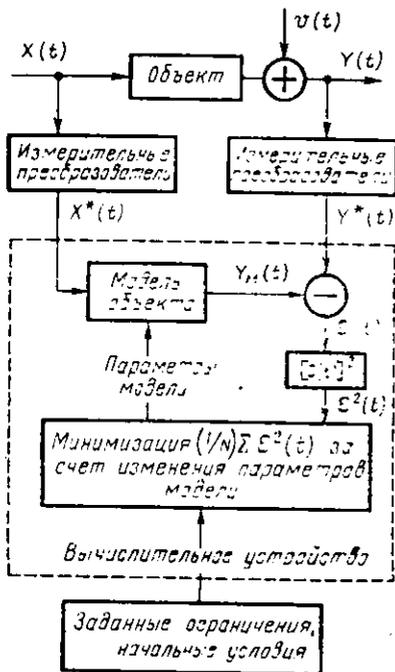


Рис. 2.4

Метод адаптивной идентификации иллюстрируется рис. 2.4. Модель объекта реализуется с помощью вычислительного устройства (ВУ), на котором проводятся также все вычислительные операции идентификации: вычисление ошибки $\epsilon(t)$, расчет критерия идентификации I в форме выражения (2.8), проверка условий (2.9) и (2.10), изменение параметров модели, если условие (2.9) не выполняется, и т. д.

Информация о текущих значениях $X(t)$ и $Y(t)$ поступает на ВУ от объекта через измерительные преобразователи, на выходе которых имеем $X^*(t)$ и $Y^*(t)$.

Идентификация стационарного объекта состоит в следующем: параметры модели объекта вычисляются за конечное число циклов, расчет заканчивается при достижении условия (2.10), после чего модель используется без уточнения. В число заданных ограничений модели входят: структура модели, алгоритм расчета параметров модели, допустимая погрешность модели $I_{\text{доп}}$, начальные условия.

Сформулируем основные этапы идентификации модели объекту:

1. Выбор существенных входных воздействий $\vec{X}(t)$ и выходных переменных $\vec{Y}(t)$. Разработка (выбор) структуры модели [тип оператора $f\{\vec{X}(t)\}$ в уравнении (2.3)], если структура модели не задана.

2. Выбор критерия идентификации I (здесь и далее будем предполагать его в виде (2.31а) или (2.31б).

3. Разработка алгоритма идентификации и программы для ввода в ВУ.

4. Проведение предварительного экспериментального исследования объекта для уточнения структуры модели, проверки стационарности объекта, определения интервала наблюдения $[0, t_n]$ и шага дискретности регистрации Δt .

5. Проведение основного экспериментального исследования для получения исходных данных.

6. Ввод в ВУ программы (алгоритм идентификации) и исходных данных, расчет параметров модели.

7. Если условие (2.10) не задано, то необходима специальная процедура проверки адекватности модели объекту (см. § 2.4).

8. В случае положительного результата проверки адекватности, как правило, ВУ рассчитывает доверительные интервалы для оценок параметров модели и определяет рабочий диапазон применения моделей.

9. Для стационарного объекта процесс идентификации на этом заканчивается. Для квазистационарного объекта применяют адаптационную идентификацию, при этом информация об изменениях $\vec{X}(t)$ и $\vec{Y}(t)$ (см. рис. 2.4) непрерывно поступает на ВУ, которое в соответствии с заданным алгоритмом идентификации корректирует непрерывно или дискретно (по интервалам) модель объекта.

§ 2.2. ВЫБОР СУЩЕСТВЕННЫХ СИГНАЛОВ ОБЪЕКТА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ

В технологическом процессе имеется множество сигналов, т. е. входных воздействий и выходных переменных. При разработке модели необходимо отобрать из этого множества самые важные, существенные. Понятие «существенность» в данном случае предполагает учет двух основных требований: 1) выбранные сигналы должны обеспечить получение модели, адекватной объекту, т. е. обеспечить условие $I \leq I_{\text{доп}}$, где $I_{\text{доп}}$ — допускаемое заданное значение критерия идентификации (средний квадрат ошибки); 2) количество выбранных сигналов должно быть минимальным по сравнению с другими вариантами выбора (при заданной структуре оператора модели $\{ \}$). Второе требование позволяет уменьшить размерность разрабатываемой модели, что упрощает ее расчет.

Существенные сигналы выбираются в несколько этапов. В первую очередь анализируются априорные данные об объекте с точки зрения характера физических и химических процессов в объекте, учитываются конечные цели процессов и производится предварительный отбор сигналов. Затем, если имеется такая возможность, организуют специальный эксперимент на объекте с целью отсеивания несущественных сигналов (из предварительно отобранного множества). Несущественные сигналы отсеиваются на основе статистической обработки результатов эксперимента, поставленного по специально составленному плану. При этом одновременно разрабатывается модель объекта (регрессионный метод, метод главных компонент, метод случайного баланса [2]).

Рассмотрим подробнее метод экспертных оценок, предназначенный для отбора существенных сигналов, не требующий проведения специального экспериментального исследования на объекте. В основе этого метода лежит теория ранговой корреляции, разработанная М. Кендалом [3].

Суть метода экспертной оценки заключается в том, что опрашивается некоторое число специалистов (экспертов) по специально организованной процедуре. Например, если целью является определение одной основной выходной переменной Y_0 из целого ряда Y_i , то каждый из Y_i получает свой постоянный номер. При сборе мнений путем опроса экспертов каждому из них предлагают анкету одного типа, в которой перечислены Y_i , их размерность, иногда указаны предполагаемые диапазоны изменения. Заполняя анкету, каждый эксперт, независимо от других экспертов, определяет место (ранг) Y_i в общем (ранжированном) ряду. Одновременно он может включить дополнительные переменные или высказать мнение об изменении диапазонов.

Результаты опроса экспертов обрабатываются следующим образом. Сначала определяют сумму рангов по переменным $\left(\sum_{j=1}^m a_{ij}\right)$, а затем — разность Δa_i между суммой каждой переменной и средней суммой рангов и сумму квадратов отклонений S :

$$\Delta a_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad (2.37)$$

$$S = \sum_{j=1}^m (\Delta a_i)^2, \quad (2.38)$$

где i — номер сигнала Y_i ; j — номер эксперта; $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, m$; a_{ij} — ранг каждой i -й переменной j -го эксперта; m — число экспертов; k — число переменных.

Полученные данные позволяют построить среднюю априорную диаграмму рангов, но предварительно необходимо оценить степень согласованности мнений всех исследователей с помощью коэффициента конкордации

$$\omega_k = 12 S / \left[m^2 k (k^2 - 1) - m \sum_{j=1}^m T_j \right], \quad (2.39)$$

где $T_j = \sum_{i=1}^k (t_j^3 - t_j)$; t_j — число одинаковых рангов, отмеченных j -м экспертом.

Использовать коэффициент конкордации можно только после оценки его значимости, например по χ^2 -распределению (при $k > 7$). Значение расчетного χ_p^2 критерия определяется по выражению

$$\chi_p^2 = 12 S / \left\{ m k (k + 1) - [1/(k - 1)] \sum_{j=1}^m T_j \right\}. \quad (2.40)$$

Если величина ω_k рассчитана, то для расчета χ_p^2 удобнее использовать другую форму выражения (2.40), а именно

$$\chi_p^2 = m(k-1)\omega_k.$$

Гипотеза о наличии согласия может быть принята, если при заданном числе степеней свободы табличное значение χ_p^2 меньше расчетного $\chi_{p\%}^2$ для $P\%$ -ного уровня значимости. Значение χ_p^2 выбирается по таблицам распределения χ^2 (Пирсона). Наибысшее значение $\omega_k = 1$ (мнение всех экспертов полностью совпадает относительно рангов Y_i), наименьшее значение $\omega_k = 0$ (между мнениями экспертов нет связи). Чем ближе ω_k к 1, тем существеннее результаты опроса.

Оценив согласованность мнений всех экспертов, строят среднюю диаграмму рангов, откладывая по оси абсцисс названия (номера) переменных Y_i , по оси ординат — соответствующие суммы рангов. Чем меньше сумма рангов данной переменной, тем она важнее. С помощью этой диаграммы оценивается относительная значимость переменных Y_i . При вычислении коэффициента конкордации иногда представляется возможным ранжирование самих экспертов по их компетентности в интересующей нас области. Имея сравнительную характеристику (ранжировку) экспертов, при обработке их мнений можно ввести вес каждого эксперта в суммарную ранжировку исследуемых переменных Y_i . С учетом весов экспертов выражение (2.39) примет вид

$$\omega_k = \frac{12S}{\left[m^2 k(k-1) - m \sum_{j=1}^m T_j \right] \left[\sum_{j=1}^m (b_j \cdot m) \right]^2}, \quad (2.41)$$

где b_j — вес j -го эксперта.

В качестве примера рассмотрим априорное ранжирование выходных переменных для процесса хромового дубления кож для верха обуви (см. гл. 1, § 1). Для проведения опроса была составлена анкета (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

Переменная	Условное обозначение	Определение переменной, возможность автоматического контроля
Температура сваривания, °С	Y_1	Определяется завершенностью процесса дубления; контроль только лабораторными методами
pH кожи (по срезу)	Y_2	Определяется кинетикой процесса дубления; контроль только лабораторными методами
Содержание оксида хрома в коже, %	Y_3	То же
Содержание оксида хрома в рабочем растворе, г/л	Y_4	Определяется кинетикой процесса дубления; возможен автоматический контроль
pH раствора	Y_5	То же

В анкете была указана цель ранжировки — автоматизация процесса дублирования. В ранжировке участвовали 16 экспертов. В том случае если эксперт затруднялся отдать предпочтение одному из двух или нескольких параметров, им присваивалось одно и то же значение, которое затем преобразовывалось при вычислении. Результаты опроса экспертов представлены в табл. 2.2 рангов выходных переменных.

Таблица 2.2

j	Переменные Y_i					j	Переменные Y_i				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
1	1	4	5	2	3	9	1	4	2	4	3
2	1	4	1	2	3	10	1	5	4	3	2
3	1	2	3	2	4	11	1	5	2	3	4
4	2	5	3	1	4	12	1	5	2	4	3
5	2	1	3	4	4	13	1	5	2	4	3
6	1	5	2	3	4	14	1	4	2	3	5
7	1	1	1	1	1	15	2	3	1	4	4
8	1	2	3	4	5	16	1	2	2	2	2

Для учета компетентности экспертов была проведена ранжировка самих экспертов. Для этого эксперты 2, 5, 6 и 9 проранжировали всех остальных экспертов, при этом учитывались квалификация, опыт и стаж работы в рассматриваемом производстве. Результаты ранжировки экспертов представлены в табл. 2.3 рангов экспертов. Здесь $k=16$, $m=4$ [см. формулу (2.39)].

Таблица 2.3

Ранжирующие эксперты	Ранжируемые эксперты															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2	14	12	14	15	1	2	4	13	3	5	7	6	9	10	8	11
5	14	9	15	13	2	5	7	16	3	1	10	6	8	12	4	11
6	16	9	15	14	3	5	7	13	2	1	10	8	6	11	4	12
9	9	7	9	11	1	6	7	12	2	4	9	7	5	10	3	8

Для получения нормированной ранжировки табл. 2.3 преобразуют таким образом, чтобы сумма рангов каждой строки равнялась $k(k+1)/2$ (так как в данном случае $k=16$, то $k(k+1)/2=136$). Для этого ранжируемым экспертам, имеющим одинаковые ранги, присваиваются значения рангов, равные среднему арифметическому мест, которые они поделили между собой (см. преобразованную табл. 2.4 рангов экспертов).

В столбце Σi приведено число повторений одинаковых рангов в каждой строке. Средняя сумма рангов

$$a_{cp} = m(k+1)/2, \quad (2.42)$$

где m — число ранжирующих экспертов. Для данного случая $a_{cp}=34$.

В строке $\sum_{j=1}^4 a_{ij}$ приведена сумма рангов, а в строке $\Delta a_i = \sum_{j=1}^4 a_{ij} - (a_{cp})_i$ разность между суммой рангов и средней суммой рангов.

Таблица 2.4

Ранжирующие эксперты	Ранжируемые эксперты																Σr
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
2	14,5	12	14,5	16	1	2	4	13	3	5	7	6	9	10	8	11	2
5	14	9	15	13	2	5	7	16	3	1	10	6	8	12	4	11	0
6	16	9	15	14	3	5	7	13	2	1	10	8	6	11	4	12	0
9	12	8	12	15	1	6	8	16	2	4	12	8	5	14	3	10	3+3
$\sum_{j=1}^4 a_{ij}$	56,5	38	56,5	58	7	18	26	58	10	11	39	28	28	47	19	44	—
Δa_i	22,5	4	22,5	24	-27	-16	-8	24	-24	-23	5	-6	-6	13	-15	10	—
$(\Delta a_i)^2$	506	16	506	576	729	256	64	576	576	529	25	36	36	169	225	100	S=4925

Затем по формуле (2.38) определялось $S=4925$ (см. табл. 2.4) и рассчитывался коэффициент конкордации для случая с совпавшими рангами $T_2=2^3-2=6$; $T_5=0$; $T_6=0$; $T_9=2(3^3-3)=48$. Отсюда согласно (2.39) $w_k=12 \cdot 4925 / [4^2(16^2-1)16-4(6+48)]=0,91$.

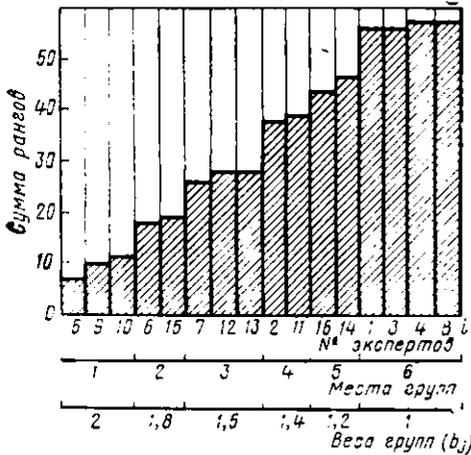


Рис. 2.5

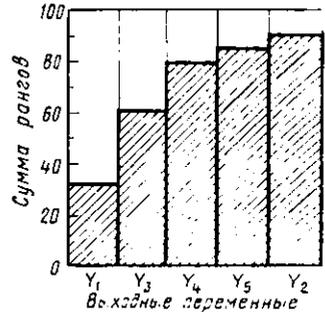


Рис. 2.6

Оценим значимость коэффициента конкордации w_k по критерию $\chi_p^2 = m(k-1)w_k = 4 \cdot 15 \cdot 0,91 = 54,6$. Для 1%-ного уровня значимости ($P=0,99$) при степени свободы $\nu = k-1 = 15$ величина $\chi_{p^2} = 30,578$, т. е. для данного случая $\chi_{p^2} < \chi_p^2$, следовательно, с вероятностью 0,99 можно утверждать, что существует согласованность ранжирующих экспертов относительно компетентности ранжируемых экспертов.

На рис. 2.5 приведена гистограмма ранжировки экспертов. Эксперты, имеющие равные или близкие суммы рангов, объединены в группы (на рис. 2.5 шесть групп), и каждой группе приписывается вес b_j в зависимости от ее места в ранжированном ряду. Вес b_j определяется линейной зависимостью по номеру группы специалистов. В данном примере b_j считается максимальным и равным

двум для самых опытных экспертов и минимальным и равным единице для наименее опытных (возможны другие способы задания веса). Получив ранжировку экспертов, преобразуем табл. 2.2 рангов выходных переменных аналогично тому, как это делалось в табл. 2.4, получаем преобразованную табл. 2.5 рангов выходных переменных.

Таблица 2.5

Эксперты	Переменные Y_j					Ранг эксперта	Вес эксперта b_j	Σ
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5			
1	1	4	5	2	3	6	1,0	0
2	1,5	5	1,5	3	4	4	1,4	2
3	1	2,5	4	2,5	5	6	1,0	2
4	2	5	3	1	4	6	1,0	0
5	2	1	3	4,5	4,5	1	2,0	2
6	1	5	2	3	4	2	1,8	0
7	3	3	3	3	3	3	1,6	5
8	1	2	3	4	5	6	1,0	0
9	1	4,5	2	4,5	3	1	2,0	2
10	1	5	4	3	2	1	2,0	0
11	1	5	2	3	4	4	1,4	0
12	1	5	2	4	3	3	1,6	0
13	1	5	2	4	3	3	1,6	0
14	1	4	2	3	5	5	1,2	0
15	2	3	1	4,5	4,5	2	1,8	2
16	1	3,5	3,5	3,5	3,5	5	1,2	4
$\sum_{j=1}^{16} a_{ij} b_j$	32,3	92,7	61,1	80,8	87,1	$\sum_{j=1}^{16} b_j = 23,6$		
Δa_i	-38,5	+21,9	-9,7	+10,0	+16,3			
$(\Delta a_i)^2$	1482,2	479,6	94,1	100	265,7			

По данным таблицы окончательно рассчитываем:

$$\sum_{j=1}^{16} b_j = 23,6; \quad \sum T_{\text{вых}} = 210; \quad \sum_{j=1}^5 (\Delta a_i)^2 = 2421,6.$$

Сумма рангов каждой переменной $\sum_{j=1}^{16} a_{ij} b_j$ определяется с учетом веса экспертов. Тогда средняя сумма рангов

$$a_{cp} = [(k+1)/2] \sum_{j=1}^m b_j.$$

При отсутствии ранжировки экспертов $\sum_{j=1}^m b_j = m$, т. е. $a_{cp} = m(k+1)/2$ согласно (2.42). Для данного случая $a_{cp} = 70,8$; величина $\sum_{i=1}^5 T_j = 210$; $S = 2461,6$.

Отсюда коэффициент конкордации для выходных переменных $w_k = 12 \cdot 2421,6 / [256(25-1)5 - 16 \cdot 210(23,6/16)^2] = 0,488$.

Оценка значимости по критерию χ^2 будет $\chi_p^2 = 16 \cdot 0,488 = 31,232$. Табличное значение χ_r^2 для степени свободы $\nu=4$; $P=0,99$ равно 13,277, т. е. $\chi_r^2 < \chi_p^2$.

На рис. 2.6 приведена гистограмма ранжировки выходных переменных согласно табл. 2.5. Анализ гистограммы позволяет сделать выводы о том, что наиболее важными (существенными) выходными переменными являются температура сваривания Y_1 и содержание оксида хрома в коже Y_3 . Разница в рангах остальных переменных (Y_4, Y_6, Y_2) меньше, чем между Y_1 и Y_3 .

Процедура, подобная изложенной выше, может применяться также для отбора существенных входных воздействий X_i и решений других подобных задач.

Кроме метода экспертных оценок имеются и другие методы ранжирования сигналов, основанные на проведении специально организованных экспериментов. Такие эксперименты называются *отсеивающими*, так как по их результатам исключаются (отсеиваются) несущественные сигналы.

§ 2.3. ВЫБОР ИНТЕРВАЛА НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТА И ШАГА ДИСКРЕТНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Пусть требуется определить величины Δt и t_n для оценки модели объекта. Рассмотрим данную задачу применительно к одномерному стационарному линейному объекту, имеющему один вход $X(t)$ и один выход $Y(t)$.

Решение данной задачи зависит от структуры модели, которую требуется построить по результатам экспериментального исследования. Например, величина Δt при расчете динамических моделей, как правило, значительно меньше, чем при расчете статических моделей. Известны два принципиально разных подхода к разработке моделей объектов экспериментальными методами — это метод активного эксперимента и метод пассивного эксперимента.

Метод активного эксперимента предполагает исследование реакции объекта на специально сформированные входные воздействия, конкретный вид которых и закон изменения во времени определяются специальными планами эксперимента. Выбор Δt и t_n в этом случае также определяется планом эксперимента.

Метод пассивного эксперимента предполагает регистрацию $X(t)$ и $Y(t)$ в режиме нормального функционирования объекта. Именно для этого случая рассмотрим данную задачу при построении статической модели объекта в виде регрессионного уравнения. Основная идея излагаемого метода выбора (расчета) $\Delta t, t_n$ состоит в применении следующих ограничений регрессионного анализа: 1) независимости входных воздействий X_i друг от друга; 2) применимости уравнения регрессии только в границах исследованных диапазонов изменений $[X_{\min}, X_{\max}]$. Эти ограничения используют при анализе статистических характеристик X_i , определяемых по экспериментально снятым реализациям $X(t)$ во времени.

Для решения задачи необходимы априорные данные о диапазоне изменения $X(t)$ — $[X_{\min}, X_{\max}]$, классах точности $\gamma_r, \%$ и диапазонах измерения N_n измерительных преобразователей, используе-

мых для регистрации $X(t)$, а также данные о плотности распределения вероятностей $P(X)$.

На рис. 2.7 показан пример реализации входного воздействия $X(t)$. Весь диапазон $[X_{\min}, X_{\max}]$ разбит на ряд одинаковых квантов ΔX , при этом величина ΔX должна отвечать условию

$$\Delta X \geq \gamma_r N_{\text{н}}^{-1} 100. \quad (2.43)$$

Слева от реализации $X(t)$ показан типичный вид кривой плотности распределения вероятностей $P(X)$ по диапазону (при достаточно большом $t_{\text{н}}$ он обычно близок к нормальному). При рассмотрении кривой плотности распределения вероятностей в диапазоне

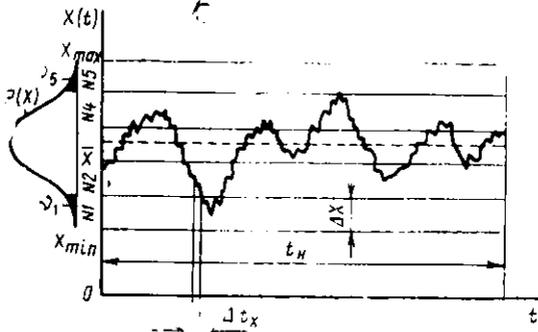


Рис. 2.7

$[X_{\min}, X_{\max}]$ можно определить (рис. 2.7) вероятности v_k появления $X(t)$ в крайних квантах (для рис. 2.7 $v_k = v_1 = v_5$). Если кривая плотностей распределения вероятностей неизвестна, то необходимо провести пассивное экспериментальное исследование на объекте с целью получения реализации $X(t)$ в течение достаточно длительного времени $[0, t_{\text{н}}]$. При шаге дискретности Δt_x на интервале $[0, t_{\text{н}}]$ получаем N точек реализации $X(t)$; $N = t_{\text{н}}/\Delta t_x$. Если за время $[0, t_{\text{н}}]$ имеются b_k появлений $X(t)$ в крайних квантах ΔX_k , то

$$v_k = b_k/N. \quad (2.44)$$

Шаг дискретности регистрации Δt_x выбирают из следующих соображений. Математический аппарат разработки статических моделей построен в предположении, что соседние точки X_i и X_{i+1} реализации $X(t)$ независимы. Согласно условию (2.28) (см. рис. 2.2), это обеспечивается для линейных моделей при

$$\Delta t_x \geq (\tau_{\text{нр}})_x, \quad (2.45)$$

где $(\tau_{\text{нр}})_x$ — предельный интервал корреляции для $X(t)$.

При известной оценке корреляционной функции $R_x(\tau)$ определяется Δt_x по (2.45). Если $R_x(\tau)$ неизвестна, то необходимо получить реализацию $X(t)$ с достаточно малым шагом дискретности Δt_x^* . На диаграмме регистрации $X(t)$, т. е. реализации $X(t)$, отмечают при-

ближенное среднее значение \bar{X} и подсчитывают число пересечений F кривой $X(t)$ линии \bar{X} (см. рис. 2.7). Когда величина F достигнет величины 50—60, то прекращают подсчет и определяют среднее число пересечений (число нулей) по формуле

$$f_0 = F/t_p, \quad (2.46)$$

где t_p — время регистрации.

Тогда можно определить Δt_x из формулы [4]

$$\Delta t_x \geq 2 t_p / F. \quad (2.47)$$

При регистрации $X(t)$, $Y(t)$ желательно выбирать одинаковый временной шаг дискретности, т. е. $\Delta t_x = \Delta t_y = \Delta t$. Для окончательного выбора Δt необходимо определить Δt_y по изложенной процедуре [используя реализации $Y(t)$], сравнить Δt_x и Δt_y между собой и выбрать в качестве Δt большую из них.

Если имеется многомерный объект с m входами и p выходами, то необходимо определить все $[\Delta t_x, \Delta t_y]$ и в качестве Δt выбрать наибольшее из них.

Перейдем к вопросу выбора t_n — интервала времени наблюдения, или минимального времени реализации. При этом необходимо учесть, что при квантовании $X(t)$ в диапазоне $[X_{\min}, X_{\max}]$ на кванты ΔX мы имеем дискретную случайную величину.

Для стационарных процессов вероятность P того, что $X(t)$ за время t_n попадет хотя бы один раз в крайний квант диапазона $[X_{\min}, X_{\max}]$ (при симметричном законе вероятностей) равна, согласно формуле Пуассона [4],

$$P = (1 - e^{-\lambda})^2, \quad (2.48)$$

где λ — параметр, определяемый формулой

$$\lambda = t_n \nu_k / (\Delta t). \quad (2.49)$$

Из (2.49) определяем искомое значение t_n :

$$t_n = \Delta t \lambda / \nu_k. \quad (2.50)$$

Задаваясь вероятностью P , из (2.48) определяем λ . В табл. 2.6 приведены значения λ для некоторых P .

Таблица 2.6

P	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
λ	3,68	3,90	4,19	4,60	5,30

Пример. Для разработки статической модели ракельного наносного узла (см. рис. 1.2) в качестве входного воздействия $X(t)$ выбрана толщина основы $b_{ос}$, мм, в качестве выходной переменной $Y(t)$ выбрана толщина покрытия b_n , мм. Анализ реализации $X(t)$, $Y(t)$ показал, что величина f_0 , определяемая по (2.46), для $X(t)$ и $Y(t)$ одинакова и равна $12,5 \text{ мин}^{-1}$, что позволяет рассчитать $t_{пр} \approx 9,6 \text{ с}$. Выбираем шаг дискретности регистрации $\Delta t = 10 \text{ с}$.

Обработка реализаций $X(t)$ позволила получить табл. 2.7 частот появления значений $X(t)$ в одиннадцати квантах диапазона [$X_{\min}=0,2$ мм; $X_{\max}=0,8$ мм], $\Delta X=0,054$ мм. Общее число точек в реализации (выборке) 200, т. е. время регистрации $t_r=33$ мин; $v_k=(v_1+v_{11})/2=0,5(2/200+4/200)=3/200$.

Таблица 2.7

Номер кванта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Частота появления n_x	2	4	12	18	34	52	38	21	10	5	4

Задавшись $P=0,95$, из табл. 2.6 получаем $\lambda=3,68$. По формуле (2.50) при $v_k=3/200$ рассчитаем $(t_n)_x=40,8$ мин, окончательно выбираем $t_n=41$ мин, при этом получим 246 точек реализации $X(t)$, $Y(t)$.

Для многомерного объекта, имеющего m входов $X_v(t)$ при $v=1, 2, \dots, m$, необходимо рассчитать $(t_n)_v$ по (2.50) для каждого $X_v(t)$ и в качестве t_n выбрать наибольшее из них. Анализ формулы (2.50) показывает, что чем реже попадает входное воздействие $X(t)$ в крайние кванты диапазона [X_{\min} , X_{\max}], тем больше требуется величина t_n . Этот результат объясняется необходимостью учета в модели значений $X(t)$ на краях диапазона, так как только в этом случае разработанная модель будет работоспособной в заданном диапазоне. Чем меньше изменения (колебательность) $X(t)$ в процессе регистрации, т. е. чем стабильнее $X(t)$, тем больше должен быть интервал наблюдения t_n .

Особенно часто с такой ситуацией встречаются при применении метода пассивного эксперимента на действующем объекте, включенном в контур локальной АСР. При хорошо настроенной системе регулирования и малом уровне возмущений выходная переменная $Y(t)$ и входное управляемое воздействие $X(t)$ имеют малую колебательность. Стабильность $X(t)$ вызывает необходимость назначения значительных величин t_n , что удорожает и усложняет исследование. По этой причине часто пассивные методы вообще не могут быть применены для идентификации объекта моделью; в этих случаях приходится использовать методы активного эксперимента, чтобы исследовать объект во всем рабочем диапазоне [X_{\min} , X_{\max}].

§ 2.4. РАЗРАБОТКА СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Здесь рассматривается задача построения статической модели на основе проведения пассивного экспериментального исследования на объекте. Излагаемая процедура расчета использует аппарат регрессионного анализа [5], в основе которого лежит метод наименьших квадратов (МНК). Этот метод обеспечивает для линейных объектов построение модели, наиболее соответствующей (адекватной) массиву экспериментальных данных в смысле выполнения условия (2.9), т. е. минимума среднего квадрата ошибки I .

Изложение данного метода начнем с расчета модели одномерного объекта по экспериментальным данным, собранным в результате пассивной регистрации $X(t)$, $Y(t)$, при этом время наблюдения t_n и шаг дискретности M выбраны в соответствии с методикой, изложенной в § 2.3.

На рис. 2.8 показана выборка $[X_i, Y_i]$, где $i=1, 2, \dots, n$; в данном случае число опытов $n=6$. Предположим, что искомая модель линейна, тогда

$$\hat{Y}_M = a_0 + a_1 X, \quad (2.51)$$

где \hat{Y}_M — расчетное значение (оценка) выходной переменной модели; a_0 и a_1 — параметры модели.

Требуется получить такие значения параметров a_0 и a_1 , для которых выполнялось бы условие (2.9), т. е. чтобы функция

$$\Phi(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^n (Y_{M_i} - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 X_i - Y_i)^2 \quad (2.52)$$

стремилась к минимуму.

Здесь X_i, Y_i — экспериментальные значения в i -м опыте.

Условием минимума $\Phi(a_0, a_1)$ является $\partial\Phi(a_0, a_1)/\partial a_0 = 0$; $\partial\Phi(a_0, a_1)/\partial a_1 = 0$. Дифференцируя $\Phi(a_0, a_1)$, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Phi(a_0, a_1)}{\partial a_0} &= \frac{\partial}{\partial a_0} \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 X_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial a_0} (a_0 + a_1 X_i - Y_i)^2 = \\ &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 X_i - Y_i) = 2 \left(n a_0 + a_1 \sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n Y_i \right) = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$n a_0 + a_1 \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n Y_i. \quad (2.53)$$

Аналогично

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Phi(a_0, a_1)}{\partial a_1} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial a_1} (a_0 + a_1 X_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^n 2 X_i (a_0 + a_1 X_i - Y_i) = \\ &= 2 a_0 \sum_{i=1}^n X_i + 2 a_1 \sum_{i=1}^n X_i^2 - 2 \sum_{i=1}^n X_i Y_i = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$a_0 \sum_{i=1}^n X_i + a_1 \sum_{i=1}^n X_i^2 = \sum_{i=1}^n X_i Y_i. \quad (2.54)$$

Система уравнений (2.53) и (2.54) называется системой нормальных уравнений МНК.

В матричном виде система нормальных уравнений имеет вид

$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_i Y_i \end{vmatrix} \quad (2.55)$$

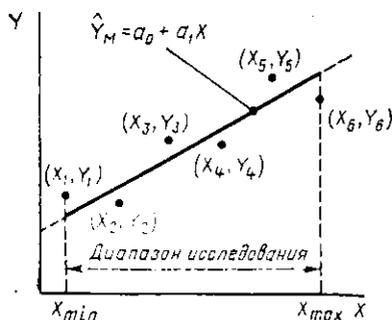


Рис. 2.8

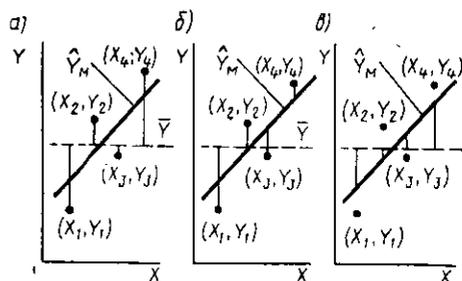


Рис. 2.9

Решая систему (2.55), получаем

$$\left. \begin{aligned} \hat{a}_0 &= \left(\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) / \left[n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right]; \\ \hat{a}_1 &= \left(n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i \right) / \left[n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right], \end{aligned} \right\} (2.56)$$

где \hat{a}_0, \hat{a}_1 — расчетные оценки параметров a_0, a_1 .

Необходимым условием решения системы (2.55) является неравенство нулю знаменателя, представляющего собой определитель Δ матрицы

$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix} \quad (2.57)$$

Если определитель Δ матрицы (2.57) равен или близок нулю, то матрицу называют вырожденной или плохо обусловленной.

После определения параметров \hat{a}_0, \hat{a}_1 по (2.56) вычисляют расчетные значения \hat{Y}_m и строят линию регрессии (см. рис. 2.8).

Построив модель (уравнение регрессии), ее анализируют с целью проверки адекватности модели объекту и в случае адекватности строят доверительные интервалы для параметров модели и расчетных значений \hat{Y}_m .

При анализе модели используются следующие характеристики (рис. 2.9) [5]:

1) сумма квадратов разбросов экспериментальных данных около их среднего значения (рис. 2.9, а)

$$SS_{ic} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2, \quad (2.58)$$

где $\bar{Y}_i = \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) / n$; в данной задаче степень свободы для SS_{ic} есть $\gamma_{ic} = n - 1$;

2) сумма квадратов разбросов экспериментальных данных около линии регрессии (рис. 2.9, б)

$$SS_{ip} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2; \quad (2.59)$$

степень свободы для SS_{ip} есть $\gamma_{ip} = n - 2$;

3) сумма квадратов разбросов линии регрессии около среднего значения (рис. 2.9, в)

$$SS_{pc} = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2; \quad (2.60)$$

степень свободы для SS_{pc} есть $\gamma_{pc} = 1$.

При наличии повторных опытов величину SS_{ip} , вычисляемую по (2.59), можно представить в виде двух слагаемых [5]:

$$SS_{ip} = SS(Y_i) + SS(\hat{Y}_i) \text{ при } \gamma_{ip} = \gamma(Y_i) + \gamma(\hat{Y}_i), \quad (2.61)$$

где $SS(Y_i)$ — сумма квадратов погрешностей измерения Y_i («чистой» ошибки); $SS(\hat{Y}_i)$ — сумма квадратов погрешностей, связанных с неадекватностью модели объекту; $\gamma(Y_i)$, $\gamma(\hat{Y}_i)$ — соответствующие степени свободы.

При проведении m_j повторных опытов при одном и том же значении X_i получим m_j значений $Y_{1i}, Y_{2i}, \dots, Y_{m_i}$ выходных переменных и тогда можно определить среднее значение $\bar{Y}_i = \sum_{j=1}^{m_j} Y_{ij} / m_j$.

Для двух повторных опытов ($m=2$) получим $Y_i = 0,5(Y_{1i} + Y_{2i})$; квадрат погрешности измерения Y_i равен

$$\sum_{j=1}^{m_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 = 0,5(Y_{1i} - Y_{2i})^2. \quad (2.62)$$

Для $SS(Y_i)$ по всем n значениям

$$SS(Y_i) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2. \quad (2.63)$$

При $m=2$ для всех n значений Y_i

$$SS(Y_i) = 0,5 \sum_{i=1}^n (Y_{i1} - Y_{i2})^2. \quad (2.64)$$

Степень свободы для $SS(Y_i)$ в общем случае

$$\gamma(Y_i) = \sum_{i=1}^n m_i - n. \quad (2.65)$$

При $m=2$ степень свободы $\gamma(Y_i) = 2n - n = n$.

Из дисперсионного анализа [5] известно, что названные суммы квадратов связаны уравнением

$$SS_{tc} = SS_{ip} + SS_{pc} \quad \text{при} \quad Y_{ic} = Y_{ip} + Y_{pc}. \quad (2.66)$$

Мерой погрешности модели (2.51) служит среднее квадратичное отклонение

$$S_{ip} = \sqrt{SS_{ip}/\gamma_{ip}}. \quad (2.67)$$

Мерой погрешности регрессии относительно среднего служит среднее квадратичное отклонение

$$S_{pc} = \sqrt{SS_{pc}/\gamma_{pc}}. \quad (2.68)$$

Мерой погрешности измерения Y_i (чистой ошибки) служит среднее квадратичное отклонение

$$S(Y_i) = \sqrt{SS(Y_i)/[\gamma(Y_i)]}. \quad (2.69)$$

Мерой погрешности неадекватности модели \hat{Y}_m служит среднее квадратическое отклонение

$$S(\hat{Y}) = \sqrt{SS(\hat{Y}_i)/[\gamma(\hat{Y}_i)]}. \quad (2.70)$$

Величины $SS(\hat{Y}_i)$, $\gamma(\hat{Y}_i)$ определяют обычно из выражения (2.61):

$$SS(\hat{Y}_i) = SS_{ip} - SS(Y_i); \quad \gamma(\hat{Y}_i) = \gamma_{ip} - \gamma(Y_i). \quad (2.71)$$

Величины SS_{ip} , SS_{pc} , γ_{ip} , γ_{pc} рассчитывают по экспериментальным данным по соответствующим формулам. Затем рассчитывают S_{ip} , S_{pc} . Для проверки адекватности модели объекту используют методику, разработанную Р. Фишером [5].

При отсутствии повторных опытов адекватность проверяют следующим образом. Определяют расчетное значение

$$F_p^* = S_{pc}^2 / S_{ip}^2, \quad (2.72)$$

при этом числа степеней свободы числителя и знаменателя соответственно равны γ_{pc} и γ_{ip} . По таблицам распределения Фишера (F -распределение), задавшись P , с учетом γ_{pc} и γ_{ip} определяют табличное значение $F_{\tau}^*(P, \gamma_{pc}, \gamma_{ip})$. Если F_p^* и F_{τ}^* удовлетворяют неравенству

$$F_p^* > F_{\tau}^*, \quad (2.73)$$

то рассчитанная модель адекватна объекту с вероятностью (надежностью) P . Если это неравенство не выполняется, то модель неадекватна объекту и необходимо изменить структуру модели (добавить другие X , учесть нелинейность объекта и т. п.).

При наличии повторных опытов используется несколько иная процедура. По экспериментальным данным в соответствии с (2.59), (2.63) определяют SS_{ip} , $SS(Y_i)$, γ_{ip} , $\gamma(Y_i)$, по (2.71) $SS(\hat{Y}_i)$ и $\gamma(\hat{Y}_i)$, по (2.69) и (2.70) — $S(Y_i)$ и $S(\hat{Y}_i)$, а затем расчетное значение

$$F_p^{**} = S^2(\hat{Y}_i) / S^2(Y_i), \quad (2.74)$$

при этом числа степеней свободы числителя и знаменателя равны соответственно $\gamma(\hat{Y}_i)$ и $\gamma(Y_i)$.

По таблицам распределения Фишера, задавшись P и учитывая $\gamma(\hat{Y}_i)$ и $\gamma(Y_i)$, определяют табличное значение $F_{\tau}^{**} [P, \gamma(\hat{Y}_i), \gamma(Y_i)]$. Если значения F_p^{**} и F_{τ}^{**} удовлетворяют неравенству

$$F_p^{**} < F_{\tau}^{**}, \quad (2.75)$$

то модель адекватна объекту [обратите внимание на направление знака неравенства в условиях (2.75) и (2.73)]. Если неравенство (2.75) не выполняется, то полученная модель не адекватна объекту. Процедура проверки адекватности при наличии повторных опытов [неравенство (2.75)] даст более надежные результаты, чем неравенство (2.73) [5].

Следующий этап после проверки адекватности — расчет доверительных интервалов для параметров модели a_0 , a_1 и выходной переменной Y_m . Основой для расчета доверительных интервалов является величина S_{ip} , полученная по формуле (2.67), а также таблицы распределения Стьюдента (t -распределение).

Задаваясь надежностью оценки P и зная степень свободы $\gamma_{ip} = n - 2$, по таблицам распределения Стьюдента находят величину $t(P, n - 2)$. Тогда расчетные формулы для доверительных интервалов параметров модели [5] можно написать:

для параметра a_1

$$\hat{a}_1 \pm a_1 = \hat{a}_1 \pm t S_{ip} \left/ \left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \right., \quad (2.76)$$

где a_1 — половина ширины, доверительного интервала для \hat{a}_1 ; $\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / n$;

для параметра a_0

$$\hat{a}_0 \pm \alpha_0 = \hat{a}_0 \pm \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right\}^{1/2} t S_{iP}, \quad (2.77)$$

где α_0 — половина ширины доверительного интервала для \hat{a}_0 .

Надежность оценок этих интервалов равна P . Рассчитанные интервалы для параметров модели $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ при наличии k -входов X_v позволяют оценить значимость отдельных входных воздействий. Входное воздействие X_v считается значимым, если соответствующий параметр \hat{a}_v в модели удовлетворяет условию (при заданной надежности P)

$$|\hat{a}_v| > \alpha_v, \quad (2.78)$$

т. е. если абсолютное значение параметра \hat{a}_v превышает половину ширины соответствующего доверительного интервала α_v , то X_v

является значимым. В противном случае X_v является незначимым и его можно отбросить, при этом, однако, изменится модель объекта, т. е. изменятся параметры при оставшихся в модели входных воздействиях, а также изменятся все SS и, следовательно, S_{iP} . Экспериментальное исследование повторять не следует, но необходимо провести повторный расчет модели после исключения незначимых X_v .

Чтобы не проводить повторных расчетов модели, при отбрасывании (или включении) отдельных входных воздействий применяют регрессионные

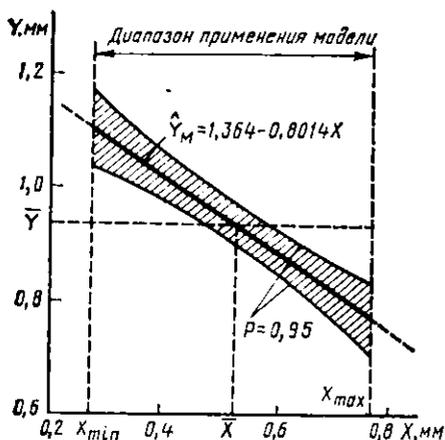


Рис. 2.10

ные уравнения в форме ортогональных полиномов (ортогональные многочлены Чебышева) [5].

Доверительный интервал для какого-то конкретного расчетного (среднего) значения Y_{Mk} модели при $X_i = X_k$ определяется выражением

$$Y_{Mk} \pm t S_{iP} \left[1/n + (X_k - \bar{X})^2 / \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2}, \quad (2.79)$$

из которого следует, что он меняется по ширине в зависимости от значения X_k . Минимальная ширина доверительного интервала достигается при $X_k = \bar{X}$, т. е. доверительный интервал для среднего значения равен

$$\bar{Y}_M \pm t S_{iP} \sqrt{n}$$

При удалении X_h от \bar{X} в любую сторону доверительный интервал расширяется и достигает максимального значения на концах диапазона, т. е. при $X_h = X_{\min}$ или $X_h = X_{\max}$. На рис. 2.10 показан вид «коридора» доверительных интервалов для \hat{Y}_m , построенного по (2.78). Кривые, ограничивающие этот коридор, — гиперболы.

Использование регрессионной модели \hat{Y}_m за пределами исследованного диапазона $[X_{\min}, X_{\max}]$ необоснованно (см. рис. 2.8 и 2.10) [5].

Рассмотрим особенности данного метода на примере расчета статической линейной модели ракельного наносного узла (см. рис. 1.3). Строится линейная модель, выходной переменной Y является толщина покрытия b_p в мм; входным воздействием — толщина основы b_{oc} в мм.

В табл. 2.8 дана выборка 25 значений X_i, Y_i ($n=25$), полученных в результате регистрации процесса.

Таблица 2.8

i	X_i	Y_i	i	X_i	Y_i	i	X_i	Y_i
1	0,353	1,098	10	0,575	0,914	18	0,700	0,811
2	0,297	1,113	11	0,464	0,824	19	0,700	0,683
3	0,308	1,257	12	0,289	1,219	20	0,745	0,888
4	0,588	0,804	13	0,281	1,188	21	0,721	0,768
5	0,614	0,927	14	0,391	0,957	22	0,585	0,847
6	0,713	0,873	15	0,468	1,094	23	0,446	0,886
7	0,744	0,636	16	0,485	0,958	24	0,334	1,036
8	0,767	0,850	17	0,593	1,009	25	0,286	1,108
9	0,707	0,782						

Будем искать заданную модель в виде $\hat{Y}_m = a_0 + a_1 X$. Для составления системы (2.55) рассчитаем величины:

$$\sum_{i=1}^{25} X_i = 13,15; \quad \bar{X} = 0,526; \quad \sum_{i=1}^{25} X_i^2 = 7,63; \quad \sum_{i=1}^{25} Y_i = 23,56; \quad \bar{Y} = 0,9424;$$

$$\sum_{i=1}^{25} X_i Y_i = 11,821.$$

Составим систему нормальных уравнений согласно (2.55)

$$\begin{bmatrix} 25 & 13,15 \\ 13,15 & 7,63 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23,56 \\ 11,821 \end{bmatrix}.$$

Определитель $\Delta = 17,83 \neq 0$. Согласно (2.56) получим $\hat{a}_0 = (23,56 \cdot 7,63 - 13,15 \cdot 11,821) / 17,83 = 1,364$; $a_1 = (25 \cdot 11,821 - 13,15 \cdot 23,56) / 17,83 = -0,8014$. Следовательно, искомая модель (уравнение регрессии) получится (см. рис. 2.10) в виде $\hat{Y}_m = 1,364 - 0,8014X$. По этой модели, подставляя в нее X_i из табл. 2.8, рассчитывают \hat{Y}_{mi} (см. рис. 2.10). В связи с отсутствием повторных опытов применяют первый вариант проверки адекватности.

По (2.59) рассчитывают $SS_{i.p} = 0,182$; $\gamma_{i.p} = 23$, по (2.60) рассчитывают $SS_{p.c} = 0,456$; $\gamma_{p.c} = 1$, по (2.67) и (2.68) определяют

$$S_{i.p} = \sqrt{0,182/23} = 0,089; \quad S_{p.c} = \sqrt{0,456} = 0,675,$$

по (2.72) рассчитывают $F_p^* = 0,456 / (0,182/23) = 57,63$.

По таблицам распределения Фишера при $P=0,95$ находят $F_{\tau}^*(0,95; 1; 23) = 4,28 < F_p^*$.

Условие (2.73) выполняется, следовательно, полученная модель адекватна объекту.

Рассчитаем доверительные интервалы, задавшись надежностью $P=0,95$. Согласно (2.76) для a_1 получим:

$$t(0,95; 23) = 2,069; \sum_{i=1}^{25} (X_i - \bar{X})^2 = 0,715; \hat{a}_1 \pm 2,069 \cdot 0,089 / \sqrt{0,715} = \\ = \hat{a}_1 \pm 0,218,$$

следовательно, доверительный интервал для a_1

$$\{-1,0194 \leq a_1 \leq -0,5834\}_{P=0,95}.$$

Для a_0 по (2.77) аналогично получим

$$t = 2,069; \sum_{i=1}^{25} X_i^2 = 7,63; \hat{a}_0 \pm 2,069 \cdot 0,089 \sqrt{7,63 / (25 \cdot 0,715)} = \hat{a}_0 \pm 0,12.$$

Отсюда доверительный интервал для a_0

$$\{1,244 \leq a_0 \leq 1,484\}_{P=0,95}.$$

По выражению (2.78) определяем расчетную формулу для оценки доверительного интервала для

$$\hat{Y}_k \pm 2,069 \cdot 0,089 \sqrt{1/25 + (X_k - 0,526)^2 / 0,715}.$$

Минимальная ширина доверительного интервала для $X_k = \bar{X} = 0,526$, т. е. для $Y_k = \bar{Y} = 0,9424$, будет:

$$\hat{Y} \pm 0,0368, \text{ т. е. } \{0,9056 \leq \hat{Y} \leq 0,9792\}_{P=0,95}.$$

Наибольшее значение доверительного интервала получается при крайних значениях X_k . Например, для $X_k = X_{\max} = 0,767$ (табл. 2.8, опыт 8) получим (см. рис. 2.10):

$$\hat{Y}_8 \pm 2,069 \cdot 0,089 \sqrt{1/25 + 0,0581 / 0,715} = \hat{Y}_8 \pm 0,064,$$

т. е. доверительный интервал увеличился почти вдвое по сравнению со средней областью модели.

Укажем ограничения, принятые для регрессионного метода:

1) погрешность модели $v(t) = \varepsilon(t)$ [см. выражения (2.3), (2.7)] есть случайная величина со средним, равным нулю и дисперсией $\sigma^2 \approx S_{\text{пр}}^2$;

2) погрешности в отдельных опытах не коррелированы между собой и не зависят от значений X_i, Y_i ;

3) величины X_i в отдельных опытах измерены без погрешностей;

4) погрешности $v(t)$ имеют нормальное распределение плотности вероятностей.

Последнее ограничение (условие) необходимо для проверки адекватности модели и нахождения доверительных интервалов, так как применение распределений Фишера и Стьюдента требуют нормальности распределения вероятностей погрешностей.

Разработка статической модели для многомерного объекта (с m входами и одним выходом) использует изложенную вычислительную процедуру, но в связи с увеличением размерности модель объекта (2.51) записывают в векторно-матричной форме [5]:

$$\vec{Y} = \vec{X} \vec{a}, \quad (2.80)$$

где \vec{Y} есть $(n \times 1)$ вектор наблюдений (вектор-столбец) выходной переменной Y по n опытам; \vec{X} есть $(n \times m)$ матрица входных воздействий (m входов и n опытов); \vec{a} есть $(m \times 1)$ вектор параметров модели.

Система нормальных уравнений (2.55) преобразуется к виду

$$(\vec{X}^T \vec{X}) \vec{a} = \vec{X}^T \vec{Y}, \quad (2.81)$$

где \vec{X}^T — транспонированная матрица \vec{X} .

Если матрица $(\vec{X}^T \vec{X})$ невырожденная, то система (2.81) имеет решение в виде

$$\vec{a} = (\vec{X}^T \vec{X})^{-1} \vec{X}^T \vec{Y}, \quad (2.82)$$

где $(\vec{X}^T \vec{X})^{-1}$ — обратная матрица.

Большинство современных ЭЦВМ имеют стандартные программы регрессионного анализа (решение системы линейных алгебраических уравнений), которые могут быть использованы для идентификации многомерных объектов линейными моделями типа

$$\hat{Y}_m = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_m X_m = \sum_{v=0}^m a_v X_v. \quad (2.83)$$

Существующие алгоритмы расчета позволяют получать и более сложные модели, учитывающие нелинейности, т. е. получать модели, например, типа

$$\hat{Y}_m = \sum_{v=0}^m a_v X_v + \sum_{u,v=1}^m a_k X_u X_v + \dots. \quad (2.84)$$

Для многомерных моделей типа (2.83) или (2.84), рассчитываемых по данным пассивного эксперимента, доверительные интервалы для параметров модели обычно не определяют. При пассивном эксперименте не удастся полностью исключить корреляцию между отдельными входными воздействиями X_u , X_v , что приводит к весьма сложной совместной конфигурации доверительных интервалов, которые трудно рассчитать аналитически. Активный эксперимент, проводимый, например, по методам оптимального многофакторного эксперимента [3], позволяет исключить корреляцию между X_u , X_v и определить независимые оценки доверительных интервалов параметров модели по процедуре, подобной описанной

выше. Методикам проведения подобных экспериментальных исследований посвящена обширная литература [2, 3].

В заключение рассмотрим, как влияет погрешность измерения входных воздействий X на погрешность модели S_{ip} . Известно, что наличие погрешностей измерения (регистрации) X увеличивает S_{ip} . В общем случае приращение S_{ip} за счет погрешностей измерения может быть столь значительным, что полученная модель окажется неработоспособной, поэтому одним из ограничений регрессионного анализа является условие отсутствия погрешностей при измерении X_i (см. выше третье ограничение). Однако на практике X_i измеряется с погрешностями.

Для оценки влияния ошибок измерения (регистрации) X_i на точность получаемой модели представим i -е измерение j -го входного воздействия $X_{ij}^{из}$ в виде суммы

$$X_{ij}^{из} = x_{ij} + e_{ij}, \quad (2.85)$$

где x_{ij} — истинное значение X_{ij} ; e_{ij} — абсолютная погрешность измерения.

Введем ограничения:

ошибки e_{ij} есть случайные величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D_j(e)$;

эти ошибки не коррелированы между собой и со значениями самих воздействий.

Величины $D_j(e)$ определяются экспериментально по повторным измерениям X_{ij} или по характеристикам измерительных приборов (класс точности γ_T (%) и диапазон шкалы прибора N_n); в последнем случае величины

$$D_j(e) \approx [\gamma_T N_n / (3 \cdot 100)]^2. \quad (2.86)$$

Если задано среднее значение \bar{X}_j и относительная погрешность γ_j (%) ее измерения, то

$$D_j(e) = [\bar{X}_j \gamma_j / (3 \cdot 100)]^2.$$

Влияние погрешностей измерения X_j на точность модели оценим по приращению дисперсии модели согласно выражению [4]:

$$S_{ip}^i = (S_{ip}^0)^2 + \Delta S_{ip}^2, \quad (2.87)$$

где $(S_{ip}^0)^2$ — дисперсия модели при условии, что все $e_{ij} = 0$. Величина S_{ip} определяется по (2.67).

В процессе регистрации X_j изменяются в диапазоне $[X_{\min}; X_{\max}]$. Оценим эти изменения дисперсией

$$D_{ij}(X) = \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 / (n - 1), \quad (2.88)$$

где n — число различных значений X_{ij} в диапазоне.

Далее предположим, что в результате регрессионного анализа получена модель в виде (2.83), т. е. рассчитаны параметры \tilde{a}_0 ,

$\hat{a}_1, \dots, \hat{a}^k$. Представим приращение дисперсии модели ΔS_{ip}^2 в виде [4]:

$$\Delta S_{ip}^2 = [(n-1)/(n-k)] (S_{ip}^0)^2 \sum_{j=1}^k \Delta R_j^2, \quad (2.89)$$

где
$$\Delta R_j^2 = \frac{D_j(e)}{D_j(X)} (\hat{a}_j^*)^2;$$

ΔR_j — величина, характеризующая вклад j -го входного воздействия X_j в увеличение ΔS_{ip}^2 ; \hat{a}_j^* — расчетные параметры модели в стандартизованном масштабе.

Модель преобразуется к стандартизованному масштабу переводом входных воздействий в безразмерную форму по выражению

$$x_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_j) / [(X_j)_{\max} - (X_j)_{\min}], \quad (2.90)$$

где X_{ij} — текущее значение X_j в i -м измерении; $\bar{X}_j = [(X_j)_{\max} + (X_j)_{\min}] / 2$.

Анализ выражения (2.89) показывает, что чем больше вариация X_j [т. е. чем больше $D_j(X)$], тем меньше сказываются погрешности измерения $D_j(e)$ на ухудшение точности модели. Далее, чем больше абсолютное значение параметра \hat{a}_j^* (т. е. чем больше вес (влияние) данного воздействия X_j), тем больше влияет погрешность измерения e_j на ухудшение точности модели.

Пример [4]. Модель процесса коагуляции была получена в стандартизованном масштабе в виде $\bar{Y}_m = -0,12x_1 - 0,17x_2 - 0,3x_3 + 0,18x_4 + 0,7x_5 + 0,14x_6 + 0,38x_7$. В табл. 2.9 даны основные показатели, необходимые для расчета величины

$\sum_{j=1}^k \Delta R_j^2$, определяющей увеличение погрешности модели: $(S_{ip}^0)^2 \approx S_{ip}^2 = 8,13$; $n=8$; $k=7$.

Таблица 2.9

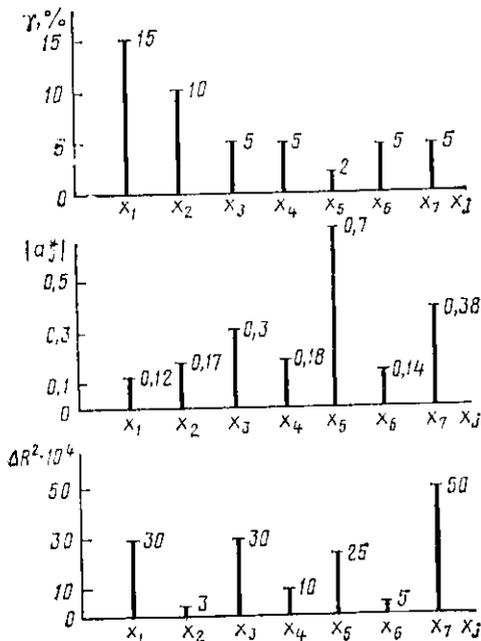
x_j	\bar{X}_j	$\gamma_j, \%$	$D_j(e)$	$D_j(X)$	$ a_j^* $	ΔR_j^2
X_1	375	15	351	1660	0,12	0,003
X_2	24	10	0,64	68,5	0,17	0,0003
X_3	104	5	3,0	90,0	0,3	0,003
X_4	33	5	0,3	96,9	0,18	0,001
X_5	60	2	0,16	31,2	0,7	0,0025
X_6	1990	5	1100	47700	0,14	0,0005
X_7	120	5	4,0	113,0	0,38	0,005

$$\sum_{j=1}^7 \Delta R_j^2 = 153 \cdot 10^{-4}$$

Полученные результаты представлены на рис. 2.11 в виде диаграмм. Анализ этих диаграмм позволяет сделать следующие выводы.

1. Основными составляющими в $\sum_{j=1}^7 \Delta R_j^2$ являются вклады x_7, x_1, x_3, x_5 . Осо-

бенно выделяется вклад x_7 , хотя относительная погрешность ее измерения сравнительно невелика (5%). Вклад x_1 почти вдвое меньше, хотя погрешность ее измерения в три раза больше (15%). На этом примере видно, что в роли особенно «неприятных» (в смысле



увеличения погрешности модели) воздействий могут быть сигналы, которые регистрируются сравнительно точно, т. е. абсолютное (или относительное) значение погрешности измерения не является решающим при отборе измерительных приборов для идентификации модели объекта.

2. Величина суммарного приращения дисперсии модели согласно (2.90) равна $\Delta S^2_{ip} = 7 \cdot 8,13 \times 0,0153 = 0,87$.

3. Общее приращение дисперсии модели за счет погрешности измерения X_j относительно невелико (около 11% от S^2_{ip}). Величину ΔS^2_{ip} можно уменьшить, если уменьшить погрешности измерения x_7, x_1, x_3, x_6 . Однако в связи с относительно малой величиной ΔS^2_{ip} точность полученной модели следует повышать в основном за счет изменения ее структуры.

Рис. 2.11

§ 2.5. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

Большинство объектов легкой промышленности имеет значительную инерционность. Так, переходные процессы изменения температуры воздуха в конвективных сушилках при скачкообразном изменении подачи тепла в калориферы делятся от 30 мин до 1,5 ч (для разных конструкций сушилок). Эта особенность требует учета динамических свойств объектов при их автоматизации. В § 2.1 приводились некоторые типы динамических моделей объектов. Указывалось, что наиболее полная информация о динамике и статике объектов содержится в модели типа дифференциального уравнения (2.13) или передаточной функции $W_m(p)$ типа (2.14).

Применяются два подхода к разработке моделей типа (2.13) — аналитический и экспериментальный.

Аналитический подход заключается в выводе модели типа (2.13) из анализа существа физико-химических процессов, происходящих в объекте, с учетом имеющихся экспериментальных данных. Аналитические модели позволяют учесть небольшое число существенных сигналов, так как они базируются на значительном упрощении (идеализации) конкретных условий работы объекта. Величина \dot{Y}_m , рассчитываемая по аналитической модели, как правило, значительно расходится с Y объекта [см. выражение (2.6)], получаемой экспериментально, однако аналитическая модель хо-

тя и грубо, но отражает существо объекта в достаточно большом диапазоне изменения учитываемых сигналов. Особенности вывода аналитических моделей тепловых объектов см. в гл. 9, 11.

Экспериментальный подход состоит в постановке специального экспериментального исследования на объекте. Как правило, эксперимент носит активный характер.

Существуют различные методы оценки динамических моделей объектов путем подачи на его вход (входы) детерминированных, специально сформированных сигналов. Здесь излагается один из прикладных методов получения динамической модели объекта, основанной на экспериментальном определении его частотной характеристики и применении метода наименьших квадратов (МНК) для расчета параметров передаточной функции $W_M(p)$ модели объекта.

С учетом того, что абсолютное большинство объектов легкой промышленности обладает самовывравниванием, отыскиваем передаточную функцию модели объекта в виде

$$W_M(p) = k(T_n p^n + T_{n-1} p^{n-1} + \dots + T_1 p + 1), \quad (2.91)$$

где k, T_1, T_2, \dots, T_n — параметры модели объекта, которые необходимо определить.

Введем ограничение на порядок знаменателя n , а именно

$$n \leq 5. \quad (2.92)$$

Соответствующую частотную характеристику объекта $W_M(i\omega)$ запишем в виде

$$W_M(i\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)}, \quad (2.93)$$

где $A(\omega)$ — модуль $W_M(i\omega)$; $\varphi(\omega)$ — аргумент (фаза)

$$W_M(i\omega); i = \sqrt{-1}; \omega — \text{круговая частота.}$$

Непосредственный расчет $W_M(i\omega)$ в виде (2.93) по МНК неудобен, так как $W_M(i\omega)$ есть нелинейная функция. Для перехода к линейной форме вводят понятие *инверсной передаточной функции*

$$W_M^{-1}(p) = 1/W_M(p), \text{ т. е.}$$

$$W_M^{-1}(p) = b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0, \quad (2.94)$$

где $b_0 = 1/k, b_1 = T_1/k, \dots, b_n = T_n/k$.

Если известны параметры инверсной передаточной функции b_0, b_1, \dots, b_n , то параметры исходной передаточной функции $W_M(p)$ определяют из формул

$$k = 1/b_0; T_j = b_j/b_0, \quad (2.95)$$

где $j = 1, 2, \dots, n$.

Учитывая (2.92), запишем инверсную частотную характеристику в виде

$$W_M^{-1}(i\omega) = U(\omega) + iV(\omega) = (b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4) + i\omega(b_1 - b_3\omega^2 + b_5\omega^4), \quad (2.96)$$

где $U(\omega), V(\omega)$ — вещественная и мнимая части $W_M^{-1}(i\omega)$.

Из (2.96) получим выражения

$$U(\omega) = b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4; \quad V(\omega)/\omega = b_1 - b_3\omega^2 + b_5\omega^4. \quad (2.97)$$

Величины $U(\omega)$ и $V(\omega)/\omega$ связаны с составляющими частотной характеристики $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ формулами

$$U(\omega) = \cos \varphi(\omega)/A(\omega); \quad V(\omega)/\omega = -\sin \varphi(\omega)/\omega A(\omega). \quad (2.98)$$

Систему уравнений (2.97) запишем в форме, позволяющей рассчитывать $U(\omega)$ и $V(\omega)/\omega$ по МНК:

$$c_1 + c_2\omega_j^2 + c_3\omega_j^4 = \hat{U}(\omega); \quad g_1 + g_2\omega_j^2 + g_3\omega_j^4 = \hat{V}(\omega)/\omega, \quad (2.99)$$

$$\text{где } c_1 = b_0; \quad c_2 = -b_2; \quad c_3 = b_4; \quad g_1 = b_1; \quad g_2 = -b_3; \quad g_3 = b_5; \quad (2.100)$$

$\hat{U}(\omega)$, $\hat{V}(\omega)/\omega$ — расчетные значения инверсной частотной характеристики.

Коэффициенты c , g в (2.99) рассчитывают методом наименьших квадратов аналогично изложенному в § 2.4. Образуют функции:

$$\left. \begin{aligned} E_{U(\omega)} &= \sum_{j=1}^m [U_i(\omega) - \hat{U}_i(\omega)]^2; \\ E_{V(\omega)/\omega} &= \sum_{j=1}^m [V_i(\omega)/\omega - \hat{V}_i(\omega)/\omega]^2, \end{aligned} \right\} \quad (2.101)$$

где $U_i(\omega)$, $V_i(\omega)/\omega$ — значения, определяемые через экспериментальные точки $W_m(i\omega)$ по (2.98); m — общее число экспериментальных точек частотной характеристики $W_m(i\omega)$.

Расчетные значения $\hat{U}(\omega)$, $\hat{V}(\omega)/\omega$ определяют из условия

$$E_{U(\omega)} \xrightarrow{c_1, c_2, c_3} \min; \quad E_{V(\omega)/\omega} \xrightarrow{g_1, g_2, g_3} \min, \quad (2.102)$$

Системы нормальных уравнений для отыскания коэффициентов c_k , g_r имеют вид

$$\partial E_{U(\omega)} / \partial c_k = 0 \quad (k=1, 2, 3); \quad \partial E_{V(\omega)/\omega} / \partial g_r = 0 \quad (r=1, 2, 3). \quad (2.103)$$

Используя (2.99) и (2.101) и учитывая (2.103), получим

$$\left. \begin{aligned} c_1 m + c_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^2 + c_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 &= \sum_{i=1}^m U_i(\omega); \\ c_1 \sum_{i=1}^m \omega_i^2 + c_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 + c_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^6 &= \sum_{i=1}^m [U_i(\omega) \omega_i^2]; \\ c_1 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 + c_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^6 + c_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^8 &= \sum_{i=1}^m [U_i(\omega) \omega_i^4]; \end{aligned} \right\} \quad (2.104)$$

$$\left. \begin{aligned}
 g_1 m + g_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^2 + g_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 + \sum_{i=1}^m V_i(\omega) \omega_i; \\
 g_1 \sum_{i=1}^m \omega_i^2 + g_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 + g_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^6 = \sum_{i=1}^m [(V_i(\omega)/\omega_i) \omega_i^2]; \\
 g_1 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 + g_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^6 + g_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^8 = \sum_{i=1}^m [(V_i(\omega)/\omega_i) \omega_i^4].
 \end{aligned} \right\} (2.105)$$

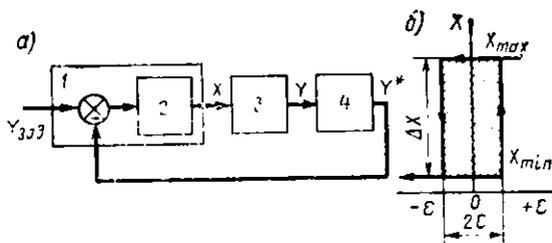


Рис. 2.12

Справа в этих уравнениях находятся величины, рассчитываемые по (2.98) из экспериментально определенных $A(\omega_i)$ и $\varphi(\omega_i)$ с учетом $(\omega_i)^2$ и $(\omega_i)^4$, слева - коэффициенты g_h, g_r , которые необходимо рассчитать, и суммы частот ω_i в четных степенях. Если действительный порядок объекта меньше 5, то вид системы упрощается. Например, при $n=4$ имеем $g_3=0$, система из трех уравнений (2.105) превращается в систему из двух уравнений.

После расчета коэффициентов c_h, g_r из (2.104), (2.105) определяют параметры b_0, b_1, \dots, b_n инверсной передаточной функции согласно (2.100). Затем по (2.95) рассчитывают параметры $\hat{k}, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_n$ искомой передаточной функции $W_M(p)$. Исходными данными для расчета являются экспериментально определенные точки частотной характеристики объекта $W(i\omega)$. Известны различные методы экспериментального определения частотных характеристик $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ [7].

С учетом распространенности в легкой промышленности локальных АСР с двухпозиционным релейным регулятором можно рекомендовать следующую методику. Исследуемый объект 3 включается в контур релейной двухпозиционной АСР согласно рис. 2.12, а. Релейный элемент 2 регулятора 1 (рис. 2.12, б) имеет постоянную зону регулирования $\Delta X = X_{max} - X_{min}$ при $\Delta X = \text{const}$ и управляемую зону неоднозначности (гистерезис) 2ϵ в диапазоне $[0, 2\epsilon_{max}]$, расположение статической релейной характеристики относительно задаваемого значения $Y_{зад}$ симметричное ($\pm\epsilon$). Выходной сигнал с объекта Y измеряется преобразователем 4 и поступает на вход регулятора 1.

Как известно, в такой АСР устанавливается режим автоколебаний (рис. 2.13), амплитуда A и период $t_{п}$ которых определяются

динамическими характеристиками объекта и настройкой релейного регулятора (величины $Y_{зад}$, $2e$, ΔX). Обозначим зону регулирования объекта через $\Delta Y = Y_{max} - Y_{min}$, где Y_{max} , Y_{min} — максимальное и минимальное значения Y объекта при $X = X_{max}$; $X = X_{min}$ соответственно. Если $Y_{зад}$ (установка задания регулятора) находится в средней зоне, т. е.

$$Y_{зад} \approx \bar{Y} = (Y_{max} + Y_{min})/2, \quad (2.106)$$

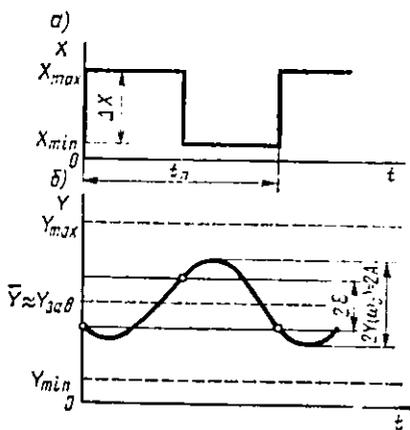


Рис. 2.13

то автоколебания $Y(t)$ имеют симметричную форму. На рис. 2.13, а показаны автоколебания входного сигнала X объекта, на рис. 2.13, б автоколебания выходного сигнала Y .

Объекты имеют различные фильтрующие свойства; при $n \geq 3$ можно считать, что объект отфильтровывает все гармоники (из входного периодического сигнала), кроме первой. Известно, что первую гармонику входного воздействия $X(t)$ типа прямоугольных симметричных колебаний (рис. 2.13, а), согласно разложению в ряд Фурье, можно представить в виде

$$X(t) \approx (2\Delta X/\pi) \sin \omega_1 t, \quad (2.107)$$

где $\omega_1 = 2\pi/(t_n)_1$ — круговая частота первой гармоники; $(t_n)_1$ — период колебаний.

Выходная переменная линейного объекта с входным воздействием $X(t)$ вида (2.107) при условии фильтрующих свойств есть гармоническая функция

$$Y(t) = Y_i \sin(\omega_1 t + \varphi_i), \quad (2.108)$$

где Y_i — амплитуда гармонических колебаний (A) объекта на частоте ω_i ; φ_i — начальная фаза колебаний $Y(t)$ по сравнению с $X(t)$ на частоте ω_i .

В связи с тем что форма автоколебаний $Y(t)$, как правило, не чисто гармоническая, $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ рассчитывают по формулам:

$$A(\omega_i) = \sqrt{a_1^2(\omega_i) + b_1^2(\omega_i)} / (0,637 \cdot \Delta X); \quad (2.109)$$

$$\varphi(\omega_i) = \arctg [b_1(\omega_i)/a_1(\omega_i)], \quad (2.110)$$

где a_1 , b_1 — коэффициенты, определяемые с помощью известных приемов обработки реализации $Y(t)$, например, методом шести (или двенадцати) ординат [7].

При регистрации $Y(t)$ необходимо предусмотреть устройство, отмечающее на диаграмме регистрации $Y(t)$ моменты переключений релейного элемента и направления его переключений.

Изменение частоты ω_i в системе достигается изменением зоны неоднозначности 2ϵ . При уменьшении 2ϵ частота ω_i увеличивается, при увеличении 2ϵ частота ω_i уменьшается. Как известно из теории релейных систем, максимально возможное в такой системе значение $\varphi_i = -\pi$; следовательно, частотный диапазон исследования объекта по данному методу определяется в основном в третьем квадранте системы координат $[Re, Im]$. Для расчетов устойчивости и качества систем регулирования именно эта область — самая важная.

Сформулируем основные этапы разработки динамической модели вида (2.91).

1. Исследуемый объект включают в контур релейной двухпозиционной АСР согласно рис. 2.12, а. При этом должны быть известны X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , а в релейном регуляторе величина 2ϵ должна управляться в пределах от 0 до $2\epsilon_{\max}$. Задатчик регулятора $U_{\text{зад}}$ устанавливается на $Y_{\text{зад}} = \bar{Y}$, где \bar{Y} определяется по (2.106).

2. Устанавливая величину $2\epsilon_1 = 2\epsilon_{\max}$, регистрируют пять-шесть периодов автоколебаний в АСР с частотой $\omega_1 = \omega_{\min}$ (входное воздействие $X(t)$ и выходная переменная $Y(t)$). По регистрации $Y(t)$ определяют (по последним двум-трем периодам) $a_1(\omega_1)$, $b_1(\omega_1)$ и рассчитывают согласно (2.110) величины $A(\omega_1)$, $\varphi(\omega_1)$.

3. Устанавливая последовательно $2\epsilon_2 < 2\epsilon_1$, $2\epsilon_3 < 2\epsilon_2 \dots$ регистрируют аналогично п. 2 автоколебания частот $\omega_2, \omega_3, \dots$, вплоть до частоты ω_{\max} при $2\epsilon = 0$ (всего m точек частот ω_i). Рассчитывают соответствующие величины: $[A(\omega_2), \varphi(\omega_2)]$, $[A(\omega_3), \varphi(\omega_3)]$, ..., $[A(\omega_m), \varphi(\omega_m)]$.

4. По (2.98) рассчитывают величины $U_i(\omega_i)$, $V_i(\omega)/\omega$.

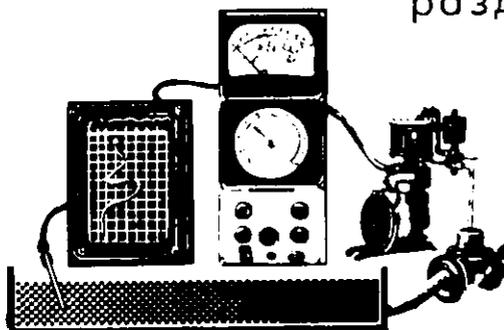
5. Составляют системы нормальных уравнений согласно (2.104) и (2.105) и решают их относительно коэффициентов c_k, g_r .

6. С учетом (2.100) определяют передают параметры инверсной передаточной функции $W^{-1}(p)$; b_0, b_1, \dots, b_n .

7. Рассчитывают искомые параметры передаточной функции $W_m(p)$; $\hat{k}, T_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_n$ по формулам (2.95).

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20913—75. АСУТП. Стадии создания. Приложение к ГОСТу.
2. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов. М., 1979.
3. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента. М., 1974.
4. Бородюк В. П., Лецкий Э. К. Статистическое описание промышленных объектов. М., 1971.
5. Драйнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М., 1973.
6. Белова Д. А., Кузин Р. Е. Применение ЭВМ для анализа и синтеза автоматических систем управления. М., 1979.
7. Балакирев В. С., Дудников Е. Г., Цирлин А. М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М., 1967.
8. Волгин В. В., Каримов Р. Н. Оценка корреляционных функций в промышленных системах управления. М., 1979.



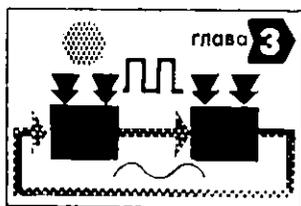
ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Автоматические устройства локальной автоматики относятся к нижней ступени управления технологическими процессами и обычно располагаются на щитах вблизи управляемых объектов или непосредственно на них. При этом совместно работают средства механизации, контроля, автоматической компенсации, программного управления исполнительными механизмами позиционного действия, стабилизации регулируемых величин и оптимизации хода технологического процесса. Среди перечисленных видов технических средств автоматизации АСУ занимают центральное место, так как регулирующие устройства обычно непосредственно взаимодействуют со всеми остальными применяемыми автоматическими устройствами локальной автоматики, используя общие элементы получения сигналов информации и оказания управляющего воздействия на объект.

Среди различных видов промышленных регуляторов самыми распространенными в легкой промышленности являются электрические регуляторы. В автоматических системах с такими регуляторами технически просто решаются вопросы дистанционного контроля и управления, а также получения разнообразных динамических характеристик блока формирования управляющего воздействия на объект, при этом линейные законы регулирования часто реализуются на основе электронного усилителя с релейным каскадом. Релейные регуляторы конструктивно наиболее просты, поэтому широко применяются при автоматизации технологических процессов.

Приведенные в данной части учебного пособия вопросы теории АСУ направлены на решение ин-

женерных задач при проектировании этих систем. К числу важнейших вопросов обычно относится выбор динамических характеристик регулирующего устройства, определение параметров настройки регулятора, выяснение целесообразной коррекции одноконтурной системы, расчет процессов регулирования при заданных внешних воздействиях.



АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Автоматические системы релейного регулирования с регулирующим устройством, построенном на основе двух- либо трехпозиционного релейного элемента, широко применяются при автоматизации технологических процессов различных отраслей промышленности. Такие важные особенности этого вида систем, как простота технических способов управления подачей электрической энергии путем переключения схемы источника питания, удобство сочетания релейного элемента с двигателем постоянной скорости, перемещающим регулирующим органом той или иной запорной арматуры технологического оборудования, определяют широкое применение их в легкой промышленности.

В данной главе рассматриваются три типа одноконтурных релейных АСР: автоматическая система двухпозиционного регулирования (АСДР) с безынерционным исполнительным элементом, АСДР и автоматическая система трехпозиционного регулирования (АСТР) с исполнительным механизмом постоянной скорости. Коррекция этих систем заключается в применении несложных дополнительных устройств, позволяющих существенно улучшить показатели качества регулирования.

Необходимые для инженерных расчетов релейных АСР теоретические положения основываются на главной особенности этих систем — формировании релейным элементом управляющего воздействия на объект, при этом выбор предпочтительного метода описания процессов регулирования зависит от динамических характеристик объекта и исполнительного устройства. В наиболее простом случае, когда непрерывная часть системы представляет собой либо интегрирующее, либо инерционное звено первого порядка с чистым запаздыванием, расчет удобно выполнять по формулам, полученным из временной зависимости регулируемой величины от сигнала на входе объекта. В других случаях, когда модель

объекта представляется последовательной цепью инерционных звеньев с чистым запаздыванием, расчет выполняют либо на основе реакции объекта на входное воздействие последовательно по интервалам, определяемым переключением релейного элемента с учетом чистого запаздывания объекта и ограничения перемещения регулирующего органа, либо на основе частотных характеристик непрерывной части системы с использованием условия гармонического баланса.

§ 3.1. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С БЕЗЫНЕРЦИОННЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

АСДР с безынерционным исполнительным элементом широко применяются при автоматизации тепловых объектов с электрообогревом, насосных и компрессорных установок. Выбор наиболее

простого метода расчета АСДР определяется видом динамической модели объекта.

Инерционный объект первого порядка с чистым запаздыванием. Математическое описание процесса двухпозиционного регулирования такого объекта непосредственно вытекает из принципа действия релейного регулятора и позволяет получить необходимые для инженерных расчетов аналитические выражения.

На рис. 3.1, а показана структурная схема АСДР объекта с передаточной функцией $W(p)$. Сигнал регулируемой величины θ с выхода объекта регулирования ОР подается на вход элемента сравнения с сигналом заданного значения θ_0 .

Сигнал рассогласования e_θ вызывает переключение релейного элемента РЭ. Сигнал регулирующего воздействия x подается на вход объекта совместно с сигналом возмущающего воздействия x_0 . Тогда передаточная функция линейного объекта

$$W(p) = \Theta(p) E_x(p) = k_{об} e^{-p\tau} (1 + pT), \quad (3.1)$$

где $\Theta(p)$ — изображение по Лапласу регулируемой величины θ , например температуры; $E_x(p)$ — изображение по Лапласу сигнала

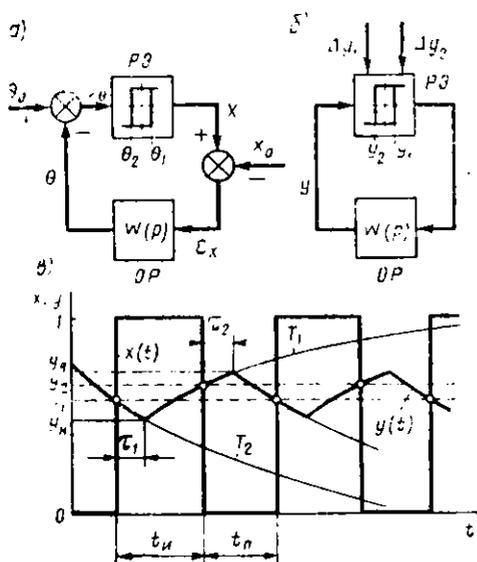


Рис. 3.1

на входе объекта ε_x ; $k_{об}$ — коэффициент усиления объекта; T и τ — постоянная времени и время чистого запаздывания объекта.

Учитывая, что изменению сигнала x в результате переключения релейного элемента соответствует практически безынерционный переход регулирующего органа из одного крайнего положения в другое, для удобства описания процессов двухпозиционного регулирования объектов разной природы полагаем, что величина x принимает значения 0 и 1.

На практике часто управляющее воздействие на объект вызывает изменение его динамических характеристик. Так, в тепловых объектах это может быть вызвано влиянием управляющего воздействия на условия отвода теплоты. Например, для охлаждения электродвигателя, работающего в режиме переменной нагрузки, можно применить охлаждающий вентилятор, включаемый и выключаемый с помощью исполнительного элемента двухпозиционного регулятора. Двигатель нагревается за счет внутренних тепловыделений. Дополнительное охлаждение используется лишь при достижении температуры, соответствующей перегреву двигателя. При этом включение вентилятора может в несколько раз уменьшить постоянную времени теплового процесса, рассматриваемого на интервале охлаждения, по сравнению с постоянной времени на интервале нагревания, когда вентилятор выключен. В этом случае нелинейность характеристик объекта с датчиком удобно отразить в расчетах АСДР изменением параметров T и τ при переключении релейного элемента, которые принимают значения T_1 и τ_1 при $x=1$ и T_2 и τ_2 при $x=0$. Тогда выражение (3.1) в зависимости от направления воздействия принимает вид

$$W_1(p) = k_{об} e^{-p\tau_1} / (1 + pT_1) \text{ или } W_2(p) = k_{об} e^{-p\tau_2} / (1 + pT_2). \quad (3.2)$$

Условия переключения релейного элемента определим параметрами настройки θ_1 и θ_2 , полагая, что релейный элемент находится во включенном состоянии при $\theta < \theta_1$ и в выключенном состоянии при $\theta > \theta_2$. Включение релейного элемента вызывает увеличение регулируемой величины θ до установившегося значения θ_{max} , а выключение — уменьшение до установившегося значения θ_{min} . Таким образом, $\theta_{min} - \theta_{max}$ — диапазон регулирования. При настройке значений θ_1 и θ_2 в пределах диапазона регулирования θ_{min} и θ_{max} , т. е. $\theta_{min} < \theta_{1,2} < \theta_{max}$, в системе образуются автоколебания. Назначение АСДР — поддержание на уровне задания θ_0 среднего значения регулируемой величины θ_{cp} в процессе колебаний при внешних управляющих либо возмущающих воздействиях на систему.

Сигнал регулируемой величины θ удобно измерять в относительных единицах аналогично сигналу x , обозначив ее буквой y :

$$y = (\theta - \theta_{min}) / (\theta_{max} - \theta_{min}). \quad (3.3)$$

Замечаем, что в пределах диапазона регулирования величина y изменяется от 0 до 1, а передаточная функция $W(p) = Y(p) / [E_x(p)]$ имеет выражения (3.1) или (3.2) при $k_{об} = 1$. Параметры настрой-

ки θ_1 и θ_2 пересчитываются в относительные единицы измерения соответственно y_1 и y_2 путем подстановки в (3.3) $\theta = \theta_1$ и $\theta = \theta_2$.

Рассмотрим влияние на параметры системы внешних возмущающих воздействий. Управляющее воздействие по заданию осуществляется изменением параметров настройки θ_1 и θ_2 . Возмущение по нагрузке проявляется в изменении параметров θ_{\min} и θ_{\max} . Оба вида внешних воздействий учитываются отклонением параметров y_1 и y_2 на величину соответственно Δy_1 и Δy_2 , поэтому схему рис. 3.1, а представим схемой, показанной на рис. 3.1, б.

Диапазон регулирования $\theta_{\min} - \theta_{\max}$ необходимо выбирать исходя из наибольших значений внешних воздействий. Разница $\theta_2 - \theta_{\min}$ должна быть больше возмущения, действующего в направлении увеличения регулируемой величины θ , а разница $\theta_{\max} - \theta_1$ должна быть больше возмущения, действующего в направлении уменьшения величины θ . Если наибольшие амплитуды возмущения по нагрузке как в направлении увеличения регулируемой величины θ , так и в направлении уменьшения ее одинаковы, то целесообразна симметричная настройка системы, определяемая выполнением условия $y_1 + y_2 = 1$. В случаях преобладания возмущения одного из направлений целесообразна несимметричная настройка, т. е. $y_0^* \geq 0,5$, где $y_0^* = (y_1 + y_2)/2$. Выбор значения y_0^* определяется с учетом того, что внешнее воздействие $2\Delta y_0^* = \Delta y_1 + \Delta y_2$ с отрицательным знаком компенсируется в момент включения релейного элемента величиной регулирующего воздействия, равной $1 - y_1$, а воздействие $2\Delta y_0^*$ с положительным знаком компенсируется в момент выключения релейного элемента величиной регулирующего воздействия, равной y_2 .

На рис. 3.1, в показан автоколебательный процесс регулирования в АСДР с объектом, имеющим динамическую характеристику по (3.2). Изменение регулируемой величины y следует рассматривать как реакцию инерционного звена первого порядка на входное воздействие ступенчатой формы, образующееся в моменты переключения релейного элемента и смещенное по оси времени на интервал чистого запаздывания τ . В общем виде зависимость $y(t)$ для этого объекта представляется выражением

$$y = x - [x - y(0)] e^{-t/T}, \quad (3.4)$$

где t^* — время, отсчитываемое с момента $t = \tau$ после переключения релейного элемента; x — входное воздействие; $y(0)$ — начальное значение регулируемой величины, т. е. $y = y(0)$ при $t^* = 0$. Для включенного состояния релейного элемента имеем $x = 1$ и $T = T_1$, а для выключенного состояния $x = 0$ и $T = T_2$.

В соответствии с (3.4) на участках чистого запаздывания после переключения релейного элемента наибольшее отклонение величины y в процессе автоколебаний (см. рис. 3.1, в) определяется выражениями соответственно для верхнего и нижнего значений:

$$y_u = 1 - (1 - y_2) e^{-\tau_2/T_2}; \quad (3.5)$$

$$y_n = y_1 e^{-\tau_1/T_1}. \quad (3.6)$$

Учитывая (3.5) и (3.6), получим формулы для определения соответственно амплитуды и среднего значения автоколебаний в виде

$$a = 0,5(y_n - y_n) = 0,5[1 - y_1 e^{-\tau_1/T_1} - (1 - y_2) e^{-\tau_2/T_1}]; \quad (3.7)$$

$$y_{cp} = 0,5(y_n + y_n) = 0,5[1 - (1 - y_2) e^{-\tau_2/T_1} + y_1 e^{-\tau_1/T_1}] \quad (3.8)$$

при настройке релейного элемента $0,5\epsilon < y_0^* < (1 - 0,5\epsilon)$, где $\epsilon = y_2 - y_1$ — зона неоднозначности релейного элемента.

На основе экспоненциальной зависимости $y(t)$ согласно (3.4) изменения регулируемой величины на конечных временных интервалах от y_n до y_n и от y_n до y_n представляются выражениями

$$y_n = y_n + (1 - y_n)(1 - e^{-(t_n + \tau_1 - \tau_1)T_1}); \quad (3.9)$$

$$y_n = y_n e^{-(t_n + \tau_1 - \tau_1)T_1}, \quad (3.10)$$

где t_n и t_n — продолжительности импульса и паузы периодического сигнала x . Из (3.9) и (3.10) находим

$$t_n = \tau_1 - \tau_2 + T_1 \ln[(1 - y_n)/(1 - y_n)]; \quad (3.11)$$

$$t_n = \tau_2 - \tau_1 + T_2 \ln(y_n/y_n). \quad (3.12)$$

Используя (3.11) и (3.12) с учетом (3.5) и (3.6), получим формулу для периода автоколебаний в виде

$$T_a = t_n + t_n = T_1 \ln \frac{1 - y_1 e^{-\tau_1/T_1}}{(1 - y_2) e^{-\tau_2/T_1}} + T_2 \ln \frac{1 - (1 - y_2) e^{-\tau_2/T_1}}{y_1 e^{-\tau_1/T_1}}. \quad (3.13)$$

Отклонение среднего значения регулируемой величины θ_{cp} от величины задания θ_0 в результате медленно изменяющегося внешнего воздействия может рассматриваться как статическая погрешность регулирования. Оценивая внешнее воздействие величиной $\Delta y_0^* = 0,5(\Delta y_1 + \Delta y_2)$, статическую погрешность представим в виде

$$\Delta y_{ст} = \Delta y_0^* - \Delta y_{cp}, \quad (3.14)$$

где Δy_{cp} — отклонение величины y_{cp} , определяемое из (3.8) с учетом значений Δy_1 и Δy_2 по формуле

$$\Delta y_{cp} = 0,5(\Delta y_1 e^{-\tau_1/T_1} + \Delta y_2 e^{-\tau_2/T_1}). \quad (3.15)$$

Из (3.14) с учетом (3.15) выражение статической погрешности

$$\Delta y_{ст} = 0,5[\Delta y_1(1 - e^{-\tau_1/T_1}) + \Delta y_2(1 - e^{-\tau_2/T_1})]. \quad (3.16)$$

Для сравнительной оценки статической погрешности линейной АСР с пропорциональным регулятором и АСДР с тем же объектом введем понятие эквивалентного коэффициента пропорциональности двухпозиционной системы k_a , значение которого

$$k_a = \Delta y_0^*/\Delta y_{ст} - 1 \quad (3.17)$$

аналогично названной линейной АСР, имеющей коэффициент усиления, равный k_3 . Раскрывая в (3.17) значение Δy_0^* и $\Delta y_{ср}$ по (3.16), получаем

$$k_3 = \frac{\Delta y_1 e^{-\tau_1/T_1} + \Delta y_2 e^{-\tau_2/T_2}}{\Delta y_1 (1 - e^{-\tau_1/T_1}) + \Delta y_2 (1 - e^{-\tau_2/T_2})}. \quad (3.18)$$

При $T_1 = T_2 = T$ и $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ выражение (3.18) принимает вид

$$k_3 = 1/(e^{\tau/T} - 1). \quad (3.19)$$

Из рассмотрения (3.19) при различных значениях τ/T следует, что область целесообразного применения АСДР определяется условием $\tau/T < 0,2$, когда $k_3 > 4,5$, а $\Delta y_{ср}/\Delta y_0^* < 0,182$.

Так как колебания регулируемой величины y происходят обычно на небольших участках экспонент [см. (3.4)] от нижнего значения y_n до верхнего y_n при $\tau_{1,2}/T_{2,1} \leq 0,1$ и $\epsilon \leq 0,05$, то эти участки могут быть с достаточно высокой точностью аппроксимированы отрезками наклонных прямых согласно соотношению $e^{-t/T} \approx 1 - t/T$, а выражения (3.7), (3.8), (3.13) и (3.18) записываются приближенно в более простой форме

$$a = 0,5 [\epsilon + y_1 \tau_1/T_2 + (1 - y_2) \tau_2/T_1]; \quad (3.20)$$

$$y_{ср} = y_0^* + 0,5 [(1 - y_2) \tau_2/T_1 - y_1 \tau_1/T_2]; \quad (3.21)$$

$$T_a = T_1 \frac{\epsilon + y_1 \tau_1/T_2 + (1 - y_2) \tau_2/T_1}{1 - y_1 (1 - \tau_1/T_2)} + T_2 \frac{\epsilon + y_1 \tau_1/T_2 + (1 - y_2) \tau_2/T_1}{1 - (1 - y_2) (1 - \tau_2/T_1)}; \quad (3.22)$$

$$k_3 = \frac{\Delta y_1 (1 - \tau_1/T_2) + \Delta y_2 (1 - \tau_2/T_1)}{\Delta y_1 \tau_1/T_2 + \Delta y_2 \tau_2/T_1}; \quad (3.23)$$

или при $T_2 = T_1 = T$ и $\tau_1 = \tau_2 = \tau$

$$a = 0,5 [\tau/T + \epsilon (1 - \tau/T)]; \quad (3.24)$$

$$y_{ср} = y_0^* + (0,5 - y_0^*) \tau/T; \quad (3.25)$$

$$T_a = [\tau + \epsilon (T - \tau)] \left[\frac{1}{1 - y_1 (1 - \tau/T)} + \frac{1}{1 - (1 - y_2) (1 - \tau/T)} \right]; \quad (3.26)$$

$$k_3 = T/\tau - 1. \quad (3.27)$$

Объект высокого порядка с чистым запаздыванием. Многочисленные и разнообразные технологические объекты легкой промышленности, оснащаемые автоматическими устройствами контроля и регулирования, обладают динамическими характеристиками цепочки последовательно соединенных инерционных звеньев первого порядка. Высокий порядок дифференциального уравнения, описывающего переходные процессы в таких объектах, обуславливается инерционными свойствами собственно конструкции объекта, а также датчика и исполнительного устройства. Кроме того, высокий порядок получается в результате аппроксимации динамических характеристик модели с распределенной регулируемой координатой эквивалентными характеристиками модели с сосредоточенной координатой.

Учитывая периодичность сигнала, передаваемого в контуре релейной автоколебательной системы, и эффективную фильтрацию

высших гармоник этого сигнала непрерывной частью высокого порядка, расчет процессов регулирования целесообразно выполнять на основе частотного метода. В общем случае частотный метод основывается на преобразовании суммы гармоник разложения в ряд Фурье сигнала, формируемого релейным элементом.

Важным частным случаем частотного метода является метод гармонического баланса. Обычно гармонический баланс ограничивают рассмотрением преобразования в контуре системы только

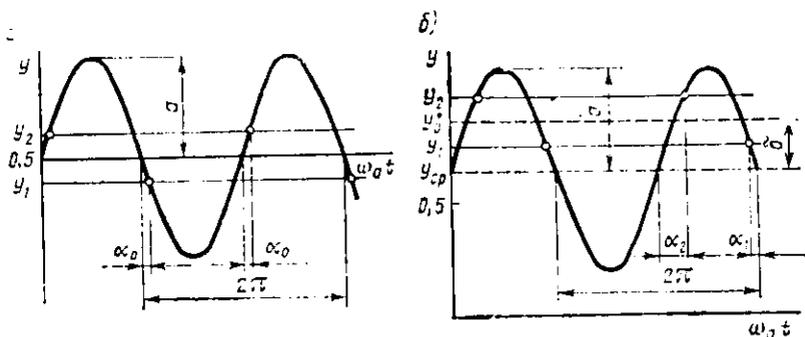


Рис. 3.2

первой гармоники, имеющей наибольшую амплитуду по сравнению с амплитудами высших гармоник. Это позволяет легко проводить анализ и выполнять расчеты АСДР путем построения логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) непрерывной части с применением шаблонов характеристик типовых звеньев [1]. Наибольшее распространение метод гармонического баланса находит при симметричной настройке АСДР, когда основные соотношения параметров автоколебаний представляются более простыми выражениями по сравнению с выражениями, относящимися к несимметричной настройке. При этом четные гармоники сигнала на входе объекта отсутствуют, а следующая за первой гармоника имеет частоту в три раза выше, чем первая.

Первоочередным вопросом расчета АСДР является определение параметров автоколебаний. Далее сохраняем принятое обозначение регулируемой величины и управляющего воздействия на объект, а также параметров настройки системы.

Согласно методу гармонического баланса (одночастотный вариант) гармонический сигнал на входе релейного элемента преобразуется в выходной сигнал в соответствии с характеристиками релейного элемента, представляемыми эквивалентным комплексным коэффициентом усиления, который обозначим $k_{рв}$. Учитывая, что для симметричных автоколебаний в АСДР с линейным объектом выполняется соотношение $y_0^* = y_{ср} = 0,5$, как показано на рис. 3.2, а, определим модуль и аргумент эквивалентного коэффициента усиления двухпозиционного релейного элемента в зависимости от ам-

плитуды входного сигнала a и величины ϵ . Коэффициент усиления разомкнутого контура системы находим по отношению изменения регулируемой величины в установившихся режимах к соответствующему отклонению сигнала на входе релейного элемента

$$K_0 = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) / (b_2 - c_1) = 1/\epsilon. \quad (3.28)$$

При этом замечаем, что для $K_0 = 1$ сигнал на выходе релейного элемента имеет амплитуду $\epsilon/2$, а амплитуда первой гармоники этого сигнала равна $2\epsilon/\pi$. Тогда модуль эквивалентного комплексного коэффициента усиления

$$|k_{p\Phi}(a)| = 2\epsilon / (\pi a). \quad (3.29)$$

Из графика рис. 3.2, а видим, что смещение по фазе первой гармоники выходного сигнала относительно входного определяется углом α_0 согласно соотношению $a \sin(-\alpha_0) = 0,5 \epsilon$, а аргумент эквивалентного комплексного коэффициента усиления

$$\varphi_{p\Phi}(a) = -\arcsin[\epsilon / (2a)]. \quad (3.30)$$

В случае несимметричных автоколебаний, т. е. при $y_0^* \neq 0,5$, как показано на рис. 3.2, б, имеется разность $y_0^* - y_{ср}$, а выражения для модуля и аргумента эквивалентного комплексного коэффициента усиления релейного элемента принимают вид [2]

$$|k_{p\Phi}(a, \delta)| = \frac{\epsilon}{\pi a} \sqrt{[1 - [\epsilon / (2a) - \delta / a]^2 + 1 - [\epsilon / (2a) + \delta / a]^2]^2 + (\epsilon / a)^2}; \quad (3.31)$$

$$\varphi_{p\Phi}(a, \delta) = -\arctg \frac{\epsilon / a}{\sqrt{1 - [\epsilon / (2a) - \delta / a]^2 + 1 - [\epsilon / (2a) + \delta / a]^2}}, \quad (3.32)$$

где $\delta = |y_0^* - y_{ср}|$.

В этом случае к искомым параметрам автоколебаний кроме амплитуды a и частоты ω_a относится также постоянная составляющая регулируемой величины $y_{ср}$, показанная на рис. 3.2, б штриховой линией. Учитывая значения углов α_1 и α_2 гармонического сигнала $y(\omega_a t)$, соответствующих условиям переключения релейного элемента, получаем систему уравнений

$$a \sin \alpha_1 = \delta - 0,5 \epsilon; \quad a \sin \alpha_2 = \delta + 0,5 \epsilon. \quad (3.33)$$

Используя (3.33), из соотношения

$$y_{ср} = t_n / (t_n + t_p) = [\pi + (\alpha_1 + \alpha_2)] / (2\pi) \quad (3.34)$$

находим выражение для постоянной составляющей

$$y_{ср} = 0,5 \left\{ 1 \pm \frac{1}{\pi} \left[\arcsin \left(\frac{\delta}{a} + \frac{\epsilon}{2a} \right) + \arcsin \left(\frac{\delta}{a} - \frac{\epsilon}{2a} \right) \right] \right\}. \quad (3.35)$$

Двойной знак в (3.35) определяется неравенством $y_0^* \geq 0,5$.

На рис. 3.3 показаны зависимости $y_{ср}(2a/\epsilon)$, вычисленные по (3.35) для различных постоянных значений δ/a при $y_0^* > 0,5$. Нетрудно заметить, что при $\delta < 0,5a$ и $a \gg 0,5\epsilon$ выражение (3.35) записывается в виде

$$y_{ср} \approx 0,5 [1 \pm 2\delta / (\pi a)]. \quad (3.36)$$

Для нахождения амплитуды a и частоты ω_a симметричных автоколебаний используем условия баланса амплитуд и баланса фаз (гармонический баланс), которые можно записать в виде

$$K_0 M_{об}(\omega) M_{p\Phi}(a) = 1; \quad (3.37)$$

$$\varphi_{об}(\omega) + \varphi_{p\Phi}(a) = -\pi, \quad (3.38)$$

где $M_{об}(\omega) = |W_{об}(i\omega)|$ — модуль частотной характеристики объекта; $M_{рз}(a) = |k_{рз}(a)|$; $\omega = \omega_a$.

При определении амплитуды и частоты автоколебаний путем построения ЛЧХ непрерывной части разомкнутой системы целесообразно применение шаблонов характеристик типовых линейных звеньев модели объекта и характеристик релейного элемента. Для этого необходимо предварительно задаться масштабами по осям $\lg \omega$, $L = 20 \lg M_{об}(\omega)$ или $20 \lg K_0$, $20 \lg M_{рз}(a)$, а также φ и $\lg(2a/e)$. Например, принимаем масштабы: 0,01 декада/мм по осям $\lg \omega$ и $\lg(2a/e)$, 0,2 дБ/мм по оси L , 0,5 град/мм по оси φ . Шаблон характеристик двухпозиционного релейного элемента показан на рис.

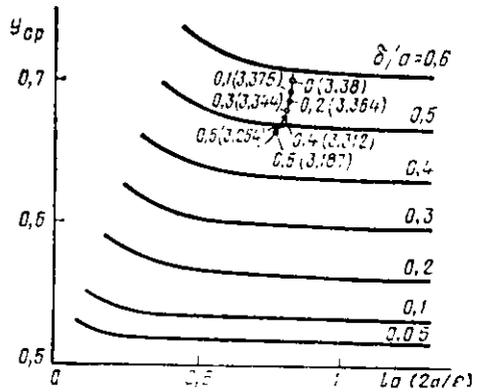


Рис. 3.3

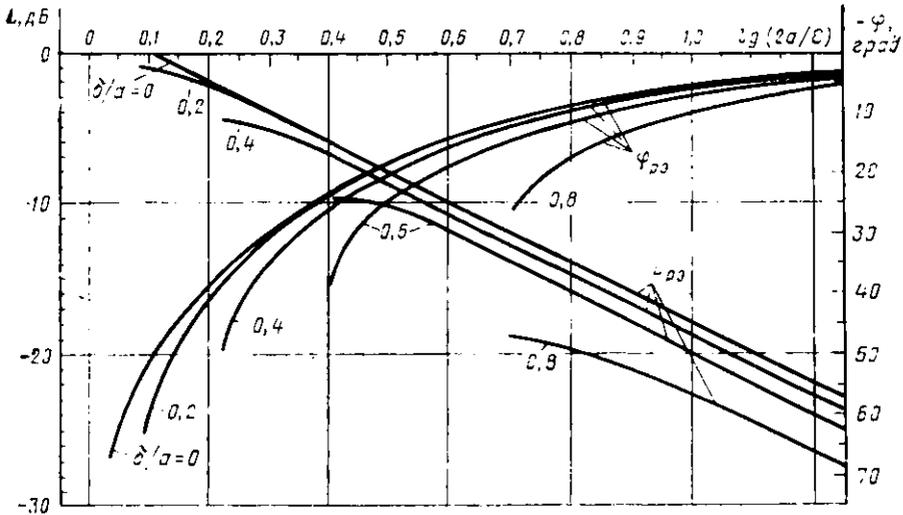


Рис. 3.4

3.4 для общего случая с учетом несимметричности δ/a [см. (3.31) и (3.32)].

Расчет начинается с построения графиков ЛЧХ отдельных звеньев непрерывной части системы. Затем алгебраическим суммированием отдельно амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик определяем ЛЧХ непрерывной части системы, показанные на рис. 3.5 графиками амплитудно-частотной характеристики $L_{н.ч}$ и фазочастотной характеристики $\varphi_{н.ч}$ при совмещении оси абс-

числ $L=0$ и $\varphi=-180^\circ$. На ЛЧХ непрерывной части системы накладываем шаблон характеристик релейного элемента (см. на рис. 3.4 графики при $\delta/a=0$) с совмещением осей $L=0$. Путем перемещения этого шаблона, показанного на рис. 3.5 прерывистыми линиями, вдоль оси $\lg \omega$ находим его положение, соответствующее условиям

$$L_{н.ч} + L_{рз} = 0; \quad (3.39)$$

$$\varphi_{н.ч} + \varphi_{рз} = -180^\circ \quad (3.40)$$

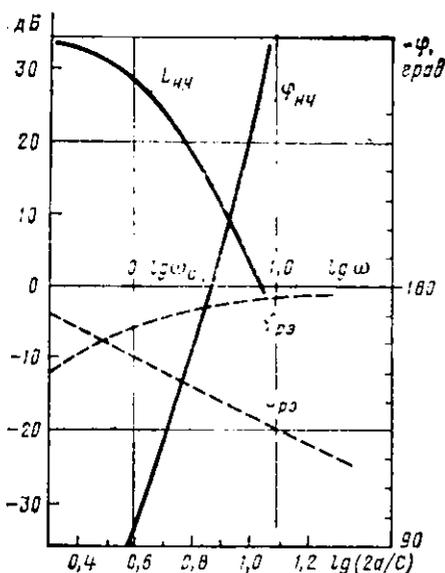


Рис. 3.5

при частоте $\omega = \omega_a$ согласно (3.37) и (3.38). Практически при выбранном отсчете отрицательной фазы $\varphi_{рз}$ от линии $L=0$ точке пересечения графиков $\varphi_{рз}$ и $\varphi_{н.ч}$ соответствует выполнение условия (3.40). При этом сумма ординат по графикам $L_{н.ч}$ и $L_{рз}$ должна равняться нулю [см. (3.39)]. Выполнение (3.39) и (3.40) позволяет по оси $\lg \omega$ найти сначала $\lg \omega_a$, а затем величину ω_a , и по оси $\lg(2a/\epsilon)$ — сначала логарифм искомого значения $2a/\epsilon$, а затем отношение $2a/\epsilon$ и амплитуду a .

В случае несимметричных автоколебаний определение параметров автоколебаний на основе гармонического баланса несколько усложняется в связи с необходимостью отыскания третьего параметра (кроме амплитуды a и частоты ω_a — постоянной составляющей $y_{ср}$). Сначала рас-

смотренным способом рассчитывают параметры a и ω_a для разных выбранных значений δ/a . Затем отыскивают искомую величину δ/a и соответствующие ей параметры a , ω_a и $y_{ср}$. Графическое решение получают в результате построения дополнительного графика $y_{ср}[\lg(2a/\epsilon), \delta/a]$ на плоскости семейства графиков (см. рис. 3.3) по данным пробных расчетов на основе ЛЧХ с учетом равенства $y_{ср} = y_0^* \pm \delta$ и последующего нахождения точки, удовлетворяющей одинаковому значению δ/a как по этому графику, так и по (3.35). Этот график проведен на рис. 3.3 по точкам, отмеченным кружочками, с обозначением величины δ/a и в скобках ω_a для объекта, модель которого представляется тремя последовательно соединенными апериодическими звеньями с постоянными времени $T_1=1$; $T_2=0.6$; $T_3=0.2$. При настройке системы $y_0^*=0.7$; $v=0.07$ получаем параметры: $y_{ср}=0.67$; $\delta/a=0.5$; $\omega_a=3.26$; $a=0.061$ (соответственно имеем точные значения: $y_{ср}=0.67$; $\delta/a=0.469$; $\omega_a=3.142$; $a=0.064$).

Для оценки величины эквивалентного коэффициента пропорциональности k_0 согласно (3.17) сначала определим отклонение величины $y_{ср}$ от исходного значения 0,5 при симметричной настройке АСДР. Для этого по выражению (3.36) получаем формулу

$$\Delta y_{ср} = \delta / (\pi a), \quad (3.41)$$

затем, учитывая $\Delta y_0^* = \delta + \Delta y_{ср}$, (3.41) и $\Delta y_{ср} = \delta$, из (3.17) находим эквивалентный коэффициент пропорциональности

$$k_0 = 1 / (\pi a). \quad (3.42)$$

§ 3.2. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

При применении исполнительного механизма постоянной скорости, обычно выполняемого на основе асинхронного электродвигателя, автоколебательный режим работы АСДР обеспечивает плавное перемещение регулирующего органа, например штока клапана. Такой исполнительный механизм исключает ударные перегрузки во входном трубопроводе клапана позиционного управления подачей теплоносителя в объект. Кроме того, часто подвижные части этих исполнительных устройств не допускают продолжительного неподвижного рабочего состояния в связи с увеличением во времени сухого трения неподвижного штока клапана.

Пренебрегая малой инерционностью исполнительного двигателя, а также нелинейностями характеристик, обусловленными люфтом, выбегом, сухим трением, и учитывая позиционный способ управления, динамику исполнительного механизма постоянной скорости представим передаточной функцией линейного звена

$$W_{\text{и}}(p) = 1/(pT_c), \quad (3.43)$$

где T_c — постоянная времени, равная времени перемещения регулирующего органа с постоянной скоростью из одного крайнего положения в другое.

Структурная схема АСДР с исполнительным механизмом постоянной скорости показана на рис. 3.6, а, где OP — объект регулирования, $PЭ$ — релейный элемент, $ИМ$ — исполнительный механизм. Рассмотрим определение параметров автоколебаний при различных динамических характеристиках объекта регулирования.

Апериодический объект с чистым запаздыванием. В случае когда передаточная функция объекта регулирования записывается выражением (3.1), процессы регулирования удобно рассмотреть на основе временных зависимостей изменения регулируемой величины от сигнала на входе объекта. Процесс автоколебаний в системе показан на рис. 3.6, б в соответствии с принципом релейного регу-

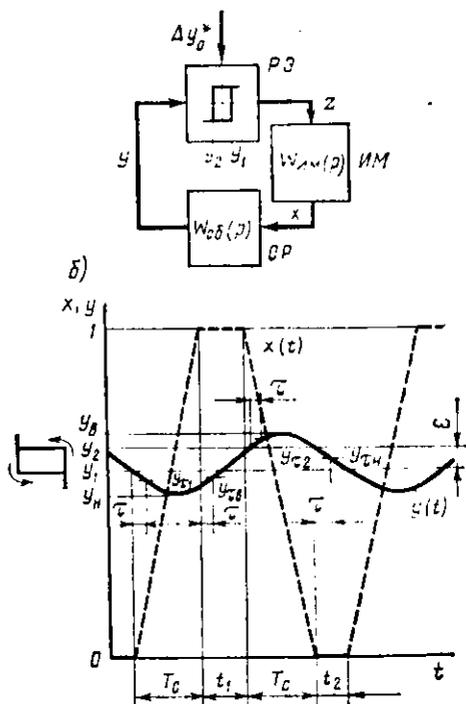


Рис. 3.6

лирования. Важно отметить, что регулирующий орган в крайних положениях образует вы́стон, характерные для этого вида системы. Регулируемая величина θ измеряется в относительных единицах по (3.3) и изменяется в соответствии с перемещением и положением регулирующего органа x . Моменты переключения релейного элемента определяются параметрами его настройки y_1 и y_2 или $\varepsilon = y_2 - y_1$ и $y_0^* = 0,5(y_1 + y_2)$, как в случае АСДР с безынерционным исполнительным элементом.

Для вывода выражений параметров автоколебаний обозначим величины ординаты y через время τ после остановки регулирующего органа в крайних положениях соответственно $y_{\tau 1}$ и $y_{\tau 2}$, а через время τ после переключения релейного элемента — соответственно $y_{\tau 1}$ и $y_{\tau 2}$, как показано на рис. 3.6, б.

Учитывая, что с момента подачи управляющего воздействия на объект реакция объекта проявляется через время чистого запаздывания в форме, соответствующей отсутствию чистого запаздывания, изменение $y(t)$ рассматривают на основе математического описания этого процесса без чистого запаздывания. Смещенная на время τ реакция объекта на входной сигнал описывается дифференциальным уравнением

$$T dy/dt + y = x(0) + x(t). \quad (3.44)$$

Решение дифференциального уравнения (3.44) представляется выражением

$$y = x(0) - T/T_c + t/t_c + [y(0) + T/T_c - x(0)]e^{-t/T}, \quad (3.45)$$

где $y(0)$ и $x(0)$ — начальные значения регулируемой величины и сигнала положения регулирующего органа.

По изменению регулируемой величины y на различных участках, соответствующих неизменному входному воздействию в процессе автоколебаний, находим выражения для параметров автоколебаний.

Изменения величины y на участках $y_{\tau 1} - y_{\tau 1}$ и $y_{\tau 2} - y_{\tau 2}$ определяем из (3.45) при $t = T_c$ по формулам

$$y_{\tau 1} - y_{\tau 1} = 1 - (1/\sigma + y_{\tau 1})(1 - e^{-\sigma}); \quad (3.46)$$

$$y_{\tau 2} - y_{\tau 2} = 1 - (1/\sigma + 1 - y_{\tau 2})(1 - e^{-\sigma}), \quad (3.47)$$

где $\sigma = T_c/T$.

Интервалы времени Δt_n и Δt_b , соответствующие нижнему и верхнему экстремальному изменению величины y на участках $y_{\tau 1} - y_n$ и $y_b - y_{\tau 2}$, определяются из условия $dy/dt = 0$ в точках $y = y_n$ и $y = y_b$. Производную dy/dt получаем в результате дифференцирования (3.45) при отсутствии слагаемых, содержащих T_c , и различных значениях $x(0)$, равных либо 1, либо 0. Приравнявая производную dy/dt нулю при $t = \Delta t_n$ и $t = \Delta t_b$, находим

$$\Delta t_n = T \ln(1 + \sigma y_{\tau 1}); \quad (3.48)$$

$$\Delta t_b = T \ln[1 + \sigma(1 - y_{\tau 2})]. \quad (3.49)$$

Определяя по конечным отклонениям величины y интервалы t_1 и t_2 , соответствующие продолжительностям выстоев регулирующего органа в верхнем и нижнем положениях, и используя соотношения

$$y_{\tau 1} - y_{\tau 2} = (1/\sigma + y_{\tau 1})(1 - e^{-\Delta t_w/T_c}) - \Delta t_w/T_c; \quad y_{\tau 1} - y_{\tau 2} = (1/\sigma + 1 - y_{\tau 2}) \times \\ \times (1 - e^{-\Delta t_w/T_c}) - \Delta t_w/T_c; \quad y_{\tau 1} = y_1 e^{-\tau/T}; \quad 1 - y_{\tau 2} = (1 - y_2) e^{-\tau/T}$$

с учетом (3.48) и (3.49), получаем формулы для определения параметров автоколебаний.

Амплитуда автоколебаний

$$a = 0,5 \left\{ 1 - \frac{T}{T_c} \ln \left[\left(1 + \frac{T_c}{T} y_1 e^{-\tau/T} \right) \left(1 + \frac{T_c}{T} (1 - y_2) e^{-\tau/T} \right) \right] \right\}. \quad (3.50)$$

Для среднего значения автоколебаний

$$y_{\text{ср}} = 0,5 \left[1 - \frac{T}{T_c} \ln \frac{1 + \frac{T_c}{T} (1 - y_2) e^{-\tau/T}}{1 + \frac{T_c}{T} y_1 e^{-\tau/T}} \right]. \quad (3.51)$$

Период автоколебаний

$$T_a = 2T_c + \\ T \ln \left\{ \frac{\frac{T}{T_c} (1 - e^{-T_c/T}) e^{\tau/T} - y_1 e^{-T_c/T}}{y_1 (1 - y_2)} \left[\frac{T}{T_c} (1 - e^{-T_c/T}) e^{\tau/T} - (1 - y_2) e^{-T_c/T} \right] \right\}. \quad (3.52)$$

На рис. 3.7 изображены графики зависимости $a(T_c/T)$ при заданных постоянных значениях τ/T и ε согласно (3.50) для симметричной настройки системы ($y_0^* = 0,5$). Графики, показанные сплошными линиями, соответствуют $\varepsilon = 0$, а прерывистыми линиями — $\varepsilon = 0,05$. Графики 1 — для $\tau/T = 0$; 2 — для $\tau/T = 0,1$; 3 — для $\tau/T = 0,2$. При $y_0^* \neq 0,5$ амплитуда a получается большей величины, чем при $y_0^* = 0,5$. Зависимость $a(\varepsilon)$ при рассматриваемых значениях τ/T и T_c/T имеет практически линейный характер.

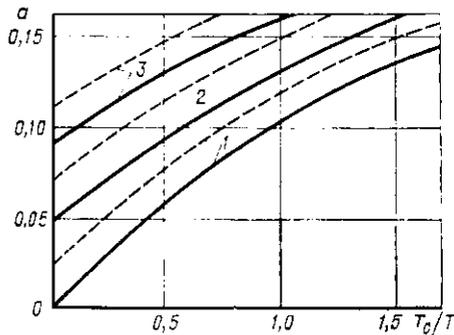


Рис. 3.7

Если учесть действие медленно изменяющихся возмущений по заданию и нагрузке смещением настройки y_0^* на величину Δy_0^* , то эффективность регулирующего воздействия удобно оценить коэффициентом k_3 , определяемым по (3.17). Из (3.51) после замены вы-

ражения натурального логарифма первым членом разложения его в степенной ряд по формуле

$$\ln \zeta = 2 \left[\frac{\zeta - 1}{\zeta + 1} + \frac{(\zeta - 1)^3}{3(\zeta + 1)^3} + \frac{(\zeta - 1)^5}{5(\zeta + 1)^5} + \dots \right] \quad (3.53)$$

при начальном значении $y_0^* = 0,5$ и малой величине Δy_0^* получим

$$\Delta y_{c\tau} \approx \left(1 - e^{-\tau/T} \left[1 + 0,5 \frac{T_c}{T} (1 - \varepsilon) e^{-\tau/T} \right] \right) \Delta y_0^*; \quad (3.54)$$

$$k_3 \approx 1 / \left[e^{\tau/T} - 1 + 0,5 \frac{T_c}{T} (1 - \varepsilon) \right]. \quad (3.55)$$

При $T_c = 0$ из выражения (3.55) получаем формулу (3.19).

Из анализа АСДР с исполнительным механизмом постоянной скорости следует, что увеличение значения T_c ведет к увеличению амплитуды a и уменьшению эффективности регулирующего воздействия. Зона неоднозначности ε релейного элемента слабо влияет на точность регулирования; увеличение параметра ε несколько повышает точность за счет изменения соотношения между временем выстоя и временем перемещения регулирующего органа.

Объект высокого порядка с чистым запаздыванием. Включение в контур АСДР астатического звена исполнительного механизма постоянной скорости создает предпосылки целесообразности применения частотного метода определения параметров автоколебаний. В этом случае рассмотрение преобразования только первой гармоники разложения в ряд Фурье периодически изменяющегося сигнала $y(t)$ оказывается более обоснованным, так как условия фильтра выполняются здесь в большей мере, чем в случае безынерционного исполнительного элемента.

При симметричных автоколебаниях выстоя регулирующего органа совершаются в обоих крайних положениях. Наличие астатического звена исполнительного устройства и необходимость учета выстоя в расчетах параметров автоколебаний требуют соответствующего изменения выражений, описывающих условия баланса амплитуд и баланса фаз релейной системы:

$$M_{об}(\omega) M_{им}(\omega) K_0 k_d(\omega) M_{рз}(a) = 1; \quad (3.56)$$

$$\varphi_{об}(\omega) + \varphi_{им}(\omega) + \varphi_d(\omega) + \varphi_{рз}(a) = -\pi, \quad (3.57)$$

где $M_{об}(\omega)$ и $\varphi_{об}(\omega)$ — модуль и фаза частотной характеристики объекта $W_{об}(i\omega)$; $M_{им}(\omega)$ и $\varphi_{им}(\omega)$ — модуль и фаза частотной характеристики исполнительного устройства с передаточной функцией $W_{им}(p) = 1/(pT_c)$; $K_0 = 1/\varepsilon$; $M_{рз}(a)$ и $\varphi_{рз}(a)$ — модуль и фаза эквивалентного комплексного коэффициента усиления релейного элемента $k_{рз}(a)$; $k_d(\omega)$ и $\varphi_d(\omega)$ — раскрываемые далее модуль и фаза (аргумент) частотной характеристики дополнительного звена, введенного в выражения (3.56) и (3.57) с целью учета выстоя регулирующего органа, $\omega = \omega_a$; ω_a — частота автоколебаний.

Учитывая трапецеидальную форму изменения во времени сигнала управляющего воздействия на объект $x(t)$ и используя разло-

жение периодической функции $x(t)$ в ряд Фурье, получаем амплитуду автоколебаний

$$a = \frac{4}{\pi} M_{об}(\omega_a) \frac{\sin(\omega_a T_c / 2)}{\omega_a T_c} \quad (3.58)$$

Подставляя в (3.56) выражения $K_0 = 1/\epsilon$, $M_{им}(\omega_a) = 1/(\omega T_c)$, $M_{рз}(a) = 2\epsilon(\pi a)$ и a из (3.58), получаем модуль частотной характеристики дополнительного звена

$$k_a(\omega) = 2 \sin(\omega T_c / 2) \quad (3.59)$$

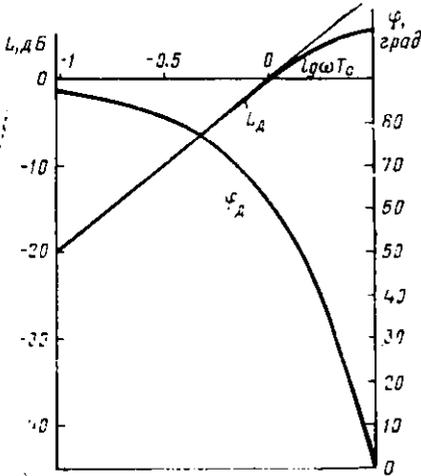


Рис. 3.8

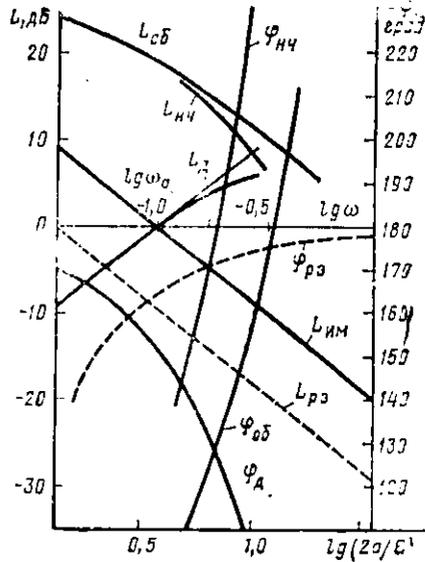


Рис. 3.9

При малых значениях ω имеем $k_d(\omega) \approx \omega T_c$, что с учетом характеристики исполнительного механизма постоянной скорости означает устранение влияния последнего на процесс регулирования с понижением частоты ω_a .

Смещение фазы первой гармоники за счет выстоев регулирующего органа выявляется из рассмотрения угловых соотношений периодического сигнала $x(\omega t)$ и определяется по формуле

$$\varphi_d(\omega) = 0,5(\pi - \omega T_c) \quad (3.60)$$

Следовательно, при построении ЛЧХ непрерывной части разомкнутого контура системы влияние выстоев учитывается амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками дополнительного звена по (3.59) и (3.60). Шаблон для построения этих характеристик показан на рис. 3.8. Шаблон располагается относительно оси $\lg \omega$ таким образом, чтобы наклонная асимптота амплитудно-

частотной характеристики пересекала эту ось в точке $\lg 1/T_c$ и $L = 0$. Диапазон частот дополнительного звена ограничивается сверху значением $\omega = \pi/T_c$. За этим пределом частоты ω_a регулирующий орган не может достигнуть крайних положений, т. е. не может быть его выстоёв.

Для определения амплитуды и частоты симметричных автоколебаний по ЛЧХ разомкнутой АСР на основе гармонического баланса сначала определяют амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики непрерывной части системы, т. е. объекта с исполнительным механизмом и дополнительным звеном. Затем эти характеристики необходимо совместить с характеристиками релейного элемента так, чтобы при суммировании ординат амплитудных и фазовых характеристик непрерывной части $L_{н.ч}$, $\varphi_{н.ч}$ и релейного элемента $L_{р.ч}$, $\varphi_{р.ч}$ результирующие графики $L = L_{н.ч} + L_{р.ч}$ и $\varphi = \varphi_{н.ч} + \varphi_{р.ч}$ пересекались на оси $L = 0$, $\varphi = -180^\circ$, что соответствует выполнению условий (3.56) и (3.57). Тогда значения ω_a и a находятся по положению полученной точки пересечения графиков на осях $\lg \omega$ и $\lg (2a/e)$, как показано на рис. 3.9.

§ 3.3. УСТРОЙСТВА КОРРЕКЦИИ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

При неудовлетворительном качестве двухпозиционного регулирования, получаемого с помощью обычной одноконтурной системы, выясняются возможности усовершенствования этой системы и по-

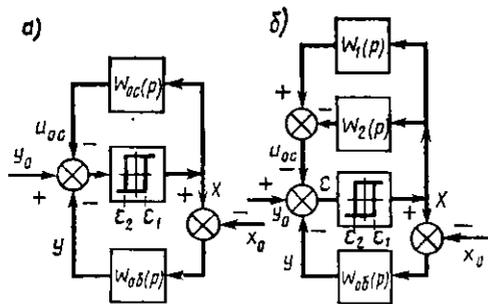


Рис. 3.10

вышения ее качества прежде всего путем применения дополнительных несложных элементов, относящихся к устройствам коррекции. В наиболее распространенных случаях коррекции дополнительные элементы включают параллельно с релейным элементом (параллельная коррекция), т. е. в цепь обратной связи, охватывающей релейный элемент.

На рис. 3.10, а показана структурная схема АСДР с отрицательной обратной связью параллельной коррекции. В цепь этой обратной связи, охватывающей релейный элемент, включают инерционное звено, представляемое либо малогабаритным маломощным нагревательным элементом с собственным датчиком температуры и измерительным устройством формирования сигнала u_{oc} , либо RC-фильтром преобразования постоянного напряжения входного сигнала ступенчатой формы в выходной сигнал u_{oc} экспоненциальной формы. Основное назначение такого вида коррекции заключается в существенном изменении режима работы релейного

элемента, повышенная частота переключения которого приводит к уменьшению амплитуды колебаний регулируемой величины и близкому к непрерывному преобразованию входного сигнала ε в среднее значение импульсного выходного сигнала x (вибрационная линеаризация). Частота переключения ω_0 релейного элемента определяется быстроедействием местного контура, образованного корректирующей обратной связью.

Обозначим коэффициент обратной связи через k_{oc} , оцениваемый отношением установившихся отклонений Δu_{oc} и Δy . Если передаточная функция звена обратной связи

$$W_{oc}(p) = k_{oc}/(1 + pT_{oc}), \quad (3.61)$$

то скорость изменения сигнала u_{oc} при малой величине зоны неоднозначности релейного элемента ε приближенно записывается в виде

$$du_{oc}/dt \approx k_{oc}/(2T_{oc}), \quad (3.62)$$

где T_{oc} — постоянная времени обратной связи; цифра 2 обусловлена изменением знака сигнала обратной связи на входе звена с передаточной функцией (3.61) при переключении релейного элемента.

Тогда при разомкнутой цепи основного контура АСДР полупериод колебаний в контуре обратной связи

$$t_0 = \varepsilon / (du_{oc}/dt), \quad (3.63)$$

а частота колебаний

$$\omega_0 = \pi/t_0 = \pi k_{oc}/(2\varepsilon T_{oc}). \quad (3.64)$$

Необходимое условие выбора параметров настройки устройства параллельной коррекции $0,5\varepsilon\omega_0 > a\omega_a$. Оно состоит в том, что скорость изменения сигнала обратной связи превышает наибольшую скорость изменения сигнала регулируемой величины. С учетом (3.64)

$$\pi k_{oc} 4T_{oc} > a\omega_a, \quad (3.65)$$

где a и ω_a — амплитуда и частота симметричных автоколебаний в АСДР без коррекции.

При выполнении условия (3.65) релейный элемент, охваченный корректирующей обратной связью, проявляет свойства эквивалентного линейного звена с передаточной функцией

$$W(p) = k_p/(1 + pT_{oc}), \quad (3.66)$$

где $k_p = 1/k_{oc}$ — коэффициент усиления регулятора, выбираемый из условия устойчивости линеаризованной АСР и получения необходимых показателей качества регулирования (линейные АСР рассматриваются в гл. 4).

На рис. 3.11 показаны установившиеся и переходный процессы регулирования в АСДР без коррекции (график 1) и с параллельной коррекцией (график 2) при передаточной функции объекта

$$W_{об}(p) = 1/[(1 + pT_1)(1 + pT_2)(1 + pT_3)].$$

при условии, что $T_1=1$; $T_2=0,6$; $T_3=0,2$; $T_{oc}=0,6$; $k_{oc}=0,12$; $\epsilon=0,02$.

Переходные процессы получены для ступенчатого изменения параметров, определяющих переключение релейного элемента. Из сравнения графиков 1 и 2 замечаем, что параллельная коррекция ведет не только к уменьшению амплитуды колебаний регулируемой величины, но и к снижению статической погрешности, показанной на рис. 3.11 значением $\Delta y_{ст}$.

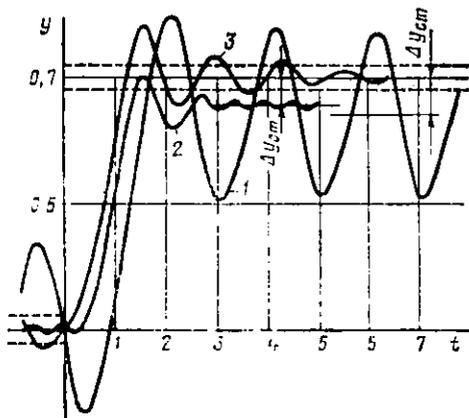


Рис. 3.11

Для устранения статической погрешности применяют параллельную коррекцию с отрицательной и положительной обратными связями, охватывающими релейный элемент через фильтры с передаточными функциями соответственно $W_1(p)$ и $W_2(p)$, как показано на рис. 3.10, б. При этом коэффициенты обеих обратных связей коррекции настраивают одинаковыми со значением k_{oc} , а посто-

янная времени T_{oc2} инерционного звена с передаточной функцией вида

$$W_2(p) = k_{oc} / (1 + pT_{oc2}) \quad (3.67)$$

выбирается по величине большей, чем T_{oc1} по (3.61). В этом случае условие преобладания быстродействия контура корректирующего устройства над быстродействием АСДР без коррекции по аналогии с условием (3.65) получаем в виде

$$\frac{\pi}{4} k_{oc} \left(\frac{1}{T_{oc1}} - \frac{1}{T_{oc2}} \right) > a_{\omega_a}. \quad (3.68)$$

На рис. 3.11 показан график 3, отображающий процесс регулирования в рассматриваемой системе при $T_{oc1}=0,2$, $T_{oc2}=0,6$ и с тем же объектом и параметрами ϵ , k_{oc} , что и для графика 2. График 3 свидетельствует о том, что действие корректирующей положительной обратной связи устраняет статическую погрешность, но снижает другие показатели качества регулирования, относящиеся к переходному процессу. Устранение статической погрешности объясняется видом передаточной функции параллельно соединенных фильтров с передаточными функциями $W_1(p)$ и $W_2(p)$, которая имеет вид

$$W_{oc}(p) = k_{oc} \left(\frac{1}{1 + pT_{oc1}} - \frac{1}{1 + pT_{oc2}} \right) = \frac{k_{oc} p (T_{oc2} - T_{oc1})}{(1 + pT_{oc1})(1 + pT_{oc2})}. \quad (3.69)$$

В результате линеаризации релейного элемента имеем эквивалентный регулятор непрерывного действия (квазинепрерывный регулятор) с передаточной функцией $W_p(p)$, получаемой из соотношения

$$W_p(p) = 1/W_{oc}(p), \quad (3.70)$$

где выражение $W_{oc}(p)$ принимается по (3.69).

Дальнейшее совершенствование двухпозиционного регулирования достигается в результате изучения особенностей объекта регулирования и может проводиться в направлениях применения каскадного регулирования и компенсации возмущений, построения системы с компенсацией влияния чистого запаздывания объекта на качество регулирования. Эти принципы построения линеаризованных АСР рассматриваются в гл. 4.

§ 3.4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТРЕХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

На рис. 3.12, а показана структурная схема автоматической системы трехпозиционного регулирования (АСТР) с исполнительным механизмом постоянной скорости, а на рис. 3.12, б — затухающий колебательный процесс регулирования.

На рис. 3.12, а обозначено: РЭ — трехпозиционный релейный элемент; ИМ — исполнительный механизм постоянной скорости; ОР — объект регулирования; y — регулируемая величина, измеряемая в относительных единицах [см. (3.71)]; x — сигнал положения регулирующего органа, изменяющийся в относительных единицах измерения от -1 до $+1$; z — сигнал управления исполнительным механизмом; y_0 и x_0 — сигналы внешнего воздействия на систему соответственно по заданию и нагрузке; $e_y = y_0 - y$; $e_x = x - x_0$; y_1, y_{-1}, y_2, y_{-2} — параметры настройки релейного элемента, определяющие условия соответственно включения и выключения исполнительного механизма.

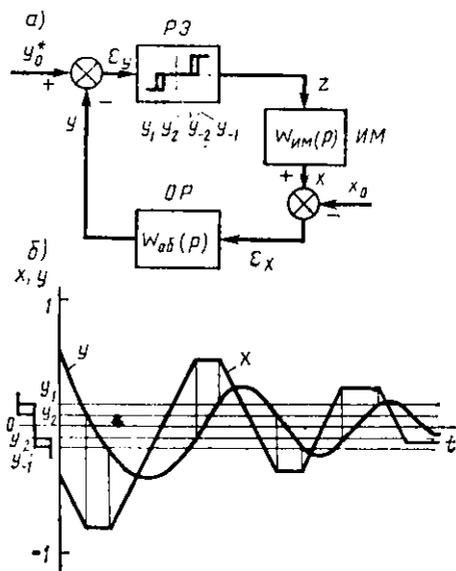


Рис. 3.12

Статическая погрешность устойчивой АСТР может изменяться в пределах от нуля до величины зоны нечувствительности релейного

элемента $\kappa = y_1 - y_{-1}$. Характерным режимом работы такой системы регулирования является включение исполнительного двигателя лишь по мере компенсации действующих на систему внешних воздействий.

Для перехода к измерению регулируемой величины θ в относительных единицах y воспользуемся формулой

$$y = (2\theta - \theta_{\min} - \theta_{\max})(\theta_{\max} - \theta_{\min}), \quad (3.71)$$

где θ_{\min} и θ_{\max} — предельные значения регулируемой величины θ , соответствующие границам диапазона регулирования и определяемые в установившихся режимах при положениях регулирующего органа $x = -1$ и $x = 1$.

Заданное значение регулируемой величины y_0 устанавливается настройкой параметра $y_0^* = 0,5(y_1 + y_{-1})$. Тогда условия включения релейного элемента записываются в виде $y_0^* + \epsilon_y \leq y_{-1}$ при перемещении регулирующего органа в прямом направлении ($z = 1$) и $y_0^* + \epsilon_y \geq y_1$ при перемещении в обратном направлении ($z = -1$). Релейный элемент выключается, если выполняются условия $y_0^* + \epsilon_y \geq y_{-2}$ при увеличении регулируемой величины и $y_0^* + \epsilon_y \leq y_2$ при уменьшении регулируемой величины. Для затухающего колебательного процесса регулирования (рис. 3.12, б) существенно то, что регулирующий орган поочередно занимает верхнее положение с координатой $x_n < 1$ и нижнее — с координатой $x_n > -1$. При этом продолжительность включения релейного элемента последовательно уменьшается. Устойчивость и показатели качества АСТР определяются как динамическими характеристиками объекта, так и параметрами исполнительного устройства, передаточная функция которого без учета инерционности двигателя и люфта в цепи передачи движения представляется передаточной функцией

$$W_{\text{ин}}(p) = 2(pT_c), \quad (3.72)$$

где T_c — время перемещения регулирующего органа с постоянной скоростью $1/T_c$, соответствующее изменению на единицу величины x .

В случае инерционного объекта первого порядка с постоянной времени T и временем чистого запаздывания τ анализ переходных процессов в АСТР, проводимый на основе временной зависимости реакции объекта на входное управляющее воздействие, позволяет легко выяснить условия устойчивости системы. Предположим, в момент включения релейного элемента регулирующий орган занимал начальное положение $x = x_{\text{нач}}$, а регулируемая величина y имела начальное значение $y_{\text{нач}}$. Изменение регулируемой величины в соответствии с перемещением регулирующего органа начинается через время τ после включения релейного элемента. Для медленно изменяющегося внешнего воздействия на систему время выключенного состояния релейного элемента обычно больше времени τ .

Изменение регулируемой величины y на интервале $y_{\text{нач}} - y_{\text{кон}}$, где $y_{\text{кон}}$ — конечное значение величины y , равно y_2 либо y_{-2} , опи-

сывается выражением для включенного состояния релейного элемента в виде

$$y = y_{\text{нач}} + (x_{\text{нач}} - y_{\text{нач}})(1 - e^{-(t+\tau)/T}) + t/T_c - (T/T_c)(1 - e^{-t/T}), \quad (3.73)$$

где $x_{\text{нач}}$ — начальное положение регулирующего органа.

На основе (3.73) находим продолжительность включенного состояния релейного элемента $t = t_n$ и перемещение регулирующего органа t_n/T_c . В устойчивой системе перемещение регулирующего органа при переходе с одного направления движения на другое уменьшается. Если последующему выключению релейного элемента соответствует выполнение условия $x_n < y_1$ либо $x_n > y_{-1}$, то при неизменном внешнем воздействии наступает установившееся состояние исполнительного механизма.

Важным требованием к АСТР является отсутствие вы́стоев регулирующего органа в крайних положениях. Условие отсутствия вы́стоев определяется из (3.73) при $t \leq T_c$ и $|x_{\text{нач}} - y_{\text{нач}}| = x - h$, где h — зона неоднозначности релейного элемента ($h = y_1 - y_2 = y_{-2} - y_{-1}$), и представляется в виде

$$h \leq 1 - \frac{T}{T_c} (1 - e^{-T_c/T}) + (x - h)(1 - e^{-(T_c+\tau)/T}). \quad (3.74)$$

При наличии вы́стоев, когда регулирующий орган достигает крайнего положения до выключения релейного элемента, динамика АСТР соответствует характеристикам двухпозиционного регулирования с величиной $\varepsilon = y_1 - y_{-1}$.

В случае объекта высокого порядка для анализа режимов работы АСТР целесообразно применение частотного метода, учитывающая эффективную фильтрацию высших гармонических сигнала, передаваемого в цепи исполнительного устройства и объекта регулирования.

Полагая, что в течение переходного процесса сигнал на входе трехпозиционного релейного элемента имеет форму, близкую к синусоидальной, для оценки возможных режимов работы АСТР удобно использовать метод гармонического баланса. На рис. 3.13 показаны графики характеристик релейного элемента, построенные по формулам модуля и аргумента эквивалентного комплексного коэффициента усиления при различных значениях параметра h/χ [1]. На рис. 3.13 график 1 построен при $h/\chi = 1$; 2 — при $h/\chi = 0,5$; 3 — при $h/\chi = 0,25$; 4 — при $h/\chi = 0,125$; 5 — при $h/\chi = 0$.

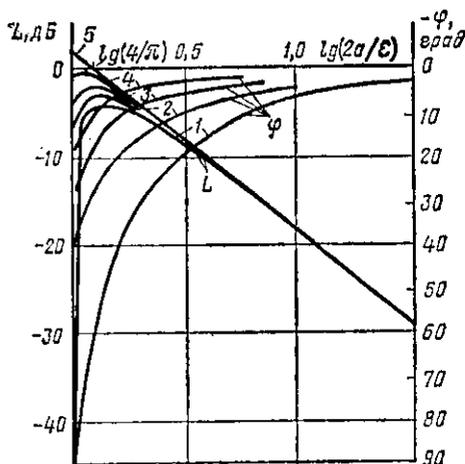


Рис. 3.13

Преобразование гармонического сигнала, проходящего через трехпозиционный релейный элемент при $h=0$, происходит без смещения фазы первой гармоники выходного сигнала. Следовательно, если ЛЧХ непрерывной части системы без учета возможных выстоев регулирующего органа пересекаются ниже оси $L=0$, $\varphi=-180^\circ$, то для всех рассматриваемых значений амплитуды a регулируемой величины АСТР устойчива и в затухающем колебательном переходном процессе регулирования по мере уменьшения амплитуды сигнала на входе релейного элемента общее усиление разомкнутого контура системы сначала увеличивается, что соответствует уменьшению запасов устойчивости и растягиванию переходного процесса, а затем с определенного момента времени, обусловленного переходом, через точку перегиба амплитудной характеристики, уменьшается. При $h>0$ имеет место смещение фазы первой гармоники сигнала x на выходе релейного элемента относительно входного гармонического сигнала. Тогда характер переходного процесса определяется соотношением графиков $L=L_{н.ч}+L_{рл}$ и $\varphi=\varphi_{н.ч}+\varphi_{рл}$, где $L_{н.ч}$ и $\varphi_{н.ч}$ — ЛЧХ непрерывной части системы; $L_{рл}$ и $\varphi_{рл}$ — амплитудная и фазовая характеристики релейного элемента.

Если ЛЧХ непрерывной части системы без учета выстоев регулирующего органа звеном с характеристиками (3.59) и (3.60) пересекаются выше оси $L=0$, $\varphi=-180^\circ$, а с учетом выстоев — ниже этой оси, то в системе релейного регулирования возможны колебательные циклы без выстоев регулирующего органа. Как известно из теории автоматического управления, предельные колебательные циклы определяются таким соотношением параметров системы, при котором графики L и φ пересекаются на оси $L=0$, $\varphi=-180^\circ$. Устойчивость колебаний предельного цикла проверяется путем вариации величины a . Если с увеличением a точка пересечения графиков L и φ перемещается вниз, а с уменьшением — вверх от оси $L=0$, $\varphi=-180^\circ$, то колебания устойчивы, т. е. имеют место автоколебания.

При всех видах характеристики рассматриваемого релейного элемента автоколебания системы можно рассчитывать по методике для случая АСДР с исполнительным механизмом постоянной скорости, если ЛЧХ непрерывной части системы с учетом выстоев регулирующего органа пересекаются выше оси $L=0$, $\varphi=-180^\circ$. Тогда величина k принимается в качестве параметра e эквивалентной АСДР, а величина h в расчетах не учитывается.

§ 3.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦВМ ПРИ РАСЧЕТАХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Использование вычислительной техники для расчетов автоматических систем релейного регулирования позволяет не только ускорить и облегчить вычисления, но и значительно расширить возможности применения современных методов определения процессов регулирования при различных видах входных сигналов. Методы расчета одноконтурных АСР могут быть основаны на исполь-

зовании принципиально различных способов представления зависимости выходного сигнала объекта от входного. Временные методы базируются на использовании решения дифференциального уравнения, описывающего зависимость между входным и выходным сигналами, а частотные — на знании частотных характеристик звеньев.

Определение процессов регулирования релейных АСР временным методом заключается в последовательном нахождении моментов времени, соответствующих выполнению условий переключения релейного элемента и определяющих границы временных участков, на которых отдельно рассматривается по шагам изменение регулируемой величины. При этом изменение регулируемой величины $y(t)$ задается решением дифференциального уравнения, описывающего динамические характеристики непрерывной части системы с учетом управляющего воздействия на объект на рассматриваемом интервале времени.

Наиболее простым приемом определения процесса двухпозиционного регулирования является графическое построение зависимости $y(t)$, выполняемое путем последовательного суммирования переходной характеристики линейного объекта с графиком реакции объекта на предшествующем интервале времени по мере реализации условий переключения релейного элемента. При этом включение релейного элемента вызывает дополнительное воздействие на объект, учитываемое сложением графика предшествующего изменения $y(t)$ с графиком переходной характеристики, смещенной на время τ , как показано на рис. 3.14 тонкими линиями. Полученный график влияния зависимости $y(t)$ на последующее движение позволяет определить момент выключения релейного элемента. Тогда из имеющегося графика $y(t)$ через время τ вычитается график переходной характеристики объекта и снова определяется последующее движение до выполнения условия очередного включения релейного элемента. Результирующий график построения зависимости $y(t)$ показан на рис. 3.14 утолщенной линией.

Другой прием получения процесса двухпозиционного регулирования заключается в использовании решения дифференциального уравнения для расчета по участкам, соответствующим включенному и выключенному состояниям релейного элемента, без промежуточного определения движения по всей временной оси. При этом конечные значения процесса предшествующего участка принимаются в качестве начальных условий для определения движения на последующем участке (метод припасовывания).

Рассмотрим порядок расчета процессов регулирования в АСР с безынерционным исполнительным элементом при медленно изменяющемся внешнем воздействии, заданном функциями $y_1(t)$ и $y_2(t)$. Смещенная на время τ реакция объекта регулирования на входной сигнал ступенчатой формы находится из решения дифференциального уравнения, записываемого расчетным выражением. Моменты переключения релейного элемента находятся на графике $y(t)$ по реализации условия $y(t) = y_1$ либо $y(t) = y_2$ с учетом чистого запаздывания объекта, т. е. после каждого переключения в течение времени чистого запаздывания τ продолжа-

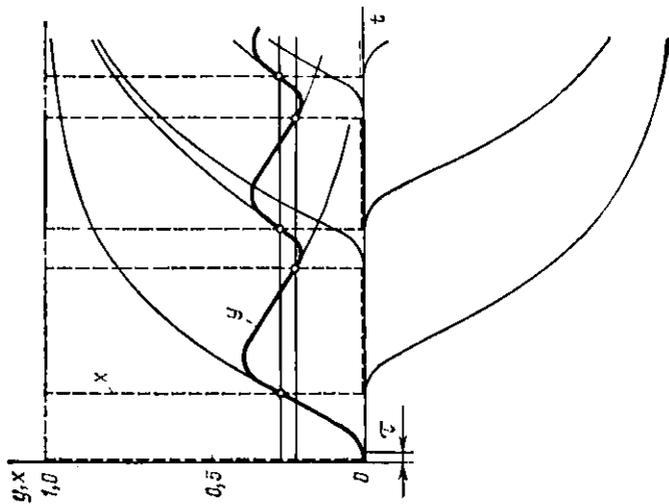


Рис. 3.14

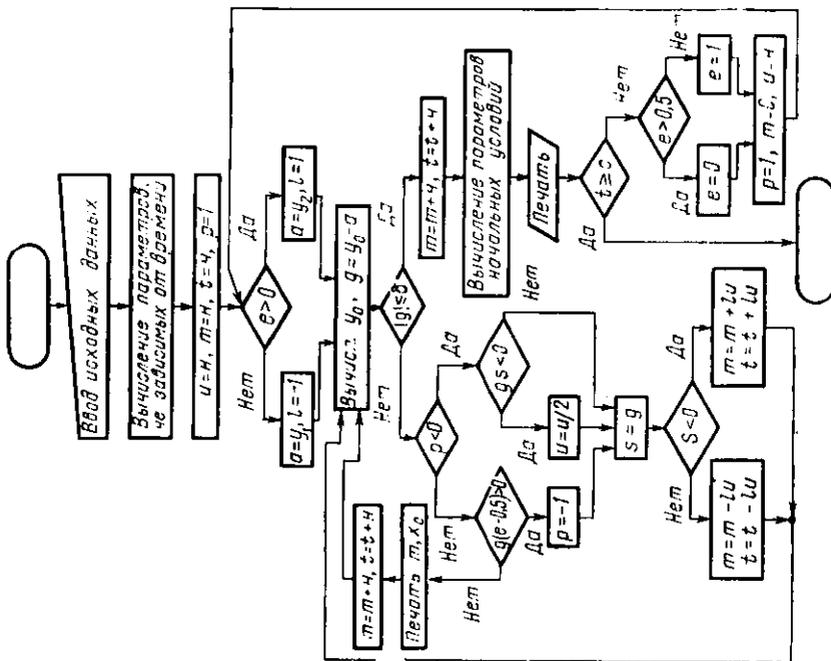


Рис. 3.15

ется реакция объекта на прежнее воздействие, а затем определяются параметры начальных условий для расчета процесса на последующем участке, соответствующем новому состоянию релейного элемента.

На рис. 3.15 показана блок-схема программы расчета процесса регулирования в АСДР с безынерционным исполнительным элементом. На схеме приняты обозначения: y_0 — регулируемая величина; t — текущее время; m — время на интервале между переключениями релейного элемента, смещенное на время чистого запаздывания объекта; τ — чистое запаздывание; e , p и l — логические переменные. Расчет процесса регулирования начинают с ввода исходных данных, которыми являются: постоянные времени объекта регулирования и время τ ; начальные условия по координате регулируемой величины; погрешность расчета δ , задаваемая исходя из требуемой точности нахождения времени переключения релейного элемента; c — длительность рассчитываемого процесса регулирования; величины, входящие в расчетные выражения $y_1(t)$ и $y_2(t)$ в соответствии с характером внешнего воздействия на систему; обозначенный буквой n шаг изменения времени Δt между точками расчетного графика $y(t)$, начальное положение регулирующего органа $x(0)$.

Расчет согласно блок-схеме рис. 3.15 состоит из двух этапов на каждом интервале включенного либо выключенного состояния релейного элемента.

Первый этап заключается в нахождении расчетных точек зависимости $y(t)$ по выражению решения дифференциального уравнения объекта с заданным шагом Δt и одновременно в отделении корня трансцендентного уравнения $y_1(t) - y_2(t) = 0$ на участке действия импульса сигнала x либо уравнения $y(t) - y_1(t) = 0$ на интервале действия паузы. Последнее выполняется путем вычисления значений функции $f(t) = y(t) - y_{1,2}(t)$ при изменении аргумента t на величину шага Δt до тех пор, пока значения функции $f(t)$ на концах некоторого отрезка $[t, t + \Delta t]$ не будут иметь противоположные знаки. Изменение знака функции $f(t)$ определяется по выполнению неравенства $f(t)f(t + \Delta t) < 0$, представляемого на блок-схеме рис. 3.15 условием $g(e - 0,5) > 0$, где e — параметр, принимающий значения 0 либо 1 в соответствии с величиной сигнала x ; g — разность регулируемой величины в данный момент времени и ее значения по условию переключения релейного элемента. Переход на второй этап сопровождается изменением знака логической переменной p .

Второй этап расчета заключается в уточнении корня соответствующего трансцендентного уравнения одним из методов, описанных, например, в [3]. Определение момента переключения с заданной погрешностью δ , т. е. уточнение корня решаемого трансцендентного уравнения, выполняется путем повторяющихся вычислений величины y с целенаправленным изменением величины и направления отклонения шага времени. Выполнение условия нахождения момента переключения релейного элемента ведет к вычислению начальных условий для продолжения расчета на следующем участке, соответствующем изменившемуся состоянию релейного элемента.

Вспомогательные параметры a и S используются для запоминания переменных величин y_1 либо y_2 и разности $g = y_0 - a$.

Таким образом, рассмотренный расчет процесса двухпозиционного регулирования позволяет определить реакцию системы на внешние воздействия в переходных и установившихся режимах, оценить показатели качества регулирования.

Большие возможности открывает применение ЦВМ при выполнении расчетов систем релейного регулирования на основе частотного метода. Определение параметров симметричных автоколебаний в АСДР амплитуды a и частоты ω_a на основе гармонического баланса легко выполняется с помощью вычислений на ЦВМ. Расчетные выражения получаются из (3.37) и (3.38) с учетом соотношений (3.28), (3.29) и (3.30). В результате можно записать два уравнения

$$a = \frac{2}{\pi} |W_{об}(j\omega)|; \quad (3.75)$$

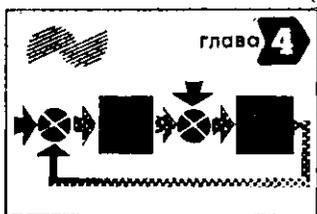
$$\varphi_{об}(\omega) - \arcsin [e \cdot (2a)] = -\pi. \quad (3.76)$$

Процесс расчета заключается в первоначальном задании частоты ω , последующем вычислении амплитуды a по (3.75) и проверке выполнения условия баланса фаз по (3.76). Начальное значение ω может быть выбрано, например, как обратная величина суммы постоянных времени последовательных инерционных звеньев первого порядка модели объекта.

Каждый раз, когда условие (3.76) не выполняется, то в зависимости от величины левой части выражения (3.76) значение ω изменяется на величину шага $\pm \Delta\omega$ так, чтобы выполнялось уточнение величины a и приближение к выполнению условия (3.76). При этом шаг $\Delta\omega$ соответственно уменьшается по мере приближения к требуемому результату. Операции уточнения продолжаются до тех пор, пока не будут получены значения ω_a и a с заданной точностью расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вавилов А. А.* Частотные методы расчета нелинейных систем. Л., 1970.
2. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М., 1972; 1975.
3. *Левин В. М., Литвинов Б. Ф.* Приближенные вычисления и программирование на ЭВМ «Наир-2». Л., 1977.



ЛИНЕЙНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

При автоматизации технологических процессов широко применяются линейные автоматические системы регулирования (АСР). Важнейшим типом таких систем являются одноконтурные АСР, изучение которых составляет основное содержание данной главы.

На стадии проектирования линейных АСР инженеру необходимо прежде всего выбрать обоснованно закон регулирования, исходя из динамической характеристики объекта и учитывая характер внешних воздействий на систему. При этом внешние воздействия могут быть в виде либо изменения сигнала задания регулируемой величины (воздействие по заданию), либо возмущений на объект, рассматриваемых в общем случае на входе объекта (возмущение по нагрузке). Выбор закона регулирования заканчивается определением параметров настройки регулятора, удовлетворяющих условиям устойчивости и требуемых показателей качества. Динамическая точность системы и показатели качества регулирования обычно выясняются путем выполнения расчетов переходных процессов, вызываемых внешними воздействиями заданной формы. В настоящее

время названные вопросы удобно решать с помощью ЭВМ. В этой главе рассматриваются также различные способы коррекции одно-контурных АСР.

§ 4.1. ВЫБОР ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ

Структурная схема линейной АСР может быть представлена в наиболее простом виде, как показано на рис. 4.1, где приняты следующие обозначения: x — сигнал управляющего воздействия на объект, y — регулируемая величина, y_0 — заданное значение регулируемой величины, x_0 — возмущение по нагрузке, $\varepsilon_x = x - x_0$, $\varepsilon_y = y_0 - y$.

Сигнал x определяется положением регулирующего органа и обычно измеряется в относительных единицах в пределах диапазона регулирования от 0 до 1 (шкалу указателя положения регулирующего органа градуируют в процентах — от 0 до 100). Учитывая ограничения изменения регулируемой величины от управляющего воздействия на объект, измерение сигнала y приведем в соответствие с сигналом x по формуле

$$y = (\theta - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}), \quad (4.1)$$

где θ — абсолютное значение регулируемой величины; $(\theta_{\min} \div \theta_{\max})$ — диапазон регулирования, определяемый пределами θ_{\min} и θ_{\max} по статической характеристике объекта для крайних положений регулирующего органа при $x_0 = 0$.

Таким образом, согласно (4.1) сигнал y изменяется также от 0 до 1, а коэффициент усиления объекта в выражении его передаточной функции $W_{об}(p)$ получается равным 1. Выражение передаточной функции регулятора $W_p(p)$ определяет закон регулирования.

Типовыми законами регулирования в линейных АСР являются: *пропорциональный* (П) с передаточной функцией регулятора

$$W_{p(n)}(p) = k_p, \quad (4.2)$$

где k_p — коэффициент усиления регулятора;

интегральный (И) с передаточной функцией регулятора

$$W_{p(n)}(p) = 1/(pT_{ин}), \quad (4.3)$$

где $T_{ин}$ — постоянная времени, характеризующая крутизну статической характеристики астатического исполнительного механизма и численно равная времени перемещения регулирующего органа на величину ступенчатого отклонения от нуля сигнала на входе регулятора;

пропорционально-интегральный (ПИ) с передаточной функцией регулятора

$$W_{p(n)}(p) = k_p [1 + 1/(pT_{ин})], \quad (4.4)$$

где k_p и $T_{ин}$ — параметры настройки; $T_{ин}$ — постоянная времени интегрирования;

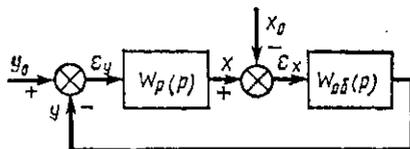


Рис. 4.1

пропорционально-дифференциальный (ПД) с передаточной функцией регулятора

$$W_{p(пл)}(p) = k_p(1 + pT_d), \quad (4.5)$$

где k_p и T_d — параметры настройки; T_d — постоянная времени дифференцирования;

пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) с передаточной функцией регулятора

$$W_{p(пид)}(p) = k_p [1 + 1/(pT_i) + pT_d], \quad (4.6)$$

где k_p , T_i и T_d — параметры настройки соответствующих составляющих этого сложного закона регулирования.

Из теории автоматического управления известны преимущества перечисленных регуляторов. Эффективность П-регулятора проявляется в наибольшей мере при малой величине чистого запаздывания объекта, обладающего астатизмом первого порядка. В случае статического объекта высокого порядка, модель которого представляется цепью последовательно соединенных инерционных звеньев и звена чистого запаздывания, статическая погрешность в системе с П-регулятором и этим объектом может быть малой величины при наибольшей постоянной времени $T_1 \gg \tau$ и другими постоянными времени меньше величины τ .

Выполнение этого условия целесообразности применения П-регулятора удобно рассмотреть по частотным характеристикам объекта. Тогда частота ω_{180} , соответствующая значению фазы -180° , получается больше значения $10/T_1$.

Область применения И-регулятора определяется необходимостью устранения статической погрешности в системе регулирования с малоинерционным объектом, обладающим относительно большой величиной чистого запаздывания.

При наличии в динамической модели объекта звена чистого запаздывания и инерционного звена с постоянной времени, превосходящей постоянные времени остальных таких же звеньев, целесообразно применение ПИ-регулятора. Если передаточную функцию (4.4) переписать в виде

$$W_{p(пи)}(p) = k_p(1 + pT_i)/(pT_i), \quad (4.7)$$

то нетрудно заметить, что звено предварения (форсирующее звено) с постоянной времени T_i (в 4.7) позволяет компенсировать инерционность звена объекта с наибольшей постоянной времени путем настройки постоянной времени T_i , равной этой постоянной времени объекта.

Если приведенные для П-регулятора условия целесообразности его применения выполняются только в результате компенсации инерционности одного из последовательных инерционных звеньев модели объекта высокого порядка, то необходимо использовать ПД-регулятор с настройкой постоянной времени T_d , равной величине постоянной времени компенсируемого звена.

ПИД-регулятор наряду с астатизмом, обеспечивающим устранение статической погрешности, позволяет компенсировать в кон-

туре системы инерционность двух последовательных звеньев первого порядка модели объекта высокого порядка. Для рассмотрения выбора параметров настройки ПИД-регулятора его передаточную функцию запишем в виде

$$W_{p(\text{инт})}(p) = k_p^* (1 + pT_n^*) (1 + pT_d^*) / (pT_n^*), \quad (4.8)$$

где k_p^* , T_n^* , T_d^* — параметры настройки, которые связаны с параметрами k_p , T_n , T_d по (4.6) соотношениями $k_p^* = k_p/\varkappa$; $T_n^* = T_n/\varkappa$; $T_d^* = \varkappa T_d$; $\varkappa = 1 + T_d^*/T_n^*$.

Параметры T_n^* и T_d^* настраивают равными двум наибольшим постоянным времени инерционных звеньев модели объекта. В общем случае передаточную функцию объекта представим

$$W_{об}(p) = W^*(p) e^{-p\tau}, \quad (4.9)$$

где $W^*(p)$ — передаточная функция объекта без чистого запаздывания.

Желаемую передаточную функцию регулятора с учетом компенсации инерционности объекта $W^*(p)$ возьмем в виде

$$W_p(p) = k_p [pW^*(p)], \quad (4.10)$$

тогда передаточная функция разомкнутого контура АСР получается в виде

$$W_0(p) = W_p(p) W_{об}(p) = k_p e^{-p\tau} p. \quad (4.11)$$

Исходя из требования затухания колебательных переходных процессов регулирования, коэффициент усиления k_p выбирают в диапазоне от $0,6/\tau$ до $0,8\tau$. Регулятор с передаточной функцией (4.10) обеспечивает переходные характеристики в системе одновременно с выполнением требований минимальной продолжительности переходного процесса и минимального отклонения регулируемой величины от заданного значения.

В качестве обобщенного критерия оценки качества регулирования обычно принимают минимум интеграла сигнала рассогласования при ступенчатом изменении заданного значения регулируемой величины или возмущения по нагрузке. При этом полагают, что статическая погрешность равна нулю, а интеграл отклонения регулируемой величины от заданного значения принимает конечное значение. Иногда в качестве критерия принимается интеграл от квадрата рассогласования, т. е. $\int \varepsilon_y^2 dt$. Если необходимо с большим весом учитывать отклонения регулируемой величины по мере увеличения времени переходного процесса, то в качестве критерия используется интеграл от произведения времени на модуль рассогласования, т. е. $\int t |\varepsilon_y| dt$. Наилучшим критерием качества работы АСР считается интеграл от модуля сигнала рассогласования, так как обычно ухудшение качества регулирования является линейной функцией значения рассогласования [1].

Настройки регулятора, обеспечивающие лучшую реакцию системы на ступенчатой формы внешнее воздействие, не всегда прием-

лемы для условий работы объекта. По своему характеру внешние воздействия могут представлять собой ступенчатое изменение и разные сочетания типовых воздействий, такие, как изменение с постоянной скоростью, периодические импульсные колебания, а также случайные отклонения. Оптимальные настройки регулятора в определенной степени зависят от вида воздействий и частоты их поступления в систему. Например, оптимальные настройки, выбранные для ступенчатого или гармонического входного воздействия, могут существенно различаться. Поэтому обоснованный выбор закона регулирования и параметров настройки регулятора проводится путем анализа возможностей получения высокой точности системы, начиная с рассмотрения выражения (4.10), вопросов применения регулятора из числа типовых или целесообразности технической реализации специального регулятора. При этом частотный метод, основанный на определении амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик разомкнутого и замкнутого контура системы, является одним из наиболее распространенных способов изучения линейных одноконтурных АСР с целью решения инженерных задач на стадии проектирования системы регулирования для конкретного объекта.

По частотным характеристикам разомкнутого контура системы выясняется не только устойчивость и запас устойчивости. Для сравнительной оценки различных линейных законов регулирования, рассматриваемых с точки зрения выбора для имеющихся характеристик объекта, определяют предельные параметры: коэффициент усиления $k_{р.пр}$ (или $1/T_{им.пр}$ для П-регулятора) и частоту $\omega_{пр}$. Эти параметры соответствуют границе устойчивости системы, когда модуль частотной характеристики разомкнутого контура $W_0(j\omega) = W_p(j\omega) W_{об}(j\omega)$ равен единице, а аргумент $\varphi_0(\omega) = \varphi_p(\omega) + \varphi_{об}(\omega)$ равен $-\pi$ согласно критерию устойчивости Найквиста. Таким образом, имеем два уравнения

$$|W_0(j\omega)| = 1; \quad (4.12)$$

$$\varphi_0(\omega) = -\pi \quad (4.13)$$

при $\omega = \omega_{пр}$. Из (4.13) определяется $\omega_{пр}$, а затем из (4.12) — $k_{р.пр}$. Чем выше значения $\omega_{пр}$ и $k_{р.пр}$, тем больше возможность получения малого времени переходного процесса с наименьшим достигаемым отклонением регулируемой величины от заданного значения за счет повышения чувствительности системы к высокочастотным составляющим внешнего воздействия.

Рассмотрим зависимости предельных параметров $k_{р.пр}$ и $\omega_{пр}$ от параметров объекта в случае

$$W^*(p) = 1/(1 + pT)$$

согласно (4.9) при П- и ПИ-законах регулирования.

Учитывая (4.2), для АСР с П-регулятором выражения (4.12) и (4.13) записываются соответственно в виде

$$k_{р.пр} T \sqrt{1 + (\omega_{пр} T)^2} = 1; \quad (4.14)$$

$$-\omega_{пр} T = -\text{arctg } \omega_{пр} T = -\pi. \quad (4.15)$$

Так как фаза $-\operatorname{arctg} \omega T$ принимает значения в диапазоне от 0 до -90° , изменение величины $\omega_{\text{нр}} T$ ограничивается условием

$$\pi > \omega_{\text{нр}} T > \pi/2. \quad (4.16)$$

Задаваясь значением $\omega_{\text{нр}} T$, находим величину $k_{\text{р.нр}}$ по (4.14), $\omega_{\text{нр}} T$ по (4.15) и затем отношение τ/T , по которым выясняется зависимость параметров $k_{\text{р.нр}}$ и $\omega_{\text{нр}} T$ от значения τ/T . Нетрудно убедиться, что область целесообразного применения П-регулятора ограничивается условием $\tau/T < 0,2$. При этом для расчетов удобно воспользоваться приближенными формулами

$$k_{\text{р.нр}} \approx 1,585 T/\tau; \quad (4.17)$$

$$\omega_{\text{нр}} \approx 1,585/\tau. \quad (4.18)$$

Учитывая (4.7), для АСР с ПИ-регулятором при настройке $T_{\text{н}} = T$ выражения (4.12) и (4.13) записывают соответственно в виде $k_{\text{р.нр}}/\omega_{\text{нр}} T = 1$ и $\omega_{\text{нр}} T = \pi/2$, из которых получают

$$k_{\text{р.нр}} = \pi T/2\tau; \quad (4.19)$$

$$\omega_{\text{нр}} = \pi/2\tau. \quad (4.20)$$

Сравнивая предельные параметры для П- и ПИ-регулятора по (4.17)–(4.20), убеждаемся, что для обоих регуляторов они примерно одинаковые.

Аналогичным способом можно проводить сравнительный анализ регуляторов для случаев объекта высокого порядка и различных других законов регулирования.

Для установления связи между частотной характеристикой разомкнутого контура системы и переходным процессом регулирования используют понятие «комплексной частоты», обобщающей незатухающее синусоидальное воздействие с частотой ω в определении обычных частотных характеристик на случай затухающего синусоидального воздействия в виде $Ae^{-m\omega t} \sin \omega t$, где A — начальное значение амплитуды; m — коэффициент затухания. Тогда из выражения передаточной функции $W_0(p)$ путем замены оператора p на $j\omega(1+jm)$ получаем так называемые расширенные частотные характеристики $W_0[j\omega(1+jm)]$, как показано в [2].

Относительное уменьшение амплитуды колебаний за один период переходного процесса оценим степенью затухания ψ по формуле $\psi = 1 - A_2/A_1$, где A_1 и A_2 — выбранные с одним знаком два соседних экстремальных отклонения регулируемой величины, рассматриваемые относительно установившегося значения, которое получается в результате завершения этого переходного процесса. Степень затухания ψ связана с величиной m соотношением

$$\psi = 1 - e^{-2\pi m}.$$

Обычно требуется обеспечить величину $m = 0,22 \div 0,37$, что соответствует $\psi = 0,75 \div 0,9$. Для этого необходимо при заданном значении m выполнить расчеты расширенных частотных характеристик разомкнутой системы, построить графики логарифмических характеристик и определить коэффициент усиления $k_{\text{р}}$, при котором амплитудно-частотная характеристика пересекает ось $L=0$, а фазочастотная характеристика пересекает линию, соответствующую -180° для одной и той же частоты ω^* . Точность регулирования можно повышать изменением закона регулирования в направлении увеличения частоты ω^* и коэффициента усиления $k_{\text{р}}$.

Последующее изучение частотных характеристик замкнутого контура АСР при воздействии по заданию и возмущении по нагрузке позволяет рассмотреть основные слагаемые отклонения регулируемой величины от заданного значения, выяснить поведение системы при разных видах входного сигнала, уточнить настройку коэффициента усиления в пределах достаточного запаса устойчивости.

Частотная характеристика системы при воздействии по заданию из рис. 4.1 получается в виде

$$W_s(j\omega) = Y(j\omega)/Y_0(j\omega) = W_0(j\omega)/[1 + W_0(j\omega)], \quad (4.21)$$

а при возмущении по нагрузке

$$W_n(j\omega) = Y(j\omega)/E_x(j\omega) = W_{ос}(j\omega)/[1 + W_0(j\omega)]. \quad (4.22)$$

В (4.21) и (4.22) выражения частотных характеристик $W_0(j\omega)$ и $W_{ос}(j\omega)$ заменим на основе соотношения

$$W(j\omega) = M(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (4.23)$$

где $M(\omega) = |W(j\omega)|$ — модуль и $\varphi(\omega)$ — аргумент частотной характеристики $W(j\omega)$.

Затем, используя формулу Эйлера

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi,$$

получим расчетные выражения для определения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик замкнутого контура системы. При воздействии по заданию имеем

$$M_s(\omega) = |W_s(j\omega)| = 1/\sqrt{1 + 2 \cos \varphi_0(\omega) [M_0(\omega)] + 1/[M_0^2(\omega)]}; \quad (4.24)$$

$$\varphi_s(\omega) = \arctg \frac{\sin \varphi_0(\omega)}{M_0(\omega) + \cos \varphi_0(\omega)}, \quad (4.25)$$

где $M_0(\omega) = |W_0(j\omega)|$.

При возмущении по нагрузке получаем

$$M_n(\omega) = |W_n(j\omega)| = M_s(\omega)/M_p(\omega); \quad (4.26)$$

$$\varphi_n(\omega) = \varphi_s(\omega) - \varphi_p(\omega). \quad (4.27)$$

При $\omega \rightarrow 0$ для статической системы имеем $M_0(\omega) \rightarrow k_p$, $\varphi_0(\omega) \rightarrow 0$, $M_s(\omega) \rightarrow k_p/(1 + k_p)$, $\varphi_s(\omega) \rightarrow 0$, $M_n(\omega) \rightarrow 1/(1 + k_p)$, $\varphi_n(\omega) \rightarrow 0$, а для астатической системы с астатизмом первого порядка — $M_0(\omega) \rightarrow \infty$, $\varphi_0(\omega) \rightarrow -\pi/2$, $M_s(\omega) \rightarrow 1$, $\varphi_s(\omega) \rightarrow 0$, $M_n(\omega) \rightarrow 0$, $\varphi_n(\omega) \rightarrow \pi/2$. Следовательно, в области низкой частоты контур АСР обладает характеристиками элементарных звеньев.

Если $\omega \rightarrow \infty$, $M_0(\omega) \rightarrow 0$, то $M_s(\omega) \rightarrow M_0(\omega)$, $\varphi_s(\omega) \rightarrow \varphi_0(\omega)$, $M_n(\omega) \rightarrow M_{ос}(\omega)$, $\varphi_n(\omega) \rightarrow \varphi_{ос}(\omega)$. Таким образом, в области высокой частоты характеристики системы регулирования отражают фильтрующие свойства разомкнутого контура и объекта.

В области промежуточной частоты характеристики замкнутого контура по $M_s(\omega)$ отражают свойства колебательного звена с резонансной частотой ω_p , определяемой аналитически из условия

$$dM_s(\omega)/d\omega = 0. \quad (4.28)$$

Учитывая выражение для $M_s(\omega)$ по (4.24), из (4.28) получаем выражение для определения величины ω_p при условии существования производных $dM_0(\omega)/d\omega$ и $d\varphi_0(\omega)/d\omega$ в области частот $\omega = \omega_p$:

$$\left[\frac{1}{\cos \alpha(\omega)} - \frac{1}{M_0(\omega)} \right] \frac{dM_0(\omega)}{d\omega} = \frac{d\alpha(\omega)}{d\omega} \operatorname{tg} \alpha(\omega), \quad (4.29)$$

где $\alpha(\omega) = \varphi_0(\omega) - \pi$ и $\omega = \omega_p$.

На рис. 4.2 и 4.3 показаны логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) замкнутого контура системы, полученные соответственно по (4.24) — (4.27) для объекта с передаточной функцией

$$W_{об}(p) = e^{-p\tau} / [(1 + pT_1)(1 + pT_2)]$$

и регулятора, выбранного по (4.10) при $\tau = 0,2$; $T_1 = 1,5$; $T_2 = 0,5$ и различных значениях коэффициента усиления k_p .

Отклонение графика амплитудно-частотной характеристики $M_3(\omega)$ от прямой $M_3(0)$ определяет вид переходных процессов, обусловленных, по существу, частотным искажением входного сигнала. Чем выше резонансный пик, тем больше начальная амплитуда и количество колебаний графика переходной характеристики. Повышение динамической точности системы связано с расширением полосы пропускания гармонических составляющих в область высокой частоты, что ранее оценивалось частотой $\omega_{пр}$. С другой стороны, высокочастотные помехи должны иметь собственную частоту выше значения ω_p и за верхним пределом полосы пропускания.

График амплитудно-частотной характеристики $M_H(\omega)$ согласно (4.26) получается из $M_3(\omega)$ с

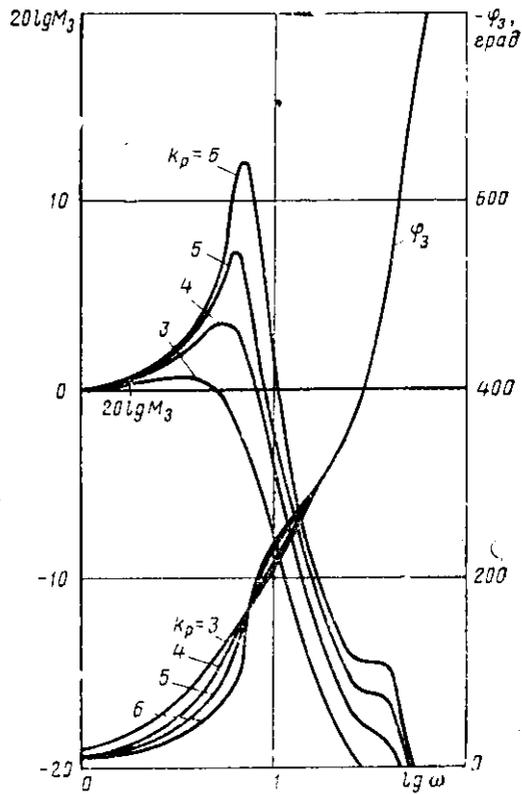


Рис. 4.2

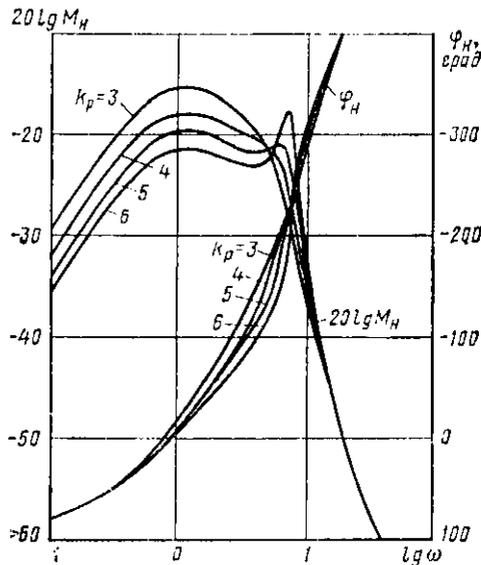


Рис. 4.3

учетом модуля обратной характеристики регулятора. Из рассмотрения семейства графиков $M_{11}(\omega)$, показанных на рис. 4.3 для разных значений k_p , следует, что частота ω_B периодических возмущающих воздействий по нагрузке может существенно влиять на качество регулирования. При расположении частоты ω_B на участках возвышения модуля $M_{11}(\omega)$ наибольшее отклонение регулируемой величины в процессе регулирования соответственно увеличивается.

Окончательно качество регулирования оценивается на основе выбранного критерия по графику переходного процесса, определяемого при заданной форме внешнего воздействия.

Достижение высокой точности регулирования путем использования вероятностных характеристик случайного входного воздействия получило название синтеза оптимальных систем и описано, например, в книге [3]. Согласно методике [3] сначала выясняется оптимальный алгоритм функционирования регулятора исходя из условия определения предельной динамической точности системы регулирования. Затем анализируется резонансный пик модуля частотной характеристики замкнутой системы $|W_a(j\omega_p)|$ и находится коэффициент усиления регулятора k_p , соответствующий отношению $|W_a(j\omega_p)|/W_a(0)$ в диапазоне значений 2,4—1,3 (или 7,6—2,3 дБ).

По реализации стационарного случайного процесса $x_0(t)$, приведенного к выходу объекта в виде процесса $z(t)$, находим корреляционную функцию

$$R_z(\Delta t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} z(t) z(t + \Delta t) dt.$$

Учитывая, что функция $R_z(\Delta t)$ четная двусторонняя, после преобразования по Лапласу этой функции находим выражение для спектра мощности процесса $z(t)$ в виде

$$G_z(p) = \int_{-\infty}^{\infty} R_z(\Delta t) e^{-p\Delta t} dt = G_z^+(p) + G_z^-(p),$$

где

$$G_z^+(p) = \int_0^{\infty} R_z^+(\Delta t) e^{-p\Delta t} dt \quad \text{и} \quad G_z^-(p) = \int_{-\infty}^0 R_z^-(\Delta t) e^{-p\Delta t} dt.$$

Представим выражение для $G_z(p)$ в виде произведения $G_z(p) = G_z^*(+p)G_z^*(-p)$. Тогда оригинал, соответствующий $G_z^*(+p)$, определяет выражение для взаимной корреляционной функции $R_{1z}(t)$, совпадающей с выражением весовой функции $W_{1\text{ опт}}(t)$ оптимальной системы при подаче на вход белого шума $\dot{f}(t)$. Искомая передаточная функция оптимальной системы находится по соотношению

$$W_{3\text{ опт}}(f) = N(p)G_z^*(f),$$

где $N(p)$ — изображение весовой функции $W_{1\text{ опт}}(t)$, полученное в результате преобразования по Лапласу выражения для $W_{1\text{ опт}}(t)$ с учетом естественного условия физической реализуемости $W_{1\text{ опт}}(t) = 0$ при $t \leq \tau$.

После определения передаточной функции $W_{3\text{ опт}}(p)$, используя формулу (4.9) и учитывая (4.21), находим выражение передаточной функции для оптимального регулятора в виде

$$W_{p\text{ опт}}(p) = W_{3\text{ опт}}^*(p) / \{W_{06}^*(p) [1 - W_{3\text{ опт}}^*(p) e^{-p\tau}]\},$$

где $W_{3\text{ опт}}^* = W_{3\text{ опт}}(p) e^{p\tau}$.

Дисперсия ошибки регулирования в найденной оптимальной системе, т. е. предельная динамическая точность, определяется по формуле

$$\sigma_{\min}^2 = \int_0^{\infty} R_{fz}^2(t) dt.$$

§ 4.2. ПРИМЕНЕНИЕ ЦВМ ПРИ РАСЧЕТЕ ОДНОКОНТУРНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Расчеты амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик одноконтурной линейной АСР удобно выполнять с помощью ЦВМ, используя выражения для модуля и аргумента частотной характеристики разомкнутого контура $W_0(j\omega)$ и формул (4.24) — (4.27), относящиеся к замкнутому контуру системы.

На рис. 4.4 приведена блок-схема программы расчета частотных характеристик линейной АСР. Для расчета частотных характеристик замкнутого контура необходимо предварительно получить выражения для функций $M_{об}(\omega)$ и $\varphi_{об}(\omega)$ по $W_{об}(j\omega)$, $M_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ по $W_p(j\omega)$, $M_0(\omega) = M_{об}(\omega)M_p(\omega)$ и $\varphi_0(\omega) = \varphi_{об}(\omega) + \varphi_p(\omega)$. Особенность рассматриваемой программы расчета заключается в том, что она учитывает многозначность функции арктангенса при вычислении по формуле (4.25), в то время как алгоритм ЦВМ предусматривает вычисление только главного угла. При этом важно, чтобы расчет выполнялся в направлении повышения частоты ω с достаточно малого начального значения ω_0 , когда аргумент по формуле (4.25) находится в первом квадранте. В программе может быть предусмотрена возможность контроля за выполнением последнего условия по данным, выводимым на печать. Кроме того, изменение частоты в процессе расчета происходит автоматически с постоянным шагом $\Delta\omega = 2\omega_0$, обеспечивая переход графика фазочастотной характеристики $\varphi_0(\omega)$ через все последующие за первым квадранты. Действительное значение угла $\varphi_0(\omega)$ определяется по формуле

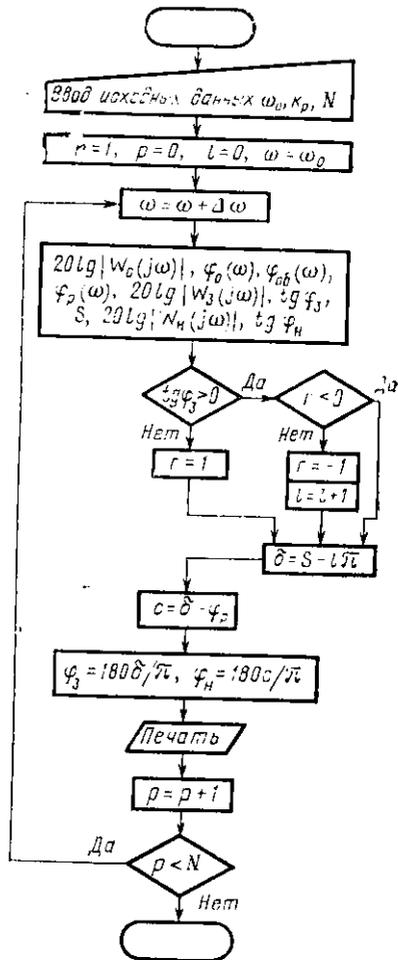


Рис. 4.4

$$\delta = S - l\pi, \quad (4.30)$$

где $\delta = \varphi_3$; $S = \text{Arctg} \{ \sin \varphi_0(\omega) / [M_0(\omega) + \cos \varphi_0(\omega)] \}$; l — поправочный коэффициент.

Участок программы, относящийся к вычислению величины δ , начинается с анализа знака величины $\text{tg } S$. Отрицательному знаку тангенса соответствует значение логической переменной $g = 1$, а положительному знаку — $g = -1$. Каждое изменение знака приводит к увеличению на единицу коэффициента l . На печать выводятся результаты расчета ЛЧХ разомкнутого и замкнутого контуров системы.

По частотным характеристикам разомкнутого контура определяются запасы устойчивости: запас по модулю равен обратной величине модуля частотной характеристики при значении аргумента, равном -180° , а запас по фазе равен разности $180^\circ - \varphi_{01}$, где φ_{01} — взятый с обратным знаком аргумент φ_0 при частоте ω , соответствующей модулю, равному 1. По частотным характеристикам замкнутого контура системы выясняются свойства этой системы пропускать и фильтровать гармонические составляющие сигнала внешнего воздействия.

На основе частотных характеристик замкнутого контура можно вычислить реакцию системы на заданный вид внешнего воздействия, вызывающего переходный процесс регулирования, который завершется за конечный интервал времени. Этот интервал времени принимается за полупериод при представлении сигнала внешнего воздействия периодической функцией, записываемой в результате разложения ее в ряд Фурье в виде

$$\Delta Z = Z \left[Z_0 + \sum_{v=1}^N C_v \cos(\omega_1 t + \xi_v) \right], \quad (4.31)$$

где Z — амплитуда воздействия; Z_0 — постоянная составляющая; C_v — коэффициенты ряда Фурье; v — номер гармоники ($v = 1, 2, 3, \dots, N$); ω_1 — частота первой гармоники; ξ_v — смещение фазы v -й гармоники.

Сигнал ΔZ при управляющем воздействии по заданию есть сигнал Δy_0 (см. рис. 4.1), а при возмущении по нагрузке — Δx_0 . В общем случае реакцию АСР на внешнее воздействие ΔZ запишем выражением в виде

$$\Delta y(t) = A \left[B + \sum_{v=1}^N C_v M_{з,н}(\omega_v) \cos(v\omega_v t + \xi_v + \psi_v) \right], \quad (4.32)$$

где A — амплитуда изменения регулируемой величины по статической характеристике объекта, согласно (4.1) $A = Z$; B — постоянная составляющая; $M_{з,н}(\omega_v)$ — модуль частотной характеристики $W_z(j\omega)$ либо $W_n(j\omega)$ при $\omega = \omega_v$; ψ_v — аргумент частотной характеристики и замкнутого контура также при $\omega = \omega_v$.

Для ступенчатой формы внешнего воздействия при возмущении по нагрузке и при условии периодизации сигнала этого воздействия эквивалентным импульсным сигналом прямоугольной формы с

импульсом и паузой, соответствующими продолжительности переходного процесса регулирования, выражение (4.31) принимает вид

$$\Delta x_0 = Z \left[0,5 + \frac{2}{\pi} \sum_{\nu=1}^N \frac{\sin (2\nu - 1) \omega_1 t}{2\nu - 1} \right]. \quad (4.33)$$

Тогда выражение (4.32) с учетом (4.33) может быть записано формулой

$$\Delta y(t) = A \left\{ B + \frac{2}{\pi} \sum_{\nu=1}^N M_{\nu} [(2\nu - 1) \omega_1] \frac{\sin [(2\nu - 1) \omega_1 t + \psi_{2\nu-1}]}{2\nu - 1} \right\}. \quad (4.34)$$

В выражении (4.34) $B=0$ для случая астатической системы и $B=1/2(k_p+1)$ для случая пропорциональной системы.

Расчет переходных процессов в АСР при воздействии по заданию ступенчатой формы проводится аналогично по (4.34) при замене передаточной функции $W_{\nu}[j(2\nu-1)\omega_1]$ на $W_{\nu}[j(2\nu-1)\omega_1]$. Кроме того, необходимо принять $B=0,5$ для случая астатической системы и $B=k_p/[2(k_p+1)]$ для случая пропорциональной системы.

Первоначальное значение частоты ω_1 для расчета процесса регулирования выбирается равным $\omega_p/8$, где резонансная частота ω_p определяется по амплитудно-частотной характеристике замкнутого контура АСР. Шаг изменения времени Δt удобно принять равным (или кратным) величине запаздывания объекта τ . Переходный процесс рассматривается на интервале времени от 0 до π/ω_1 .

Методическая погрешность расчета переходного процесса зависит от величины $\omega_1 t$, ω_1 и количества учитываемых гармоник N . Наибольшее значение погрешности ожидается при тех значениях

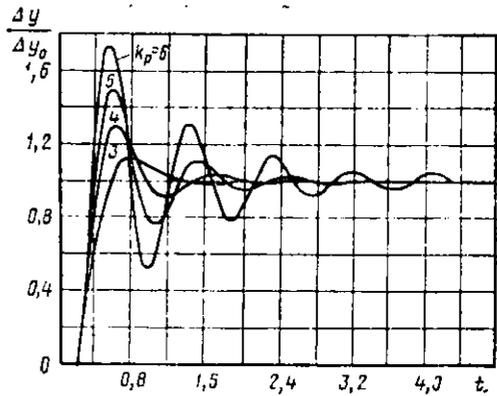


Рис. 4.5

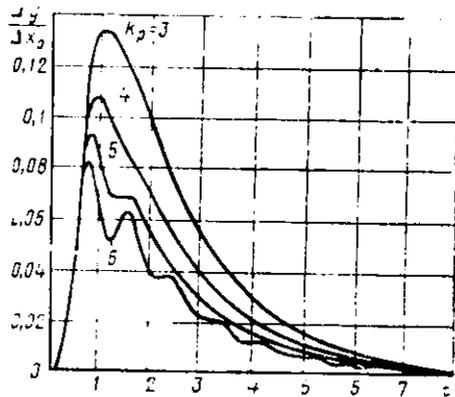


Рис. 4.6

$\omega_1 t$, при которых функция, описывающая внешнее воздействие, претерпевает разрыв. Однако фильтрующие свойства реальных систем и выбор достаточно большого числа гармоник позволяют свести эту погрешность до сколь угодно малой величины. Погрешность, обусловленная выбором значения ω_1 , физически проявляется в незавершенности переходного процесса в конце полупериода периодизированного внешнего воздействия ступенчатой формы. Уменьшение этой погрешности путем понижения величины ω_1 сопровождается необходимостью учитывать большее число гармоник, чтобы охватить достаточно широкий спектр в области высоких частот до значений, когда модуль частотной характеристики замкнутого контура АСР становится близким к нулю. Методическую погрешность удобно оценивать по отклонению расчетной ординаты Δy от нулевого значения при $t=0$ и $t=\tau$.

На рис. 4.5 и 4.6 показаны вычисленные по приведенным расчетным выражениям графики переходных характеристик АСР с ЛЧХ соответственно рис. 4.2 и 4.3 при различных значениях коэффициента k_p . Для расчета графиков рис. 4.5 были выбраны параметры $\omega_1=0,5$ и $N=40$, а графики рис. 4.6 получены при $\omega_1=0,2$ и $N=40$. По графикам рис. 4.5 и 4.6 проводится сравнительный анализ показателей качества регулирования и выбор настройки величины k_p с учетом места приложения внешнего воздействия (по заданию и по нагрузке) на систему.

Совершенствование одноконтурных АСР предполагает использование дополнительной информации либо о состоянии объекта, либо о действующих внешних воздействиях и усложнения структурной схемы системы регулирования, т. е. применение того или иного способа коррекции.

§ 4.3. СПОСОБЫ КОРРЕКЦИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В данном параграфе рассматриваются основные направления совершенствования линейных систем регулирования при использовании особенности объекта регулирования и учета места приложения внешнего воздействия.

Автоматические системы каскадного регулирования. Один из способов коррекции АСР сложного объекта заключается в применении каскадного регулирования. Для этого кроме основного контура системы образуется дополнительный контур регулирования промежуточной величины объекта [1, 3]. На рис. 4.7, а показана структурная схема автоматической системы каскадного регулирования объекта, передаточная функция которого представляется в виде $W_{об}(p) = W_1(p)W_2(p)$. При этом важно то, что управляющее и возмущающие воздействия на объект вызывают отклонение основной регулируемой величины y через изменение промежуточной величины y_n , воспринимающей эти воздействия с гораздо меньшим запаздыванием, чем величина y . Поэтому автоматическое поддержание необходимого значения промежуточной величины с помо-

щью дополнительного регулятора с передаточной функцией $W_{p1}(p)$, называемого также стабилизирующим, позволяет существенно уменьшить отклонения регулируемой величины y от заданного значения. Функция основного регулятора с передаточной функцией $W_{p2}(p)$, называемого корректирующим, сводится к изменению задания промежуточной величины в соответствии с отклонением регулируемой величины от заданного значения.

Учитывая относительно малое запаздывание в реакции промежуточной величины на изменение управляющего воздействия согласно выражению передаточной функции $W_1(p)$, выбором передаточной функции $W_{p1}(p)$ обеспечивают высокое быстродействие контура стабилизации промежуточной величины по отношению к медленно изменяющейся регулируемой величине y . Выполнение этого требования позволяет использовать простую методику расчета рассматриваемой системы каскадного регулирования.

Путем преобразования структурной схемы рис. 4.7, а находим передаточную функцию эквивалентного объекта $W_0(p)$ соответствующей одноконтурной системы с регулятором, имеющим передаточную функцию $W_{p2}(p)$. Передаточную функцию $W_0(p)$ можно представить в виде

$$W_0(p) = \frac{Y(p)}{Y_{от}(p)} = \frac{W_1(p)W_2(p)W_{p1}(p)}{1 + W_1(p)W_{p1}(p)} \cdot \frac{W_{об}(p)W_{p1}(p)}{1 + W_1(p)W_{p1}(p)}. \quad (4.35)$$

Учитывая относительно медленное изменение сигнала y_{01} по сравнению с изменением сигнала y_n в процессе регулирования, передаточную функцию $W_{p1}(p)$ выбираем, исходя из выражения передаточной функции $W_1(p)$, а передаточную функцию $W_{p2}(p)$ определяем на основе выражения $W_0(p)$.

Уточнение выбора передаточной функции $W_{p1}(p)$ с учетом влияния цепи $W_2(p)W_{p2}(p)$ на динамику процессов в контуре стабилизирующего регулятора выполняется заменой передаточной функции $W_1(p)$ на выражение $W_1(p)/[1 + W_1(p)W_2(p)W_{p1}(p)W_{p2}(p)]$.

На практике применяется также другой вариант системы регулирования с использованием сигнала промежуточной величины по структурной схеме, показанной на рис. 4.7, б. В этом случае возможно косвенное измерение промежуточной величины. Тогда коррекция осуществляется с помощью дополнительного сигнала y_n ,

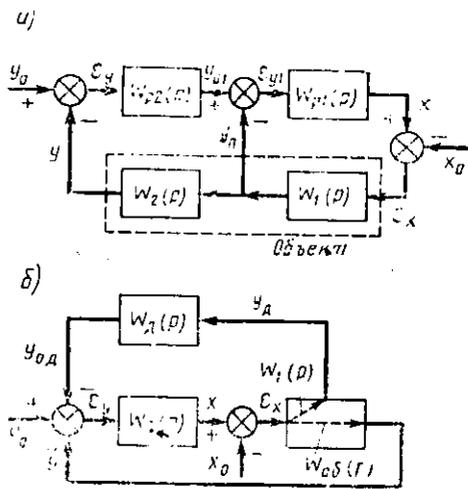


Рис. 4.7

который подается на вход дифференциатора, имеющего передаточную функцию

$$W_x(p) = k_d p T_d / (1 + p T_d), \quad (4.36)$$

где k_d — коэффициент усиления; T_d — постоянная времени.

Управляющее воздействие на объект x по схеме рис. 4.7, б формируется в цепи местного контура системы $W_1(p)W_d(p)W_p(p)$ с передаточной функцией устройства преобразования сигнала рассогласования в виде

$$W(p) = X(p)/E_y(p) = W_p(p) / [1 + W_x(p)W_1(p)W_p(p)]. \quad (4.37)$$

Аналогично для схемы рис. 4.7, а передаточная функция устройства формирования управляющего воздействия записывается в виде

$$W(p) = X(p)/E_y(p) = W_{p1}(p)W_{p2}(p) / [1 + W_1(p)W_{p1}(p)]. \quad (4.38)$$

Из сравнения выражений (4.37) и (4.38) получаем формулы соответствия схемы системы регулирования по рис. 4.7, б схеме по рис. 4.7, а. Так из равенства выражений знаменателей (4.37) и (4.38) находим

$$W_{p1}(p) = W_p(p)W_d(p), \quad (4.39)$$

а из равенства числителей с учетом соотношения (4.39) получаем

$$W_{p2}(p) = 1/W_x(p). \quad (4.40)$$

Таким образом, расчет системы, выполненной по схеме рис. 4.7, б, проводится по методике для схемы рис. 4.7, а, а выбор выражения передаточной функции $W_p(p)$ определяется условием получения высокого быстродействия контура с передаточной функцией разомкнутой цепи $W_p(p)W_d(p)W_1(p)$. Важной особенностью схемы рис. 4.7, б является то, что система регулирования реагирует на изменение дополнительной величины y_d и в установившемся режиме величина y_d не учитывается в значении управляющего воздействия на объект.

Комбинированные автоматические системы регулирования. В тех случаях когда представляется возможность получения сигнала возмущающего воздействия, доминирующего в конкретных производственных условиях, целесообразно сочетание двух принципов формирования управляющего воздействия на объект, т. е. на основе сигнала возмущения, передаваемого в разомкнутой цепи, и сигнала рассогласования, образуемого в замкнутом контуре системы регулирования и учитывающего неконтролируемые воздействия на систему, вызывающие отклонение регулируемой величины от заданного значения. Такие АСР называют комбинированными. При этом преобразование сигнала внешнего воздействия в разомкнутой цепи может относиться и к сигналу изменения задания регулируемой величины.

На рис. 4.8 показаны структурные схемы АСР с компенсацией возмущающего воздействия на объект, которое обозначено x_0 . Не-

контролируемые возмущения обозначены f . В схеме рис. 4.8, а сигнал возмущения по нагрузке x_0 преобразуется звеном компенсации действия этого возмущения, имеющим передаточную функцию $W_{к1}(p)$. Условие компенсации возмущения определяется из равенства нулю реакции объекта на сигналы x_0 и x_k и записывается в виде

$$W_{к1}(p) = W_{в}(p) / W_{об}(p), \quad (4.41)$$

где $W_{в}(p)$ — передаточная функция объекта по каналу преобразования входного сигнала возмущения x_0 .

В случае сложного объекта могут возникнуть трудности технического выполнения устройства с передаточной функцией (4.41). Тогда целесообразно применить приближенную компенсацию возмущения, основанную на реализации частотной характеристики $W_{к1}(j\omega)$ согласно (4.41) лишь в рабочем диапазоне частот, соответствующих гармоническим составляющим сигнала x_0 .

Для этого условие приближенной компенсации возмущения представим выражениями амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик объекта и звена формирования сигнала компенсации

$$|W_{к1}(j\omega)| = \left| \frac{W_{в}(j\omega)}{W_{об}(j\omega)} \right| \quad (4.42)$$

$$\varphi_{к}(\omega) = \varphi_{в}(\omega) - \varphi_{об}(\omega), \quad (4.43)$$

где $\varphi_{к}(\omega)$, $\varphi_{в}(\omega)$ и $\varphi_{об}(\omega)$ — фазы звеньев с частотными характеристиками соответственно $W_{к1}(j\omega)$, $W_{в}(j\omega)$ и $W_{об}(j\omega)$.

Из рассмотрения в заданном частотном диапазоне выражений $|W_{к1}(j\omega)|$ и $\varphi_{к}(\omega)$, получаемых по (4.42) и (4.43), выясняется схема устройства компенсации.

Для оценки эффективности приближенной компенсации возмущения с учетом замкнутого контура АСР запишем в операторной форме выражение сигнала регулируемой величины

$$Y(p) = E_x(p) W_{об}(p) + x_0(p) W_{в}(p) \quad (4.44)$$

или с учетом равенства $E_x(p) = E_y(p) W_p(p) - x_0(p) W_{к1}(p)$ и $E_y(p) = Y_0(p) - Y(p)$ получаем выражение для $Y(p)$ в виде

$$Y(p) = W_0(p) [Y_0(p) + x_0(p) W_1^*(p)], \quad (4.45)$$

где $W_0(p) = W_{об}(p) W_p(p) / [1 + W_{об}(p) W_p(p)]$ — передаточная функция замкнутого контура системы при входном воздействии по заданию

$$W_1^*(p) = \frac{1}{W_p(p)} \left[\frac{W_{в}(p)}{W_{об}(p)} - W_{к1}(p) \right]. \quad (4.46)$$

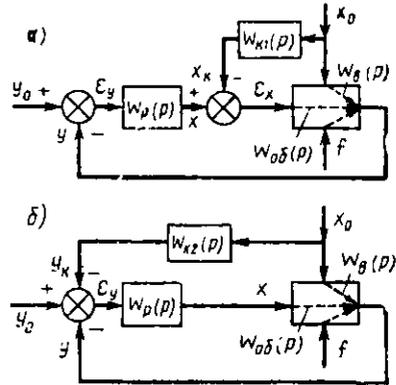


Рис. 4.8

Вопрос технической реализации устройства компенсации с передаточной функцией $W_{к1}(p)$ может рассматриваться путем сравнения разных вариантов.

В случае использования структурной схемы системы регулирования, показанной на рис. 4.8, б, исходное выражение для выбора передаточной функции звена формирования сигнала компенсации возмущения получается из равенства сигналов реакции объекта на это возмущение $x_0(p) W_n(p)$ и управляющее воздействие $x_0(p) W_{к2}(p) W_p(p)$. В результате получаем

$$W_{к2}(p) = W_n(p) [W_p(p) W_{об}(p)], \quad (4.47)$$

а передаточная функция $W_2^*(p)$ записывается в виде

$$W_2^*(p) = W_n(p) [W_{об}(p) W_p(p)] - W_{к2}(p). \quad (4.48)$$

На рис. 4.9, а показана структурная схема АСР с компенсацией отклонения регулируемой величины y от заданного значения y_0 . Условие компенсации по этой схеме представляется передаточной функцией звена компенсации в виде

$$W_{к}(p) = 1 [W_{об}(p) W_p(p)]. \quad (4.49)$$

Учитывая (4.49), управляющее воздействие на замкнутый контур системы запишем в операторной форме выражением

$$Y_0^*(p) = Y_0(p) \{1 - 1 [W_{об}(p) W_p(p)]\}. \quad (4.50)$$

Тогда регулируемая величина y в операторной форме определяется по формуле

$$Y(p) = Y_0^*(p) W_{об}(p) W_p(p) [1 + W_{об}(p) W_p(p)] \quad (4.51)$$

или с учетом (4.50) имеем $Y(p) = Y_0(p)$. Однако техническая реализация устройства преобразования сигнала y_0 в соответствии с (4.49) практически может быть осуществлена лишь приближенно, т. е. для некоторого частотного диапазона, как это было рассмотрено ранее.

Если сигнал компенсации подать на вход объекта, как это показано на схеме рис. 4.9, б, то условие компенсации определяется передаточной функцией звена формирования управляющего воздействия в виде

$$W_{к}(p) = 1/W_{об}(p). \quad (4.52)$$

Таким образом, в этом случае динамика регулятора не учитывается в условии компенсации, что иногда позволяет упростить техническую реализацию комбинированной системы регулирования.

Автоматическая система регулирования с компенсацией влияния чистого запаздывания объекта на качество регулирования. Чистое запаздывание объекта может служить причиной ограничения в достижении высокой точности регулирования в одноконтур-

пой системе. Если промежуточная величина объекта не может быть получена в его конструкции для использования каскадного регулирования, то эту величину можно создать искусственно, применив в схеме регулятора модель объекта без чистого запаздывания. Практически непрерывное определение реакции системы без чистого запаздывания позволяет регулятору как бы «предвидеть» поведение действительной системы на величину чистого запаздывания раньше.

Полагая, что передаточная функция объекта регулирования представляется выражением (4.9), рассмотрим показанную на рис. 4.10, а структурную схему АСР, в которой цепь с моделью объекта без чистого запаздывания $W_m(p) = -W^*(p)$ и блоком запаздывания $W_{\text{за}}(p)$ образует положительную обратную связь, охватывающую основное регулирующее устройство с передаточной функцией $W_{\text{ру}}(p)$. Кроме того, модель объекта без чистого запаздывания с передаточной функцией $W_m(p)$ включена в цепь отрицательной обратной связи, охватывающей основное регулирующее устройство $W_{\text{ру}}(p)$. Таким образом, регулятор рассматриваемой системы содержит два контура обратных связей, охватывающих звено с передаточной функцией $W_{\text{ру}}(p)$.

Характеристики контура отрицательной обратной связи в модели регулятора представим передаточной функцией эквивалентного регулирующего устройства в виде

$$W_{\text{ру}}^*(p) = X(p)/E_y(p) = W_{\text{ру}}(p) / [1 + W_m(p)W_{\text{ру}}(p)], \quad (4.53)$$

где $E_y(p)$ — преобразованный по Лапласу сигнал рассогласования $e_y = y_0 - z$.

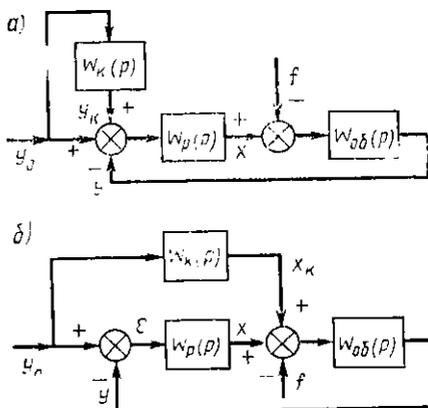


Рис. 4.9

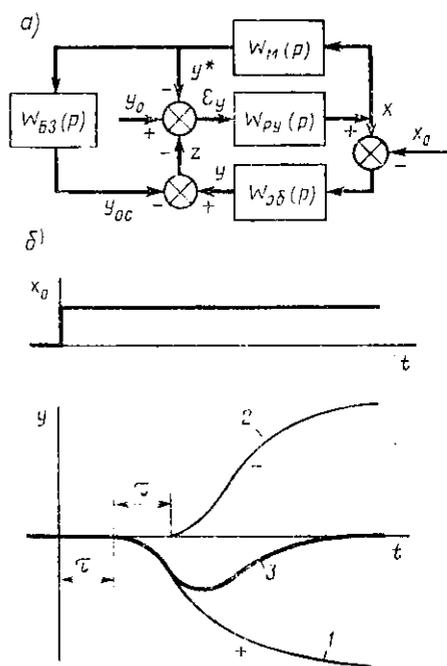


Рис. 4.10

Тогда с учетом положительной обратной связи передаточная функция регулятора

$$W_p(p) = W_{py}^*(p) / [1 - W_{py}^*(p) W_m(p) W_{\delta_3}(p)] \quad (4.54)$$

или, подставляя $W_{py}^*(p)$, по (4.53)

$$W_p(p) = W_{py}(p) / \{1 + W_m(p) W_{py}(p) [1 - W_{\delta_3}(p)]\}. \quad (4.55)$$

Передаточная функция системы регулирования при внешнем воздействии по задаванию $W_3(p) = Y(p)/Y_0(p) = W_{\delta_3}(p) W_p(p) / [1 + W_{\delta_3}(p) W_p(p)]$ с учетом (4.55) записывается в виде

$$W_3(p) = \frac{W_{\delta_3}(p) W_{py}(p)}{1 + W_{py}(p) \{W_{\delta_3}(p) + W_m(p) [1 - W_{\delta_3}(p)]\}}. \quad (4.56)$$

Полагая $W_m(p) W_{\delta_3}(p) = W_{\delta_3}(p)$, из (4.56) находим выражение для передаточной функции $W_3(p)$ в виде

$$W_3(p) = \frac{W^*(p) W_{py}(p)}{1 + W^*(p) W_{py}(p)} e^{-p\tau}. \quad (4.57)$$

Из рассмотрения (4.57) следует, что передаточная функция $W_{py}(p)$ выбирается исходя из выражения передаточной функции $W^*(p)$, т. е. по динамической характеристике объекта без учета чистого запаздывания, которое в данном случае не оказывает влияния на качество регулирования при $t > \tau$.

Передаточная функция системы регулирования при возмущении по нагрузке $W_n(p) = -Y(p)/X_0(p) = -W_{\delta_3}(p) / [1 + W_{\delta_3}(p) W_p(p)]$ с учетом (4.55) записывается в виде

$$W_n(p) = - \frac{\{1 + W_m(p) W_{py}(p) [1 - W_{\delta_3}(p)]\} W_{\delta_3}(p)}{1 + W_{py}(p) \{W_{\delta_3}(p) + W_m(p) [1 - W_{\delta_3}(p)]\}}. \quad (4.58)$$

Полагая $W_m(p) W_{\delta_3}(p) = W_{\delta_3}(p)$, из (4.58) находим выражение для передаточной функции $W_n(p)$ в виде

$$W_n(p) = - \left[1 - \frac{W^*(p) W_{py}(p)}{1 + W^*(p) W_{py}(p)} e^{-p\tau} \right] W^*(p) e^{-p\tau}. \quad (4.59)$$

Из рассмотрения выражения (4.59) следует, что при возмущении по нагрузке реакция системы регулирования определяется двумя составляющими, смещенными во времени на величину τ . Первая составляющая представляет собой реакцию на входной сигнал $-x_0$, а вторая, противоположно направленная, — результат управляющего воздействия на объект сигналом $X_0(p) W_3(p) e^{-p\tau}$. Таким образом, изменение регулируемой величины в результате управляющего воздействия проявляется лишь через время 2τ , как показано на рис. 4.10, б, где графики 1 и 2 представляют реакцию на ступенчатое входное воздействие по нагрузке составляющих звеньев по (4.59), а график 3 — результат суммирования слагаемых 1 и 2, т. е. переходную характеристику системы.

Если выбрать передаточную функцию основного регулирующего устройства по соотношению

$$W_{py}(p) = K_1 [pW_{\kappa}(p)],$$

где K — коэффициент усиления, то выражение (4.57) преобразуется к виду

$$W_3(p) = e^{-pT} (1 + pT), \quad (4.60)$$

где $T = 1/K$ — постоянная времени.

Значение K выбирают возможно большей величины, ограниченной влиянием при высоком быстродействии системы не учтенных в структурной схеме инерционных звеньев с малыми постоянными времени, которые выносятся в результате анализа реальной конструкции системы. Основная трудность реализации рассмотренной АСР заключается в построении точной модели звена чистого запаздывания в конструкции блока запаздывания. Погрешность модели чистого запаздывания снижает эффективность указанной компенсации и требует дополнительного изучения характеристик полученной системы.

Рассмотренный принцип компенсации влияния чистого запаздывания объекта на качество регулирования можно использовать для компенсации влияния других частей динамической модели объекта, например звеньев, отражающих распределенность регулируемой величины.

§ 4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Импульсные линейные системы регулирования являются разновидностью систем непрерывного действия и характеризуются импульсной модуляцией сигналов регулируемой величины (или сигнала рассогласования) и управляющего воздействия на объект. В большинстве практических случаев импульсные системы образуются при многоканальном регулировании, которое предполагает многократное использование общего на все каналы блока формирования управляющего воздействия, т. е. регулирующего устройства. Для изучения конкретного способа технической реализации промышленной системы многоканального регулирования, допускающей настройку на получение различных типовых законов регулирования, предварительно рассмотрим принцип действия этой системы с одним объектом и без импульсного элемента.

Важным направлением технического осуществления ПИД-регулятора, а также частных случаев более простых законов регулирования является использование исполнительного механизма постоянной скорости, управляемого трехпозиционным релейным усилителем, с корректирующей обратной связью по положению регулирующего органа. На рис. 4.11, а показана структурная схема такого регулятора. На этом рисунке приняты обозначения $PЭ$ — релейный элемент, $ИМ$ — исполнительный механизм постоянной скорости. Схемы настройки корректирующего фильтра $KФ$ на различные законы регулирования показаны на рис. 4.11, б.

Учитывая ступенчатую форму сигнала z и пренебрегая влиянием люфта в механической передаче движения и инерционностью, определяющей переходные процессы при пуске и останове электрического двигателя, полагаем, что исполнительный механизм постоянной скорости, выполненный на основе этого двигателя, обладает передаточной функцией вида $1/(pT_c)$.

Для пропорционального закона регулирования характерно выключение релейного элемента при $|\epsilon_u| \geq h_1$, где $\epsilon_u = \epsilon_y - u_{oc}$, u_{oc} — сигнал обратной связи. Перемещение регулирующего органа

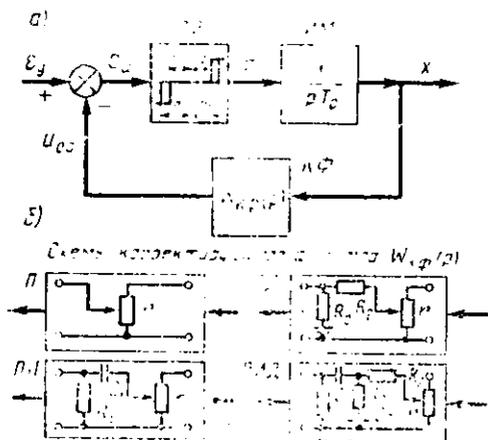


Рис. 4.11

на происходит в соответствии с характеристикой релейного элемента до тех пор, пока не произойдет выключение двигателя при выполнении условия $|\epsilon_u| \leq h_2$. Последовательное включение и выключение релейного элемента определяется изменением сигнала рассогласования ϵ_u к моменту переключения. Если $d\epsilon_y/dt < du_{oc}/dt$, то непрерывно изменяющийся сигнал ϵ_y вызывает пульсирующий режим работы исполнительного механизма, т. е. поочередное включение на время продолжительности импульса t_n и последующее

выключение на время продолжительности паузы t_n релейного элемента при перемещении регулирующего органа в одном направлении (в пределах диапазона регулирования). При постоянной скорости изменения сигнала рассогласования согласно зависимости $\epsilon_y(t) = st$, где s — коэффициент, в пульсирующем режиме интервалы включенного и выключенного состояний релейного элемента определяются по формулам

$$t_n = (h_1 - h_2) / (k_{oc}/T_c - s); \quad (4.61)$$

$$t_n = (h_1 - h_2) / s, \quad (4.62)$$

где k_{oc} — коэффициент обратной связи по положению регулирующего органа. Средняя скорость перемещения регулирующего органа в пульсирующем режиме определяется по формуле

$$(dx/dt)_{cp} = \gamma / T_c, \quad (4.63)$$

где $\gamma = t_n / (t_n + t_n)$

Учитывая (4.61) и (4.62), из (4.63) получаем

$$(dx/dt)_{cp} = s / k_{oc}. \quad (4.64)$$

Таким образом, рассматриваемый релейный контур при малой величине h_1 и $s < k_{oc}/T_c$, когда $\gamma < 1$, является линейным по постоян-

ной составляющей сигнала x (квазинепрерывный регулятор). Коэффициент k_{oc} настраивается с помощью потенциометра r . Коэффициент усиления регулятора k_p равен $1/k_{oc}$.

В случае ПИ-регулятора процессы компенсации сигнала рассогласования ϵ_y сигналом обратной связи u_{oc} осуществляются аналогично процессам в контуре рассмотренного П-регулятора. При этом полагаем, что скорость изменения сигнала рассогласования гораздо меньше величины k_{oc}/T_c , а постоянная времени $T_{II} = R_1 C_1$ выбирается достаточно большой величины, так что скоростная составляющая сигнала u_{oc} передается через конденсатор C_1 почти без потерь. В установившемся состоянии системы регулирования конденсатор C_1 заряжается постоянным напряжением сигнала u_{oc} и тем самым как бы выключает цепь корректирующей обратной связи, обеспечивая устранение статической погрешности до величины $\pm h_1$. В случае ПД-регулятора передача через конденсатор C_2 скоростных составляющих сигнала обратной связи определяет образование предварения, так как уменьшение сигнала u_{oc} равносильно увеличению сигнала управляющего воздействия на объект.

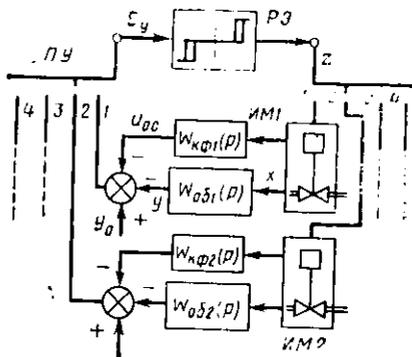


Рис. 4.12

Небольшой величины сопротивление резистора R_0 выбирается исходя из условия устойчивости контура обратной связи по положению регулирующего органа. ПИД-регулятор сочетает свойства предшествующих вариантов настройки законов регулирования.

На рис. 4.12 показана схема автоматической системы многоканального регулирования, принцип действия которой основывается на работе регулятора, выполненного по схеме рис. 4.11. На рис. 4.12 приняты обозначения: РЭ — релейный элемент, ПУ — переключающее устройство. Каждый объект, занимающий отдельный канал ПУ, имеет измерительное устройство с индивидуальным датчиком и исполнительный механизм постоянной скорости ИМ с корректирующей отрицательной обратной связью по положению регулирующего органа. Закон регулирования и параметры настройки выбираются для каждого объекта индивидуально.

Используя принятые обозначения параметров пульсирующего режима работы исполнительного механизма, выясним требуемую продолжительность цикла обегания ПУ. За время включения каждого канала t_0 исполнительный механизм должен успевать переместить регулирующий орган на величину, соответствующую компенсации сигнала рассогласования сигналом u_{oc} , т. е. должно выполняться условие $t_0 > t_n$, где величина t_n определяется по (4.61).

Продолжительность выключенного состояния каждого объекта определяется по формуле

$$t^* = (N - 1)t_0, \quad (4.65)$$

где N — число каналов переключения.

Тогда при $t^* \leq t_n$, где величина t_n определяется по (4.62), переключающее устройство не оказывает влияния на качество регулирования.

Пренебрегая влиянием РЭ, у которого мала зона нечувствительности, импульсную модуляцию сигнала регулируемой величины удобно представить дискретной формой преобразования рассогласования в схеме регулятора. Для этого необходимо записать зависимости отклонения сигнала положения регулирующего органа от рассогласования в дискретные моменты времени с текущим номером ν . В наиболее общем случае для ПИД-регулятора в соответствии с передаточной функцией (4.6) положение регулирующего органа Δx в ν -й интервал времени определяется по формуле

$$\Delta x_\nu = k_p \left[\varepsilon_{y\nu} + (\varepsilon_{y\nu} - \varepsilon_{y(\nu-1)}) \frac{T_x}{\Delta t} \right] + \Delta x_\nu^*, \quad (4.66)$$

где
$$\Delta x_\nu^* = \Delta x_{\nu-1}^* + [k_p (\varepsilon_{y\nu} + \varepsilon_{y(\nu-1)})/2] (\Delta t/T_n).$$

Исключая соответствующие составляющие в (4.66), можно получить формулы для П-, И-, ПИ- и ПД-регуляторов. Определив выражение реакции объекта на сигнал перемещения регулирующего органа по интервалам с номером ν , можно составить программу последовательного вычисления с применением ЦВМ процесса регулирования при заданной форме внешнего воздействия. С уменьшением величины шага Δt влияние импульсной модуляции сигнала ослабляется, а характеристики рассматриваемой импульсной системы приближаются к характеристикам непрерывной линейной системы. Чистое запаздывание объекта учитывается путем запоминания реакции объекта без чистого запаздывания и принятия в расчете по (4.66) величины ε_y , смещенной на интервал $t = \tau$.

В настоящее время для многоканального регулирования начинает широко использоваться цифровая вычислительная техника. Применение стандартных блоков цифровой вычислительной техники и управляющих вычислительных машин в локальных системах управления определяется повышенными требованиями к точности измерения контролируемых величин и управления технологическими процессами, созданием цифровых и частотных датчиков, преобразующих незлектрические величины непосредственно в цифровую форму, а также распространением информационных вычислительных машин централизованного контроля.

Регуляторы, конструкция которых выполнена на типовых блоках цифровой вычислительной техники, называют цифровыми регуляторами [4]. В системах многоканального регулирования с цифровыми регуляторами имеет место не только «квантование по времени» передаваемого сигнала (импульсная модуляция), но и

«квантование по уровню», вызванное дискретностью сигналов на входе и выходе цифрового регулятора (см. гл. 6). Учитывая высокое быстродействие, характерное для вычислительной техники, автоматическая система многоканального регулирования с цифровым регулятором при малом времени обегания может охватить значительное количество регулируемых объектов.

На рис. 4.13 показана блок-схема многоканальной цифровой системы регулирования, построенной на основе машины централизованного контроля (МЦК). МЦК имеет следующие используемые в контуре регулирования основные блоки:

переключающее устройство (ПУ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок сравнения (БС). К числу других основных блоков относятся устройства регистрации и сигнализации, которые на рис. 4.13 не показаны. Переключающее устройство поочередно подключает на вход аналого-цифрового преобразователя датчики регулируемых величин в цифровом коде поступают на регистрирующее устройство, а также в блок сравнения, в котором поочередно вычисляется отклонение регулируемой величины от заданного значения (сигнал рассогласования). Сигнал рассогласования подается на вход вычислительного устройства цифрового регулятора (МЦР). Работа многоканального цифрового регулятора синхронизируется тактовыми импульсами переключающего устройства. В результате вычисления в соответствии с заданным алгоритмом (законом регулирования) по каждому каналу на выходе регулятора получают управляющие воздействия x . Для сочетания цифрового регулятора с исполнительными устройствами (ИУ) используются цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), за исключением случаев применения цифровых исполнительных механизмов. Один из вариантов подключения управляющих сигналов от МЦК (ЭВМ) к ИУ рассмотрен также в § 8.1.

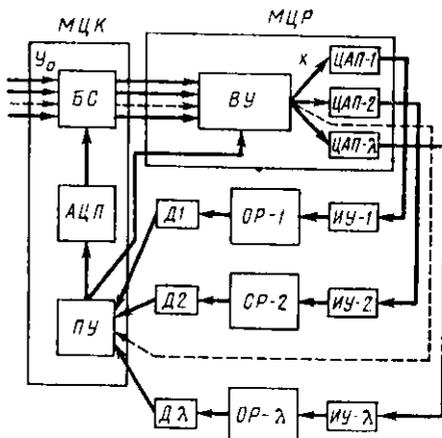
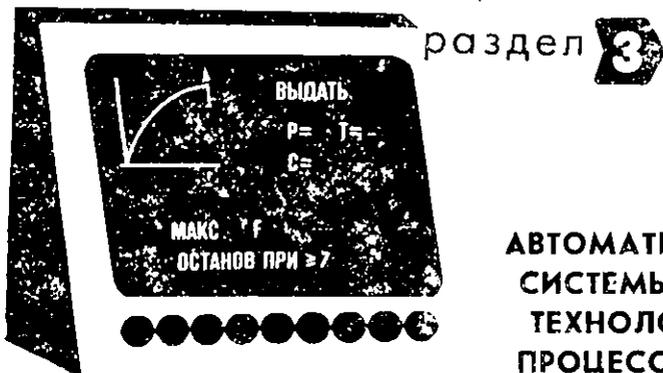


Рис. 4.13

Анализ динамических характеристик цифровых систем регулирования показывает, что в области частот $\omega t_{об} < 0,2$, где $t_{об}$ — время обегания ПУ (время обхода всех каналов), и при отклонении сигнала в результате квантования по уровню менее 0,2%, например, в случае цифрового И-регулятора, АСР можно рассматривать как систему непрерывного действия [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Эрриот П. Регулирование производственных процессов. М., 1967.
2. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М., 1972.
3. Ротач В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М., 1973.
4. Круг Е. К., Александриди Т. М., Дилигенский С. Н. Цифровые регуляторы. М. — Л., 1966.



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ (АСУ ТП)

Построение АСУ ТП особенно актуально при большом объеме перерабатываемой исходной информации о состоянии управляемого процесса и необходимости оптимизации управляющих воздействий.

Особенностью АСУ ТП является наличие в системе управления человека-оператора, степень его участия в управлении зависит от конкретных характеристик системы. Высшей ступенью развития АСУ ТП являются автоматические системы, когда человек не участвует непосредственно в контуре управления процессом. Таким образом, от автоматизации отдельных операций осуществляется переход к автоматизированным (с участием человека) крупным технологическим процессам, которые по мере их развития становятся автоматическими. В итоге полная автоматизация реализуется на новом более высоком уровне производства.

Проектирование АСУ ТП качественно отличается от проектирования локальных систем автоматизации. Кроме расчета отдельных управляющих устройств, инженер, проектирующий АСУ ТП, должен решать вопросы обоснованного выбора объема исходной информации, ее точности, методов преобразования и передачи. От него требуется умение разрабатывать алгоритмы, которые обеспечивают заданный регламент работы оборудования, а также выработку оптимальных управляющих воздействий. Для реализации системы управления необходимо обосновать состав серийных технических средств и специализированных устройств путем анализа их характеристик и показателей экономической эффективности.

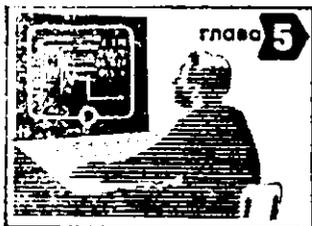
сти. Указанные вопросы рассматриваются в данной части пособия. При этом предполагается, что читатель знаком с принципами действия ЭВМ, основами программирования и теорией автоматического управления. Поэтому основное внимание уделяется вопросам, которые не изучаются в должном объеме в других курсах специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов».

Разработка АСУ ТП имеет непосредственное отношение к проблеме создания гибких автоматизированных производств (ГАП). Создание ГАП диктуется необходимостью быстрого внедрения новых научных идей и технических решений в производстве. При этом требуется в пухлый момент и за короткое время осуществлять переход на выпуск новой продукции. Для легкой промышленности эта проблема имеет особое значение в связи с быстрой сменяемостью моды на изделия швейной и обувной промышленности. Современные предприятия, оснащенные специализированным оборудованием, характеризуются высокой производительностью. Однако переход на новую продукцию требует замены значительной части действующего оборудования, оснастки и инструмента. Поэтому необходимо сочетание гибкости при переходе на выпуск новой продукции с автоматизацией.

Эта задача решается на базе использования микро-ЭВМ и промышленных роботов, в частности путем использования устройств программного управления. Затраты времени на разработку и запись программы обработки изделия значительно меньше затрат на изготовление новой станочной оснастки или резаков для вырубki деталей швейных или обувных изделий. Однако гибкие технологические комплексы требуют в свою очередь затрат на их обеспечение. Это и разработка новой технологии, и программ изготовления деталей, и проектирование инструмента и оснастки. Такое обеспечение также должно быть автоматизировано, для чего создаются системы автоматизированного проектирования (САПР). Проблематика САПР относится к дисциплине «Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации», поэтому в данном пособии эти вопросы не рассматриваются. Использование микро-ЭВМ и роботов, которые должны применяться в АСУ ТП и в целом в ГАП, отражены в данном разделе.

АСУ ТП представляет собой взаимосвязанный единый комплекс. Однако для облегчения изложения принято условное подразделение материала на общие (организационные) вопросы создания АСУ ТП, информационные вопросы, математическое обеспечение и технические средства построения АСУ ТП.

В этом разделе пособия рассматриваются перечисленные компоненты (подсистемы) АСУ ТП. При этом предполагается, что читатель знаком с принципами действия ЭВМ, основами программирования и теорией автоматического управления. Поэтому основное внимание уделяется вопросам, которые не изучаются в должном объеме в других курсах специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов».



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Поскольку автоматизированные системы управления технологическими процессами являются новым более высоким уровнем автоматизации по сравнению с традиционными методами регулирования и управления, то, прежде чем перейти к изложению конкретных вопросов создания АСУ ТП, необходимо рассмотреть некоторые методологические вопросы проектирования, которые и излагаются в данной главе. Рассмотрение этих вопросов позволяет оттенить особенности АСУ ТП, их отличие от традиционных методов управления, причины подразделения функций системы между человеком и автоматическими устройствами и др. В завершение главы указываются некоторые технологические процессы легкой промышленности, для которых уже подготовлены условия для разработки АСУ ТП, созданы такие системы или еще проектируются (вопросы собственно проектирования АСУ ТП рассматриваются в гл. 13).

§ 5.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ЦЕЛЬ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ, ЕЕ ФУНКЦИИ

АСУ ТП представляет собой сложную систему. Наиболее существенными чертами сложных систем являются: наличие ряда критериев эффективности для системы в целом, большое количество взаимодействующих частей или элементов системы, возможность расчленения на отдельные подсистемы наиболее тесно взаимодействующих элементов, наличие иерархической структуры связей подсистем и иерархии частных критериев, сложность поведения системы из-за наличия случайных внешних возмущений и большого количества обратных связей внутри системы, невозможность строгого определения понятия отказа системы. Данная характеристика сложной системы не является строгой, поскольку не приведены количественные оценки отдельных черт системы и допускается определенный произвол в их истолковании. Рассмотрим некоторые определения, связанные с понятием АСУ ТП.

Любой технологический процесс осуществляется с помощью определенного технологического комплекса (ТК), который состоит из оборудования, инструментов, приборов и т. п., а также документов, регламентирующих последовательность, режимы, количественные и качественные цели выполнения процесса.

Под управляемым понимается такой технологический процесс, для которого определены основные входные (управляемые и неуправляемые) воздействия и выходные переменные величины, подлежащие контролю в реальном времени. Управление осуществляется точнее, если при этом известны детерминированные или вероятностные зависимости между входными воздействиями и выходными переменными (математическая модель), разработаны методы их автоматического измерения и направленного изменения. В процессе управления осуществляется воздействие на те или иные элементы оборудования ТК: клапаны, задвижки, заслонки, дозирующие устройства и т. п. Перед разработкой системы управления важно суметь «выделить объект управления» из общей технологической структуры предприятия. Для этого необходимо руководствоваться основной целью данного технологического процесса, назначением и ролью отдельных агрегатов и установок, зависимостью их работы от «соседних» производственных участков, а также степенью централизации управления, принятой на данном предприятии.

Средства, которые используются для управления технологическим процессом, условно называются АСУ ТП. При этом под АСУ ТП понимается система, реализуемая на базе высокоэффективной вычислительной техники, которая обеспечивает управление технологическим процессом на основе централизованно обработанной информации по заданным технологическим и технико-экономическим критериям, определяющим количественные и качественные результаты выработки продукта. В это понятие системы включаются технические средства, соответствующее математическое обеспечение (алгоритмы, программы и другая документация) и человек-оператор.

Автоматизированным технологическим комплексом (АТК) называется совокупность технологического процесса и АСУ ТП. Таким образом, АСУ ТП является неотъемлемой частью АТК. Однако нельзя считать, что автоматизация состоит только в использовании автоматизированных элементов и их подключении к ЭВМ. Для успешной автоматизации необходимо настолько овладеть отдельными технологическими операциями и всем процессом, чтобы иметь возможность описать его математически. При этом в системе «технологический процесс — АСУ ТП» сможет осуществляться не только оперативное управление, но и квалифицированное прогнозирование протекания процесса.

К основным звеньям системы управления относятся и оперативный персонал (операторы, технологи, диспетчеры), непосредственно участвующий в управлении технологическими процессами, через который замыкаются соответствующие контуры управления.

При разработке АСУ иногда говорят о внешнем и внутреннем их проектировании. Внешнее проектирование (его называют и системным обследованием) состоит в исследовании процесса и формировании его желательных характеристик. Внутреннее проектирование — принятие конструктивных решений, обеспечивающих

получение этих характеристик. При создании АСУ ТП должны быть определены конкретные цели ее функционирования и роль в общей структуре управления предприятием. При автоматизированном управлении человек-оператор непосредственно входит в контур управления и, используя современные средства обработки информации, вырабатывает решения для целенаправленного воздействия на систему, причем применение ЭВМ в АСУ ТП для обработки больших объемов информации не является главной особенностью этих систем. Главными задачами АСУ ТП являются задачи выбора целесообразного управления технологическим процессом. ЭВМ в АСУ ТП в основном должна выполнять роль управляющей машины, в то время как в автоматизированной системе управления предприятием (АСУ ТП) — информационно-советующей машины.

Основной целью разработки и внедрения АСУ ТП должна быть оптимизация технологических процессов как основного средства повышения производительности труда и качества выпускаемой продукции. В ряде случаев, когда функционирование новых технологических процессов без современной АСУ ТП оказывается практически невозможным, назначением такой АСУ ТП можно считать обеспечение реализуемости технологического процесса в новых высокоинтенсивных и экономичных режимах использования. Однако конкретный технологический процесс определяется столь большим числом различных факторов (в том числе уровнем технологии, оборудования, квалификацией обслуживающего персонала и т. п.), что принятие решения о реализации тех или иных задач управления связано с весьма большими материальными затратами и должно быть научно обоснованным. Потому необходимо четко определить, какие функции должна выполнять система управления. На основе анализа технологического процесса и задач управления прежде всего следует определить:

- 1) возможность оптимизации процесса и критерий оптимизации;
- 2) те участки технологического процесса, на которых человек не в состоянии полноценно выполнить управляющие функции и, следовательно, они должны быть безусловно автоматизированы;
- 3) участки технологического процесса, управление которыми может быть возложено на человека, но оно осуществляется не оптимально;
- 4) участки технологического процесса, для которых управление возможно только при помощи человека-оператора без использования автоматических устройств.

В результате этого анализа можно определить управляющие функции, возлагаемые только на операторов, только на автоматические устройства и на операторов, работающих с помощью автоматических устройств. Далее для задач, которые будут решаться с участием человека, определяются информационные функции системы, т. е. объем и форма представления той информации, которая потребуется для принятия решений об управлении. Для уточнения функций системы необходимо также определить степень централизации автоматизированного управления, т. е. определить, все ли

функции управления возлагаются на ЭВМ и операторов или часть этих функций осуществляется местными автоматическими устройствами, которые работают самостоятельно или управляются от ЭВМ. В уточнение функций системы входят также задачи получения некоторых количественных оценок; необходимое быстрое действие реализации для каждой управляющей и информационной функции, требования по надежности выполнения той или иной функции.

Конкретные функции, которые может выполнять АСУ ТП, зависят от характера технологического процесса, поставленных целей управления и возможностей самой АСУ ТП. Обычно на АСУ ТП возлагаются следующие функции: 1) сбор и обработка информации о состоянии технологического процесса и выпускаемой продукции; 2) информация, предусматривающая различного рода сигнализацию, регистрацию и т. п.; 3) организация противоаварийных мероприятий, а также защиты технологического объекта управления от повреждений; 4) стабилизация (регулирование) процессов в заданных режимах; 5) логико-программное управление механизмами объекта в зависимости от текущего состояния технологического процесса; 6) оптимизация процесса производства по заданному критерию; 7) расчет технико-экономических показателей технологического процесса; 8) техническая диагностика отдельных частей и системы в целом; 9) оперативная связь с высшими уровнями иерархии управления.

Перечисленные функции обычно подразделяют на две основные группы: информационные и управляющие.

В настоящее время в АСУ ТП в большей степени реализуются информационные функции. Это объясняется тем, что автоматизация сбора информации является первоочередным этапом, без которого невозможно решить задачу оптимального управления процессом. Автоматизация в широких масштабах информационных функций объясняется также тем, что эти функции менее ответственны, они требуют от технических средств меньшей надежности по сравнению с автоматическим принятием управляющих решений, однако внедрение только информационных функций АСУ ТП следует рассматривать лишь как первый этап создания АСУ ТП, на котором процессе автоматизации не останавливается. Во всех разрабатываемых АСУ ТП должны закладываться все необходимые черты для ее развития в управляющую систему.

§ 5.2. СТРУКТУРА И КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Современные АСУ ТП представляют собой развитые человеко-машинные системы с достаточно сложными взаимосвязями. Чтобы описать такие системы, недостаточно применения какого-либо одного вида структуры, поэтому совокупности составных частей АСУ ТП и взаимосвязи между ними характеризуются несколькими структурами, каждая из которых отражает один из существенных аспектов системы. Наиболее часто употребляются функциональная,

информационная, техническая и организационная структуры АСУ ТП.

В функциональной структуре составными элементами АСУ ТП являются те основные функции, которые выполняет система (они были описаны в § 5.1). При этом связи между элементами отражают порядок (логическую последовательность и подчиненность) выполнения этих функций, функциональная структура дает возможность показать, какие действия и в какой последовательности выполняет данная АСУ ТП (см. рис. 13.2).

При задании информационной структуры рассмотрение ведется с более формальной точки зрения, т. е. функционирование АСУ ТП трактуется как совокупность операций по переработке информации. В этом случае элементами системы являются информационные потоки, характеризующиеся их интенсивностью. Взаимосвязь в системе определяется взаимодействием потоков информации. Информационную структуру для большей наглядности часто совмещают с функциональной или какой-либо другой структурой.

Элементами технической структуры служат основные конструктивные части комплекса технических средств АСУ ТП, которые применяются в системе. Связями в этой структуре являются технические средства, объединяющие основные конструктивные части в совместно функционирующий комплекс (электрические провода, кабели, пневмолинии и т. п.). Полная техническая структура АСУ ТП должна отражать весь комплекс технических средств, т. е. всю совокупность средств получения, передачи, преобразования и использования информации, которые необходимы для функционирования системы (подробнее технические средства рассмотрены в гл. 8).

Организационная структура АСУ ТП отражает состав и взаимодействие оперативного персонала системы, а также его соподчиненность с персоналом смежных уровней управления. В состав оперативного персонала включаются операторы (диспетчеры) и эксплуатационный персонал, который должен своевременно обеспечивать правильность функционирования технических средств системы.

Классификация АСУ ТП. Классифицируют АСУ ТП по следующим наиболее существенным признакам: 1) уровню автоматизации функций системы; 2) характеру алгоритмов, реализующих функции системы; 3) характеру управляемого технологического процесса; 4) степени сложности процесса; 5) числу уровней управления; 6) уровню охвата технологического процесса автоматизацией.

Классификация по уровню автоматизации основана на распределении функций управления между человеком и ЭВМ. Этот вопрос уже рассматривался в § 1.3 при сопоставлении систем с различной степенью централизации управления. Здесь мы более подробно остановимся на различных модификациях АСУ ТП, которые в § 1.3 были представлены схемами на рис. 1.4, а, б. Классификация по уровню определяет степень совершенства АСУ ТП и подразделяет их на информационное, информационно-советую-

щие, управляющие с помощью регуляторов, управляющие в режиме непосредственного цифрового управления.

Информационные АСУ ТП наиболее просты, с их помощью осуществляется только сбор и некоторая предварительная обработка данных о технологическом процессе. Упрощенная схема работы

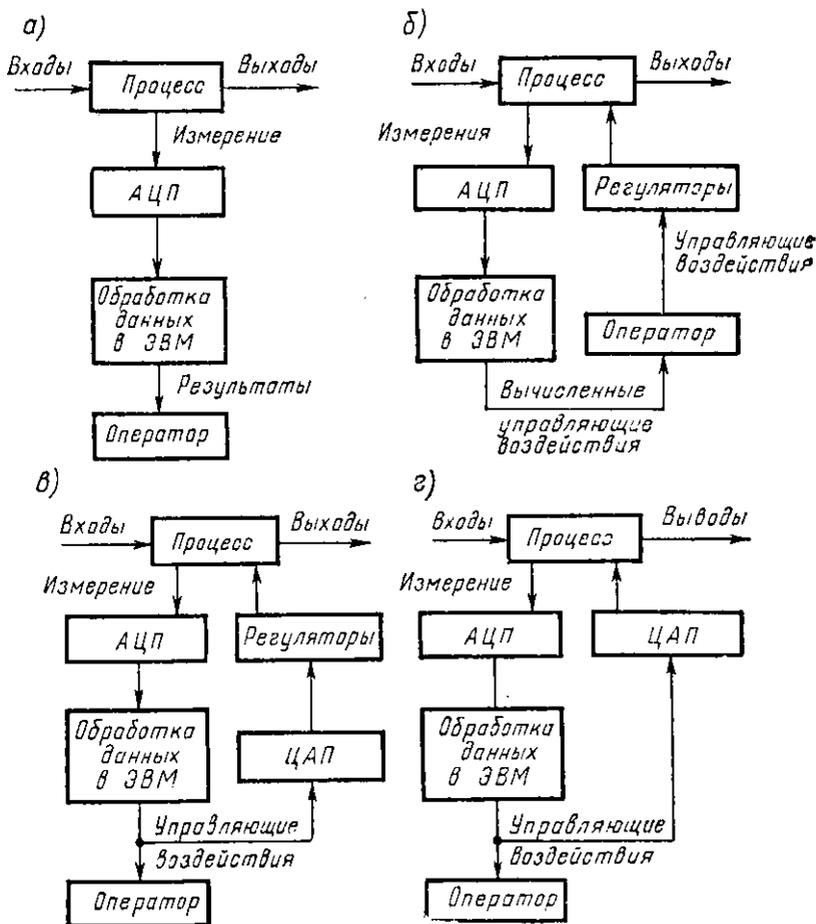


Рис. 5.1

такой АСУ ТП представлена на рис. 5.1, а, где АЦП — аналого-цифровой преобразователь данных из аналоговой в цифровую форму. Полученные результаты используются для изучения процесса, в результате чего инженер-технолог может построить или уточнить математическую модель процесса, управление которым предполагается в дальнейшем. Кроме того, анализ этих данных позволяет получить рекомендации для корректировки технологического процесса с целью его совершенствования. Очевидно, что

сбор данных не оказывает прямого воздействия на процесс, однако информационные функции АСУ ТП являются первоочередными и сохраняются даже после внедрения самых сложных методов управления.

Информационно-советующие АСУ ТП более сложны, они выполняют роль советчика оператору. В данном случае ЭВМ работает в ритме технологического процесса в разомкнутом контуре управления, т. е. ее выходы не связаны непосредственно с органами, управляющими процессом. Управляющие воздействия осуществляет оператор-технолог, получающий указание от ЭВМ (рис. 5.1, б). Через заданные промежутки времени, переменные процесса (температура, концентрация, давление и т. п.) с помощью аналого-цифровых преобразователей вводятся в цифровой форме в ЭВМ. На основании математической модели процесса ЭВМ вычисляет воздействия, необходимые для приближения процесса к оптимальному режиму. Результаты вычислений выдаются оператору в печатанном виде и он управляет процессом, изменяя настройку регуляторов. Таким образом, оптимальный режим поддерживается с помощью регуляторов, а оператор играет роль следящего и управляющего звена, замыкая контур управления. Число входных переменных при этом относительно невелико (10—100), так как оператор не в состоянии безошибочно изменять уставки большого числа регуляторов в течение длительного времени, следовательно, фактором, ограничивающим возможности информационно-советующей АСУ ТП, является непосредственное участие в ней человека. В то же время участие оператора в контуре управления является преимуществом системы на первых этапах ее внедрения, когда оператор, анализируя рекомендации ЭВМ, может обнаружить ошибки и неточности алгоритма управления и не допустить появления брака в технологическом процессе производства.

В управляющей АСУ ТП ЭВМ включается в замкнутый контур управления (рис. 5.1, в), причем, если управление осуществляется с помощью регуляторов, то уставки регуляторов задаются непосредственно с ЭВМ через цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Вначале ЭВМ, аналогично предыдущему случаю, вычисляет управляющие воздействия. Однако если в информационно-советующей АСУ ТП эти воздействия выдавались в форме, удобной для восприятия оператору, то тут они преобразуются в величины, которые можно непосредственно использовать для изменения параметров регуляторов. Например, если регуляторы воспринимают напряжение, то результаты вычислений ЭВМ в двоичном коде преобразуются с помощью ЦАП в напряжение соответствующего уровня и знака, которые подаются на регуляторы. Контур управления замкнут и задача оператора сводится только к наблюдению за процессом, поэтому такое управление иногда называют супервизорным. Вмешательство оператора требуется при возникновении аварийных ситуаций и при необходимости вносить коррективы в управление процессом при изменении сырья или состава вырабатываемой продукции. В последнем случае необходимо вводить

новые значения коэффициентов уравнений, описывающих контуры управления, и это осуществляет оператор. Система приспособлена и к быстрому внесению изменений, связанных с переходом на новый алгоритм управления или с подключением большего числа точек управления, что осуществляется сменой программы управления. В остальном АСУ ТП способна работать без вмешательства человека длительное время. Преимущество supervisory управления состоит в объективном контроле и управлении большим числом параметров системы.

В АСУ ТП с непосредственным цифровым управлением воздействие на управляющие органы процесса поступают не с регуляторов, как в предыдущем случае, а непосредственно от ЭВМ через преобразователи, регуляторы же вообще отсутствуют (рис. 5.1, з). Передача функций регуляторов на ЭВМ вполне естественна при развитии системы управления, так как регуляторы — это малые вычислители, реализующие формулу вида

$$u(t) = k_1 e(t) + k_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + k_3 [de(t)/dt],$$

где $u(t)$ — положение управляющего органа, например угол поворота заслонки; $e(t)$ — отклонение переменной процесса от заданного значения, в частности, например, разность измеряемой переменной и уставки; k_1, k_2, k_3 — параметры настройки регулятора, определяемые в соответствии с выражением (4.6) $k_1 = k_p$; $k_2 = k_i/T_i$; $k_3 = k_d T_d$.

Данное выражение описывает работу пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД), другие типы регуляторов реализуют еще более простые формулы. В системе с непосредственным цифровым управлением, таким образом, вместо того чтобы рассчитывать уставки, требуемые для оптимальной работы, ЭВМ сразу рассчитывает управляющие воздействия и передает их на управляющие органы. Это делается для каждого контура управления, число которых может достигать нескольких сотен. Преимуществом таких АСУ ТП является более широкая возможность изменения алгоритмов управления путем внесения изменений в программу по сравнению с управляющей АСУ ТП с регуляторами. Недостатком АСУ ТП с непосредственным цифровым управлением является требование повышенной надежности, так как отказ в системе может вызвать значительные нарушения в технологическом процессе. Поэтому не удастся полностью исключить приборное оборудование и регуляторы, а общая стоимость оборудования может даже возрасти, так как ЦАП, которые используются для непосредственного воздействия на клапаны или другие регулирующие органы, относительно дороги. Основным аргументом к использованию АСУ ТП с непосредственным цифровым управлением является поэтому наличие задач, которые не могут быть решены другими системами управления.

Рассмотрим более кратко характеристику АСУ ТП по остальным признакам. По характеру алгоритмов, реализующих функции системы, АСУ ТП подразделяются на системы логико-программного, экстремального, адаптивного и оптимально-координационного управления. В логико-программных системах управление осуществляется по жесткой программе с предварительно запрограммированными воздействиями на одну или несколько технологических установок (система управления без обратной связи). Примером таких установок являются смесеприготовители, станки механической обработки. В системах экстремального управления на основании принятой математической модели процесса и получаемой информации о его параметрах определяются воздействия, обеспечивающие близкий к оптимальному режим установки (например, химического реактора). Системы адаптивного управления обеспечивают нахождение оптимального режима по самонастраиваемому алгоритму в условиях изменений как внешних воздействий, так и параметров самой установки. При этом осуществляется перестройка математической модели процесса. Примером соответствующих установок являются многореакторные агрегаты полимеризации. При оптимально-координационном управлении осуществляется автоматизированное (или автоматическое) управление протеканием нескольких взаимосвязанных технологических процессов с оптимизацией показателей основного выходного продукта. Объектом автоматизации здесь выступает уже не отдельный агрегат, а их комплекс.

По характеру управляемого технологического процесса АСУ ТП подразделяются на системы управления непрерывным процессом (химическое производство, в частности производство искусственной кожи), дискретным процессом (машиностроение, например производство швейных машин), непрерывно-дискретным или смешанным процессом (обувное производство).

Степень сложности процесса условно оценивается числом переменных контроля и управления. Некоторые авторы для классификации сложности АСУ ТП предлагают использовать следующие границы числа параметров: 20, 40, 100, 800. По общеотраслевым руководящим методическим материалам по созданию АСУ ТП рекомендуется классифицировать АСУ ТП пятью градациями соответственно количеству «точек» контроля и управления: до 100, от 100 до 300, от 300 до 900, от 900 до 3000, свыше 3000.

Число уровней управления позволяет классифицировать АСУ ТП на одноуровневые централизованные, основанные на базе одной ЭВМ, имеющей прямую связь со всеми источниками информации; двухуровневые на базе одной ЭВМ с частичным выделением функций управления на управляемые регуляторы и (или) локальные посты управления; многоуровневые с несколькими ЭВМ, когда ЭВМ используются на двух и более уровнях.

По уровню охвата технологического процесса автоматизацией АСУ ТП могут подразделяться на два класса: локальные и комплексные.

Поскольку главной задачей АСУ ТП является оптимизация управления сложными технологическими процессами, а основная задача АСУ П состоит в обеспечении оптимального функционирования производства как единого целого, то в настоящее время наметилась тенденция слияния АСУ ТП и АСУ П в единые интегрированные системы управления (ИСУ).

§ 5.3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Основные аргументы целесообразности разработки АСУ ТП. Экономический эффект и другие преимущества автоматизации могут существенно различаться для разных технологических процессов, поэтому не все процессы одинаково могут быть объектами применения АСУ ТП. Основными характеристиками, от которых зависит экономическая эффективность применения АСУ ТП, являются: мощность технологической установки или объем выпускае-

мой продукции; величина и частота возмущающих воздействий на процесс; сложность управления процессом.

Создание АСУ ТП связано со значительными капиталовложениями на приобретение оборудования (ЭВМ, датчики, регуляторы, средства передачи и приема информации и т. п.) и разработку математического обеспечения.

Математическое обеспечение включает в себя выбор и обоснование соответствующих математических методов управления, создание алгоритмов реализации этих методов, написание и отладку программ на языке управляющей ЭВМ, подготовку программ обслуживания основных алгоритмов и другую документацию. Более подробно эти вопросы рассматриваются в гл. 7 и 13. Затраты на АСУ ТП могут не окунуться для процесса малой мощности с небольшим объемом выпуска продукции. Экономический эффект от автоматизации будет получен, если увеличение объема продукции или снижение ее себестоимости благодаря АСУ ТП покроют затраты на автоматизацию.

Все технологические процессы подвержены самым различным возмущениям, связанным с изменением качества поступающего сырья, сменой вида и сортности продукции, изменением внешних условий (температура, давление, параметры источников питания) и т. п. Экономический эффект, который дает компенсация возмущений, зависит от характера процесса. Так, при смене сортности продукции в непрерывном процессе, а также в периодических процессах приходится останавливать производство, например, для загрузки резервуара, набора материалов по рецепту, для перемешивания и подогрева раствора согласно временной диаграмме процесса. Если потери времени на выполнение этих операций обусловлены тем, что оператор не может контролировать все в достаточно быстром темпе или быть одновременно в нескольких местах, то дополнительный выпуск продукции, полученной за счет сокращения простоя оборудования, является прямым экономическим эффектом внедрения АСУ ТП.

Технологическая сложность процесса определяется наличием большого числа контролируемых переменных и взаимодействий между ними. Эксплуатационная сложность состоит в том, что оператор должен соблюдать последовательность операций в соответствии с жестким временным расписанием (программное управление) или же оперативно реагировать на непредсказуемые изменения переменных величин процесса. На практике оператор редко может одновременно манипулировать более чем двумя переменными, поэтому при ручном управлении нередко возникает временное нарушение режима процесса. Автоматизированное ведение процесса с применением математической модели позволяет своевременно изменять множество переменных. Таким образом, источником эффективности управляющих систем сложных процессов является сокращение времени перехода от одного рабочего режима к другому, а также сокращение числа нарушений процесса, т. е. сокращение возможного брака продукции. Другим источником эффективно-

сти АСУ для сложного процесса является возможность осуществлять такое управление, которое не может быть реализовано на традиционной технике. Например, более высокого уровня стабилизации можно добиться, используя алгоритмы регулирования по возмущению; близость к оптимальному режиму достигается методами экстремального или адаптивного управления.

Дополнительные условия целесообразности автоматизации объекта. Кроме рассмотренных трех основных характеристик для обоснования автоматизации объекта необходимо учитывать и ряд других. Так, очевидно, наиболее выгодны для автоматизации новые, перспективные технологические процессы и соответствующее оборудование. Экономическая эффективность автоматизации зависит от степени оснащения производства измерительной аппаратурой. Технологический процесс, слабо оснащенный датчиками, не обеспечивает АСУ ТП объективной информацией и она не сможет достаточно эффективно выполнять свои функции, а разработка новых средств измерения может потребовать значительных затрат. Срок окупаемости системы управления значительно возрастает, если отсутствует адекватное математическое описание процесса, на основании которого строится алгоритм управления. В этом случае разрабатывается эмпирическая модель процесса на основе сбора данных и вычислительных возможностей ЭВМ в сочетании с методами математического моделирования. Очевидно также, выгоднее автоматизировать широко распространенные производства. При этом можно применять типовые АСУ ТП, что снижает затраты на разработку систем управления в отрасли.

Экономическая эффективность редко возрастает за счет сокращения числа обслуживающего персонала при внедрении АСУ ТП. Во-первых, на объекте всегда сохраняется столько операторов, сколько необходимо для ликвидации аварийных ситуаций, которые не могут быть устранены с помощью ЭВМ. Например, повреждение трубопроводов, заклинивание клапанов, прекращение подачи электроэнергии, пара и т. п. Во-вторых, сокращение персонала на обслуживании самой технологической установки обычно покрывается ростом численности технического персонала, необходимого для программирования и эксплуатации ЭВМ.

При оценке экономической эффективности внедрения АСУ ТП следует учитывать и такие факторы, как уменьшение ремонтных работ при повышении качества управления, что сокращает общий простой оборудования и, следовательно, увеличивает выпуск продукции. При пуске нового объекта наличие ЭВМ, работающей в оперативном режиме, позволяет вывести объект на полную мощность за более короткий срок. Обработка показателей процесса на ЭВМ путем сглаживания, выявления корреляции данных и других статистических методов позволяет обнаружить закономерности, которые не видны при простом просмотре накопленных данных из отчетов. Эти закономерности, например, мало заметные различия в рабочих режимах в дневные и ночные смены, позволяют совершенствовать стратегию управления. Преимуществом автоматизированного контроля является также возможность сбора данных в аварийных условиях, когда операторы заняты восстановлением управления объектом и соответствующих записей не ведут. Анализ данных непосредственно до, во время и после крупных неполадок позволяет инженеру-технологу внести изменения в программы управления, чтобы предотвратить или сократить до минимума подобные нарушения процесса в будущем.

Обоснование выбора объекта автоматизации и соответствующее экономическое обоснование могут оказаться ошибочными. Одна из распространенных ошибок — использование моделей процесса, полученных обработкой данных статистическими методами (см. гл. 2) и недостаточно широко и всесторонне проверенных на практике. Другая ошибка — обоснование автоматизированного управления технологическим процессом без учета его воздействия на выпуск конечного продукта. Если, например, автоматизация позволяет поднять производительность труда данного участка производства, то соответственно должны быть изменены режимы работы соседних участков, решены вопросы увеличения поставки сырья и возможности реализации выпуска продукции. Таким образом, обоснование должно проводиться тщательно, всесторонне и объективно.

Существенный прогресс в тех или иных отраслях производства зависит от решения трех основных задач: разработки новых технологических процессов, создания соответствующего нового технологического оборудования, разработки и внедрения эффективного управления процессами и оборудованием. При этом существенно, чтобы все эти задачи решались не последовательно, а одновременно и взаимосвязанно. Автоматизация, как правило, влияет не только на протекание технологических процессов, но и на структуру объекта и на взаимоотношение в трудовых коллективах. Следовательно, проблема создания системы управления должна быть тесно увязана с проектированием самого объекта управления. Внедрение АСУ ТП кроме прямого экономического эффекта дает вторичный, социальный эффект, способствуя повышению общего уровня организации производства, его культуры, улучшению стиля руководства. Автоматизированные системы управления технологическими процессами являются новой формой синтеза традиционной локальной автоматки и комплексной проработки проблем управления, которая отвечает современным требованиям научно-технического прогресса.

Разработка АСУ ТП в легкой промышленности. Как отмечалось в гл. 1, в подотраслях легкой промышленности определились тенденции совершенствования применяемых и внедрения новых технологических процессов, основанных на прогрессивных методах получения и обработки материалов. Осуществление этих процессов на высокопроизводительном комплексно-механизированном оборудовании открывает перспективы эффективного использования АСУ ТП в отрасли.

Работы по созданию АСУ ТП в легкой промышленности начаты с 1972 г. Они ведутся на стадиях технического, рабочего проектирования и практического внедрения. Запланировано создание головных образцов АСУ ТП в основных подотраслях: текстильной, трикотажной, производстве естественной и искусственной кожи и др.

При разработке АСУ ТП в легкой промышленности необходимо учитывать разнообразие процессов обработки (механические, химические), большую неоднородность сырья, отсутствие объективных числовых показателей качества полуфабрикатов, специфические свойства элементов изделий. Например, процессы захвата и ориентации элементов швейных изделий трудно поддаются автоматизации. Основные усилия сейчас направлены на разработку математических моделей процессов, создание локальных систем автоматки, разработку методов и приборов, позволяющих автоматически (в ряде случаев бесконтактным способом) контролировать переменные процессов (толщину, температуру и т. п.).

К объектам, для которых целесообразно создание АСУ ТП, относятся химические станции приготовления различных растворов заданных объемов и соотношений компонент. Последовательность приготовления того или иного состава рабочего раствора определяется производственной необходимостью и выясняется в ходе выполнения технологических операций (например, зольение, пикеливание, дубление при обработке кожевенного сырья). При этом системы управления отдельными аппаратами химических станций оснащаются средствами локальной автоматки, однако взаимодействие этих аппаратов вызывает необходимость централизованного

управления химической станцией с решением задачи наилучшего использования оборудования для получения наибольшей производительности. Задача усложняется большим количеством задаваемых вариантов приготовления растворов и необходимостью подачи растворов по трубопроводам, общим для нескольких потребителей. Конкретные реализации некоторых схем приготовления и подачи растворов рассмотрены в гл. 10. Применение ЭВМ в системе управления позволяет реализовать алгоритм управления с учетом совокупности требований как по регламенту работы аппаратов, так и по выработке управляющих воздействий при изменении условий протекания технологического процесса. Достоинством этой автоматизированной системы управления является также возможность всеобъемлющего контроля за работой химической станции, учета расходуемых продуктов и расчета технико-экономических показателей. Применение в системе современных средств отображения информации позволяет достигнуть высокой эффективности работы оператора.

Большое внимание уделяется подготовке производства к созданию АСУ ТП кожевенного производства, однако особенности этого производства (неоднородность сырья, периодичность процессов обработки, неблагоприятные условия работы оборудования и людей, отсутствие методов прямого измерения переменных для автоматического контроля) затрудняют эту работу. В то же время существует объективная необходимость централизованного контроля за комплексом барабанов обработки кожевенного сырья (см. гл. 1) и оптимального распределения материальных и трудовых ресурсов с целью повышения эффективности технологических процессов прежде всего за счет сокращения простоев оборудования. При этом целесообразность применения ЭВМ в системе управления определяется как большим количеством барабанов на предприятии, так и разнообразием технологических процессов в них.

В АСУ ТП производства искусственной кожи предусмотрен контроль и оптимизация основных переменных полуфабриката и готовой продукции в ходе технологического процесса: толщина волокнистой основы, концентрация реагентов и др. При этом основное внимание уделяется качеству продукции. Перспективна АСУ ТП, разрабатываемая на Ивановском заводе искусственных кож, где используется технология производства кожи на трикотажной основе.

В текстильной промышленности предполагается создание автоматизированного технологического комплекса (АТК) для высокопроизводительных пневмомеханических прядильных машин БД-200, РС, БД-200С, ткацких станков СТБ, АТПР, чесальных (ЧМД-4, ЧМД-100) и промышленных швейных машин с применением микро-ЭВМ семейства «Электроника-С5» (см. § 8.3).

В настоящее время разработано устройство контроля за работой прядильной машины БД-200 на базе микро-ЭВМ «Электроника С5-11», «Электроника С5-12», предназначенное для автоматического сбора, предварительной обработки, цифровой индикации и

передачи информации по проводным линиям связи на ЭВМ более высокой степени управления. С его помощью осуществляется ввод информации от позиционных датчиков состояния машины в целом и ее отдельных узлов, а также дискретной информации с блоков ручного ввода и задатчика; обеспечивается индикация обрывности нити, фактической выработки, общего простоя машины, прогноза параболки съема, сигнализация момента съема пряжи; реализуется выдача на второй уровень системы информации о фактической выработке, накопленном количестве обрывов на машине и ряд других показателей. Микро-ЭВМ выполняет функции управления блоками сопряжения, световой и цифровой индикации, обработки информации, поступающей от датчиков машины БД-200, блоками задатчика и ручного ввода.

В следующем параграфе более подробно рассмотрены проблемы создания АСУ ТП одного из наиболее подготовленных производств — подготовительно-раскройного производства.

§ 5.4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНО-РАСКРОЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Раскрой материалов является составной частью технологических процессов в ряде подотраслей легкой промышленности, таких, как швейная, трикотажная, обувная, кожевенно-галантерейная. Применяемые методы раскроя очень трудоёмки, не всегда обеспечивают необходимую точность кроя, в ряде случаев приводят к перерасходу материала. Существующая организация технологического процесса раскроя материалов не обеспечивает необходимой мобильности, цикл от разработки модели до запуска в производство весьма продолжителен. Автоматизация подготовительно-раскройного производства (ПРП) становится настоятельной необходимостью, особенно при частой смене моделей. Например, на Московском производственном обувном объединении «Буревестник» в год выпускается более 70 моделей мужской обуви, из которых до 70% ежегодно обновляется. При этом конструкторы-модельеры разрабатывают в год до 500 моделей. Особое внимание в настоящее время уделяется разработке новой технологии раскроя изделий и созданию автоматизированного раскройного оборудования. Решение этой проблемы основывается на использовании принципиально новых режущих инструментов на основе луча лазера, струи воды высокого давления, осциллирующего механического ножа, ультразвука и других прогрессивных способов резания материалов.

Развитие системы малых ЭВМ (СМ ЭВМ) и появление микро-ЭВМ с необходимым периферийным (вспомогательным) оборудованием открывают новые возможности для создания системы управления АТК раскроя. Работы в этом направлении в течение ряда лет проводятся у нас в стране и за рубежом. Наибольшее применение и известность в мировой практике получила система «Мар-

коматик» (США), успешно применяются также системы ПРП, разработанные в ФРГ, Японии, Великобритании.

АТК раскроя применительно к ролонным и листовым материалам для швейной, обувной и кожевенно-галантерейной промышленности разрабатывают в нашей стране организации Минлепрома и Минлегпищемаша, при этом можно выделить следующие основные направления работ: автоматизация подготовки данных; использование числового программного управления (ЧПУ) в работе раскройной установки; создание режущего инструмента для раскроя; механизация и автоматизация процессов подачи материала, съема

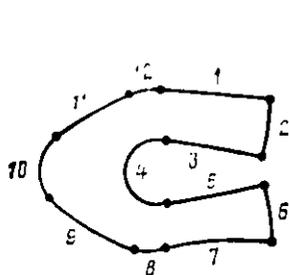


Рис. 5.2

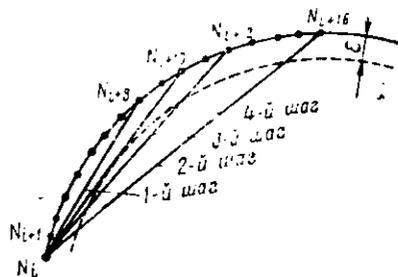


Рис. 5.3

кроя и его отходов. Рассмотрим подробнее некоторые вопросы создания АТК раскроя.

Устройства считывания контуров лекал. Для получения исходной информации о формах выкраиваемых изделий необходимо устройство считывания координат контура лекал. Специальное устройство для считывания точек контура представляет собой стол, на котором располагаются детали кроя основной модели. Над столом перемещается каретка с фотоэлектрическим устройством слежения за контуром детали.

При полуавтоматическом вводе графической информации оператор анализирует изображение (рис. 5.2), выбирает точки и совмещает их с регистрирующим органом (визир, перекрестье). Регистрирующий орган связан с узлом измерения координат. Координаты вычисляются автоматически по сигналу оператора. Однако производительность полуавтоматических устройств достаточно велика лишь тогда, когда графическая информация предварительно хорошо подготовлена, т. е. на контурах указаны все точки, координаты которых должны быть определены. Кроме того, возможны субъективные ошибки оператора как на стадии предварительной подготовки, так и в процессе считывания.

При автоматическом вводе увеличивается точность определения координат, потому что электронными методами можно точнее фиксировать положение регистрирующего органа, а также значительно увеличивается производительность процесса считывания.

Однако в настоящее время автоматические устройства ввода распространены в меньшей степени, чем полуавтоматические. Отчасти это объясняется тем, что автоматизировать ввод машиностроительных чертежей и другой конструкторской документации с множественным пересеканием линий очень сложно. В этом отношении ввод контуров швейных или обувных лекал, которые, как правило, представляют собой замкнутые кривые (например, стелька), значительно проще.

Очевидно, что исходная информация в форме оцифрованных данных контуров лекал содержит как методические, так и случайные погрешности. Методические погрешности определяются в основном длиной отрезка контура, через который происходит съем очередной точки; случайные — зависят от точности работы технических устройств и от оператора, подготавливающего лекало к считыванию и контролирующего процесс считывания.

Обработка оцифрованных данных контуров лекал. Информация с устройств считывания поступает в ЭВМ, где подвергается обработке, которая заключается в уплотнении информации, выполнении расчетов по размножению лекал, получении рациональных раскладок лекал на материале.

Большой объем координат точек исходной информации приводит к необходимости приближенного описания контуров лекал простейшими функциями, в первую очередь прямыми и дугами окружностей, что позволяет значительно сократить объем памяти для хранения исходных данных. Иначе говоря, необходимо построить такую аппроксимирующую кривую, которая удалена от контура не более, чем на заданное расстояние ϵ , и при этом состоит из минимального возможного количества отрезков. В результате аппроксимации информация о контуре содержит данные о координатах узлов аппроксимации и типе соединяющих их линий.

Разработаны различные методы аппроксимации контуров, отличающиеся быстродействием и сложностью алгоритма. Разработаны, например, алгоритм, в основу которого положена проверка принадлежности трех точек контура одной прямой с заданной точностью. Используется способ поиска допустимой длины аппроксимирующего отрезка путем метода половинного деления, сущность которого показана на рис. 5.3. Через ϵ обозначена допустимая погрешность. Результат, полученный на четвертом шаге, обеспечивает максимально возможную длину отрезка при соблюдении необходимой точности. Алгоритм круговой аппроксимации состоит в поиске центра дуги окружности и ее радиуса. На рис. 5.2 представлен контур круговой союзки женских туфель. Участки 1, 3, 5, 9, 11 могут быть аппроксимированы отрезками прямых, участки 2, 4, 6, 8, 10, 12 — дугами окружностей.

Кроме уплотнения информации часто возникает необходимость получать изображения лекал в другом масштабе. Уменьшение размеров лекал требуется при выполнении мини-раскладок или при работе с графическим дисплеем, рабочее поле которого не позволяет выполнить раскладку в натуральную величину. Имеются также режимы работы с графическим дисплеем, когда можно отдельные участки изображения увидеть в увеличенном масштабе.

При подготовке модели изделия в производство требуется иметь лекала не только исходного (среднего) размера и роста. Размножение лекал на смежные размеры и роста (градирование) можно производить с помощью ЭВМ по специальным алгоритмам. Для обеспечения преобразования информации необходимо на контурах основного комплекта лекал выделить конструктивные точки, т. е. те точки, в которых согласно принятой методике конструирования изделия задаются приращения по координатным осям. В основном это точки излома контура, расщечек, но могут быть и точки, находящиеся на криволинейном участке контура. Для расчета координат промежуточных точек лекала используются методы, основанные на геометрическом подобии соответствующих участков контура или на аффинных преобразованиях общего вида, которые дают большую точность. Проверять выполненные градации можно визуально на экране дисплея, на котором в одном изображении появляются лекала всех размноженных размеров-ростов, вложенные одно в другое.

Конечной целью автоматизированной системы подготовки данных является автоматизация синтеза рациональных раскладок. На рис. 5.4 изображен фрагмент раскладки двух различных деталей

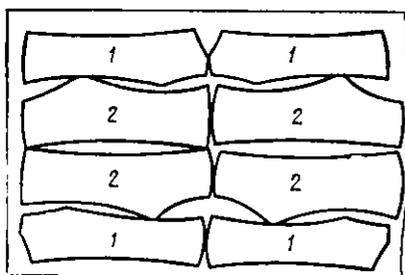


Рис. 5.4

в полосе материала заданной ширины. Применяются следующие основные методы автоматизации при получении раскладок: полуавтоматическое считывание выполненных вручную раскладок миниатюрных лекал, автоматическое размещение лекал в заданной полосе, интерактивное (диалоговое) получение раскладок на экране графического дисплея.

Первый метод нуждается в изготовлении копий всех лекал, характеризуется невысокой производительностью и экономичностью. Полностью автоматическая раскладка требует пока еще много машинного времени и не всегда автоматические методы могут состязаться в скорости с человеком в поиске лучшего размещения деталей. Наиболее перспективен интерактивный метод, при котором интеллектуальные возможности человека соединяются со скоростью и точностью расчета на ЭВМ и ее возможностями хранения информации.

Чтобы получить раскладку лекал по этому методу, оператор вызывает из вычислительной машины на экран дисплея лекала (детали), которые требуется разместить на материале. В верхней части экрана появляются все относящиеся к раскладке детали в уменьшенном масштабе. ЭВМ автоматически вычисляет их площадь. В нижней части экрана оператор указывает ширину материала, которая вычерчивается в виде прямоугольника. Кроме того, оператор может указать потери от раскроя в процентах, которые он признает допустимыми при соответствующей раскладке лекал. Затем с помощью светового пера оператор располагает в очерченном прямоугольнике все детали в требуемом положении и поручает вычислительной машине сблизить эти детали друг с другом либо влево, либо вправо, вверх или вниз. Он может также увеличить

какую-либо деталь раскладки и проверить таким образом положение миниатюрных деталей. Программа ЭВМ составляется так, что исключаются перекрытие соседних деталей.

Используя программные возможности ЭВМ, оператор может расположить детали за несколько минут. Когда раскладка лекал получена, на экране указываются характеристики раскладки, например: коэффициент использования материала, площадь раскраиваемого материала, длина отрезанных краев. Оператор может принять найденное решение или отклонить его и попытаться найти более рациональное. Каждая принятая раскладка лекал запоминается блоком памяти вычислительной машины, она может быть вызвана в любое время и использована для раскроя.

Рассмотренная система подготовки данных для раскроя с помощью ЭВМ обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными ручными методами, а именно: 1) не требуется большого количества лекал, единственным шаблоном, который изготавливается из бумаги, является основная модель; 2) возможно быстрое изменение раскладки, чтобы приспособить ее к другой ширине материала; 3) при интерактивном методе раскладки получается меньший процент отходов материала; 4) вся информация, полученная за определенный период при разработке лекал отдельных изделий и соответствующих раскладок, может длительное время храниться в памяти ЭВМ.

Раскройные установки. При традиционных методах раскроя обычно применяются резаки, которые изготавливаются по форме лекала и путем однократного нажима (давления) на материал вырезают один или несколько слоев детали изделия. При автоматическом раскросе чаще всего применяются ножи специальной конструкции, струя воды, луч лазера. Материал обычно располагается на столе с решетчатым покрытием, вакуумная система которого прижимает материал. Нож для раскроя может быть обычной конструкции, который режет скользя с нажимом вдоль контура разреза. Иногда применяется игла-нож, движущийся возвратно-поступательно в перпендикулярном к материалу направлении. Резание струей воды производится при малом диаметре и высоком давлении струи.

Наиболее перспективные режущие инструменты — это твердотельные и газовые лазеры, на которых достигается когерентное оптическое излучение высокой плотности и соответственно высокой температуры при относительно небольшой мощности. В твердотельных лазерах в качестве активной среды используются кристаллические и аморфные вещества, мощность излучения около 100 Вт. На их базе создано несколько типов лазерных технологических установок («Квант», «Корунд»), которые применяются для прошивки отверстий, термообработки, микросварки. Однако коэффициент полезного действия этих лазеров невелик, он не превышает 3—5%. В последнее время для технологических целей стали широко применяться газовые лазеры и прежде всего непрерывные CO₂-лазеры, которые обладают высокой выходной мощностью и большим КПД (до 20%). В качестве активной среды в них используется смесь газов — углекислого, азота и гелия, возбуждаемых электрическим разрядом.

На рис. 5.5 представлена принципиальная схема лазерной технологической установки [3], созданной на базе мощного CO₂-лазера «Катунь-1». Излучение лазера 1 системой поворотных зеркал 3 и 4 направляется на подвижное зеркало 5, закрепленное на портале 7, который перемещается вдоль координаты X. Лазерный пучок, отразившись от зеркала 5, попадает на подвижное зеркало 10, а от него в оптический резак 6. Этот резак установлен на каретке 8, обеспечивающей его перемещение вдоль координаты Y. Оптический резак фокусирует

лазерный пучок на поверхность материала, размещенного на раскройном столе 9. Механизм плавания 11 обеспечивает постоянство положения оптического резака над поверхностью материала в процессе раскроя. По окончании процесса раскроя лазерный пучок перекрывается электромагнитной заслонкой 2. Образующиеся в процессе резания газообразные продукты деструкции удаляются из зоны обработки через полости 12 раскройного стола 9 системой вытяжной вентиляции. Обычно в зону резания подается технологический газ, который способствует передаче тепловой энергии более глубоким слоям и удалению из зоны резания газообразных продуктов испарения материала или его сгорания. Мощ-

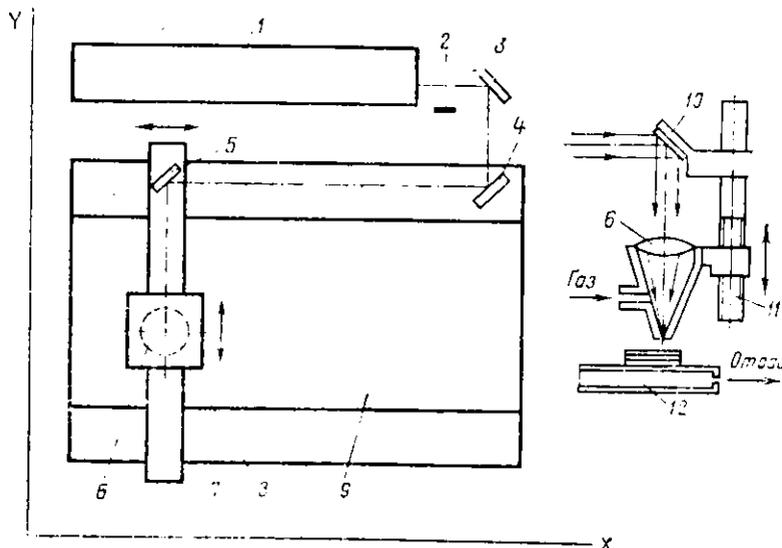


Рис. 5.5

ность излучения лазера 800 Вт, минимальный диаметр сфокусированного пятна 0,4 мм, размеры зоны резания 6×2 м, скорость резания 6–10 м/мин, потребляемая мощность от сети 30 кВт.

При раскрое рулонного материала вместо перемещения портала в некоторых конструкциях раскройных установок используется перемещение стола вдоль координаты X вместе с материалом, край которого автоматически фиксируется пневматическими захватами.

В настоящее время разрабатываются и автоматические раскройные установки, в которых используют в качестве режущего инструмента традиционные резаки. Такие установки целесообразно применять, если модели изделия сменяются относительно редко и требуется повышенная производительность. В этом случае вырубной пресс помещается в каретке раскройной установки, которая должна автоматически перемещаться и фиксироваться в определенном положении относительно материала в координатах X, Y с учетом ориентации (угла поворота) резака. При этом в одном вырубе может вырезаться до нескольких десятков изделий.

Использование того или иного вида режущего инструмента зависит от характера материала и его толщины. Нож чаще применяется для резки трикотажа и ткани (слой толщиной до 10 мм), струя воды — для резки хрупких и ломких материалов (при этом ширина реза увеличивается с глубиной и составляет 0,12–0,5 мм), лазер — для резки различных материалов толщиной до 6 мм. Благодаря отсутствию механического воздействия с помощью лазера можно раскраивать хрупкие, вязкие и мягкие материалы, такие, например, как стекло,

кварц, резина, искусственная кожа, ткани и т. п. Однако лазер неприменим для материалов, обладающих повышенным возгоранием, а также для разрезания нескольких слоев материала, который характеризуется значительным оплавлением кромки реза (происходит сплавление слоев). Скорость резания для пожа 8—16 см/с, для струи воды 2—4 см/с, максимальная скорость резания лучом лазера может достигнуть 40 см/с. Скорость резания определяется конкретными параметрами установки, качеством и толщиной материала, а также контуром резания. Наибольшая скорость обеспечивается на прямолинейных участках, наименьшая при обработке малых радиусов кривизны. В этом отношении струя воды и луч лазера имеют преимущества перед пожом.

Перед раскроем материала обычно лекала и раскладки зарисовываются в целях:

- контроля графической информации о деталях при их начальном вводе;
- контроля лекал после их технического размножения по размерам и ростам;
- контроля мини-раскладок, по которым затем раскладчик вручную производит раскладку в натуральную величину;
- контроля раскладок в натуральную величину для последующего использования в технологических целях.

Зарисовка лекал и раскладок требует разработки комплекса программных средств, ориентированных на используемую ЭВМ, и определяется возможностями технических средств, которые могут быть использованы в системе. В качестве графопостроителя для зарисовки лекал и раскладок могут применяться различные технические системы. В частности, применяется автоматическое чертёжное устройство «Дигиграф» (производство ЧССР), которое имеет сопряжение с ЕС ЭВМ (см. § 8.2) и может использоваться в автономном режиме с выводом графической информации с перфоленты. По своим техническим характеристикам это устройство отвечает требованиям автоматизации ЦРП, однако электростатический принцип прижима бумаги осложняет возможность зарисовки из рулона.

Собственно процесс резания управляется от системы числового программного управления (ЧПУ), которая строится на базе специализированного вычислителя или на основе микропроцессора (см. § 8.3). При этом необходима разработка комплекса управляющих программ. Для задания в программе раскроя взаимного расположения всех лекал в раскладке необходимо указать координаты какой-либо характерной точки каждого лекала и ориентацию его относительно координат раскладки. Резак после обхода очередной детали перемещается от характерной точки одной детали к характерной точке следующей. Организовать эти переходы можно двумя путями.

1. Траектории переходов всегда лежат вне лекал, при этом не требуется выдачи специальной команды на прекращение резания, например на перекрытие луча лазера. Однако необходимы дополнительные затраты времени, так как переходы от лекала к лекалу осуществляются не по кратчайшим путям.

2. Переходы от одной характерной точки к другой выполняются по кратчайшим траекториям, при этом требуются дополнительные команды на перекрытие и открытие луча лазера. При организации переходов возникает еще задача поиска такого оптимального варианта обхода всех лекал в раскладке, который минимизирует общее время, затрачиваемое на перемещение резака.

Характерные точки лекал также могут быть заданы двумя способами: относительно одной (начальной) точки обхода раскладки, относительно характерной точки предыдущего лекала. В первом случае можно избежать погрешностей раскроя из-за накапливающейся ошибки при задании переходов. Однако при этом необходимы последующие преобразования информации о переходах, так как для управляющих интерполяторов характерно задание переходов по второму способу.

Цифровой интерполятор является одной из основных частей автоматизированной системы раскроя, функции его состоят в преобразовании управляющей программы в собственно перемещение рабочего органа. В настоящее время используются два способа управления перемещением рабочего органа: контурное управление, когда в программе задаются точки, характеризующие контур траек-

тории, которую следует отработать; координатное управление, когда осуществляется перемещение резака от одной точки к другой при заданных координатах точек и указанном типе соединяющей их линии. Первый способ требует хранения большого объема информации, второй — несколько более сложного алгоритма управления. Для перемещения режущего инструмента необходимо обеспечить согласованное движение исполнительных органов (портала и каретки) по двум координатам. При этом информация должна поступать непрерывно в соответствии с требуемым законом движения по каждой координате. Интерполятор, обеспечивающий отработку контура по прямым и дугам окружностей, называется линейно-круговым. Находят применение также линейные, линейно-параболические и другие интерполяторы. Выпускаются различные интерполирующие устройства типа СНЗ-4М, УМН-3К, ЗИП-ЗАГ, И-22-1М, ИЛКО-3М и др. Условием лазерного раскройного комплекса наиболее полно удовлетворяет интерполятор ИЛКО-3М. Этот интерполятор позволяет осуществлять до 10^6 шагов при отработке участков контура, изменять цену шага, скорость перемещения, управлять разгоном и торможением.

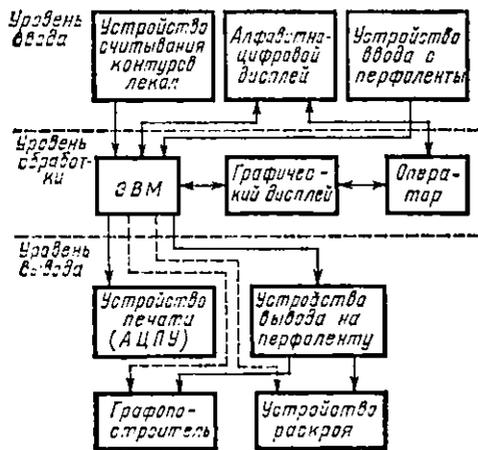


Рис. 5.6

зону резания, эвакуации готовых деталей кроя, удаления отходов и продуктов сгорания (при лазерном раскрое).

Проблемы разработки автоматизированного технологического комплекса раскроя. На рис. 5.6 представлен возможный вариант структурной схемы связи технических средств АТК раскроя рулонных и листовых материалов. На уровне ввода исходной информации кроме устройства считывания контуров лекал может применяться алфавитно-цифровой дисплей, что позволяет вводить информацию в аналитическом виде. При этом контуры лекал записываются в так называемом «карточном» формате. Под форматом понимается структура (форма) представления данных, которая определяет точное положение каждого элемента информации. Устройство ввода с перфоленты дает возможность применять на данной установке лекала изделий и раскладки, полученные на другой фабрике. Информация с этого устройства может поступать в любом формате.

В ЭВМ информация хранится в формате МГИ (массив графической информации). В графическом дисплее, на котором оператор осуществляет раскладку в режиме взаимодействия с ЭВМ, используется свой «дисплейный» формат. На уровне вывода информация также представляется в различных форматах в соответствии с типом устройства, использующего эту информацию. При этом обычно формируются два формата: для зарисовки и для раскроя.

Алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ) может использоваться для проверки входной информации или результатов ее преобразования. Возможна непосредственная передача информации от ЭВМ к графопроектору или устройству раскроя (показано пунктиром) без использования устройства вывода на перфоленту. Формат МГИ является базовым, только через него информация преобразуется в другие форматы.

Рассмотренный на содержательном уровне комплекс вопросов построения АТК раскроя позволяет проиллюстрировать те основные проблемы, которые возникают при создании АСУ ТП автоматизированного технологического комплекса. Очевидно, это получение исходной информации, в данном случае описания контуров лекал. При этом следует определить как интервал времени (или длину отрезка), через который необходимо снимать как значение функции (координаты точки контура, см. на рис. 5.2), так и допустимую погрешность измерения. Вопросы выбора интервала времени, точности представления исходной информации и ее передачи по каналам связи в общем случае рассматриваются в следующей главе.

В управляющей ЭВМ кроме вычислений по формулам вырабатываются управляющие команды, которые позволяют вести процесс по заранее заданной программе. В АТК раскроя это команды начала и окончания резания, поступательных и возвратных перемещений стола с материалом для раскроя, фиксации материала на столе, удаления готовых деталей и отходов и т. д. Совокупность взаимосвязанных во времени команд составляет алгоритм управления установкой. Методы описания алгоритмов, а также поиска оптимальных управляющих воздействий (например, оптимальных переходов резака в процессе раскроя) представлены в гл. 7, там же даны общие принципы взаимодействия основных устройств системы и особенности построения управляющих программ.

При рассмотрении АТК раскроя отмечалось, что возможна различная техническая реализация комплекса, поэтому вопросы обоснованного выбора серийных технических средств имеют большое значение. В гл. 8 дается описание этих средств с точки зрения потребностей пользователя, т. е. инженера, который не проектирует сам эти технические средства, а основываясь на их характеристиках, использует для создания АСУ ТП. Особое значение при этом имеет выбор ЭВМ соответствующей производительности, способной осуществлять связь с различными вспомогательными устройствами, которые для АТК раскроя даны на рис. 5.6. В общем случае источниками информации являются датчики сигналов, а в качестве выходных устройств используются различные исполнительные механизмы (см., например, гл. 3). Для АТК раскроя с успехом могут применяться СМ ЭВМ и микропроцессоры, которые подробно рассмотрены в § 8.2; 8.3. Для достаточно полной автоматизации необходимо ликвидировать все тяжелые ручные операции. В АТК раскроя такими операциями являются транспортировка и установ-

ка рулонов раскраиваемого материала, а также сортировка и удаление результатов кроя. Успешное решение этих задач возможно с помощью роботов-манипуляторов, которые также описаны в гл. 8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мясников В. А., Вальков В. М., Омельченко И. С. Автоматизированные и автоматические системы управления технологическими процессами. М., 1978.
2. Управляющие вычислительные машины в АСУ технологическими процессами/ Под ред. Т. Харрисона. М., 1975. Т. 1, 2.
3. Программный лазерный раскрой текстильных материалов/ Брюков А. А., Молгачев А. Р., Сафонов Л. М. и др. М., 1978.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Управление технологическими процессами должно осуществляться на основании достоверной, полной и своевременной информации. По мере усложнения технологических процессов и соответствующего оборудования объем информации в ряде производств увеличивается даже более интенсивно, чем развитие объемов самого производства или повышение его технико-экономических показателей. Однако физиологические возможности управленческого персонала (диспетчер, начальник цеха, мастер) не позволяют полностью использовать поступающую информацию, поэтому применяются упрощенные методы ее оценки, а часть информации вообще не используется. Это приводит к отклонению от предписанных режимов управления, к запаздыванию принятия решений и в конечном счете к увеличению затрат на производство или снижению качества продукции. Поэтому вопросы автоматизации получения, передачи и преобразования информации приобретают первостепенное значение.

В данной главе рассматриваются вопросы получения и передачи информации. Преобразование информации в алгоритмах управления АСУ ТП описывается в следующей главе, вопросы обработки массивов данных, получаемых от АСУ ТП для АСУП, не затрагиваются вообще.

§ 6.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Обобщенная система связи изображена схематически на рис. 6.1. Источник информации выбирает одно из совокупности возможных сообщений, подлежащее передаче. Передатчик обрабатывает сообщения определенным образом и вырабатывает сигнал в таком виде,

который может быть передан по каналу связи. Например, значение непрерывной величины кодируется числом в двоичной системе счисления и затем передается в виде последовательности единиц и нулей. Во время передачи на сигнал может налагаться помеха. Приемник преобразует принятый сигнал и восстанавливает по нему первоначальное сообщение (декодирует сигнал). Получателем может быть отдельное лицо или устройство, которое использует принятое сообщение для управления объектом.

Количество информации. Для оценки информационных каналов связи используется понятие количества информации. В теории ин-

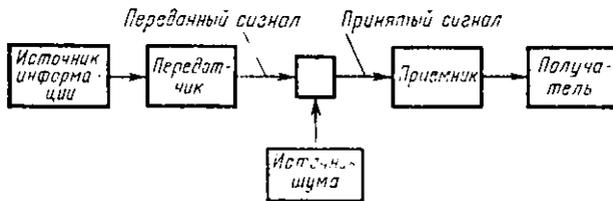


Рис. 6.1

формации количество информации определяется через понятие энтропии H — меры неопределенности состояния объекта. Если состояние объекта A характеризуется параметром y , который может принимать дискретное множество значений y_1, y_2, \dots, y_n с вероятностью каждого значения p_1, p_2, \dots, p_n ($\sum_{k=1}^n p_k = 1$), то в качестве меры неопределенности объекта используется выражение

$$H(A) = H(p_1, p_2, \dots, p_n) = - \sum_{k=1}^n p_k \log p_k, \quad (6.1)$$

где логарифм берется при произвольном основании. Если основание логарифма равно 10, то энтропия измеряется в десятичных единицах (дитах), если равно 2, то в двоичных единицах (битах), если используется натуральный логарифм ($\ln p_k$), то в нитах. Выражение энтропии $H(A)$ удовлетворяет ряду свойств. Отметим два из них:

1) $H(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0$ в том и только в том случае, когда одно из чисел p_1, p_2, \dots, p_n равно единице, а следовательно, остальные равны нулю (это означает, что состояние объекта известно заранее и сообщение о нем не дает нам никакой новой информации);

2) $H(A)$ достигает максимума, если $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1/n$, т. е. в случае наибольшей неопределенности состояния объекта.

До получения сообщения состояние объекта неизвестно, его энтропия определяется распределением вероятностей по возможным состояниям, это априорная энтропия $H_1(A)$. После получения сообщения о состоянии объекта его энтропия уменьшается и становится равной апостериорной энтропии $H_2(A)$. Если сообщение об объекте

принимается без искажений (без помех), то состояние объекта будет полностью определено, тогда $H_2(A) = 0$. В общем случае при наличии помех $H_2(A) \geq 0$.

Количество информации, содержащееся в сообщении о состоянии объекта, определяется как мера снятой неопределенности, т. е. оно равно разности априорной и апостериорной энтропий:

$$I = H_1(A) - H_2(A). \quad (6.2)$$

Очевидно, что количество информации I измеряется в тех же единицах, что и энтропия.

Скорость передачи информации. Основными характеристиками каналов связи являются скорость передачи информации и статистические характеристики ошибок (помех). Скорость передачи информации определяется с помощью понятия *количество информации*. Если передача сообщения длилась t единиц времени, то скорость передачи информации

$$R = \frac{I}{t} = \frac{1}{t} [H_1(A) - H_2(A)] = H_{1t}(A) - H_{2t}(A), \quad (6.3)$$

где $H_{1t}(A)$, $H_{2t}(A)$ — априорная и апостериорная энтропии, приходящиеся на единицу времени.

Когда рассматривается дискретный канал связи, т. е. канал, по которому передаются отдельные символы (например, двоичные или десятичные цифры), то единицей времени удобно считать время передачи одного символа t_c . Тогда $H_{1t}(A)$ и $H_{2t}(A)$ представляют собой энтропии на символ.

Пример. Пусть $p_k = 1/n$, $n = 1024$, сообщение передается двоичным кодом без искажений, при определении энтропии используется логарифм при основании 2,

время передачи $t = 10^{-1}$ с. Тогда $H_2(A) = 0$; $H_1(A) = - \sum_{k=1}^n p_k \log_2(1/n) = - \log_2(1/n) = \log_2 n = \log_2 1024 = 10$; $R = I/t = H_1(A)/t = 10/10^{-1} = 100$, т. е. скорость передачи равна 100 бит/с, причем время передачи одного символа $t_c = t/10 = 10^{-2}$ с. Если принять за единицу измерения времени $t_c = 10^{-2}$ с, то $H_{1t}(A) = R = H_1(A)/10t_c = 1$ бит/ $t_c = 1$ бит на символ, $H_{2t}(A) = 0$ бит/ $t_c = 0$ бит на символ.

Пропускная способность канала. Очевидно, что скорость передачи информации непосредственно зависит от свойств передающего и приемного устройства и косвенно от шумов в линии связи. При этом основными параметрами системы передачи информации являются полоса пропускания канала связи и отношение мощности полезного сигнала к шуму. Потенциальные возможности канала связи естественно оценить максимально возможной скоростью передачи информации, которая называется пропускной способностью канала C , т. е.

$$C = \max R = \max [H_{1t}(A) - H_{2t}(A)] \quad (6.4)$$

Рассматривая пропускную способность каналов связи с шумом, необходимо подчеркнуть, что при этом имеется в виду передача информации без существенных искажений, т. е. при сколь угодно ма-

лой вероятности ошибок. На первый взгляд такое условие может показаться невыполнимым, так как при наличии шумов сигнал на приемном устройстве всегда отличается от сигнала на передающем устройстве. Например, мы можем уменьшить ошибки введенном избыточности информации путем многократного повторения одних и тех же сообщений. При этом из интуитивных соображений можно прийти к выводу, что с уменьшением вероятности ошибок избыточность должна неограниченно возрастать, следовательно, скорость передачи будет стремиться к нулю. Однако существуют такие способы введения избыточности, которые обеспечивают одновременно и сколь угодно малую вероятность ошибок и конечную (отличную от нуля) скорость передачи информации.

Предположим, что помеха в системе есть белый шум со средней мощностью N . Эта помеха, добавляясь к переданному сигналу, искажает принятый сигнал. Если полоса пропускания канала связи равна B , Гц, отношение мощности сигнала к мощности шума равно S/N , то при сколь угодно малой вероятности ошибок можно приблизиться к скорости (в бит/с) передачи информации

$$C_1 = B \log_2(1 + S/N). \quad (6.5)$$

Таким образом, C_1 является теоретическим пределом скорости передачи. Никакой метод кодирования не допускает передачи с большей скоростью, чем C_1 . В обычных каналах связи $S/N = (20 \div 30)$ дБ, при этом теоретический предел скорости передачи информации

$$C_1 = B \log_2(1 + S/N) = (4,4 \div 5) B. \quad (6.6)$$

Следовательно, для таких каналов связи теоретический предел скорости передачи информации при сколь угодно малой вероятности ошибок примерно равен 5 бит/с на 1 Гц полосы частот канала.

При отношении сигнал/шум 20—30 дБ теоретическая пропускная способность телеграфного канала составляет примерно 900—1200 бит/с, телефонного — 20—30 тыс. бит/с, телевизионного — 30—50 млн. бит/с [2]. Однако действительная пропускная способность даже в наилучших реальных системах передачи информации значительно меньше теоретической и не превышает 1—2 бит/с на 1 Гц полосы частот канала. В большинстве систем передача осуществляется со скоростью 0,5—0,8 бит/с на 1 Гц полосы, при этом частота ошибок не является сколь угодно малой величиной, а обычно превышает одну ошибку на 10^5 переданных двоичных символов. Повышение скорости передачи связано с увеличением сложности и стоимости аппаратуры передачи и приема информации. Реальными скоростями передачи цифровой информации на ближайшее время можно считать скорости до 100 бит/с для телеграфных каналов, до 3000 бит/с для телефонных и несколько миллионов бит/с для телевизионных каналов. Такое большое отличие объясняется тем, что в реальных системах возникают искажения, не связанные со случайными помехами, например из-за неравномерности амплитудно-час-

тотных и фазочастотных характеристик. Другая причина — неоптимальность использования сигналов по отношению к шумам в реальных системах. Наряду с белым гауссовым шумом в большинстве каналов имеют место скачки уровня принимаемого сигнала, импульсные и другие помехи. Для достижения максимальной пропускной способности необходимо, чтобы форма сигнала соответствовала помехам.

При проектировании АСУ ТП наибольший интерес представляет безошибочная передача числовой информации, поэтому в следующем параграфе рассмотрены вопросы помехоустойчивого кодирования, которое позволяет понизить вероятность ошибок при сохранении высокой скорости передачи. Для улучшения реальной пропускной способности каналов разрабатываются и другие методы, например построение систем передачи с обратной связью с приемной стороны на передающую.

Количественные оценки информационных каналов связи. Выше показано, что основными взаимосвязанными характеристиками системы связи являются пропускная способность и малая вероятность ошибок передачи информации (или помехоустойчивость). Также показано, что требования увеличения скорости передачи и уменьшения ошибок передачи противоречивы. При проектировании конкретных систем и их сравнении желательно иметь более полные количественные оценки помехоустойчивости, чем вероятность ошибки передачи одного символа. Рассмотрим такую оценку для системы с некоторой фиксированной скоростью передачи и фиксированной длиной сигнала (сообщения), т. е. для дискретной системы. Эти системы характерны тем, что все возможные сигналы конечной длительности образуют дискретное конечное множество.

Пусть общее число возможных сигналов равно n . Действие помех сводится к тому, что некоторые символы в сигнале подменяются другими, в результате чего вместо i -го переданного сигнала принимается другой j -й сигнал. В этом случае помехоустойчивость системы наиболее полно может быть охарактеризована набором вероятностей p_{ij} того, что при передаче i -го сигнала будет принят j -й ($i, j = 1, 2, \dots, n$). В результате мы имеем так называемую «стохастическую матрицу трансформации сообщений» $\{P_{ij}\}$. Сравнение систем по таким матрицам затруднительно, поэтому используют более простую оценку, которая выражает помехоустойчивость одним числом. Эта оценка дает среднюю вероятность ошибочного приема $P_{\text{ош.ср}}$ и определяется выражением

$$P_{\text{ош.ср}} = \sum_{i=1}^n p_i (1 - P_{ii}), \quad (6.7)$$

где p_i — вероятность передачи i -го сигнала.

Если p_i и вероятность безошибочной передачи i -го сигнала P_{ii} не могут быть подсчитаны аналитически, то эти параметры должны быть определены статистически, т. е. путем обработки результатов многократной передачи различных сообщений (сигналов).

Для непрерывных систем действие шумов сводится к тому, что вместо отправленного сигнала $x(t)$ принимается другая функция времени $y(t)$. Чем ближе $y(t)$ к $x(t)$ при заданном шуме, тем выше помехоустойчивость системы. Для количественной оценки помехоустойчивости вводится мера различия функций $x(t)$ и $y(t)$. В качестве меры различия может быть принят средний квадрат разности этих функций

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - y(t)]^2 dt \quad (6.8)$$

или среднее значение абсолютной ошибки,

$$M_2 = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t) - y(t)| dt, \quad (6.9)$$

где T — время передачи сигнала.

Система может считаться помехоустойчивой, если «расстояние» между $x(t)$ и $y(t)$, определяемое выражением (6.8) или (6.9), меньше некоторой наперед заданной величины.

Для более полной характеристики информационной системы иногда пользуются некоторыми дополнительными параметрами систем. К таким параметрам относятся коэффициент использования η , коэффициент передачи информации μ , отношение мощности сигнала к мощности шума S/N , задержка передачи τ .

Коэффициент использования определяется отношением скорости передачи к пропускной способности

$$\eta = R/C. \quad (6.10)$$

С помощью коэффициента передачи информации оценивается полнота передачи информации, создаваемой источником информации. Если обозначить через H энтропию источника за единицу времени, т. е. скорость создания информации, то коэффициент передачи может быть оценен отношением

$$\mu = R/H. \quad (6.11)$$

Очевидно, что коэффициент μ можно рассматривать только при $H < C$.

Описание достоинств одних систем относительно других требует конкретизации условий, в которых сравниваются системы, в частности это сравнение должно учитывать отношение сигнала к шуму. Ранее уже использовалось понятие отношения мощности сигнала к мощности белого шума. В общем случае может рассматриваться мощность шума (помехи) любого вида, которую также обозначим через N . При этом отношение S/N характеризует условия работы систем; чем оно больше, тем в более «легких» условиях находится канал связи.

Задержкой передачи называется интервал времени между началом передачи, т. е. моментом поступления сигнала на передатчик (кодирующее устройство, см. рис. 6.1) и моментом окончания приема, т. е. моментом прекращения сигнала на выходе приемника (декодирующего устройства). Задержка складывается из нескольких слагаемых

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4, \quad (6.12)$$

где τ_1 — время кодирования, в течение которого кодирующее устройство вводит необходимую избыточность для передачи сигнала по каналу с шумами; τ_2 — время передачи, т. е. длительность передаваемого сигнала; τ_3 — время распространения сигнала по каналу связи; τ_4 — время декодирования принятого сигнала декодирующим устройством.

Остановимся еще на вопросе надежности системы. Стремление повысить скорость передачи и одновременно повысить помехоустойчивость приводит к необходимости усложнения структуры информационной системы. Современные сложные системы содержат многие сотни и тысячи деталей, и если даже срок службы каждой детали достаточно велик, то при увеличении сложности системы средняя частота отказов возрастает, и это может служить причиной предпочтения менее совершенной, но более надежной системы перед системой более совершенной и сложной. Таким образом, проблема надежности из чисто технической превращается в принципиальную проблему выбора структуры информационной системы.

Рассмотренные характеристики систем связи непосредственно связаны с помехоустойчивостью. Одним из путей повышения помехоустойчивости является введение избыточности в передаваемую информацию. Наиболее распространенным нетривиальным методом введения избыточности (тривиальным можно считать повторную передачу сообщений) служит помехоустойчивое кодирование сообщений, которое рассматривается ниже.

§ 6.2. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Задача построения кода из условия минимума вероятности ошибок. В подавляющем большинстве современных информационных систем используется двоичная система счисления, поэтому наибольший интерес представляет рассмотрение процессов передачи двоичных символов. Информация обычно передается с помощью сообщений (слов), содержащих постоянное количество символов (разрядов), обозначим их число через k . Каждое информационное сообщение будет иметь вид $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, где $x_v = 0, 1$; $v = 1, 2, \dots, k$.

На выходе приемника информации получим слово $y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$, которое в общем случае не совпадает с x вследствие ошибок при передаче. Полагаем, что символы y_i также принимают только два значения: 0 и 1. Обозначим через $p(y/x)$ — вероятность получения слова y при условии, что передавалось слово x . Для $p(y/x)$ должно выполняться условие

$$\sum_y p(y/x) = 1. \quad (6.13)$$

Это означает обязательный переход слова x при передаче по каналу в одно из слов y , которое принадлежит к тому же множеству возможных слов, что и слово x . Если искажения отдельных символов в слове x независимы, то такой канал передачи называется *каналом без памяти*, для него справедлива теорема умножения вероятностей, т. е.

$$p(y/x) = p(y_1/x_1) p(y_2/x_2) \dots p(y_k/x_k). \quad (6.14)$$

Обозначим вероятность правильной передачи символа 0 через p_0 , символа 1 через p_1 , соответственно вероятности ошибочных передач через q_0 и q_1 , в таком случае матрица перехода для отдельных символов имеет вид

$$\begin{array}{c|cc} & 0 & 1 \\ \hline 0 & p_0 & q_0 \\ 1 & q_1 & p_1 \end{array}$$

Если $p_0 = p_1 = p$, то канал называется *двоичным симметричным каналом*, при $p_0 \neq p_1$ имеем *асимметричный двоичный канал*. Так как символы могут принимать только два значения 0 или 1, то очевидно, что $p_0 + q_0 = 1$; $p_1 + q_1 = 1$.

Для симметричного двоичного канала выражение (6.14) принимает вид

$$p(y/x) = q^{r(x,y)} p^{k-r(x,y)}, \quad (6.15)$$

где $r(x, y)$ — число несовпадающих символов, стоящих в словах x и y на одинаковых местах (иначе: число несовпадающих разрядов слов x и y).

Число $\rho(x, y)$ называется *расстоянием Хэмминга* и определяется выражением

$$\rho(x, y) = \sum_{v=1}^k |x_v - y_v|. \quad (6.16)$$

Таким образом, значение $\rho(x, y)$ непосредственно определяет вероятность перехода $p(y/x)$.

Заметим, что для всех y с $\rho(x, y) = m$ вероятность перехода будет одинаковой и равной

$$p(y/x) = q^m p^{k-m}. \quad (6.17)$$

Число таких y для фиксированного m равно числу сочетаний из k по m , т. е. C_k^m , следовательно,

$$\sum_y p(y/x) = \sum_{m=0}^k C_k^m q^m p^{k-m} = (q + p)^k = 1, \quad (6.18)$$

что подтверждает справедливость выражения (6.13) для двоичного симметричного канала.

Поскольку для реальных каналов связи вероятность ошибочной передачи символа q должна быть близка к нулю, а вероятность правильной передачи p — близка к 1, то из выражений (6.15) и (6.17) следует, что вероятность ошибочной передачи будет уменьшаться с увеличением расстояния Хэмминга.

Линейные групповые коды. Задача построения кода из условия минимума вероятности ошибки после декодирования принятого слова оказалась в общем случае чрезвычайно трудной и до настоящего времени не решена, поэтому с целью поиска конструктивных методов построения помехоустойчивых кодов вводится понятие минимального кодового расстояния ρ , которое связано с расстоянием Хэмминга выражением

$$\rho = \min_{i \neq j} \rho(x_i, x_j), \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (6.19)$$

где для двоичной системы $n \leq 2^k$ — общее число возможных слов.

Минимум берется по множеству всевозможных пар различных слов. Очевидно, что чем больше ρ , тем меньше вероятность искажения сообщений. Однако, как будет показано в дальнейшем, увеличение ρ требует увеличения избыточности, т. е. увеличения числа символов (разрядов) в слове.

При построении помехоустойчивых кодов, вообще говоря, ставятся две задачи: обнаружение ошибок и их исправление. Для обнаружения любых r или менее ошибок необходимо, чтобы минимальное кодовое расстояние удовлетворяло неравенству

$$\rho \geq r + 1. \quad (6.20)$$

Например, код с $\rho = 2$ обнаруживает все одиночные ошибки, возникшие при передаче информации. Проиллюстрируем это простым примером.

Пусть $k=2$, т. е. должны передаваться любые двухразрядные слова. Множество таких слов состоит из четырех слов: 00; 01; 10; 11. Для такого кода $\rho=1$ и любая единичная ошибка неразличима, поскольку она приводит к другому возможному слову. Введем теперь третий избыточный разряд и перекодировем двухразрядные слова в трехразрядные таким образом, чтобы все слова отличались друг от друга как минимум двумя разрядами ($\rho=2$): 00,1; 01,0; 10,0; 11,1 (запятой отделен избыточный разряд). Если теперь передать любое из этих слов и предположить, что один из его разрядов искажился то это сразу будет обнаружено при декодировании, так как после любого одиночного искажения образуется слово, которого нет в исходном множестве слов, т. е. образуется «запрещенное» слово.

Для исправления любой ошибки кратности r или менее должно выполняться неравенство

$$\rho \geq 2r + 1. \quad (6.21)$$

Для построения кодов, исправляющих r ошибок, используется так называемая *проверочная*, или *контрольная, матрица* U , которая имеет вид

$$U = \left[\begin{array}{cccc|cccc} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{k1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{k2} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ a_{1s} & a_{2s} & \dots & a_{ks} & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right] = [A, S]. \quad (6.22)$$

Подматрица A соответствует информационным разрядам, подматрица S — контрольным. Таким образом, матрица U определяет код, в котором содержится k информационных разрядов и s контрольных (избыточных) разрядов. Код слова x имеет вид $x = (x_k, x_{k-1}, \dots, x_1, c_s, c_{s-1}, \dots, c_1)$.

При этом первые k символов слова выбираются произвольно (информационные разряды), а остальные s символов (контрольные разряды) определяются первыми k символами в соответствии с выражением

$$c_l = \sum_{v=1}^k x_v a_{vl}, \quad l=1, 2, \dots, s, \quad (6.23)$$

где суммирование осуществляется по модулю 2 ($0+1=1$; $0+0=0$; $1+1=0$).

Таким образом, матрица U определяет правила кодирования контрольных разрядов. Позиции единиц в v -м столбце подматрицы ($a_{vl}=1$) показывают, в каких контрольных соотношениях типа (6.23) участвует v -й информационный разряд, т. е. значения каких контрольных разрядов зависят от значения v -го информационного разряда. Позиция единиц в i -й строке ($i=1, 2, \dots, s$) подматрицы A показывает, какие разряды включаются в i -ю сумму по модулю 2, значение которой приписывается i -му контрольному разряду.

Пусть, например, контрольная матрица имеет вид

$$U = \left[\begin{array}{cccc|cccc} & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & \end{array} \right]. \quad (6.24)$$

Здесь $k=4$; $s=3$. Закодируем с помощью этой матрицы число 1011. Условимся считать информационных и контрольных разрядов вести справа налево. Из первой строки матрицы U и формулы (6.23) следует, что значение третьего контрольного разряда равно сумме по модулю 2 значений первого, третьего и четвертого информационных разрядов. Получаем $c_3=1+0+1=0$. Для второго контрольного разряда $c_2=1+1+1=1$, для первого — $c_1=1+1+0=0$. Таким образом, код числа 1011 будет состоять из семи разрядов и иметь вид 1011.010.

Если при передаче слова возникает ошибка, то не будет выполняться условие (6.23) для тех строк ($l=1, 2, \dots, s$), в которые входит значение ошибочного разряда. При декодировании проверяют все s условий (6.23). Тем строкам, для которых условие (6.23) выполняется, приписывают значение $e_l=0$, тем, для которых не выполняется, — $e_l=1$. В результате получают набор символов $e = (e_s, e_{s-1}, \dots, e_1)$. Слово e называется *корректором ошибки или синдромом*, с его помощью можно обнаружить и исправить ошибку. Очевидно, ненулевая величина корректора свидетельствует о наличии ошибки. Для исправления различных ошибок необходимо, чтобы различным ошибкам соответствовало различное значение корректора. Ниже при рассмотрении кода Хэмминга рассмотрен пример использования корректора.

Коды, определяемые матрицей вида U , называются *линейными групповыми кодами*. Ранее ошибки передачи мы связали с понятием минимального кодового расстояния ρ , которое определяет возможность исправления r ошибок (6.21). Установим связь ρ со свойствами линейных кодов. Можно доказать, что линейный код имеет минимальное кодовое расстояние ρ в том случае, если любые $\rho-1$ столбцы проверочной матрицы U линейно независимы. Столбцы матрицы U $u_1, u_2, \dots, u_{\rho-1}$ линейно зависимы, если выполняется условие

$$\sum_{i=1}^{\rho-1} \alpha_i u_i = 0, \quad (6.25)$$

где все α_i — скалярные величины.

Суммирование проводится по модулю 2 для каждого элемента столбцов. Если же равенство (6.25) возможно только в том случае, когда все $\alpha_i=0$, то совокупность векторов называется линейно независимой. Для двоичных кодов α_i может принимать только два значения 0 и 1, поэтому условие (6.25) означает, что ни один из столбцов u_i не может быть получен суммированием каких-либо других столбцов. Например, 7-й и 6-й столбцы матрицы (6.24) линейно независимы, также независимыми будут 4, 3 и 2-й столбцы, так как ни один из них нельзя получить как сумму других. Однако 7, 6 и 5-й столбцы линейно зависимы, также зависимы 4, 3, 2 и 1-й столбцы. Очевидно, что для матрицы U не будет выполняться условие независимости любых столбцов, если хотя бы один ее столбец содержит только нулевые элементы. Таким образом, контрольная матрица не должна содержать нулевых столбцов.

Код Хэмминга. На основе рассмотренных принципов построения проверочной матрицы U разрабатываются конкретные помехо-

устойчивые линейные коды, например: код Хэмминга, низкоплотный код, код Рида — Маллера и др. Рассмотрим наиболее простой код — код Хэмминга, который позволяет обнаруживать две ошибки и исправлять одну ошибку [см. (6.20) и (6.21)], т. е. для этого кода минимальное кодовое расстояние $\rho=3$.

Для кода Хэмминга в проверочной матрице U все столбцы выбираются разными, т. е. $\rho-1 \geq 2$, следовательно, $\rho \geq 3$, однако не ставится условие; чтобы любые три столбца были линейно независимы, поэтому в матрице U возможно наличие трех столбцов, которые в сумме по модулю 2 дают нулевой столбец, т. е. они линейно зависимы. Таким образом, матрица U с разными столбцами обеспечивает нам равенство $\rho=3$. Чтобы получить матрицу U с разными столбцами, возьмем, например, различные четырехразрядные двоичные числа, исключая число ноль:

$$U = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Выделим в этой матрице подматрицу S (см. 6.22), для чего произведем перестановку столбцов

$$U = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{10} & x_9 & x_8 & x_7 & x_6 & x_5 & x_4 & x_3 & x_2 & x_1 & c_4 & c_3 & c_2 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = [A, S] \quad (6.26)$$

Полученная матрица соответствует коду Хэмминга $(k+s, k) = (15, 11)$, общее количество разрядов кода равно 15, из них 11 информационных и 4 разряда контрольных. С помощью этой матрицы вычисляются значения контрольных разрядов кодируемого числа:

$$\begin{aligned} c_4 &= x_7 + x_6 + x_5 + x_4 + x_3 + x_2 + x_1; \\ c_3 &= x_{10} + x_9 + x_8 + x_4 + x_3 + x_2 + x_1; \\ c_2 &= x_{11} + x_9 + x_8 + x_6 + x_5 + x_2 + x_1; \\ c_1 &= x_{11} + x_{10} + x_8 + x_7 + x_5 + x_3 + x_1. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Если при передаче закодированного слова возникнет одиночная ошибка, то окажутся невыполненными те контрольные соотношения (уравнения для c_i), в которые входит значение ошибочного разряда. Например, если ошибка возникла в первом информационном разряде, то невыполненными окажутся все четыре уравнения (6.27), корректор $e = (e_4, e_3, e_2, e_1) = 1111$; если в пятом разряде, то не выполняются уравнения для c_4, c_2 и c_1 , корректор $e = (e_4, e_3, e_2, e_1) = 1011$. В первом случае корректор совпадает со столбцом U , соот-

ветствующим x_1 , во втором — со столбцом, соответствующим x_5 . Получаем следующее правило исправления ошибки: местоположение столбца матрицы U , совпадающего с вычисленным корректором e , указывает ошибочный разряд, в котором заменяется символ. Поскольку в двоичном коде всего два символа (0 или 1), то никаких дополнительных данных для исправления ошибки не требуется.

Пример. Пусть требуется передать число $x=0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1$. Вычисляем контрольные разряды:

$$c_4 = 1 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 = 0;$$

$$c_3 = 0 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 = 0;$$

$$c_2 = 0 + 1 + 0 + 1 + 1 + 0 + 0 + 1 = 0;$$

$$c_1 = 0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 0 + 0 + 1 = 1.$$

Закодированное число

$$x = 00101110001\ 0001.$$

Допустим при передаче произошла ошибка в восьмом информационном разряде и мы приняли число

$$x = 00111110001\ 0001.$$

Вычисляем c_i после приема:

$$c_4 = 1 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 = 0;$$

$$c_3 = 0 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 = 1;$$

$$c_2 = 0 + 1 + 1 + 1 + 1 + 0 + 0 + 1 = 1;$$

$$c_1 = 0 + 0 + 1 + 1 + 1 + 0 + 0 + 1 = 0.$$

Получили несовпадение третьего, второго и первого контрольных разрядов, следовательно, значение корректора $e = (e_4, e_3, e_2, e_1) = 0111$. Данное значение совпадает со столбцом матрицы U , который соответствует восьмому информационному разряду. Заменяв в этом разряде 1 на 0, получаем правильное исходное число.

Очевидно, что вычисленное значение корректора обязательно совпадает с одним из столбцов матрицы, так как в качестве столбцов выбраны все возможные четырехразрядные двоичные числа. Если ошибка возникает в контрольном разряде, то корректор будет содержать одну единицу, положение которой укажет на место ошибки.

В общем случае код Хэмминга имеет длину $k+s=2^s-1$ разрядов, из которых $k=2^s-1-s$ являются информационными. Ниже приведены параметры некоторых кодов Хэмминга. Отношение $k/(k+s)$ называется *нормой кода или избыточностью*.

Число контрольных разрядов s	3	4	5	6
Число информационных разрядов k	4	11	26	57
Избыточность $k/(k+s)$	0,57	0,73	0,84	0,9

Выше были упомянуты низкоплотностные коды и коды Рида — Маллера. Низкоплотностные коды описываются проверочной матрицей U , содержащей преимущественно нули и сравнительно небольшое число единиц (малая плотность

единиц). Тем самым уменьшается количество символов в контрольных соотношениях вида (6.27) и упрощается операция декодирования. Коды Рида — Маллера позволяют исправлять несколько независимых ошибок, но требуют более сложных методов декодирования.

При проектировании каналов связи в АСУ ТП следует обосновывать выбор метода кодирования с учетом сложности аппаратуры и требований к достоверности передачи информации. Эти вопросы непосредственно связаны с надежностью работы системы, что имеет особенно большое значение при переходе от отдельных локальных схем автоматизации к автоматизированной системе управления технологическими процессами.

§ 6.3. УСЛОВИЕ ТОЧНОГО ОПИСАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СИГНАЛА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ДИСКРЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Выше были рассмотрены вопросы, связанные с передачей информации, которые следует учитывать при проектировании передатчика, кодирующего сообщения, и приемника, декодирующего, т. е. восстанавливающего первоначальное сообщение. Рассмотрим теперь порождение (генерацию) исходной информации, подлежащей передаче, т. е. вопросы, связанные с работой источника информации (рис. 6.1). При проектировании дискретного канала связи для передачи числовой информации, используемой в ЭВМ АСУ ТП, теоретического обоснования требует выбор периода времени (периода дискретности) T_d , через который снимаются показания датчиков технологического процесса. Очевидно, что если T_d относительно велико, то не все существенные изменения измеряемой переменной будут фиксироваться, следовательно, произойдет потеря информации и ухудшится качество управления. При необоснованно частом съеме данных (T_d мало) возрастает избыточность, требуется увеличивать скорость передачи информации.

В § 2.3 уже рассматривался вопрос выбор шага дискретности регистрации сигналов (Δt), однако там эта задача решалась с целью обеспечить условие независимости значений сигнала, что необходимо для обоснованного построения математической модели процесса. Здесь же обосновывается выбор T_d исходя из требований управления в предположении, что модель процесса известна. Таким образом, по форме Δt и T_d тождественны. Это интервал времени, через который снимаются показания датчика, а обоснования к их определению различны.

Оценим вначале минимальное значение T_d , основываясь только на условии сохранения информации, заложенной в исходном непрерывном процессе. Наиболее полной математической моделью сигнала является случайный процесс, а именно непрерывный случайный процесс. Как известно, случайный процесс определяется как такая функция времени $x(t)$, значение которой в каждый данный момент времени является случайной величиной. Рассмотрим случайный процесс с ограниченным спектром $S(\omega)$. Речь идет о сигнале, частотный спектр которого находится в интервале $(0, F)$. Это значит, что сигнал не содержит гармонических составляющих с

частотой выше, чем F . Для таких сигналов В. А. Котельников доказал следующую теорему:

любая реализация случайного процесса $x(t)$ со спектром, находящимся в интервале $(0, F)$, полностью определяется последовательностью ее значений в точках, отстоящих на время $T_d = 1/(2F)$ секунд друг от друга.

На рис. 6.2 показана геометрическая интерпретация этой теоремы, где спектр $S(\omega)$ представлен как функция круговой частоты

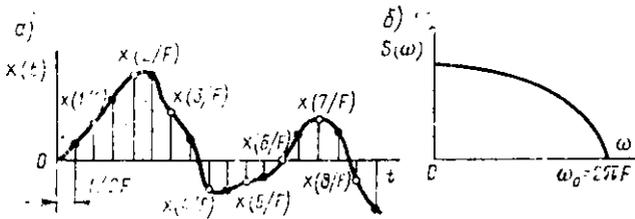


Рис. 6.2

ω_0 , при этом граничная частота $\omega_0 = 2\pi F$ (рис. 6.2, б). Можно показать, что

$$S(\omega) = \frac{1}{2F} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x\left(\frac{k}{2F}\right) e^{jk\omega/(2F)}. \quad (6.28)$$

Таким образом, спектр непрерывного случайного процесса $S(\omega)$, который однозначно определяет случайный процесс $x(t)$, оказывается выраженным через дискретные значения этого процесса $x[k/(2F)]$. Это равносильно утверждению, что исходная функция полностью описывается своими значениями в дискретных точках. Однако нетрудно найти формулу непосредственной связи $x(t)$ с $x[k/(2F)]$, т. е. установить, каким же образом по множеству отсчетов, взятых через интервал $1/(2F)$ (рис. 6.2, а), можно построить промежуточные значения функций $x(t)$. Соответствующее выражение имеет вид

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x\left(\frac{k}{2F}\right) \frac{\sin(2\pi Ft - \pi k)}{2\pi Ft - \pi k}. \quad (6.29)$$

При $t = k_1/(2F)$, как следует из смысла выражения (6.29) (см. также рис. 6.2, а), $x(t)$ должно равняться $x[k_1/(2F)]$, т. е. все функции вида $\sin z/z$ должны равняться нулю, кроме одной, которая равна 1. Действительно, имеем

$$\begin{aligned} \frac{\sin [2\pi F k_1/(2F) - \pi k]}{2\pi F k_1/(2F) - \pi k} \Big|_{k=k_1} &= 1; \\ \frac{\sin [2\pi F k_1/(2F) - \pi k]}{2\pi F k_1/(2F) - \pi k} \Big|_{k \neq k_1} &= \frac{\sin \pi (k_1 - k)}{k_1 - k} \Big|_{k \neq k_1} = 0 \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили разложение реализации случайной функции $x(t)$. Координатными функциями этого разложения

являются функции вида $\sin z/z$, коэффициентами разложения служат значения самой реализации, отстоящие друг от друга на $1/(2F)$ секунд. Из данной теоремы следует, что если брать отсчеты чаще, чем через $1/(2F)$ секунд, то мы не получим дополнительной информации о процессе, но увеличим ее избыточность. Однако следует

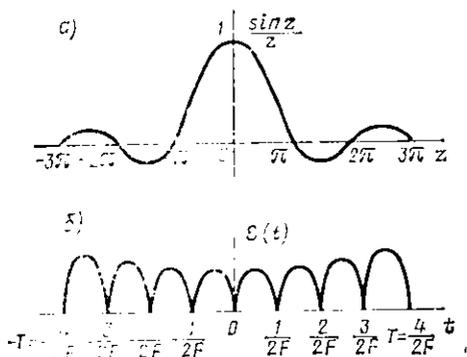


Рис. 6.3

отметить, что (6.29), являясь интерполяционной формулой, позволяет определить значение функции внутри интервала дискретности лишь для определенных идеализированных условий: ограниченность спектра и бесконечное время наблюдения. Восстановление реального непрерывного процесса $x(t)$ с неограниченным спектром $S(\omega)$ по значениям отсчетов $x[k/(2F)]$ за конечное время наблюдения может выполняться лишь с определенной интерполяционной погрешностью как при

использовании выражения (6.29), так и любой другой интерполяционной формулы, причем значение интерполяционной погрешности зависит от вида функции $x(t)$, метода интерполяции и величины интервала опроса T_d .

Поскольку отсчеты функции $x(t)$ следуют через интервал $1/(2F)$ секунд, то их число на протяжении отрезка времени T равно $n = 2FT$, однако значения отсчетов функции вне интервала T тоже дают вклад в значения $x(t)$ на интервале T . Это следует из характера координатной функции вида $(\sin z)/z$, значения которой теоретически не ограничены на оси аргумента z (см. рис. 6.3, а). Можно оценить величину соответствующей погрешности представления отрезка функции $x(t)$ длительностью $[-T, T]$ конечным числом членов ряда Котельникова, т. е. только теми членами, моменты отсчета которых приходятся на интервал $[-T, T]$. Эта погрешность оценивается формулой

$$\left| x(t) - \sum_{k=-n}^n x\left(\frac{k}{2F}\right) \frac{\sin(2\pi Ft - \pi k)}{2\pi Ft - \pi k} \right| \ll \varepsilon(t) \cdot E,$$

где $E = \int_{-F}^F S(\omega) d\omega$ — полная энергия, которую несет функция $x(t)$; коэффициент $\varepsilon(t)$ ведет себя, как показано на рис. 6.3, б. Ошибка равна нулю в точках отсчета, имеет максимум между точками отсчета, величина этих максимумов возрастает по мере приближения к границам интервала. Поэтому утверждение, будто отрезок функции длительностью T при ограниченном спектре этой функции полностью характеризуется $2FT$ отсчетами, является неточным. Таким образом, с одной стороны отсчеты следует брать через $1/(2F)$

секунд, а с другой стороны $2FT$ отсчетов не позволяют полностью восстановить значение $x(t)$. Предположение о равенстве нулю функции $x(t)$ вне интервала T не спасает положения, так как при этом предположении спектр $S(\omega)$ становится неограниченным, что нарушает одно из основных условий теоремы Котельникова.

Следовательно, эта теорема не дает достаточно строгого инженерного метода выбора интервала отсчета T_d . Она только подсказывает разумный подход к сохранению информации сигнала при его дискретной передаче, а именно, когда хотя бы приближенно известна ширина спектра, существенно отличного от нуля, с его помощью можно ориентировочно оценить разумное значение T_d .

Рассмотрим метод выбора периода опроса датчика T_d , который может быть использован, если не известен спектр сигнала $x(t)$. Измерение любой технологической переменной осуществляется с некоторой погрешностью. Если абсолютная погрешность измерения равна $\pm\Delta$, то величина разрешающей способности прибора Δx определяется условием $\Delta x = |+\Delta| + |-\Delta| = 2\Delta$.

Величина Δx должна равняться единице измерения на шкале прибора. Очевидно, период опроса T_d следует выбирать из условия, что за время T_d переменная x изменится не более чем на Δx . В этом случае не будет происходить дополнительной потери информации из-за влияния T_d .

В некоторых конкретных случаях удается оценить максимально возможную скорость изменения измеряемой переменной x . Обозначим ее x'_{\max} , и если известен диапазон изменения переменной, равный разности максимально и минимально возможных значений $x_d = x_{\max} - x_{\min}$, то, полагая скорость x'_{\max} постоянной на всем диапазоне изменения x , можно ввести следующую оценку: $x'_{\max} = x_d / T_m$, где T_m — оценка минимально возможного времени изменения x от x_{\min} до x_{\max} . Тогда наименьший интервал времени T_d , допустимый в процессе измерения переменной, будет равен

$$T_d = \Delta x / x'_{\max} = 2\Delta T_m / x_d.$$

Очевидно, что оценка периода опроса датчика T_d по полученному выражению непосредственно связана с выбором T_d на основании теоремы Котельникова, так как x'_{\max} зависит от ширины спектра $S(\omega)$. Чем шире спектр (больше значение $\omega_0 = 2\pi F$), тем более высокочастотные гармонические составляющие содержит сигнал x , следовательно, тем больше может быть скорость его изменения.

§ 6.4. ВЫБОР ПЕРИОДА ОПРОСА ДАТЧИКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБЩЕЙ ЗАДАННОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Исходную информацию о контролируемых переменных технологического процесса собирают с помощью опрашивающих устройств — датчиков информации. В реальной системе управления ин-

формация может собираться от десятков и сотен датчиков, а к каждой измеряемой переменной предъявляются разные требования относительно точности ее определения и, следовательно, относительно периода ее замера. Поэтому при оценке периода работы коммутаторов, поочередно подключающих датчики к ЭВМ АСУ ТП, должны учитываться характеристики всей совокупности измеряемых переменных. Целесообразно разделение периодически опрашиваемых датчиков на несколько групп, в каждую из которых входят датчики с близкими диапазонами возможных периодов опроса. При этом можно выбрать одно значение периода опроса для целой группы датчиков, что значительно упрощает организацию сбора информации. Для циклического метода опроса датчиков количество точек контроля N с помощью одного коммутатора определяется значением $N = T_d/t_0$, где T_d — интервал времени, определяющий цикл коммутатора, или период опроса; t_0 — длительность шага коммутатора.

Рассмотрим удобный для практики, хотя и не достаточно строго обоснованный, метод выбора периода опроса T_d , который использует среднеквадратическую погрешность измерений и, кроме того, позволяет выбрать T_d исходя из заданной требуемой точности определения измеряемой величины.

Переменные технологического процесса (температура, давление, концентрация определенных веществ в растворе и т. п.) обычно требуются поддерживать на определенном уровне (стабилизация) или изменять по заранее заданной программе (жесткое программное управление), или изменять в зависимости от изменений параметров сырья или внешних условий (управление по возмущениям). При этом отклонения контролируемых переменных $x(t)$ не должны отличаться от требуемых значений $x_0(t)$ более, чем на величину $|\Delta x(t)| = |x_0(t) - x(t)|$.

Таким образом, обычно контролируется максимальное отклонение от режима. Однако методы расчета систем по максимально допустимым отклонениям разработаны только для отдельных частных случаев, поэтому в основном пользуются методами определения среднеквадратических отклонений $\sigma_{\Delta x}$. Если допустимо предположение, что значения случайной функции $\Delta x(t)$ распределены по нормальному закону, то с вероятностью, близкой к единице (0,997), можно принять, что

$$|\Delta x(t)_{\max}| \leq 3\sigma_{\Delta x}$$

(это так называемое «правило трех сигм»). Следовательно, по заданному значению $\Delta x(t)_{\max}$ определяется $\sigma_{\Delta x}$, на основании чего могут быть найдены значения параметра квантования сигнала по времени (периода опроса датчиков) T_d .

Пусть требуемая точность определения переменной x задана в виде максимально допустимой среднеквадратической погрешности $\sigma_{\Delta x \max}$, которая включает в себя как случайную погрешность измерений Δx_n , так и случайное отклонение δx от его истинного значения x из-за дискретности процесса измерений. Постановка задачи

дополнительно поясняется с помощью рис. 6.4. На рис. 6.4, а показано изменение показателя $x(t)$ в зависимости от времени t , звездочками (*) отмечены результаты замера $x(t)$; $\Delta x_{из}(t)$ — погрешность измерений. Если не

применяются специальные методы экстраполяции функции в пределах интервала T_d (полиномом какой-либо отличной от нуля степени), то мы имеем фактически экстраполяцию функции полиномом нулевой степени, или ступенчатую экстраполяцию, т. е. предполагается, что значение функции остается постоянным до следующего замера. При этом наблюдается отклонение истинных значений от их экстраполированных значений. На рис. 6.4, б, в участки этих отклонений $\delta x(t)$ заштрихованы. Очевидно, что ступенчатая экстраполяция вносит дополнительную погрешность (вместо непрерывной функции $x(t)$ мы используем ступенчатую функцию), причем величина этой погрешности возрастает с ростом T_d в предположении монотонного в среднем изменения $x(t)$ в пределах интервала T_d . Положим, что период опроса T_d кратен некоторой величине h , т. е. $T_d = \nu h$, $\nu = 1, 2, 3, \dots$. Требуется выбрать ν из условия, чтобы среднеквадратическая погрешность определения x удовлетворяла условию $\sigma_{\Delta x} \leq \sigma_{\Delta x \max}$.

Обозначим через δ суммарную погрешность, учитывающую как экстраполяцию, так и погрешность измерений. При этом

$$\delta_{i,i-\nu} = x^*(t_i) - x^*(t_{i-\nu}) = x_i^* - x_{i-\nu}^*, \quad (6.30)$$

где i — номер периода измерения; $x^*(t)$ означают значения показателя $x(t)$ с учетом погрешности измерений.

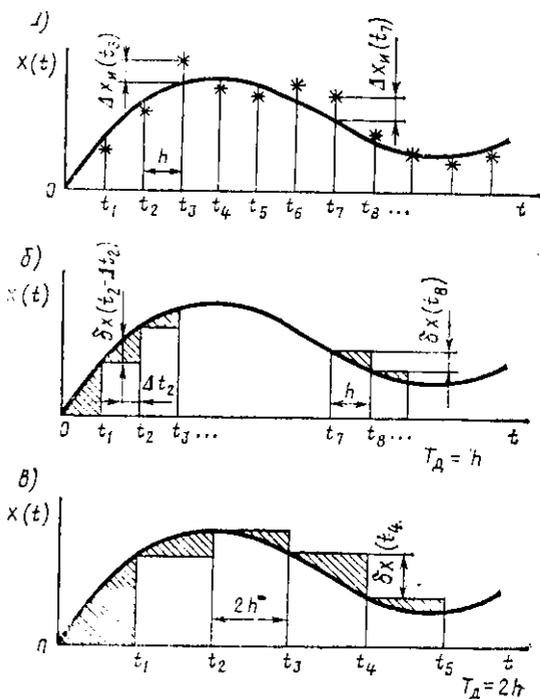


Рис. 6.4

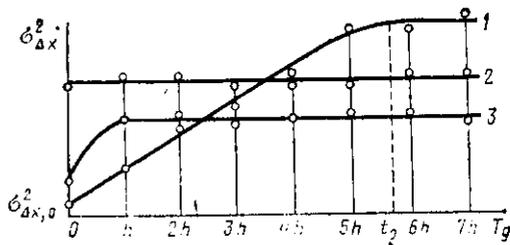


Рис. 6.5

Будем исходить из наиболее общего случая, когда нам заранее ничего не известно о характере изменения $x(t)$ ($x(t)$ — случайная функция). Тогда необходимо произвести эксперимент, заключающийся в n -кратном измерении $x(t)$ для $t=ih, i=0, 1, 2, \dots, n$. По результатам замеров подсчитывают среднеквадратическую оценку отклонений истинных значений $x(t)$ от их экстраполированных значений с учетом погрешности измерений для различных интервалов νh , т. е.

$$\sigma_{\Delta x, \nu}^2 = \frac{1}{n-\nu} \sum_{i=\nu}^n (x_i^* - x_{i-\nu}^*)^2, \quad \nu=1, 2, 3, \dots \quad (6.31)$$

В результате расчетов определяются оценки среднеквадратических отклонений $\sigma_{\Delta x, \nu}^2$ за интервалы времени, кратные h . Для определения периода опроса датчика T_d значения $\sigma_{\Delta x, \nu}^2$ наносятся на график и соединяются плавной кривой. На рис. 6.5 изображены три таких кривых, соответствующих основным случаям, которые могут встретиться при обработке результатов эксперимента. Все точки кривых, за исключением точки при $t=0$, находятся на основании расчета по формуле (6.31). Для определения $\sigma_{\Delta x, \nu}^2$ при $\nu=0$, т. е. $\sigma_{\Delta x, 0}^2$, выразим $\sigma_{\Delta x, \nu}^2$ через операцию математического ожидания M квадрата разности (6.30), т. е.

$$\sigma_{\Delta x, \nu}^2 = M [x_i^* - x_{i-\nu}^*]^2, \quad (6.32)$$

где $x_i^* = x_i + \Delta x_{н, i}$; $x_{i-\nu}^* = x_{i-\nu} + \Delta x_{н, i-\nu}$.

Относительно x и погрешности измерения $\Delta x_{н}$ примем наиболее распространенные на практике допущения:

1) отсутствие или компенсация систематической составляющей x и $\Delta x_{н}$, т. е. $M[x_i] = 0$; $M[\Delta x_{н, i}] = 0$;

2) отсутствие корреляции погрешности измерения со значением измеряемой величины $M[x_i \cdot \Delta x_{н, i}] = 0$;

3) отсутствие корреляции погрешностей измерения при выбранном шаге h , т. е. $M[\Delta x_{н, i} \cdot \Delta x_{н, j}] = 0$ при $i \neq j$.

При этих допущениях, раскрывая выражение (6.32), получим

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta x, \nu}^2 &= M [x_i^* - x_{i-\nu}^*]^2 = M [(x_i + \Delta x_{н, i}) - (x_{i-\nu} + \Delta x_{н, i-\nu})]^2 = \\ &= M [x_i^2 + x_{i-\nu}^2 + \Delta x_{н, i}^2 + \Delta x_{н, i-\nu}^2 - 2x_i x_{i-\nu} + 2x_i \cdot \Delta x_{н, i} + \\ &+ 2x_{i-\nu} \cdot \Delta x_{н, i-\nu} - 2x_i \cdot \Delta x_{н, i-\nu} - 2x_{i-\nu} \cdot \Delta x_{н, i} - 2\Delta x_{н, i} \cdot \Delta x_{н, i-\nu}] = \\ &= 2\sigma_x^2 + 2\sigma_{\Delta x_{н}}^2 - 2R_{xx}(\nu h), \end{aligned} \quad (6.33)$$

где через $R_{xx}(\nu h)$ обозначена автокорреляционная функция переменной величины $x(t)$.

Искомое значение $\sigma_{\Delta x, 0}^2$ получается при подстановке в (6.33) значения $\nu=0$. При этом, учитывая, что $R_{xx}(0) = \sigma_x^2$, находим

$$\sigma_{\Delta x, 0}^2 = 2\sigma_{\Delta x_{н}}^2; \quad \sigma_{\Delta x, 0} = 1,41\sigma_{\Delta x_{н}}. \quad (6.34)$$

Выражение (6.34) отражает тот факт, что при вычитании значений измерения в одной и той же точке [см. (6.30) при $v=0$] погрешности измерений суммируются, поэтому $\sigma_{\Delta x,0} \neq \sigma_{\Delta x_{\text{ин}}}$. Таким образом, точка $\sigma_{\Delta x,0}$ на всех кривых определяется среднеквадратической погрешностью измерительного прибора $\sigma_{\Delta x_{\text{ин}}}$, которую можно определить через класс точности прибора γ_T из условия $\gamma_T = \Delta_{\text{max}} \times 100/N_{\text{п}}$, где $\Delta_{\text{max}} = 3\sigma_{\Delta x_{\text{ин}}}$ (предполагается нормальный закон распределения ошибки измерения и используется так называемое «правило трех сигм» относительно максимальной ошибки); $N_{\text{п}}$ — диапазон шкалы прибора.

Кривая 1 на рис. 6.5 соответствует случаю, когда интервал h , выбранный произвольно, оказался меньше времени, необходимого для изменения $x(t)$ во всем диапазоне [$R_{xx}(vh) \neq 0$] и с ростом T_d значение $\sigma_{\Delta x,0}$ возрастает (см. также рис. 6.4, б, в). При $T_d > t_0$ корреляционная зависимость между замерами исчезает, т. е. $R_{xx}(t) |_{t-t_0=0} = 0$, и, как следует из (6.33), значение $\sigma_{\Delta x,0}^2$ остается постоянным. Пользуясь кривой 1, можно по заданному значению $\sigma_{\Delta x, \text{max}}$ найти период опроса T_d .

Кривая 2 соответствует случаю, когда диапазон изменения величины $x(t)$ равен или меньше погрешности измерительного прибора $\sigma_{\Delta x_{\text{ин}}}$. Это означает, что нельзя использовать прибор с такой относительно большой погрешностью.

Кривая 3 может быть получена, когда произвольно выбранный интервал h превышает время спада корреляционной функции, т. е. $R_{xx}(h) = 0$. При этом все точки, кроме начальной, лежат примерно на горизонтальной линии. Для нахождения T_d в этом случае необходимо уменьшить интервал h и повторить эксперимент и расчеты с целью получения кривой вида 1. Предложенный подход к выбору периода опроса датчиков, очевидно, только в среднем будет удовлетворять условию $\sigma_{\Delta x} < \sigma_{\Delta x, \text{max}}$. Более строгие оценки могут быть получены при учете конкретного закона распределения $x(t)$.

§ 6.5. ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРИОДА ОПРОСА ДАТЧИКОВ ОТ АЛГОРИТМОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Стремление определить интервал дискретности из условия полного сохранения информации, заложенной в непрерывном случайном сигнале в соответствии с теоремой Котельникова, а также требование воспроизведения сигнала с учетом погрешностей измерений и экстраполяции, описанные в предыдущем параграфе, не являются самоцелью.

Конечным результатом использования информации в АСУ ТП является выработка управляющих воздействий, которые формируются путем выполнения определенных математических операций над исходными данными. Покажем, что величина интервала опроса датчиков T_d при решении задач в реальном времени непосредственно связана с точностью выполнения отдельных операций, таких, например, как интегрирование, экстраполяция. При этом полагаем,

что время выполнения самих операций, учитывая быстродействие современных ЭВМ, достаточно мало, так что все операции завершаются в пределах интервала T_d . Искажения возникают из-за того, что исходная информация поступает не непрерывно, а дискретно во времени. И поскольку мы решаем задачу непрерывного управления процессом во времени, а не задачу приближенного вычисления функции на заранее заданном интервале, то нас должны интересовать не итоговые погрешности, как в теории приближенных вычислений, а амплитудные и фазовые искажения сигнала, что соответствует методам теории автоматического управления. Таким образом, мы хотим показать, что выбор T_d надо осуществлять не только с учетом характера случайной функции $x(t)$ и погрешности измерений $\sigma_{\Delta x}$, но и с учетом тех задач, для которых используется информация.

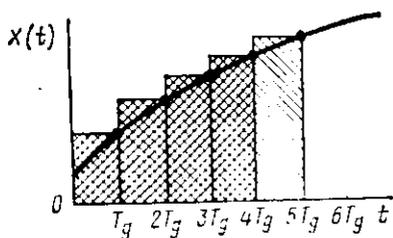


Рис. 6.6

Методы приближенного интегрирования. Рассмотрим вначале операцию интегрирования, которая реализуется на управляющей вычислительной машине одним из приближенных методов. Так по методу прямоугольников значение интеграла в момент времени $t = kT_d$, $k = 1, 2, 3, \dots$ определяется выражением

$$y(t) = y(t - T_d) + T_d \cdot x(t), \quad (6.35)$$

где $y(t)$, $y(t - T_d)$ — значение интеграла в данный и предшествующий моменты времени; $x(t)$ — значение подынтегральной функции в данный момент времени.

Процесс приближенного интегрирования по методу прямоугольников изображен на рис. 6.6, где двойной штриховкой показано значение $y(4T_d)$, а одинарной — $T_d \cdot x(5T_d)$.

Чтобы определить амплитудные и фазовые искажения для операции приближенного интегрирования, найдем передаточную функцию оператора, реализующего выражение (6.35). Поскольку рассматривается преобразование дискретных сигналов, то используем дискретное преобразование Лапласа, которое изучается в курсе «Теория автоматического управления». В этом преобразовании вместо оператора Лапласа p в качестве аргумента изображения используется e^{pT_d} . Часто для сокращения записи вводят новый оператор $z = e^{pT_d}$ и при этом дискретное преобразование Лапласа называют Z -преобразованием. И мы в дальнейшем будем пользоваться этим понятием.

Перейдем к Z -преобразованию выражения (6.35). Учитывая, что задержка в функции-оригинале на время T_d соответствует в Z -преобразовании умножению на оператор z^{-1} , получим

$$Y^*(z) = Y(z) z^{-1} + T_d X^*(z),$$

откуда передаточная функция дискретного интеграла по методу прямоугольников

$$W_n^*(z) = Y^*(z)/X^*(z) = T_x z / (z - 1). \quad (6.36)$$

Передаточная функция $W_n^*(z)$ обеспечивает интегрирование с определенными амплитудными и фазовыми искажениями. Найдем амплитудную и фазовую частотные характеристики $W_n^*(z)$. Для этого произведем замену переменной

$$z = e^{pT_x} = e^{j\omega T_x}$$

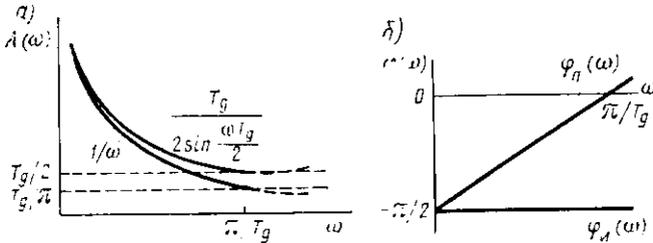


Рис. 6.7

и выделим действительную и мнимую части выражения (6.36):

$$\begin{aligned} W_n^*(z) = W_n^*(j\omega) &= T_x \frac{e^{j\omega T_x}}{e^{j\omega T_x} - 1} = T_x \left(\frac{1}{2} + \frac{e^{j\omega T_x/2}}{e^{j\omega T_x/2} - e^{-j\omega T_x/2}} - \frac{1}{2} \right) = \\ &= \frac{T_x}{2} \left(1 + \frac{e^{j\omega T_x/2} + e^{-j\omega T_x/2}}{e^{j\omega T_x/2} - e^{-j\omega T_x/2}} \right) = \frac{T_x}{2} \left[1 + \frac{\cos(\omega T_x/2)}{j \sin(\omega T_x/2)} \right] = \\ &= \frac{T_x}{2} [1 - j \operatorname{ctg}(\omega T_x/2)], \end{aligned} \quad (6.37)$$

откуда амплитудная характеристика

$$A_n(\omega) = \frac{T_x}{2} \sqrt{1 + [\operatorname{ctg}(\omega T_x/2)]^2} = T_x / [2 \sin(\omega T_x/2)];$$

фазовая характеристика

$$\varphi_n(\omega) = \operatorname{arctg}[-\operatorname{ctg}(\omega T_x/2)] = -\pi/2 + \omega T_x/2.$$

Для идеального интегратора

$$W_n(j\omega) = 1/(j\omega); \quad A_n(\omega) = 1/\omega; \quad \varphi_n(\omega) = -\pi/2. \quad (6.38)$$

На рис. 6.7, а показана амплитудная, а на рис. 6.7, б фазовая частотные характеристики интегратора по методу прямоугольников в сопоставлении с характеристиками идеального интегратора.

Более точным методом интегрирования является метод трапеций (рис. 6.8). В этом случае ЭМВ интегрирует по формуле

$$y(t) = y(t - T_x) + 0,5 T_x [x(t) + x(t - T_x)]. \quad (6.39)$$

Передаточная функция интегратора по методу трапеций $W_T^*(z)$ определится из выражения Z -преобразования для (6.39):

$$Y^*(z) = Y^*(z)z^{-1} + 0,5T_d[X^*(z) + X^*(z)z^{-1}];$$

$$W_T^*(z) = Y^*(z)/X^*(z) = 0,5T_d(z+1)/(z-1).$$

При переходе к частотным характеристикам получаем

$$W_T^*(j\omega) = 0,5T_d(e^{j\omega T_d} + 1)/(e^{j\omega T_d} - 1) = 0,5T_d[-j \operatorname{ctg}(\omega T_d/2)]; \quad (6.40)$$

$$A_T(\omega) = 0,5T_d \operatorname{ctg}(\omega T_d/2); \quad \varphi_T(\omega) = -\pi/2. \quad (6.41)$$

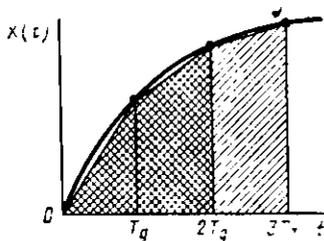


Рис. 6.8

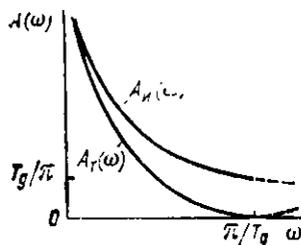


Рис. 6.9

Метод трапеций не дает фазовых искажений, но, так же как и метод прямоугольников, имеет амплитудные искажения (см. рис. 6.9).

При использовании метода прямоугольников участок функции $x(t)$ на интервале T_d заменяется полиномом нулевой степени (обычная ступенчатая экстраполяция), при использовании метода трапеций — полиномом первой степени (линейная экстраполяция). Более точные формулы интегрирования могут быть получены при использовании полиномов более высоких порядков. Например, при замене функции $x(t)$ полиномом второй степени, проходящим через три точки, получаем правило интегрирования Симпсона с передаточной функцией

$$W_C^*(z) = \frac{T_d}{3} \frac{z^2 + 4z + 1}{z^2 - 1}. \quad (6.42)$$

Таким образом, уменьшать амплитудные и фазовые искажения при приближенном интегрировании можно выбором соответствующего более сложного метода. Однако эта же цель может достигаться уменьшением периода подачи информации T_d . Действительно, как видно из рис. 6.7 и рис. 6.9, при уменьшении T_d преобразование сигналов одной и той же частоты ω смещается в область меньших искажений.

Методы экстраполяции. Задача экстраполяции заключается в предсказании значения сигнала на ближайший дискретный момент времени и описывается уравнением

$$y(t) = x(t + T_d),$$

т. е. сигнал на выходе экстраполятора $y(t)$ в данный момент времени должен равняться входному сигналу $x(t)$ на момент времени $t + T_d$. Однако передаточная функция идеального экстраполятора оказывается физически нереализуемой функцией

$$W_n^*(z) = Y^*(z)/X^*(z) = z, \quad (6.43)$$

так как степень числителя (единица) получилась выше степени знаменателя (ноль). Поэтому для экстраполяции используются приближенные методы, которые основаны на аппроксимации функции $x(t)$ многочленами. Так, при аппроксимации $x(t)$ полиномом

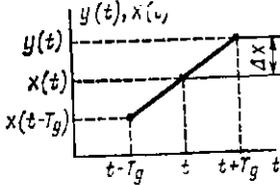


Рис. 6.10

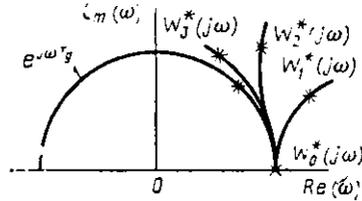


Рис. 6.11

нулевой степени предполагается, что в последующий дискретный момент времени функция $x(t)$ сохранит свое значение (ступенчатая аппроксимация функции) $y_0(t) = x(t)$, что соответствует передаточной функции

$$W_0^*(z) = 1, \quad (6.44)$$

При аппроксимации функции по двум значениям полиномом первой степени предполагается линейное изменение функции $x(t)$ во времени (рис. 6.10). В этом случае предсказанное значение определится уравнением

$$y_1(t) = x(t) + \Delta x = 2x(t) - x(t - T_d).$$

Соответствующая передаточная функция

$$W_1^*(z) = Y^*(z)/X^*(z) = 2 - z^{-1}. \quad (6.45)$$

При аппроксимации функции $x(t)$ полиномами второй и третьей степени соответственно по двум и трем предыдущим значениям можно получить следующие разностные уравнения:

$$y_2(t) = 3x(t) - 3x(t - T_d) + x(t - 2T_d);$$

$$y_3(t) = 4x(t) - 6x(t - T_d) + 4x(t - 2T_d) - x(t - 3T_d),$$

откуда передаточные функции равны

$$W_2^*(z) = 3 - 3z^{-1} + z^{-2}; \quad (6.46)$$

$$W_3^*(z) = 4 - 6z^{-1} + 4z^{-2} - z^{-3}. \quad (6.47)$$

Для сопоставления точности отдельных методов экстраполяции построим амплитудно-фазовые частотные характеристики передаточ-

ных функций $W_0^*(z)$, $W_1^*(z)$, $W_2^*(z)$, $W_3^*(z)$ путем замены переменной $z = e^{j\omega T_d}$. Тогда получим

$$\begin{aligned} W_0^*(j\omega) &= e^{j\omega T_d}; \quad W_0^*(j\omega) = 1; \\ W_1^*(j\omega) &= 2 - e^{-j\omega T_d}; \\ W_2^*(j\omega) &= 3 - 3e^{-j\omega T_d} - e^{-j2\omega T_d}; \\ W_3^*(j\omega) &= 4 - 6e^{-j\omega T_d} + 4e^{-j2\omega T_d} - e^{-j3\omega T_d}. \end{aligned}$$

Если представить $e^{j\omega T_d} = \cos \omega T_d + j \sin \omega T_d$ и изменять аргумент ωT_d в пределах $0 \leq \omega T_d \leq \pi$, то передаточная функция идеально-экстраполятора опишет в комплексной плоскости $W^*(j\omega)$ полуокружность (рис. 6.11). Характеристика $W_0^*(j\omega)$ будет представлена одной точкой на действительной оси, амплитудно-фазовые характеристики остальных передаточных функций будут все более уклоняться от характеристики идеального экстраполятора по мере роста значения ωT_d . Для удобства сопоставления методов на годографах передаточных функций звездочками отмечены точки, соответствующие $\omega T_d = \pi/4$.

Следует отметить, что аппроксимация идеального экстраполятора улучшается по мере усложнения формулы приближенной экстраполяции, однако с увеличением степени аппроксимирующего полинома возрастает переупругивание на выходе экстраполятора. Погрешность приближенного экстраполирования также может быть понижена уменьшением интервала T_d .

Таким образом, при выборе интервала опроса датчиков необходимо учитывать его влияние на точность последующих преобразований в алгоритмах управления.

Итеративные алгоритмы усреднения. Отметим еще вопросы сглаживания сигнала (фильтрации помех), так как помехи непосредственно сказываются на точности реализации алгоритмов управления, в частности и на выполнении операций интегрирования и экстраполяции, которые рассматривались выше в предположении точных значений сигнала $x(t)$.

Одной из основных характеристик случайного в общем случае сигнала $x(t)$ является математическое ожидание. Основываясь на результатах измерений x_i , можно найти оценку математического ожидания \bar{x} в форме среднего арифметического

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6.48)$$

где n — общее число измеренных значений $x(t)$.

Однако использование выражения (6.48) в процессе управления требует запоминания всех n значений x_i . В этом смысле удобнее пользоваться рекуррентным соотношением

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} [(n-1)\bar{x}_{n-1} + x_n], \quad (6.49)$$

где через \bar{x}_{n-1} обозначено среднее арифметическое, полученное по результатам $(n-1)$ замеров. Формула (6.49) позволяет последовательно (итеративно) уточнять значение \bar{x} по мере получения очередного замера x_n .

Аналогичным образом можно использовать итерационную формулу для вычисления оценки дисперсии s^2 величины $x(t)$.

$$s_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 = \frac{1}{n-1} [(n-2)s_{n-1}^2 + (x_n - \bar{x}_n)^2]. \quad (6.50)$$

Выражение для \bar{x}_n можно представить в следующей форме:

$$\begin{aligned} \bar{x}_n &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} x_i + \frac{1}{n} \left(x_n - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} x_i \right) = \\ &= \bar{x}_{n-1} + \frac{1}{n} (x_n - \bar{x}_{n-1}). \end{aligned} \quad (6.51)$$

Обозначив через $\delta x_{n-1} = x_n - \bar{x}_{n-1}$ поправку на n -й итерации, а через γ_n коэффициент $1/n$, получим

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} + \gamma_n \delta x_{n-1}. \quad (6.52)$$

С ростом n величины x_n и \bar{x}_{n-1} не стремятся к нулю, следовательно, не стремятся к нулю и поправка δx_{n-1} . Между тем для стационарного случайного процесса $x(t)$ значение \bar{x}_n должно стремиться к некоторой константе. Это условие сглаживания помех обеспечивается уменьшением коэффициента γ_n с ростом n .

Формулой типа (6.52) можно воспользоваться для итерационного вычисления самых различных характеристик случайных величин и процессов, которые являются математическими ожиданиями некоторых функций, зависящих от этих величин или процессов. Так, корреляционная функция централизованного случайного процесса $x(t)$ ($\bar{x} = 0$) при фиксированном значении ее аргумента m равна математическому ожиданию произведения $x(i) x(i+m)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Ее оценка для момента n может быть подсчитана по рекуррентной формуле

$$R_n(m) = R_{n-1}(m) = \frac{1}{n-m-1} [x(n)x(n+m) - R_{n-1}(m)], \quad (6.53)$$

где $1/(n-m-1) = \gamma_n$; $x(n)x(n+m) - R_{n-1}(m) = \delta R_{n-1}(m)$.

При $m = 0$ из формулы (6.53) получаем оценку дисперсии

$$R_n(0) \equiv s_n^2 = s_{n-1}^2 + (x_n^2 - s_{n-1}^2)/(n-1). \quad (6.54)$$

Нетрудно убедиться, что выражение (6.54) тождественно выражению (6.50) при $\bar{x}_n = 0$.

Рекуррентные соотношения типа (6.52) — (6.54) используются не только для сглаживания помех, но, как будет показано в § 7.3, и для поиска экстремума функции в условиях помех.

§ 6.6. ВЫБОР ЧИСЛА РАЗРЯДОВ ПРИ КОДИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ

Выше были рассмотрены различные подходы к выбору периода опроса датчиков T_d , или, иными словами, к периоду квантования сигнала по времени. Однако в АСУ ТП для использования в ЭВМ сигнал подвергается и квантованию по уровню. Это означает, что управляющая информация может принимать не произвольные, а только определенные фиксированные значения (уровни). Эти значения зависят от цены младшего разряда кода числа q и определяются обычно путем округления исходного значения сигнала в меньшую сторону (по недостатку) или в большую сторону (по избытку). В этих случаях максимальная погрешность за счет квантования сигнала по уровню не превышает значения q . Иногда округляют значение сигнала до ближайшего целого числа, при этом, очевидно, максимальная ошибка округления равна $q/2$. В дальнейшем будем рассматривать округление до ближайшего целого, дающего меньшую ошибку, однако полученные результаты могут быть перенесены и на другие случаи округления.

При большом количестве разрядов числа (q мало) погрешность округления невелика и влиянием квантования по уровню можно пренебречь, однако при малой числовой разрядной сетке управляющей ЭВМ ошибки квантования могут быть существенны и должны учитываться при выборе числа разрядов кодируемой информации. Некоторые же задачи, связанные с автоматическим управлением, особенно чувствительны к ошибкам округления, например: определение импульсных переходных функций по известным корреляционным функциям, решение систем нормальных уравнений в методе наименьших квадратов и др. Поэтому вопрос выбора количества разрядов заслуживает серьезного внимания.

Поскольку в общем случае математической моделью исходного сигнала является случайная функция времени, то очевидно, что ошибка квантования сигнала по уровню также будет случайной функцией. Эта ошибка полностью описывается в статистическом смысле ее автокорреляционной функцией и взаимной корреляционной функцией ошибки квантования и квантуемого исходного сигнала. При исследовании преобразования случайных сигналов в автоматических системах управления используется понятие *спектральная плотность мощности*, которая связана с корреляционной функцией преобразованием Фурье для непрерывных сигналов и двусторонним Z -преобразованием для дискретных (импульсных) сигналов.

Ниже предлагается метод определения среднеквадратической ошибки σ_n , которая возникает на выходе системы управления (или технологического процесса) из-за квантования по уровню входного сигнала. Эта задача решается при условии, что автокорреляционная функция ошибки квантования входного сигнала $R_{ee}(iT)$ может быть принята равной дисперсии ошибки квантования $\bar{\epsilon}^2 \equiv R_{ee}(0)$, которая равномерно распределена в интервале $[-q/2, q/2]$. При

этом и квантуемый сигнал, и ошибка квантования рассматриваются как случайные величины. В доказательстве метода используется понятие характеристической функции, которое дается в теории вероятностей, а также методы анализа линейных дискретных систем управления при прохождении случайного сигнала (теория автоматического управления). Рассмотренный ниже подход назван «статистическая теория квантования сигнала по уровню», его изложение относительно сложно, но конечные результаты просты и легко могут быть использованы в практике проектирования информационных систем.

Статистическая теория квантования сигнала по уровню. Обозначим значение случайного сигнала $x(t)$ через x , а его плотность распределения через $\varphi(x)$. Введем в рассмотрение характеристическую функцию $\varphi_1(\omega)$. Характеристической функцией случайной величины X называется математическое ожидание функции $e^{j\omega X}$, где ω параметр, таким образом

$$\varphi_1(\omega) = M [e^{j\omega X}] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega x} \varphi(x) dx. \quad (6.55)$$

Характеристическая функция обладает рядом свойств, которые позволяют значительно упростить решение многих задач теории вероятностей. В частности, нами будут использованы свойства:

1) характеристическая функция суммы независимых случайных величин равна произведению характеристических функций этих величин; 2) моменты случайной величины могут быть вычислены с помощью $\varphi_1(\omega)$ по формуле

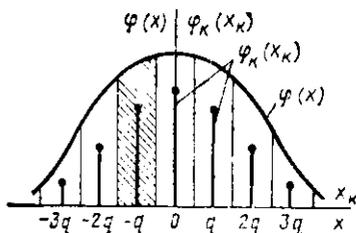


Рис. 6.12

$$\bar{x}^v = M \{X^v\} = (j)^{-v} \left. \frac{d^v \varphi_1(\omega)}{d\omega^v} \right|_{\omega=0}, \quad v = 1, 2, 3, \dots \quad (6.56)$$

Исходная случайная функция X непрерывна по амплитуде, т. е. может принимать любые действительные значения. Эти значения, представленные цифровым кодом x_k , выражаются уже ограниченным числом возможных уровней: $0, \pm q, \pm 2q, \pm 3q, \dots, (2^l - 1)q$, где l — число двоичных разрядов числа. Чтобы определить плотность распределения $\varphi_k(x_k)$ квантованной случайной величины X_k , разделим площадь под кривой $\varphi(x)$ на зоны шириной q , как показано на рис. 6.12. Всем значениям величины x , попадающим в одну и ту же зону, будет соответствовать одинаковое значение x_k , равное абсциссе центра зоны ($0, \pm q, \pm 2q, \dots$). Таким образом, плотность распределения $\varphi_k(x_k)$ будет представлять собой последовательность значений, смещенных вдоль оси амплитуд на величину шага квантования q , т. е. $\varphi_k(x_k)$ является рядом распределений, причем каждое значение $\varphi_k(x_k)$ должно иметь величину, равную площади соответствующей зоны под кривой $\varphi(x)$. Например, $\varphi_k(-q)$ равно площади зоны, заштрихованной на рис. 6.12.

Определим вначале операцию вычисления площади зоны шириной q , не фиксируя положение этой зоны:

$$r(x) = \int_{x-q/2}^{x+q/2} \varphi(x) dx = F(x + q/2) - F(x - q/2), \quad (6.57)$$

где

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx \quad (6.58)$$

есть закон распределения случайной величины X .

Таким образом, для вычисления $r(x)$ используются операции упреждения, задержки, интегрирования и вычитания, т. е. выражение (6.57) можно рассматривать как применение к $\varphi(x)$ преобразования

$$(e^{j\omega q/2} - e^{-j\omega q/2})/(j\omega) = q \sin(\omega q/2)/(\omega q/2), \quad (6.59)$$

где ω — круговая частота.

Тогда преобразование типа преобразования Фурье для $r(x)$ имеет вид

$$R(\omega) = \varphi_1(\omega) q \sin(\omega q/2)/(\omega q/2). \quad (6.60)$$

Не вдаваясь в обсуждение корректности выражения (6.60), отметим только, что здесь используется аналогия с преобразованием функции времени в системах автоматического управления. Формула же характеристической функции (6.55) соответствует преобразованию Фурье с точностью до знака степени $j\omega x$. $R(\omega)$ есть преобразование непрерывной функции $r(x)$ аргумента x . Плотность распределения квантованной величины X_k получается из $r(x)$, если задать значения X равные $0, \pm q, \pm 2q, \dots$, т. е. если подвергнуть непрерывную функцию $r(x)$ квантованию по аргументу x с интервалом квантования q (см. рис. 6.12). Здесь мы имеем полную аналогию с получением дискретных сигналов из непрерывных, т. е. с импульсной модуляцией. Из теории дискретных систем автоматического управления известно, что преобразование дискретного сигнала есть периодическая функция аргумента ω с коэффициентом, обратным интервалу квантования. В качестве типового элемента этого преобразования служит преобразование соответствующего исходного непрерывного сигнала. Таким образом, характеристическая функция $\varphi_{1k}(\omega)$ будет периодической функцией с коэффициентом $1/q$ и периодом $2\pi/q$, типовым элементом которой является выражение (6.60)

$$\begin{aligned} \varphi_{1k}(\omega) &= \frac{1}{q} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R\left(\omega + m \frac{2\pi}{q}\right) = \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \varphi_1\left(\omega + m \frac{2\pi}{q}\right) \frac{\sin(\omega q/2 + m\pi)}{\omega q/2 + m\pi}. \end{aligned} \quad (6.61)$$

Рассмотрим элемент (6.61) при $m=0$:

$$\varphi_1(\omega) = \frac{\sin(\omega q/2)}{\omega q/2}. \quad (6.62)$$

Этот элемент представляет собой произведение двух величин. Из теории вероятностей известно, что характеристическая функция суммы двух статистически независимых случайных величин есть произведение характеристических функций каждой из величин в отдельности. Выражение (6.62) является, таким образом, характеристической функцией суммы исходной квантуемой случайной величины X и статистически независимой помехи E , которая имеет характеристическую функцию (рис. 6.13, а):

$$\varphi_e(\omega) = \sin(\omega q/2)/(\omega q/2). \quad (6.63)$$

Нетрудно убедиться, что последнее выражение представляет собой преобразование вида (6.55) для равномерно распределенной в интервале $[-q/2, q/2]$ случайной величины e , т. е. (рис. 6.13, б)

$$\varphi_{ep}(\omega) = \begin{cases} 1/q & \text{при } |e| \leq q/2; \\ 0 & \text{при } |e| > q/2. \end{cases} \quad (6.64)$$

Действительно,

$$\begin{aligned} \varphi_{\varepsilon}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega\varepsilon} \varphi_{\varepsilon p}(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} e^{j\omega\varepsilon} d\varepsilon = \frac{1}{j\omega q} e^{j\omega\varepsilon} \Big|_{-q/2}^{q/2} = \\ &= \frac{1}{j\omega q} (e^{j\omega q/2} - e^{-j\omega q/2}) = \sin(\omega q/2) / (j\omega q/2). \end{aligned}$$

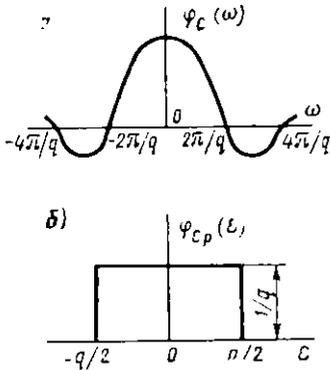


Рис. 6.13

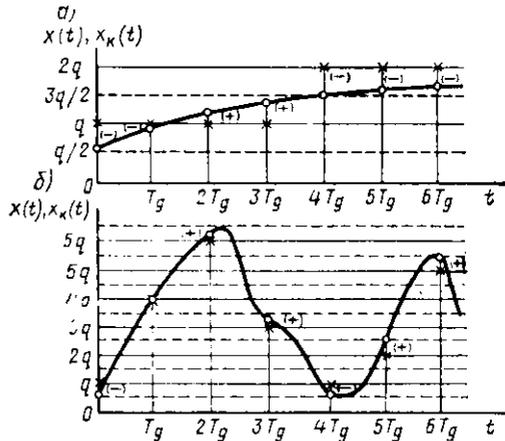


Рис. 6.14

Однако характеристическая функция $\varphi_{1k}(\omega)$ содержит не один, а бесконечную сумму элементов вида (6.62), смещенных вдоль оси ω . Влияние смещенных элементов вызывает искажение равномерного распределения ошибки квантования по уровню. В общем случае эта ошибка зависит от входного сигнала X и соответствующий квантованный сигнал X_k можно представить как сумму

$$X_k = X + E + \Delta E(x), \quad (6.65)$$

где E — равномерно распределенная ошибка; $\Delta E(x)$ — ошибка за счет влияния смещенных элементов вида (6.62).

Предположим, что ошибкой $\Delta E(x)$ можно пренебречь, т. е. пренебречь влиянием всех членов выражения (6.61) с $m \geq 1$. Ниже будет показана возможность такого предположения для одного из наиболее часто используемых на практике законов — нормального закона. В этом случае

$$X_k = X + E, \quad (6.65a)$$

где X и E — статистически независимые согласно выражению (6.62) величины.

Следовательно, взаимная корреляционная функция независимых X и E есть $R_{XE}(\tau) = 0$ для любого значения аргумента τ . Автокорреляционную функцию $R_{Xk}(\tau)$ можно получить, если известна двумерная плотность вероятностей стационарного случайного процесса $\varphi_2(x_1, x_2, \tau)$, которая определяет вероятность того, что X в момент времени t будет иметь значение $x(t) = x_1$, а в момент времени $t + \tau$ — значение $x(t + \tau) = x_2$. Можно показать, что если характеристическая функция $\varphi_2(\omega_1, \omega_2, \tau)$ для плотности $\varphi_2(x_1, x_2, \tau)$ удовлетворяет условию

$$\varphi_2(\omega_1, \omega_2, \tau) = 0 \quad \text{при} \quad \omega_1 \geq 2\pi/q, \quad \omega_2 \geq 2\pi/q \quad (6.66)$$

то автокорреляционная функция помехи квантования по уровню равномерно пренебрежимо мала уже при очень небольших значениях τ .

Физический смысл рассмотренных условий для $R_{x\bullet}(\tau)$ и $R_{\bullet\bullet}(\tau)$ можно дополнительно пояснить с помощью рис. 6.14. На рис. 6.14, *a* представлена медленно изменяющаяся, а на рис. 6.14, *б* — быстро изменяющаяся реализация функции X . Значения x в дискретные моменты времени обозначены кружками, значения x_k — «крестиками». Понятия «медленно» и «быстро» непосредственно связаны со значением период квантования по времени T_d и значением шага квантования по амплитуде q . Одна и та же функция будет изменяться «медленнее», если взять большее значение q и (или) меньшее значение T_d , и наоборот. На рис. 6.14, *a*, *б* положительные значения ошибки $\varepsilon = x - x_k$ помечены знаком (+), отрицательные знаком (-). На рис. 6.14, *a* просматривается зависимость между соседними ошибками, следовательно, $R_{\bullet\bullet}(T_d) \neq 0$. Для случая, изображенного на рис. 6.14, *б*, реализация функции X «успевает» настолько измениться за интервал T_d (проходит несколько значений уровней), что ошибки округления до ближайшего целого для соседних значений уже не зависят друг от друга, т. е. $R_{\bullet\bullet}(T_d) = 0$. Очевидно, что и взаимная корреляция X и E уменьшается с ростом T_d и уменьшением q .

Для дискретных (импульсных) систем управления статистическое описание случайного сигнала задается с помощью корреляционной функции $R_1(iT_d)$ или спектральной плотности мощности $S^*(z)$, которая определяется через двустороннее Z -преобразование от $R_1(iT_d)$:

$$S^*(z) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} R_1(iT_d) z^{-i}. \quad (6.67)$$

Если выполняется условие $R_{\varepsilon\varepsilon}(iT_d) = 0$ для $i \geq 1$, то выражение (6.67) для автокорреляционной функции ошибки квантования по уровню приобретает вид

$$S_{\bullet\bullet}^*(z) = R_{\bullet\bullet}^*(0) = \bar{\varepsilon}^2 = q^2/12. \quad (6.68)$$

В выражении (6.68) использовано то обстоятельство, что корреляционная функция в нуле равна квадрату среднеквадратической ошибки или дисперсии $\bar{\varepsilon}^2$, а дисперсия равномерно симметрично распределенной величины ε

$$\bar{\varepsilon}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon^2 \varphi_{\varepsilon p}(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} \varepsilon^2 d\varepsilon = q^2/12. \quad (6.69)$$

С помощью спектральной плотности мощности удобно исследовать прохождения случайного сигнала через линейную систему автоматического управления. Если известна передаточная функция дискретной системы $W^*(z)$, на вход которой поступает сигнал со спектральной плотностью мощности $S_{\varepsilon\varepsilon}(z)$, то спектральная плотность мощности $S_{yy}^*(z)$ выходного сигнала y определяется выражением

$$S_{yy}^*(z) = |W^*(z)|^2 S_{\varepsilon\varepsilon}^*(z). \quad (6.70)$$

Корреляционная функция выходного сигнала

$$R_{yy}(iT_d) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{|z|=1} S_{yy}^*(z) z^{i-1} dz. \quad (6.71)$$

Дисперсия выходного сигнала

$$\sigma_y^2 = R_{yy}(0) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{|z|=1} |W^*(z)|^2 \frac{S_{\bullet\bullet}^*(z)}{z} dz. \quad (6.72)$$

Выражения (6.70) — (6.72) аналогичны соответствующим выражениям для непрерывных систем. Спектральная плотность мощности, определенная через двустороннее Z -преобразование, может быть выражена как функция круговой частоты ω (при $z = e^{j\omega T_d}$, $p = j\omega$) по формуле

$$S_{yy}^*(z) = S_{yy}^*(e^{j\omega T_d}) = |W^*(e^{j\omega T_d})|^2 S_{\bullet\bullet}^*(e^{j\omega T_d}),$$

однако использование оператора z дает более компактную запись и позволяет в более удобной форме найти корреляционную функцию и дисперсию выходного сигнала на основании понятия обратного Z -преобразования, которое аналогично понятию обратного преобразования Лапласа для непрерывных систем. При этом используется формула обращения, позволяющая по известному Z -преобразованию сигнала $F^*(z)$ найти значение функции оригинала $f(iT_d)$ в любой дискретный момент времени $i = 0, 1, 2, \dots$:

$$f(iT_d) = \frac{1}{2\pi j} \oint F^*(z) z^{i-1} dz,$$

где интеграл берется по замкнутому контуру, охватывающему все полюса функции $F^*(z)$.

Поясним, почему в выражении (6.71) в качестве этого контура берется окружность единичного радиуса ($z = e^{j\omega T_d} = \cos \omega T_d + j \sin \omega T_d$; $0 \leq \omega \leq 2\pi/T_d$). Из (6.67) следует, что, переходя к Z -преобразованию от двустороннего Z -преобразования, получаем

$$S^*(z) = R^*_1(z) + R^*_1(z^{-1}) - R_1(0), \text{ где } R^*_1(z) = \sum_{i=0}^{\infty} R_1(iT_d) z^{-i} -$$

Z -преобразование от корреляционной функции $R_1(iT_d)$. Если $\lim_{i \rightarrow \infty} R_1(iT_d) = 0$, то корреляционная функция затухает с увеличением интервала корреляции. Тогда формально можно принять, что $R_1(iT_d)$ есть импульсная переходная функция устойчивой системы, при этом $R^*_1(z)$ будет ее передаточной функцией (по определению передаточная функция дискретной системы есть Z -преобразование от импульсной переходной функции), а, как известно, все полюса передаточной функции устойчивой дискретной системы должны располагаться внутри круга единичного радиуса плоскости комплексного переменного z . Полюса $R^*_1(z^{-1})$, следовательно, располагаются вне этого круга. Поэтому

$$\oint_{|z|=1} S_{yy}^*(z) z^{i-1} dz \equiv \oint R^*_1(z) z^{i-1} dz,$$

где интеграл берется по контуру, охватывающему все полюса $R^*_1(z)$.

Ниже приводится числовой пример, дополнительно поясняющий использование выражений (6.70) — (6.72).

Таким образом, если допустимо предположение, что ошибка квантования по уровню имеет равномерное распределение в интервале $[-q/2, q/2]$, взаимная корреляционная функция $R_{xe}(\tau) = 0$, автокорреляционная функция быстро убывает, т. е. $R_{ee}(iT_d) = 0$ при $i \geq 1$, то влияние ошибки квантования по уровню на выходе системы на основании выражений (6.70) — (6.72) определяется по формулам

$$S_{yy}^*(z) = (q^2/12) |W^*(z)|^2; \quad (6.70a)$$

$$R_{yy}(iT_d) = [q^2/(24\pi j)] \oint_{|z|=1} |W^*(z)|^2 z^{i-1} dz; \quad (6.71a)$$

$$\sigma_y^2 = R_{yy}(0) = [q^2/(24\pi j)] \oint_{|z|=1} (|W^*(z)|^2/z) dz. \quad (6.72a)$$

Применение статистической теории квантования по уровню к выбору числа разрядов. Как следует из вышерассмотренного, выбор числа разрядов управляющей ЭВМ (или цены разряда q) зависит от интервала квантования по времени T_d (см. рис. 6.14) и от алгоритма последующего преобразования исходного сигнала [определяется передаточной функцией системы $W^*(z)$].

Автоматическое регулирование часто осуществляется по отклонению или по разности значений входной x и выходной y величин $e = x - y$, при этом значения сигналов x и y описываются много-разрядными числами, однако значение сигнала отклонения e может не превышать нескольких единиц q , поэтому фактическое число разрядов сигнала отклонения невелико, т. е. он подвергается относительно грубому квантованию и ошибкой квантования по уровню нельзя пренебрегать.

Рассмотрим пример на применение формул (6.70a) — (6.72a). Пусть передаточная функция дискретной системы задана выражением

$$W^*(z) = T_d a z / (z - a)^2, \quad a = e^{-\alpha T_d},$$

которое соответствует импульсной переходной функции

$$w(t) = t e^{-\alpha t}.$$

Положим $T_d = 1$ с, $\alpha = \ln 2$, тогда $a = 0,5$, $W^*(z) = 0,5z / (z - 0,5)^2$. Спектральная плотность сигнала на выходе

$$S_{yy}^*(z) = (q^2/12) W^*(z) W^*(z^{-1}) = 0,25 z^2 / [(z - 0,5)^2 (1 - 0,5 z)^2] q^2/12.$$

Корреляционная функция

$$R_{yy}(iT_d) = [q^2/(24\pi j)] \oint_{|z|=1} 0,25 z^{i+1} dz / [(z - 0,5)^2 (1 - 0,5 z)^2].$$

Для вычисления последнего выражения воспользуемся формулой вычетов подынтегральной функции, которая имеет вид

$$\oint \Phi(z) dz = 2\pi j \sum_{k=1}^n \text{res } \Phi(z_k),$$

где z_k полюса $\Phi(z)$, находящиеся внутри контура интегрирования.

В нашем случае контур представляет собой окружность единичного радиуса в комплексной плоскости z , внутри контура находится один полюс ($n=1$), его значение $z_1=0,5$, кратность $m=2$. Вычет для полюса кратности m подсчитывается по формуле

$$\text{res } \Phi(z_k) = (m-1)! \frac{d^{m-1}}{dz^{m-1}} [\Phi(z) (z-z_k)^m] \Big|_{z=z_k}.$$

Таким образом, получаем

$$\begin{aligned} R_{yy}(i T_x) &= (q^2/12) \text{res} \frac{0,25 z^{i+1}}{(z-0,5)^2 (1-0,5 z)^2} \Big|_{z=0,5} \\ &= (q^2/12) \frac{d}{dz} \left[\frac{0,25 z^{i+1}}{(1-0,5 z)^2} \right] \Big|_{z=0,5} - (q^2/12) \left[\frac{0,25 (i+1) z^i}{(1-0,5 z)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,25 z^{i+1}}{(1-0,5 z)^3} \right] \Big|_{z=0,5} = q^2 [0,037 (i+1) 0,5^i + 0,049 \cdot 0,5^{i+1}]. \end{aligned}$$

Отметим, что корреляционная функция выходного сигнала не равна нулю при $i \geq 1$. Дисперсию выходного сигнала найдем, подставив в последнее выражение $i=0$:

$$\sigma_y^2 = R_{yy}(0) = 0,062 q^2.$$

Таким образом, если задано допустимое значение среднеквадратической ошибки на выходе системы за счет квантования по уровню σ_y , то можно найти значение младшего разряда числа q . Затем по значению диапазона изменения переменных величин в системе N находят количество двоичных разрядов числа n из условия $N = (2^n - 1) q$.

Оценим теперь условия применимости предлагаемого подхода, когда ошибку квантования по уровню можно считать равномерно распределенной случайной величиной. Рассмотрим наиболее часто принимаемое на практике допущение, что случайный входной сигнал X распределен по нормальному закону. Погрешности, которые возникают при таком подходе, будем оценивать с помощью моментов квантованного сигнала X_k . Если рассматривать симметричный нормально распределенный сигнал X (его математическое ожидание $\bar{x} = 0$), то все нечетные моменты будут равны нулю и мы ограничимся оценкой второго и четвертого моментов. Как известно из курса теории вероятностей, второй центральный момент, или дисперсия величины X , $\mu_2 = M[X^2] = \sigma^2$, где M — оператор математического ожидания. Четвертый центральный момент $\mu_4 = M[X^4] = 3\sigma^4$. Из статистической теории квантования по уровню следует, что ошибку квантования E можно рассматривать как независимую от X равномерно распределенную случайную величину с дисперсией $q^2/12$. При этом моменты для суммы независимых случайных величин будут равны: $\mu'_2 = M[(X+E)^2] = \sigma^2 + q^2/12$; $\mu'_4 = M[(X+E)^4] = 3\sigma^4 + \sigma^2 q^2/2 + q^4/80$. Однако квантованный сигнал $X_k = X + E + \Delta E$, где ΔE — дополнительная ошибка, которая возни-

кает из-за того, что распределение ошибки квантования отличается от равномерного. При этом

$$\begin{aligned}\mu_2' &= M[X_k^2] = \sigma^2 + q^2/12 + \Delta_2; \\ \mu_4' &= M[X_k^4] = 3\sigma^2 + \sigma^2 q^2/2 + q^4/80 + \Delta_4.\end{aligned}$$

В данном случае нас и интересует отличие μ_2', μ_4' от μ_2'', μ_4'' , т. е. числовые значения Δ_2 и Δ_4 , которые желательно выразить через значение q . Выражения для Δ_2 и Δ_4 можно найти на основании формулы (6.61). Равномерно распределенная ошибка получена из условия, что учитывается только один член ряда (6.61) при $m = 0$. Для нормально распределенной величины X можно показать, что значения членов суммы, из которых складываются величины Δ_2 и Δ_4 , резко убывают с увеличением номера m , поэтому для оценки Δ_2 и Δ_4 можно ограничиться только двумя членами для $m = \pm 1$. Полученные при этом выражения зависят от σ и q , они здесь не приводятся, а даны только результаты расчетов по этим выражениям.

В табл. 6.1 приведены значения Δ_2, Δ_4 , изменения моментов в процентах за счет Δ_2, Δ_4 , а также за счет равномерно распределенной ошибки E . В таблице через A обозначено $\sigma^2 q^2/2 + q^4/80$.

Поправки Δ_2 и Δ_4 к моментам второго и четвертого порядков малы по сравнению с μ_2' и μ_4' и влияют на соответствующие моменты только при очень грубом квантовании, когда шаг q больше среднеквадратического отклонения σ . Влияние равномерно распределенной ошибки, с помощью которой предлагается учитывать ошибку квантования по уровню, весьма существенно.

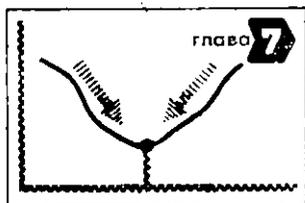
Таблица 6.1

q	Δ_2	Δ_4	$\left \frac{\Delta_2}{\mu_2'} \right 100\%$	$\left \frac{\Delta_4}{\mu_4'} \right 100\%$	$\frac{q^2}{12\mu_2'} 100\%$	$\frac{A}{\mu_4'} 100\%$
$0,5\sigma$	0	0	0	0	2	4
σ	$-1,1 \cdot 10^{-8}\sigma^2$	$8 \cdot 10^{-5}\sigma^4$	10^{-6}	$2,3 \cdot 10^{-3}$	7,7	14,5
2σ	$-3,1 \cdot 10^{-2}\sigma^2$	$0,53\sigma^4$	2,3	9,6	25	42,5
3σ	$-0,54\sigma^2$	$2,4 \cdot \sigma^4$	31	28,2	43	65

Поскольку для нормально распределенной случайной величины диапазон ее изменения практически не превышает $N = 6\sigma$ (вероятность $P[|X| \leq 3\sigma] = 0,997$), то при трех и более двоичных разрядах ($l \geq 3; N \geq 7q$) значениями Δ_2 и Δ_4 можно пренебречь и считать, что ошибка квантования по уровню практически точно описывается равномерным законом распределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов О. Н., Фомин А. Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. М., 1980.
2. Самойленко С. И. Помехоустойчивое кодирование. М., 1966.
3. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М., 1976.
4. Ицкович Э. Л., Трахтенгерц Э. А. Алгоритмы централизованного контроля и управления производством. М., 1967.



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

В настоящей главе вначале рассматриваются некоторые общие принципы построения систем управления, затем математическое обеспечение АСУ ТП. Оно подразделяется на алгоритмическое обеспечение и программное обеспечение. Под алгоритмическим обеспечением понимается совокупность алгоритмов управления и их описания, под программным — программы реализации алгоритмов управления в управляющих ЭВМ. Алгоритмическому обеспечению посвящены первый и второй параграфы главы. В первом параграфе рассмотрены методы описания регламентированных режимов работы системы (так называемое программное управление). Второй параграф посвящен рассмотрению наиболее простых и эффективных методов поиска оптимальных режимов работы системы. Программное обеспечение рассмотрено в двух последних параграфах, причем вначале делается упор на взаимодействие программ в процессе работы системы управления, а затем описываются вопросы, связанные с непосредственной разработкой самих программ. Конкретные методы программирования и языки программирования не рассматриваются, поскольку это является предметом изучения самостоятельных учебных курсов.

§ 7.1. МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Особенности построения систем управления. Рассмотрим вначале принятую в теории автоматического управления математическую трактовку понятия оптимального «управления». Наилучшее, или оптимальное, управление может быть определено следующим образом: оптимальное управление технологическим процессом состоит в нахождении управления как функции времени и координат объекта (значений его входных и выходных переменных), которое удовлетворяет заданным ограничениям и обеспечивает экстремальное (минимальное или максимальное) значение критерия качества (целевой функции).

При математическом описании реальных технологических процессов имеет место ряд упрощений и допущений, поэтому реализовать строго оптимальное управление на практике чаще всего не удается. Можно обеспечить близкое к оптимальному или рациональное управление.

Совершенство и эффективность современной АСУ ТП определяется полнотой и глубиной математического описания как техно-

логического процесса, так и соответствующей системы управления. Последовательность логических и вычислительных операций, которые следуют из математического описания задачи управления, называется алгоритмом управления. Таким образом, под алгоритмом понимается точное предписание о выполнении в определенном порядке некоторой системы операций, позволяющее решать задачи заданного типа. Один и тот же алгоритм может быть представлен с различной степенью детализации в зависимости от того, какие операции принимаются за элементарные. Например, в одном случае за элементарные принимаются арифметические операции (сложение, умножение и т. п.), в другом случае — более крупные операции, такие, как приближенное интегрирование, дифференцирование, экстраполяция. Алгоритм должен иметь определенные свойства:

определенность, что означает невозможность двусмысленного толкования или искажения предписания;

массовость, т. е. возможность исходить из любых исходных данных, принадлежащих некоторому строго определенному множеству;

результативность, которая позволяет так реализовать процесс, чтобы через конечное число шагов решения он обязательно привел к искомому результату.

Другими словами можно сказать, что корректно разработанный алгоритм обеспечивает нахождение решения, которое однозначно определяется исходными условиями задачи и непрерывно от них зависит.

Для оценки алгоритмов часто применяются следующие их характеристики:

- 1) объем памяти ЭВМ, занимаемый данным алгоритмом;
- 2) быстродействие алгоритма, реализованного на ЭВМ определенного типа (затраты машинного времени на получение результата);
- 3) точность алгоритма;
- 4) сложность использования данного алгоритма;
- 5) пригодность алгоритма к обработке сигналов с различными статистическими свойствами;
- 6) надежность алгоритма (гарантия получения результата).

Документация, определяющая процесс управления, называется математическим обеспечением АСУ ТП. Сюда входит математическое описание технологического процесса (математическая модель процесса); функциональная схема алгоритма управления; сам алгоритм, определяющий последовательность логических и вычислительных операций; машинный алгоритм, который учитывает конкретные особенности управляющей ЭВМ; программы алгоритма управления на алгоритмическом языке, в автокоде или в условных адресах; рабочие программы в кодах машины с их описаниями и реальными адресами команд.

Алгоритмы АСУ ТП, в которых реализуются методы решения задач управления, требуют постоянного учета факторов времени. При этом алгоритм управления в виде рабочих программ обычно

должен храниться в оперативной памяти управляющей ЭВМ, чтобы быть доступными для реализации в любой момент времени, определяемый ходом технологического процесса. В существующих и разрабатываемых АСУ ТП оптимизационные задачи составляют относительно небольшую часть всех задач управления. Многие задачи сводятся к четкому соблюдению определенной последовательности действий, которые зависят от хода технологического процесса, внешних возмущений, характеристик конечного продукта и полуфабрикатов. Это в основном логические задачи, а не вычислительные, поэтому количество логических операций в АСУ ТП составляет около 75% от общего объема операций.

Отметим еще особенности переменных величин, которые используются в управляющих алгоритмах. Эти переменные можно разделить на две группы. К первой группе относятся многоразрядные величины, являющиеся квантованными значениями измерений некоторых непрерывных физических характеристик. Разрядность этих переменных в большинстве случаев находится в пределах 15—20 двоичных разрядов. Такие переменные, как правило, удовлетворяют условиям гладкости, т. е. условиям малых изменений производных этих переменных во времени. Малые изменения этих переменных, если они являются исходными данными, приводят к относительно небольшому изменению выходных переменных систем. Примерами таких переменных являются температура, давление, концентрация и т. п. Ко второй группе переменных относятся величины, каждая из которых представляет собой набор малоразрядных (три-четыре) признаков. Например, такой величиной может быть перечень возможных режимов работы установки. В результате преобразования таких величин по логической схеме получают резко отличающиеся друг от друга выходные параметры системы, поэтому очевидно, что надежность определения переменных второй группы должна быть значительно выше, чем для переменных первой группы.

Выше было отмечено, что в алгоритмах АСУ ТП 75% составляют логические операции. Это означает, что кроме использования традиционных математических выражений для выполнения вычислительных операций необходимо применять специальные методы описания логической последовательности действий по управлению технологическим процессом. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Автоматные таблицы. Одним из наиболее простых и естественных способов описания логического алгоритма является его представление в виде так называемого автомата. При этом все входные переменные x_1, x_2, \dots, x_n рассматриваются как двоичные величины, т. е. они могут принимать два значения, например 1 и 0. Значению 1 может соответствовать выполнение какого-то условия, значению 0 — невыполнение. Если по какому-то входу системы поступает сигнал, который следует различать по нескольким уровням, то такой сигнал кодируется несколькими двоичными разрядами.

Рассмотрим для примера систему управления, которая должна различно реагировать на изменение уровня жидкости в резервуаре. Многие процессы жидкостной обработки кожевенного сырья, химические станции приготовления растворов, сооружения по очистке промышленных вод обслуживаются системами насосов. Представим себе, что система состоит из одного насоса малой и одного большой производительности, включение которых зависит от уровня жидкости в резервуарах. Уровень жидкости измеряется сигнализирующим уровнемером широкого диапазона измерений. Если

Таблица 7.1

Входы			Выходы		
x_3	x_2	x_1	y_3	y_2	y_1
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	?	?
1	0	1			
1	1	0			
1	1	1			

уровнемер показывает, что уровень жидкости опустился до $u = -1,2$ м, то включается насос малой производительности; если до значения $u = 0,8$ м, то включается насос большой производительности, а насос малой производительности выключается; если до значения $u = 0,5$ м, то включаются оба насоса, а при $u = 0,10$ м должен быть подан аварийный сигнал. В этом случае вместо одного входа уровнемера x_1 можно ввести еще два фиктивных входа

x_2 и x_3 . При этом имеются восемь возможных комбинаций на этих входах: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111. Пяти различным сигналам, поступающим от датчика, можно однозначно поставить в соответствие пять двоичных кодов. При аппаратной реализации системы это означает что непрерывные показания уровнемера преобразуются преобразователем аналог — код в трехзначное двоичное число. Каждый разряд этого числа мы формально рассматриваем как самостоятельный вход. Двоичное кодирование применяется в большинстве систем, потому что логический автомат является дискретной системой, а дискретные системы управления, как правило, строятся на базе двоичных элементов. Выходные сигналы автомата y_1, y_2, \dots, y_m также рассматриваются как двоичные переменные. Если устройство управления имеет n входов и m выходов, то можно составить таблицу, в которой в левой части перечислить все 2^n возможных комбинаций входных сигналов, а в правой части — 2^m комбинаций выходных сигналов.

Вернемся к примеру с двумя насосами и уточним обозначения: если $0,8 < u \leq 1,2$, то $x_1 = 1$; если $0,5 < u \leq 0,8$, то $x_2 = 1$; если $0,1 < u \leq 0,5$, то $x_1 = x_2 = 1$; если $u \leq 0,1$, то $x_3 = 1$, при $y_1 = 1$ включен насос малой производительности, при $y_2 = 1$ включен насос большой производительности, при $y_3 = 1$ включен аварийный сигнал.

Составим автоматную таблицу (табл. 7.1).

Как из нее видно, описание оказалось неполным. Не было оговорено, что делать с насосами при подаче аварийного сигнала, поэтому пятая строка выходов не заполнена в позициях y_2 и y_1 . На-

сосы можно оставить включенными (выходная комбинация 111), либо отключить (100), либо оставить включенным любой из них (101 или 110). Таким образом, при заполнении автоматной таблицы сразу обнаруживается неполнота словесного описания работы схемы управления. Входные комбинации 101, 110, 111 называются неиспользуемыми, они никогда не появляются с выхода датчика, если преобразователь непрерывного сигнала датчика в двоичный код работает исправно. В рассмотренном случае после дополнительных указаний относительно заполнения пятой строки все пять строк будут заполнены. Это означает, что система управления представляет собой комбинационную схему или автомат без памяти.

Таблица 7.2

Состояния	Входы				
	000	100	010	011	100
z_0	z_0	z_1	z_2	z_3	z_0
z_1	z_0	z_1	z_2	z_3	z_1
z_2	z_0	z_1	z_2	z_3	z_2
z_3	z_0	z_1	z_2	z_3	z_3

Иногда разработчику не удастся составить таблицу так, чтобы каждой входной комбинации значений переменных соответствовала единственная возможная комбинация значений выходных переменных. Например, в рассмотренном выше при-

мере может быть задано, что при входной комбинации 100 включается аварийный сигнал ($y_3=1$), а значения y_2 и y_1 зависят от состояния исполнительных механизмов в момент возникновения аварийной ситуации. Если насосы были включены, то их надо оставить включенными, а если нет, то включать их не следует. Таким образом, неоднозначность в пятой строке табл. 7.1 нельзя устранить, не имея дополнительной информации о состоянии, в котором находилась система. Система управления должна не только получать входные сигналы, но и «помнить» состояние, в котором она находилась. Такие системы называются автоматом с памятью.

Обозначим возможные состояния системы через z_0, z_1, \dots, z_v . Общее число возможных состояний системы в нашем примере с насосами равно 4, т. е. $v=3$. Пусть z_0 обозначает начальное состояние — оба насоса выключены, z_1 — включен маломощный насос, z_2 — включен насос большой мощности, z_3 — включены оба насоса. Информацию о смене состояний системы в зависимости от комбинации сигналов на входе можно представить в виде так называемой таблицы переходов (табл. 7.2).

Поясним эту таблицу с помощью фрагмента графа состояний (рис. 7.1), где представлено графическое изображение первой строки таблицы. При входной комбинации 000 начальное состояние не должно измениться, этому соответствует дуга, выходящая из начального состояния и входящая в него же. Эта дуга обозначена 000. При входной комбинации 001 система переходит в состояние z_1 , при 010 — в состояние z_2 , при 011 — в состояние z_3 . Если система находилась в состоянии z_0 и поступил сигнал 100, то в соответствии с вышеупомянутым условием она должна остаться в этом же

состоянии z_0 . Следовательно, надо бы построить еще одну дугу, выходящую из z_0 и входящую в z_0 . Однако чтобы не загромождать граф состояний, оставляем одну дугу, но помечаем ее вторым условием 100. Такие же фрагменты можно построить относительно состояний z_1, z_2, z_3 , которые будут аналогичны фрагменту для z_0 , и объединить их в графы переходов. Этот граф, очевидно, будет симметричен относительно вершин z_0, z_1, z_2, z_3 .

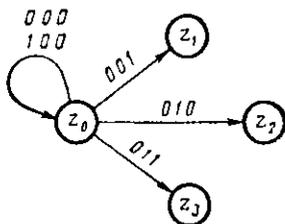


Рис. 7.1

Таблица 7.3

Состояния	Выход				
	000	001	010	011	100
z_0	000	001	010	011	100
z_1	000	001	010	011	101
z_2	000	001	010	011	110
z_3	000	001	010	011	111

Однако таблица переходов не содержит полной информации о работе системы управления — в ней отсутствуют данные о комбинациях выходных сигналов. Для задания этих комбинаций используется вторая таблица, которая называется таблицей выходов

Таблица 7.4

Состояния	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	
Входы	0	z_0	z_2	z_3	z_1	z_6	z_7	z_2	z_0
	1	z_1	z_7	z_2	z_4	z_3	z_6	z_7	z_5

Таблица 7.5

Состояния	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7
Входы	0	0	0	1	0	0	0	0
	1	0	1	0	0	0	1	1

(табл. 7.3). Совокупность двух таблиц определяет функционирование автомата с памятью. По существу, в неявном виде информация таблицы выходов заключается в таблице переходов — все столбцы обеих таблиц повторяют значения, однозначно связанные по смыслу. Однако наличие двух таблиц облегчает формальный переход к структуре системы управления при ее реализации.

Описание автомата с помощью таблиц относительно громоздко. Очевидно, что чем меньше число состояний, тем проще автоматное описание, поэтому стремятся минимизировать число внутренних состояний проектируемого автомата. Рассмотрим один из алгоритмов, решающих эту задачу.

Пусть автомат с памятью задан таблицей переходов (табл. 7.4) и таблицей выходов (табл. 7.5). Чтобы можно было показать логику работы алгоритма, число состояний увеличено до 8 ($v=7$) по сравнению с предыдущим примером, где $v=3$. Число входов и выходов для упрощения уменьшено до одного (имеем x_1 вместо x_1, x_2, x_3 ; y_1 вместо y_1, y_2, y_3). Процесс минимизации состоит из двух этапов: первого (подготовительного) и второго (основного), который повторяется многократно до завершения решения задачи.

На первом этапе минимизации просматриваем таблицу выходов (табл. 7.5) и выделяем подмножества состояний, для которых значения выходов совпадают. Таких подмножеств будет три: $a_1 = \{z_0, z_3, z_4, z_7\}$, выход $y_1=0, y_2=0$; $b_1 = \{z_1, z_5, z_6\}$, выход $y_1=0, y_2=1$; $c_1 = \{z_2\}$, выход $y_1=1, y_2=0$.

Эти подмножества образуют первое разбиение. В каждом подмножестве попарно сравниваем столбцы таблицы переходов (табл. 7.4). Выделяем те пары состояний, которые имеют одинаковые столбцы. В данном примере есть только одна такая пара, это состояния z_1 и z_6 в подмножестве b_1 , у которых столбцы равны z_2, z_7 . Состояния z_1 и z_6 называются эквивалентными, поскольку при нахождении автомата в любом из них при подаче на вход любой последовательности сигналов на выходе будет получаться одинаковая последовательность сигналов. Эти два состояния заменяем одним, например z_1 . Перепишем теперь табл. 7.4, внося следующие изменения: вычеркнем столбец с состоянием z_6 , в остальных столбцах заменим z_6 на z_1 , все состояния заменим символами соответствующих подмножеств, в которые они попали при первом разбиении. В результате получаем табл. 7.6.

Таблица 7.6

Состояния	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_7
Входы	0	a_1	c_1	a_1	b_1	b_1	a_1
	1	b_1	a_1	c_1	a_1	a_1	b_1

Таблица 7.7

Состояния	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_7
Входы	0	a_2	e_2	b_2	c_2	c_2	a_2
	1	c_2	a_2	e_2	b_2	b_2	c_2

Таблица 7.8

Состояния	z_0	z_1	z_2	z_3	z_5	z_7	
Входы	0	z_0	z_2	z_1	z_1	z_7	z_0
	1	z_1	z_7	z_2	z_3	z_1	z_5

Таблица 7.9

Состояния	z_0	z_1	z_2	z_3	z_5	z_7	
Входы	0	0	0	1	0	0	0
	1	0	1	0	0	1	0

Дальше алгоритм состоит из повторения однообразных итерационных шагов (второй этап). Рассмотрим второй шаг (получение второго разбиения). Просматриваем табл. 7.6 и в одно подмножество отнесем те состояния, которые ранее входили в одно подмножество первого разбиения и в то же время их столбцы в табл. 7.6 совпадают. Из подмножества a_1 такому условию удовлетворяют две пары состояний: $a_2 = \{z_0, z_7\}$ — столбцы a_1, b_1 и $b_2 = \{z_3, z_4\}$ — столбцы b_1, a_1 . В подмножествах b_1 и c_1 состояний со столбцами, совпадающими в табл. 7.6, нет, поэтому эти подмножества дают одноэлементные подмножества второго разбиения: $c_2 = \{z_1\}$; $d_2 = \{z_5\}$; $e_2 = \{z_2\}$. Заменяем состояния в исходной таблице переходов (табл. 7.4) на символы подмножества второго разбиения (табл. 7.7), третье разбиение проводим аналогично второму разбиению: проверяем совпадение столбцов у состояний, вошедших в одно и то же подмножество второго разбиения. Получаем $a_3 = \{z_0\}$; $b_3 = \{z_7\}$; $c_3 = \{z_3, z_4\}$; $d_3 = \{z_1\}$; $e_3 = \{z_5\}$; $f_3 = \{z_2\}$. Так как на третьем шаге получено подмножество c_3 , совпадающее с b_2 на втором шаге, то оно является подмножеством, объединяющим эквивалентные состояния. Остальные подмножества третьего разбиения одноэлементны, поэтому все остальные состояния автомата неэквивалентны. На этом заканчиваются итерационные шаги минимизации числа состояний автомата.

Состояния z_3 и z_4 заменяются одним состоянием, например z_3 . В результате таблицы переходов и выходов автомата приобретают вид табл. 7.8 и табл. 7.9 соответственно.

Таким образом, в данном примере число состояний сокращено с 8 до 6. Эквивалентность состояний z_1 и z_6 легко обнаруживается непосредственно из табл. 7.4 и 7.5. Однако эквивалентность z_3 и z_4 не столь очевидна, поэтому при большом объеме таблиц следует пользоваться алгоритмом минимизации числа состояний, который может быть реализован с помощью ЭВМ. Достоинством автоматных таблиц для описания автоматов является их простота, недостатком — некомпактность. Так, например, если число входов табл. 7.1 увеличить до 10, то число строк будет $2^{10} = 1024$.

Алгебра высказываний. С помощью аппарата алгебры высказываний можно более компактно представлять описание работы автоматов. Этот математический аппарат достаточно подробно описывается в курсах по вычислительной технике, так как ЭВМ тоже представляет собой автомат. Поэтому отметим только основные положения алгебры высказываний. Высказывание, как и двоичный разряд, может принимать два значения: истинному высказыванию приписывается значение 1, ложному — значение 0. Высказывания могут иметь самое различное содержание. Например, уровень показывает значение меньше 0,1 м, насос большой мощности включен, показания температуры датчика превышают значение 20°C и т. п. Основными операциями в алгебре высказываний являются отрицание или инвертирование, дизъюнкция и конъюнкция. Если исходное высказывание обозначено x , то его отрицание или противоположное высказывание обозначают \bar{x} , дизъюнкцию высказываний x_1 и x_2 обозначают $x_1 \vee x_2$ конъюнкцию обозначают $x_1 \wedge x_2$.

С помощью операций отрицания, дизъюнкции и конъюнкции можно описывать достаточно сложные высказывания, связанные с функционированием проектируемой системы управления. Введем для рассмотренного выше примера с двумя насосами следующие высказывания: y_1 — включен маломощный насос, y_2 — включен насос большой мощности, y_3 — включен аварийный сигнал. Пять возможных показаний входного сигнала с уровня также закодируем с помощью трех фиктивных входных сигналов, используя операции отрицания и конъюнкции: если $1,2 < u$, то $\bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1$, если $0,8 < u < 1,2$, то $\bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1$, если $0,5 < u \leq 0,8$, то $\bar{x}_3 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_1$, если $0,1 < u \leq 0,5$, то $\bar{x}_3 \wedge x_2 \wedge x_1$, если $u < 0,1$, то $x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1$. В последнем выражении для x_2 и x_1 использован знак \sim , который в данном случае означает неопределенность в значениях x_2 и x_1 (переменные x_2 и x_1 могут быть со знаком отрицания и без этого знака). При введенных обозначениях табл. 7.1 может быть следующим образом заменена выражениями алгебры высказываний:

$$y_1 = (\bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1) \vee (\bar{x}_3 \wedge x_2 \wedge x_1); \quad y_2 = (\bar{x}_3 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_1) \vee (\bar{x}_3 \wedge x_2 \wedge x_1).$$

$$y_3 = x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1.$$

Таблицы переходов также могут быть описаны с помощью алгебры высказываний. Например, фрагмент графа переходов

(рис. 7.1) будет иметь ту же структуру, но вместо комбинации входных сигналов в двоичном коде на дугах графа указываются соответствующие выражения (рис. 7.2).

Сложные высказывания поддаются упрощениям на основании определенных свойств отрицания, дизъюнкции, конъюнкции. Например, над дугой, идущей от состояния z_0 к z_0 , на рис. 7.2 написано выражение $(\bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1) \vee (x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1)$. Конъюнкцию отрицаний $\bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1$ можно вынести за скобки, в результате получаем $\bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 (\bar{x}_3 \vee x_3) = \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1$, так как очевидно, что высказывание $(\bar{x}_3 \vee x_3)$ всегда истинно, т. е. равно 1. Получим, что исходное выражение эквивалентно тому, что на входе нет одновременно сигналов x_2 и x_1 .

Секвенциальное описание. Автоматные таблицы и алгебра высказываний не всегда могут быть использованы при проектировании достаточно сложных систем. Хотя при использовании алгебры высказываний описание функционирования автомата и может быть несколько уменьшено по сравнению с автоматными таблицами, но все же оно остается громоздким. В реальной системе большинство комбинаций входных сигналов не встречается в практике работы системы из-за различных технологических ограничений и структуры объекта управления. Кроме того, трудно ожидать, что заказчик системы может сообщить разработчику всю информацию, необходимую для заполнения автоматных таблиц или записи всех возможных выражений алгебры высказываний. Поэтому для описания основных необходимых условий функционирования автомата может быть использована секвенциальная запись алгоритма, которая основана на введенных выше понятиях состояния системы и операциях алгебры высказываний. При этом нет необходимости в перечислении всех комбинаций входов системы.

Секвенцией называется выражение типа «если α , то β » и обозначается $\alpha \vdash \beta$. Под α и β понимаются какие-то логические высказывания, состоящие из логических переменных x_i, y_i, z_i и операций отрицания, дизъюнкции, конъюнкции. Любую автоматную таблицу переходов и выходов можно описать с помощью следующих двух видов секвенций:

$$\begin{aligned} & \tilde{x}_{i_1} \tilde{x}_{i_2} \dots \tilde{x}_{i_n} z_i \vdash z_j; \\ & \tilde{x}_{i_1} \tilde{x}_{i_2} \dots \tilde{x}_{i_n} z_i \vdash \tilde{y}_{k_1} \tilde{y}_{k_2} \dots \tilde{y}_{k_m}, \end{aligned}$$

где \tilde{x}_i, \tilde{y}_k — значения входных и выходных переменных; z_i, z_j — состояния системы.

Переменные системы (x, y, z) соединяют знаками дизъюнкции и конъюнкции. Например, если вместо табл. 7.2 требуется описать только условия, заложенные в первом и последнем столбцах, то получим следующее секвенциальное описание таблицы переходов автомата:

$$\begin{aligned} & \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_0 \vdash z_0; \quad \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_1 \vdash z_0; \\ & \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_2 \vdash z_0; \quad \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_3 \vdash z_0; \\ & x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_0 \vdash z_0; \quad x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_1 \vdash z_1; \\ & x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_2 \vdash z_2; \quad x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_3 \vdash z_3. \end{aligned}$$

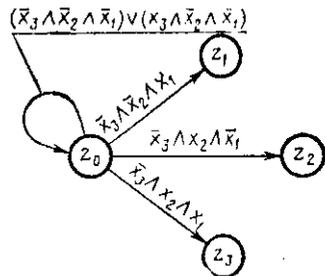


Рис. 7.2

Для второго и последнего столбцов таблицы выходов (табл. 7.3) соответственно получим:

$$\begin{aligned} \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1 \wedge z_0 \vdash y_3 \wedge \bar{y}_2 \wedge \bar{y}_1; & \quad \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1 \wedge z_1 \vdash \bar{y}_3 \wedge \bar{y}_2 \wedge y_1; \\ \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1 \wedge z_2 \vdash \bar{y}_3 \wedge \bar{y}_2 \wedge y_1; & \quad \bar{x}_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_1 \wedge z_3 \vdash \bar{y}_3 \wedge \bar{y}_2 \wedge y_1; \\ x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_0 \vdash y_3 \wedge \bar{y}_2 \wedge \bar{y}_1; & \quad x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_1 \vdash y_3 \wedge \bar{y}_2 \wedge y_1; \\ x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_2 \vdash y_3 \wedge y_2 \wedge \bar{y}_1; & \quad x_3 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge z_3 \vdash y_3 \wedge y_2 \wedge y_1. \end{aligned}$$

Для секвенциальных описаний также имеются возможности их упрощения.

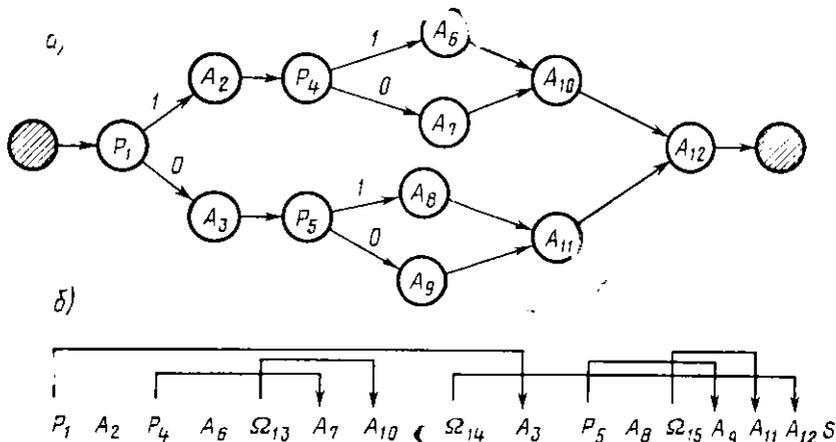


Рис. 7.3

Логические схемы алгоритмов (ЛСА). Более компактными и универсальными по сравнению с рассмотренными выше методами описания автоматов являются логические схемы алгоритмов. ЛСА особенно удобны при описании алгоритмов, содержащих большое число различных логических условий и вычислительных операций. ЛСА содержат два основных типа операторов: P_i — логические, A_i — функциональные. Например, операторами типа A_i являются оператор вычисления искомого выражения, исполнительный оператор (включить кондиционер, выключить насос). Графическое изображение ЛСА называется *граф-схемой алгоритма*. Каждый оператор A_i имеет одну выходящую дугу, следовательно, независимо от результата действия A_i вслед за ним выполняется один и тот же оператор, в который ведет дуга из A_i . Оператор типа P_i имеет две выходящие дуги, которые помечаются символами «да» «нет» или «—» «+», или «0» «1». Оператор P_i всегда проверяет некоторое условие. Если условие выполнено, то следующим выполняется оператор, в который ведет дуга с символом 1; если условие не выполнено, то выполняется оператор, на который указывает дуга с символом 0. Пример граф-схемы алгоритма функционирования автомата показан на рис. 7.3, а, где начальный и конечный операторы заштрихованы.

Вместо граф-схемы может использоваться менее наглядная, но более компактная форма записи. В этом случае операторы записываются в строку слева направо в порядке их выполнения. При этом начальный оператор не записывается вообще, так как полагается, чтобы он всегда находился в начале строки, конечный оператор обозначается буквой S . Порядок выполнения операторов в строке принимается следующим. Если выполнялся оператор A_i , то следом за ним выполняется оператор, стоящий справа от него. Если же выполняется логический оператор P_i , то дальнейший порядок выполнения операторов зависит от соответствующего логического условия. При выполнении условия следующим выполняется оператор, записанный справа от P_i . Если условие не выполнено, то выполняется оператор, к которому идет стрелка от оператора P_i . Для удобства записи еще вводится оператор тождественно ложного условия, т. е. оператор безусловного перехода, который обозначается через Ω . Этот оператор всегда передает управление по стрелке. С учетом указанных условий граф-схема на рис. 7.3, а будет записана, как показано на рис. 7.3, б.

Здесь возможны несколько вариантов последовательностей выполнения операторов. Если, например, выполняются все логические условия ($P_1 = P_4 = P_5$), то порядок выполнения операторов будет следующий: $P_1 A_2 P_4 A_6 A_{10} A_{12} S$. Если $P_1 = P_4 = P_5 = 0$, то получаем последовательность $P_1 A_3 P_5 A_9 A_{11} A_{12} S$.

При большом числе логических операторов изображение переходов в виде совокупности стрелок становится неудобным. В этом случае вместо того, чтобы от каждого оператора вести стрелку к тому оператору, который должен выполняться, поступают следующим образом: справа от P_i ставится стрелка вверх с указанием номера оператора, от которого она идет, а перед оператором, к которому должна была идти эта стрелка, ставится стрелка концом вниз, отмеченная тем же номером. Рассмотренная выше запись алгоритма принимает при этом следующий вид:

$$P_1 \uparrow A_2 P_4 \uparrow A_6 \Omega_{13} \downarrow A_7 \downarrow A_{10} \Omega_{14} \uparrow A_3 P_5 \uparrow A_8 \Omega_{15} \downarrow A_9 \downarrow A_{11} \downarrow A_{12} S.$$

При управлении технологическим процессом часто бывает необходимо отразить тот факт, что выдача некоторых выходных сигналов должна происходить одновременно. Чтобы иметь возможность отразить параллельность выполнения некоторых операторов, вводятся дополнительные обозначения и операторы. Часть логической схемы автомата, заключенная в фигурные скобки, называется ветвью. Перед каждой ветвью в квадратных скобках помещается символ, обозначенный буквой греческого алфавита. Этот символ называется отметкой ветви. Через Π ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$) обозначается оператор, который указывает, что ветви с отметками $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ следует выполнять параллельно. Оператор W ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$) вводится, чтобы указать на то, что выполнение оператора, стоящего справа, возможно лишь при условии завершения выполнения ветвей с отметками $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$.

Приведем пример использования указанных дополнений. Запись

$A_1 A_2 A_3 P(\alpha, \beta, \gamma) \{A_4 A_5\} [\beta] \{A_6 A_7\} [\gamma] \{A_8 A_9\} W(\alpha, \beta) \{b\} \{A_{10}\} W(\gamma, b) A_{11} S$

означает: вначале выполняются операторы A_1, A_2, A_3 , затем начинается параллельное выполнение трех ветвей с отметками α, β и γ , после выполнения ветвей с отметками α и β начинается выполняться ветвь с отметкой b , после завершения выполнения ветвей с отметками γ и b будут выполнены операторы A_{11} и S .

Сопоставление различных методов описания алгоритмов. Очевидно, что рассмотренные методы описания алгоритмов взаимозаменяемы, поэтому в каждом конкретном случае надо выбирать наиболее удобный из них. От графа, автоматных таблиц или системы секвенций можно перейти к записи условий работы проектируемой системы в виде выражений алгебры высказываний или логических схем автоматов (ЛСА). Графы и автоматные таблицы очень громоздки, кроме того, они часто содержат излишнюю информацию, например в случае, когда система управления реализует жесткую последовательность воздействий на технологический процесс и многие сочетания комбинаций входов и внутренних состояний не встречаются в процессе работы. Описание в виде ЛСА более компактно, при этом указан жесткий порядок выполнения действий по управлению. Компактность здесь достигается тем, что функциональные операторы A_i могут реализовать достаточно сложные функции. В ЛСА возможно использовать блочное описание, когда общая ЛСА представляется в виде композиции частных ЛСА, которые затем описываются отдельно. Этим достигается большая наглядность описания алгоритма. Однако при использовании ЛСА трудно обнаружить неполноту или противоречивость технического задания на функционирование системы. Кроме того, для ЛСА нет пока достаточно эффективных методов минимизации записи, содержание операторов A_i приходится оговаривать на естественном языке, что нередко приводит к неоднозначности понимания.

Для описания алгоритмов используют алгоритмические языки типа АЛГОЛ, ФОРТРАН, ПЛ-1. Если в систему управления включена универсальная вычислительная машина, то с помощью транслятора с алгоритмического языка получается сразу готовая программа для управления, что является большим достоинством алгоритмических языков. Однако запись на алгоритмическом языке не является наглядной, затруднена проверка полноты, непротиворечивости задания и обнаружения ошибок при его записи. При программировании в машинных кодах объем программы и время ее исполнения значительно меньше, чем при программировании на алгоритмических языках. А для управляющей ЭВМ это может иметь существенное значение.

Кроме учета свойств компактности, наглядности и возможности обнаружения недочетов в техническом задании следует учитывать и структурный способ реализации проектируемой системы. Если систему управления предполагается делать структурно, как некоторую логическую сеть или композицию автоматов, то удобнее применить автоматное описание ее функционирования. Если предполагается создать специализированную управляющую вычислитель-

ную машину, то выгоднее использовать ЛСА. При включении универсальной ЭВМ в качестве центрального устройства управления предпочтительнее использовать алгоритмические языки.

§ 7.2. МЕТОДЫ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

При построении алгоритмического обеспечения системы управления недостаточно наличия методов, позволяющих описывать регламентированные режимы работы. Часто возникает потребность в поиске оптимальных (наилучших) режимов работы в а) ходе процесса управления. Рассмотрим нагревательную установку, в которой требуется регулировать подачу воздуха с целью уменьшения общего расхода топлива для поддержания заданной температуры. При большой подаче воздуха он

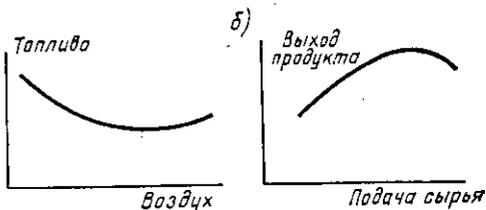


Рис. 7.4

поступает с избытком и охлаждает камеру сгорания, а при малой подаче топливо сгорает не полностью. Качественный характер зависимости расхода топлива от подачи воздуха показан на рис. 7.4, а. Показателем качества управления в данном случае является расход топлива, требуется определить оптимальное количество воздуха, при котором показатель качества достигает минимума. В реальных условиях такая задача не всегда может быть решена заранее и решаться должна по ходу процесса, так как нагревательный режим может изменяться в зависимости от внешних температурных условий, от качества топлива и т. п.

Другим примером поиска оптимального режима является работа агрегата для размельчения твердых материалов. Такие агрегаты (дробилки) могут применяться, например, на химических станциях приготовления растворов для жидкостной обработки кожевеного сырья. После измельчения материала в дробилке он пропускается через классификатор. Если крупность измельченного продукта выше заданной, то классификатор не пропускает такие частицы и возвращает их снова на переработку в дробилку. Выход готового продукта увеличивается до некоторого максимального значения [при увеличении подачи сырья (рис. 7.4, б)], а затем начинается уменьшаться, так как дробилка не успевает раздробить сырье должным образом. В данной задаче показателем качества работы системы является выход продукта, а управляющим воздействием — скорость подачи сырья. Требуется определить оптимальную скорость, при которой показатель качества максимален.

При решении оптимизационных задач можно выделить два основных этапа: формализация задачи, выбор и применение определенного метода решения. Формализация задачи в свою очередь

состоит из словесной формулировки задачи (см. рассмотренные выше два примера), введения обозначений для переменных задачи, записи целевой функции (критерия оптимальности) на базе введенных обозначений, записи ограничений на каждую из переменных задачи в отдельности (автономные ограничения), записи связей между переменными в виде ограничений типа равенств или неравенств. Второй этап определяется целым рядом условий. На выбор соответствующего метода влияют: 1) наличие или отсутствие ограничений на переменные; 2) вид применяемых ограничений — неравенства или равенства, выпуклые или невыпуклые, линейные или нелинейные; 3) характер переменных — непрерывные или дискретные; 4) вид целевой функции — линейная или нелинейная, одноэкстремальная или многоэкстремальная, скалярная величина или вектор; 5) уровень помех, с которыми измеряются входные и выходные переменные.

Наиболее известны методы исследования функций классического анализа, метод множителей Лагранжа, градиентные методы, методы вариационного исчисления, линейное программирование, принцип максимума Понтрягина, методы нелинейного программирования [2].

Сопоставление различных методов оптимизации. Методы исследования функций математического анализа применяют для решения несложных задач, когда известно аналитическое выражение целевой функции, что позволяет найти также аналитическое выражение для производных этой функции. Однако систему уравнений, которые получают приравнивая к нулю производные, редко удается решить аналитическим путем, поэтому при решении реальных задач, как правило, применяют вычислительные машины.

Метод множителей Лагранжа применяют для решения задач такой же сложности, как и при использовании классических методов исследования функций, но при наличии ограничений типа равенств на независимые переменные. При этом к условию получения аналитических выражений для производных от целевой функции добавляется аналогичное условие относительно аналитического вида уравнений ограничений. Ниже этот метод будет рассмотрен более подробно.

Градиентные методы могут применяться при относительно сложном виде целевой функции, когда вместо численного решения системы уравнений оказывается удобнее использовать итерационную процедуру пошагового приближения к оптимальному решению. Кроме того, градиентные методы можно использовать, если невозможно получить аналитические выражения для производных целевой функции, и в случае, когда аналитическое выражение самой функции отсутствует, а ее значения получаются путем расчета по алгоритму или непосредственным измерением на технологическом процессе. В этом параграфе основное внимание уделяется именно градиентным методам, которые наиболее легко реализуются в алгоритмах процессов управления.

Метод вариационного исчисления используют для решения за-

дач, в которых целевые функции представляются в виде функционалов, решениями которых служат неизвестные функции. Такие задачи возникают при статической оптимизации процессов с распределенными параметрами или в задачах динамической оптимизации.

Линейное программирование применяют для решения оптимизационных задач с линейными выражениями для целевой функции и линейными ограничениями на область изменения переменных. Эти задачи возникают при оптимальном планировании производства с ограниченным количеством ресурсов.

Динамическое программирование — эффективный метод решения задач оптимизации дискретных многостадийных процессов, для которых целевая функция представляется в виде суммы целевых функций отдельных стадий (аддитивная целевая функция). Закон управления на каждой стадии находят путем решения частных задач оптимизации последовательно для всех стадий процесса. Результаты решения, как правило, не могут быть выражены в аналитической форме, а получаются с помощью ЭВМ в виде таблиц.

Принцип максимума применяют для оптимизации процессов, описываемых системами дифференциальных уравнений. Нахождение оптимального решения сводится к задаче интегрирования системы дифференциальных уравнений процесса при граничных условиях, заданных на обоих концах интервала интегрирования, т. е. к решению краевой задачи. На область изменения переменных могут быть наложены ограничения.

Методы нелинейного программирования используют для решения оптимизационных задач с нелинейными целевыми функциями. На независимые переменные могут быть наложены ограничения в виде нелинейных соотношений, которые имеют вид равенств или неравенств. Методы нелинейного программирования объединяют большую группу численных методов, каждый из которых приспособлен для решения задач соответствующего класса. Выбор того или иного метода определяется сложностью вычисления целевой функции и сложностью ограничивающих условий, необходимой точностью решения, производительностью имеющейся вычислительной машины и т. п. Методы нелинейного программирования применяют, когда ни один из перечисленных выше методов не удается использовать для решения поставленной задачи.

Декомпозиция задач оптимизации. Если поставленная задача из-за характера целевой функции, ограничений или большой размерности (велико число переменных) настолько сложна, что не может быть решена ни одним из известных методов, то применяют декомпозицию задачи, т. е. разбиение ее на совокупность более простых задач. Это легко сделать, если имеем аддитивную целевую функцию или функцию, которую путем некоторых допущений можно представить аддитивной функцией вида

$$F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n F_i(\vec{x}).$$

В этом случае поиск максимума или минимума целевой функции $F(\vec{x})$ вектора аргумента \vec{x} сводится к поиску максимума или минимума каждой их составляющих функций $F_i(x)$, что облегчает решение задачи.

Решение оптимизационных задач также упрощается, если их удастся разбить на такие подзадачи, что решение первой из них может быть выполнено независимо от остальных, затем находится решение второй подзадачи и т. д. Здесь имеем аналогию с решением системы уравнений, когда ее удается разделить на подсистемы таким образом, что первую из них решают независимо от остальных, полученное решение подставляют во вторую подсистему, решают ее обособленно и т. д.

Необходимость решать задачу большой размерности обычно связана с тем, что оптимальное значение одной из переменных решения зависит от значений других переменных. Такая зависимость может быть обусловлена структурой целевой функции или ограничений или и того и другого. Если причиной связи оптимальных значений отдельных переменных являются некоторые ограничения, то иногда удается свести исходную задачу к другой задаче, в которой отсутствуют эти связывающие условия. При этом вновь полученная задача распадается на ряд задач меньшей размерности. Примером такого подхода является применение метода множителей Лагранжа, который рассмотрен ниже. Возможны и другие пути декомпозиции задач оптимизации.

В ряде вузов методам оптимизации посвящаются специальные большие курсы. В рамках этого параграфа мы рассмотрим подробнее только некоторые из указанных выше подходов к решению оптимизационных задач.

Основной градиентный метод. Обычно градиентные методы применяются для поиска экстремума целевых функций от непрерывных аргументов как при отсутствии, так и при наличии помех.

В математической формулировке задача ставится следующим образом: найти \vec{x}_0 такое, что

$$F(\vec{x}_0) = \max_{\vec{x}} F(\vec{x}) \quad (7.1)$$

или

$$F(\vec{x}_0) = \min_{\vec{x}} F(\vec{x}), \quad (7.2)$$

где \vec{x}_0 — вектор оптимального решения задачи; $F(\vec{x})$ — целевая функция $\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — вектор переменных, которые можно изменять в процессе решения задачи. Например, $F(\vec{x}) = 2x_1 + 3x_2 + x_3^2 - 4x_1x_2x_3$ ($n=3$).

Градиентные методы основываются на анализе значения градиента целевой функции $\nabla F(\vec{x})$:

$$\nabla F(\vec{x}) = \left\{ \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_1}, \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_n} \right\} \Big|_{\vec{x}=\vec{x}^*}, \quad (7.3)$$

где \vec{x}^k — фиксированное значение \vec{x} .

Если определяется $\max F(\vec{x})$, то осуществляется такое изменение координат вектора $\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, которое соответствует увеличению $F(\vec{x})$, а если ставится задача найти $\min F(\vec{x})$, то выбирается значение \vec{x} , вызывающее уменьшение $F(\vec{x})$. При этом постепенное приближение к оптимальному значению аргумента осуществляется на основании формулы

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k \pm \alpha \nabla F(\vec{x}^k) \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (7.4)$$

В данной формуле берется знак (+), если определяется $\max F(\vec{x})$, и знак (—), если ищется $\min F(\vec{x})$; α — скалярная величина, которая определяет значение шага при движении по направлению градиента (+) или антиградиента (—); \vec{x}^k — вектор предыдущего значения аргумента (значение аргумента на шаге k); \vec{x}^{k+1} — вектор последующего значения аргумента, т. е. его значение на $k+1$ шаге. Начальное значение аргумента \vec{x}^0 выбирается произвольно в пределах области допустимых значений. Для представленного выше примера при поиске $\max F(\vec{x})$ формула (7.4) с учетом (7.3) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} x_1^{k+1} &= x_1^k + \alpha \left. \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_1} \right|_{\vec{x}^k} = x_1^k + \alpha (2 - 4x_2^k x_3^k); \\ x_2^{k+1} &= x_2^k + \alpha \left. \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_2} \right|_{\vec{x}^k} = x_2^k + \alpha (3 - 4x_1^k x_3^k); \\ x_3^{k+1} &= x_3^k + \alpha \left. \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_3} \right|_{\vec{x}^k} = x_3^k + \alpha (2x_3^k - 4x_1^k x_2^k). \end{aligned}$$

Показатели качества решения — точность и скорость сходимости к оптимальному значению — зависят от степени выпуклости $F(\vec{x})$, от значения α и выбора начального приближения \vec{x}^0 . Коэффициент α подбирается исследователем на основе предварительного анализа характера $F(\vec{x})$. Если значение α мало, то процесс медленно сходится, если велико, то оптимальное значение аргумента определяется с большой погрешностью. Иногда используют переменное значение $\alpha = \alpha^k$, которое зависит от номера шага k . Подробнее этот подход будет рассмотрен ниже.

Если аналитическое выражение для $F(\vec{x})$ отсутствует (отсутствует математическая модель технологического процесса) или вычисление производных $F(\vec{x})$ вызывает затруднения, то для опреде-

ления каждой составляющей градиента $F(\vec{x})$ используется ее приближенное значение

$$\left. \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_j} \right|_{\vec{x}=\vec{x}^k} \cong \frac{F(x_1^k, \dots, x_j^k + \Delta x_j, \dots, x_n^k) - F(x_1^k, \dots, x_j^k, \dots, x_n^k)}{\Delta x_j} \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (7.5)$$

При этом значения $F(x_1^k, \dots, x_j^k + \Delta x_j, \dots, x_n^k)$, $F(x_1^k, \dots, x_j^k, \dots, x_n^k)$ подсчитывают по выражению для $F(\vec{x})$ или определяют непосредственным измерением на объекте (при отсутствии математической модели). Приращение одной из координат целевой функции Δx_j выбирают достаточно большим, чтобы обеспечить приращение целевой функции, превышающее погрешность вычислений (или измерений), но в то же время Δx_j должно быть настолько мало, чтобы функцию $F(\vec{x})$ можно было считать приближенно линейной в пределах приращения Δx_j .

Процесс решения прекращается при выполнении условия

$$F(\vec{x}^{k+1}) - F(\vec{x}^k) \leq 0, \quad (7.6)$$

если определяется $\max F(\vec{x})$, или

$$F(\vec{x}^{k+1}) - F(\vec{x}^k) \geq 0, \quad (7.6a)$$

если определяется $\min F(\vec{x})$.

В качестве оптимального вектора переменных принимается вектор $\vec{x}_0 = \vec{x}^k$. Из соображений точности условие (7.6) или (7.6a) должно дополняться условием

$$|F(\vec{x}^{k+1}) - F(\vec{x}^k)| < \delta, \quad (7.7)$$

где δ — заданная погрешность. Если условие (7.6) (или 7.6a) выполнено, а условие (7.7) нет, то требуется уточнить решение при меньшем значении коэффициента α .

Рассмотренный подход может применяться для одноэкстремальных функций, потому что метод градиента не гарантирует определение абсолютного экстремума при наличии у $F(\vec{x})$ нескольких локальных экстремумов. Пример остановки процесса поиска в локальном минимуме для одномерной задачи представлен на рис. 7.5 (точка x_1^3). Непрерывность координат аргумента необходима для определения градиента через значения производных.

Градиентный метод может применяться только при выпуклой области допустимых значений \vec{x} , пример которой для двухмерной задачи дан на рис. 7.6, а. Если область, заданная ограничениями, не выпукла (рис. 7.6, б), то градиентный метод не всегда обеспечивает нахождение экстремума даже одноэкстремальной целевой функции. Если на рис. 7.6, б точкой 1 обозначено исходное значе-

ние аргумента \vec{x}^0 , точкой 2 оптимальное значение \vec{x}_0 , а стрелкой показано направление градиента, то при движении по этому направлению процесс остановится на границе в точке 3, если не принять специальных мер, обеспечивающих движение вдоль границы области.

Метод наискорейшего спуска. Кроме основного градиентного метода применяются различные его модификации. Одна из них называется *методом крутого восхождения для задачи максимизации*

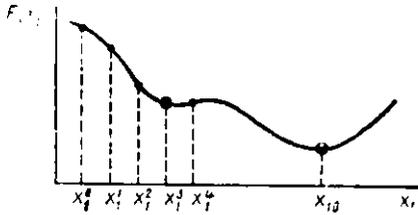


Рис. 7.5

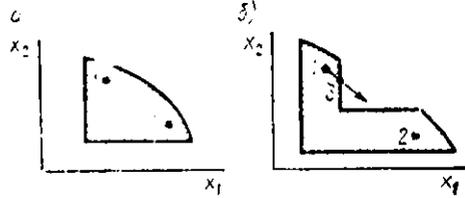


Рис. 7.6

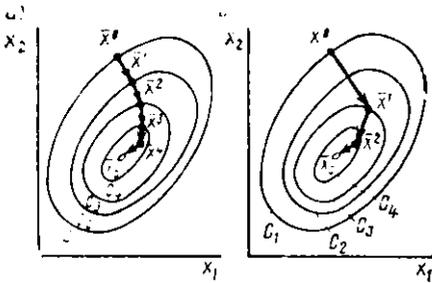


Рис. 7.7

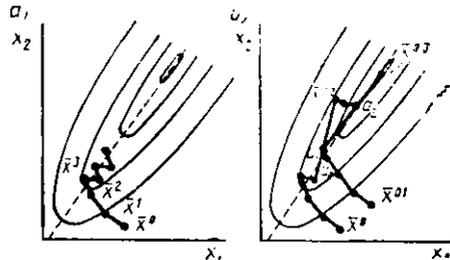


Рис. 7.8

$F(\vec{x})$ или *методом наискорейшего спуска*, если решается задача поиска $\min F(\vec{x})$. Рассмотрим для определенности метод наискорейшего спуска. Если в простом градиентном методе коэффициент α [см. (7.4)] остается постоянным в течение всей итерационной процедуры, то в этом методе значение α^k выбирается из условия минимума функции в направлении антиградиента. Иначе говоря α^k определяется из условия

$$F[\vec{x}^k - \alpha^k \nabla F(\vec{x}^k)] = \min F[\vec{x}^k - \alpha \nabla F(\vec{x}^k)]. \quad (7.8)$$

На рис. 7.7, а дана геометрическая интерпретация процесса решения для простого градиентного метода, а на рис. 7.7, б — для метода наискорейшего спуска. Через C_1, C_2, C_3, C_4 обозначены линии постоянных значений целевой функции $F(\vec{x})$, причем для задачи минимизации выполняется соотношение $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$. Таким об-

разом, для метода наискорейшего спуска величина шага по направлению антиградиента выбирается такой, чтобы целевая функция в этом направлении достигала условного минимума. Реализация этого метода сложнее, чем метода простого градиента, так как нахождение α из условия (7.8) вызывает значительные трудности, зато достигается большая скорость сходимости к оптимальному решению. На практике вместо поиска значения α делают несколько мелких шагов в направлении антиградиента, пока значение $F(\vec{x})$ не начнет возрастать.

Овражный метод оптимизации. Если линии постоянных значений (уровней) целевой функции $F(\vec{x})$ имеют вид сильно вытянутых эллипсов, то такие функции называют «овражными», так как для случая двух переменных поверхность, изображающая подобные функции, имеет вид оврага. При реализации градиентного метода для таких функций вектор аргумента \vec{x} быстро опускается на «дно оврага» (рис. 7.8, а), однако в дальнейшем траектория движения приобретает вид «зигзага» и значение $F(\vec{x})$ убывает очень медленно. Чтобы улучшить сходимость к точке минимума, применяют так называемый овражный метод минимизации. Задают начальным приближением \vec{x}^0 (рис. 7.8, б) и градиентным методом осуществляют спуск на «дно оврага» в точку a_0 . Затем выбирается новая исходная точка \vec{x}^{01} в окрестности точки \vec{x}^0 и аналогичным образом достигается точка a_1 на «дне оврага». С использованием точек a_0 и a_1 осуществляется движение вдоль «оврага». Для этого делается шаг в точку \vec{x}^{02} по направлению прямой, соединяющей точки a_0 и a_1 в сторону уменьшения $F(\vec{x})$. Размер шага обычно выбирается больше размера шага градиентного метода. Затем из точки \vec{x}^{02} осуществляется спуск градиентным методом в точку a_2 и по линии, соединяющей a_1 и a_2 , делается новый шаг «по дну оврага» в точку \vec{x}^{03} и т. д. При удачном выборе шага для движения вдоль оврага применение описанного метода значительно сокращает время решения задачи.

Метод «тяжелого шарика». В этом методе каждый шаг делается по направлению, являющемуся линейной комбинацией антиградиента в очередной точке (для задачи минимизации) и предыдущего направления движения, т. е. формула (7.4) приобретает вид

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k - \alpha \nabla F(\vec{x}^k) + \beta (\vec{x}^k - \vec{x}^{k-1}),$$

Этот метод получил название метода «тяжелого шарика», так как он имитирует движение под уклон шарика, который за счет инерции может не останавливаться в небольших углублениях. Так, для случая, представленного на рис. 7.5, метод «тяжелого шарика» может обеспечить нахождение абсолютного минимума в точке x_{10} вместо локального минимума в точке x_{11} , к которому приводит метод простого градиента.

Параметры α и β в методе «тяжелого шарика» выбираются следующим образом. Сначала принимается $\beta=0$ и решение осуществляется как в простом градиентном методе. Однако когда скорость сходимости метода уменьшится, берется значение $\beta>0$, например 0,8—0,9, одновременно рекомендуется увеличить и значение α . Метод «тяжелого шарика» позволяет не только преодолевать локальные минимумы, но и существенно увеличивает скорость сходимости.

Метод множителей Лагранжа. Выше были рассмотрены градиентные методы, которые применимы при отсутствии ограничений. Если на переменные задачи накладываются ограничения, имеющие вид равенств, то задача формируется следующим образом:

найти \vec{x}_0 , такое, что

$$F(\vec{x}_0) = \max_{\vec{x}} F(\vec{x}) \text{ или } F(\vec{x}_0) = \min_{\vec{x}} F(\vec{x})$$

при ограничениях $\vec{g}(\vec{x}) - \vec{\eta} = 0$, где $\vec{\eta} = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m\}$ — вектор заданных значений ограничений; $\vec{g}(\vec{x})$ — вектор-функция ограничений. Очевидно, что число ограничений m должно быть меньше числа независимых переменных n . Например,

$$F(\vec{x}) = 2x_1 + 3x_2 + x_3^2 + 4x_1x_2 \text{ при } n = 3; \quad (7.9)$$

$$\vec{g}(\vec{x}) - \vec{\eta} = \begin{cases} g_1(\vec{x}) - \eta_1 = x_1^2 + x_2^2 - 9 = 0 \\ g_2(\vec{x}) - \eta_2 = x_1^2 + x_3^2 - 4 = 0 \end{cases} \text{ при } m = 2.$$

Для решения экстремальных задач с такими ограничениями разработан и используется метод неопределенных множителей Лагранжа, который сводит задачу с ограничениями к обычной экстремальной задаче без ограничений [2]. При этом получают систему $n + m$ уравнений:

$$\frac{\partial F(\vec{x}_0)}{\partial x_i} + \lambda_1 \frac{\partial g_1(\vec{x}_0)}{\partial x_i} + \lambda_2 \frac{\partial g_2(\vec{x}_0)}{\partial x_i} + \dots + \lambda_m \frac{\partial g_m(\vec{x}_0)}{\partial x_i} = 0;$$

$$g_j(\vec{x}_0) - \eta_j = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

где λ_j — неопределенные множители Лагранжа. Из этой системы определяют n оптимальных значений x_{0i} и m значений λ_j .

Например, для выражения (7.9) получим систему из пяти уравнений.

$$2 + 4x_{02} + \lambda_1 2x_{01} + \lambda_2 2x_{01} = 0;$$

$$3 + 4x_{01} + \lambda_1 2x_{02} = 0;$$

$$2x_{03} + \lambda_2 2x_{03} = 0;$$

$$x_{01}^2 + x_{02}^2 - 9 = 0;$$

$$x_{01}^2 + x_{03}^2 - 4 = 0.$$

Одним из возможных решений этой системы является следующее:

$$x_{03} = 0; \quad x_{01} = 2; \quad x_{02} = \sqrt{5}; \quad \lambda_1 = -11\sqrt{5}/10; \quad \lambda_2 = (\sqrt{5} - 5)/10,$$

$$\text{при этом } F(\vec{x}_0) = 4 + 11\sqrt{5}.$$

Значения λ_1, λ_2 , полученные в процессе решения, фактически не нужны для окончательного результата. Данный пример иллюстрирует рассмотренную выше декомпозицию оптимизационных задач, которая упрощает их решение.

Метод множителей Лагранжа позволяет найти лишь необходимые условия существования условного экстремума для непрерывных функций, имеющих к тому же непрерывные производные. Значения неизвестных x_{0i} , полученные в результате решения системы уравнений, могут и не обеспечивать экстремального значения целевой функции $F(\vec{x})$. Поэтому найденные значения x_{0i} должны проверяться на экстремум с помощью анализа производных более высокого порядка или какими-либо другими методами.

Метод проектирования вектора-градиента. При ограничениях, описываемых равенствами [см. пример (7.9)], оптимизационная задача может также решаться методом проектирования вектора-градиента. В рассмотренном выше примере для метода множителей Лагранжа допустимые решения задачи располагались на линиях пересечения поверхностей двух взаимно перпендикулярных цилиндров. При большей размерности задачи область возможных решений в общем случае представляет собой гиперповерхность. Если выбрать исходную точку для метода градиента на этой поверхности, то приближение к условному экстремуму будет обеспечено при движении в направлении, касательном к гиперповерхности ограничений. Очевидно, следует выбирать то направление по касательной к гиперповерхности, которое соответствует наибо́льшему изменению целевой функции $F(\vec{x})$. Это значит, что данное направление должно выбираться из условия, чтобы проекция вектора-градиента $\nabla F(\vec{x})$ на это направление имело максимальное значение. При выполнении одного или нескольких шагов в выбранном направлении проверяется условие, не удалилась ли полученная точка пространства от гиперповерхности ограничений больше, чем на некоторую наперед заданную величину. Если удалилась, то производится спуск на гиперповерхность ограничений по направлению ее нормали и процесс поиска наилучшего направления движения повторяется. Расчетные формулы для реализации этого метода могут использовать метод множителей Лагранжа [2].

Достоинством метода является большая скорость движения к условному экстремуму, однако он требует довольно большого объема вычислений, который необходим для выполнения одного шага вдоль гиперповерхности.

Метод «штрафных функций». Этот метод может быть использован для решения оптимизационных задач при ограничениях, заданных неравенствами.

Найти \vec{x}_0 , такое, что $F(\vec{x}_0) = \max_{\vec{x}} F(\vec{x})$ или $F(\vec{x}_0) = \min_{\vec{x}} F(\vec{x})$ при ограничениях $\vec{g}(\vec{x}) - \vec{\eta} \leq 0$.

Возьмем пример аналогичный выражению (7.9):

$$F(\vec{x}) = 2x_1 + 3x_2 + x_3^2 + 4x_1x_2 \text{ при } n=3;$$

$$\vec{g}(\vec{x}) - \vec{\eta} = \begin{cases} g_1(\vec{x}) - \eta_1 = x_1^2 + x_2^2 - 9 \leq 0 \\ g_2(\vec{x}) - \eta_2 = x_1^2 + x_3^2 - 4 \leq 0 \end{cases} \text{ при } m=2. \quad (7.9a)$$

В данном случае областью допустимых решений является объем цилиндра радиуса $r=2$, ограниченный поверхностью цилиндра радиуса $R=3$. При поиске $\min_{\vec{x}} F(\vec{x})$ получим тривиальное решение $x_{01}=x_{02}=x_{03}=0$. Максимальное значение целевой функции для заданного вида $F(\vec{x})$, очевидно, будет находиться на границе области.

В общем случае при движении вдоль направления градиента из любой точки области допустимых решений мы можем приблизиться к границе ограничений и перейти ее, т. е. нарушить заданные ограничения. Чтобы вектор аргумента \vec{x}^k на очередном шаге k не выходил за пределы допустимой области, введем так называемую «штрафную функцию» $Ш(\vec{x})$. При этом целевая функция примет вид

$$\Phi(\vec{x}) = F(\vec{x}) + Ш(\vec{x}).$$

«Штрафная функция» $Ш(\vec{x})$ должна иметь такую форму, чтобы по мере приближения к границе области значение градиента $\nabla\Phi(\vec{x})$ изменяло знак. Если решается задача максимизации, то значение градиента из положительного должно становиться отрицательным, для задачи минимизации — из отрицательного положительным. При этом процесс решения автоматически остановится вблизи границы области допустимых решений. Идея метода для функции одной переменной x иллюстрируется на рис. 7.9, а для задачи поиска минимума $F(x)$, на рис. 7.9, б для поиска максимума $F(x)$. Сплошной линией дано значение $F(x)$, штрихпунктирной — $\Phi(x)$, пунктирной — граница области допустимых значений x . Одной из возможных форм функции $Ш(\vec{x})$ является следующая:

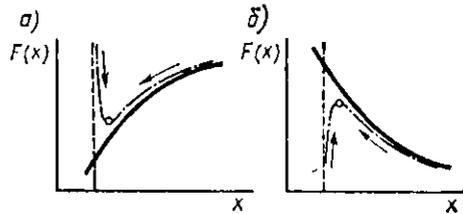


Рис. 7.9

Одной из возможных форм функции $Ш(\vec{x})$ является следующая:

$$Ш(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m \frac{A_i}{B_i + [g_i(\vec{x}^k) - \tau_i]},$$

где $A_i > 0$; $B_i > 0$ — некоторые константы.

При этом формула (7.4) принимает вид

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k \pm \alpha \nabla \Phi(\vec{x}) = \vec{x}^k \pm \alpha \nabla [F(\vec{x}) + Ш(\vec{x})].$$

Для примера (7.9а) получим

$$Ш(\vec{x}) = \frac{A_1}{B_1 + (x_1^2 + x_2^2 - 9)} + \frac{A_2}{B_2 + (x_1^2 + x_3^2 - 4)}$$

и формула вычисления \vec{x}^{k+1} для задачи максимизации будет иметь вид

$$x_1^{k+1} = x_1^k + \alpha \left\{ 2 + 4x_2^k - \frac{2A_1x_1^k}{[B_1 + (x_1^k)^2 + (x_2^k)^2 - 9]^2} - \frac{2A_2x_1^k}{[B_2 + (x_1^k)^2 + (x_3^k)^2 - 4]^2} \right\};$$

$$x_2^{k+1} = x_2^k + \alpha \left\{ 3 + 4x_1^k - \frac{2A_1x_2^k}{[B_1 + (x_1^k)^2 + (x_2^k)^2 - 9]^2} \right\};$$

$$x_3^{k+1} = x_3^k + \alpha \left\{ 2x_3^k - \frac{2A_2x_3^k}{[B_2 + (x_1^k)^2 + (x_3^k)^2 - 4]^2} \right\}.$$

Заданная в указанной форме «штрафная функция» обеспечивает изменение направления градиента в окрестности границы. Коэффициенты A_i выбираются из условия, чтобы влияние «штрафной функции» проявлялось только вблизи границы, т. е. A_i должны быть достаточно малы, чтобы не искажать характер $F(\vec{x})$ вдали от границы. Коэффициенты B_i вводятся для того, чтобы в случае $g_i(\vec{x}^k) = \eta_i$ избежать деления на ноль. Очевидно, что число A_i/B_j не должно превышать максимально возможного числа для ЭВМ, на которой осуществляется решение задачи.

В некоторых случаях, если ограничения накладываются на значения каждой переменной в отдельности (например, $x_1 \leq 2$; $2 \leq x_2 \leq 4$; $x_3 \leq 2$), соблюдение этих ограничений при решении задачи на ЭВМ может быть выполнено алгоритмически путем проверки условий $x_1^{k+1} \leq 2$; $2 \leq x_2^{k+1} \leq 4$; $x_3^{k+1} \leq 2$. Если какое-то условие нарушается, например $x_3^{k+1} > 2$, то соответствующей переменной присваивается значение границы, т. е. $x_3^{k+1} = 2$. Тем самым движение к экстремуму по соответствующей переменной осуществляется вдоль границы.

Метод стохастической аппроксимации. Если значение $F(\vec{x})$ определяется неточно из-за погрешности измерений или вычислений, то основной градиентный метод принципиально не гарантирует нахождение оптимального значения вектора \vec{x}_0 с заданной точностью. Вектор \vec{x}^k , определяемый условиями (7.6) или (7.6а), будет совершать «блуждание» в окрестности экстремума x_0 и условие (7.7) может невыполняться, даже если $k \rightarrow \infty$. Для решения задачи в условиях помех применяется разновидность градиентного метода, которая называется методом стохастической аппроксимации. В этом методе для определения очередного значения вектора аргумента на шаге $(k+1)$ применяется формула

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k \pm \alpha^k I l. \quad (7.10)$$

Здесь скалярный множитель α^k зависит от номера шага k , H — так называемая невязка, которая выполняет роль градиента в формуле (7.4).

Невязка указывает величину и знак отклонения целевой функции от оптимального значения. По мере приближения к оптимуму значение α^k должно уменьшаться. Выбор α^k определяется двумя условиями

$$\sum_{k=1}^{\infty} \alpha^k = \infty; \quad (7.11)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} (\alpha^k)^2 < \infty. \quad (7.12)$$

Условие (7.11) обеспечивает сходимость метода, т. е. шаг по градиенту должен убывать не слишком медленно и по мере увеличения номера k мы сколь угодно близко можем приблизиться к экстремуму. Условие (7.12) обеспечивает сглаживание «блужданий», это означает, что шаг по градиенту убывает достаточно быстро, чтобы разность $|\bar{x}^{k+1} - \bar{x}^k|$ стремилась к нулю. Условия (7.11) и (7.12) могут быть удовлетворены, если вычислять α^k по формуле

$$\alpha^k = 1 / (b + ck), \quad (7.13)$$

где $b > 0$; $c > 0$. При $k=0$ имеем начальное значение масштаба шага $\alpha^0 = 1/b$.

Скорость сходимости метода зависит от удачного подбора параметров b и c для конкретной решаемой задачи. Если значение b мало, то шаг движения по градиенту будет очень большим в начале процесса решения (k — мало). Чрезмерно большое значение b или малое значение c приводят к очень медленному уменьшению α^k с ростом k . Большое значение c приводит к быстрому уменьшению α^k , что резко ухудшает сходимость метода.

Рассмотрим метод стохастической аппроксимации на примере поиска минимума целевой функции вида

$$F(x, y, z) = y - zx,$$

где переменное z задается (измеряется) без погрешностей, а с помощью x можно управлять значением y (x — управляемая переменная). Результат управления — переменная y — измеряется (или вычисляется) с погрешностями. Требуется найти такое значение x , которое обеспечивает минимум целевой функции. В данном случае роль невязки выполняет сама целевая функция, т. е. $H \equiv F(x, y, z)$. При этом формула (7.10) используется в виде [сравни с формулой (7.4)]

$$x^{k+1} = x^k + \alpha^k (y^{k+1} - x^k z^{k+1}). \quad (7.14)$$

Если x^k меньше оптимального значения, то невязка положительна и x^{k+1} возрастает, что соответствует уменьшению невязки. При x^k больше оптимального значения невязка отрицательна и

x^{k+1} убывает, а абсолютное значение невязки также уменьшается. Данная процедура позволяет по ходу процесса уточнять значение переменной x , несмотря на влияние погрешностей y .

Кроме указанной выше формулы (7.13) для выбора значений α^k могут применяться и другие подходы, например, основанные на методе наименьших квадратов. Выведем соответствующее рекуррентное соотношение, связывающее значение x^{k+1} со значением x^k из условия минимума среднеквадратического значения невязки по множеству всех наблюдаемых значений. Обозначим

$$S = \sum_{i=0}^k (y_i - x^k z_i)^2. \quad (7.15)$$

Из условия минимума S по x^k получаем

$$2 \sum_{i=0}^k (y_i - x^k z_i)(-z_i) = 0; \quad x^k \sum_{i=0}^k z_i^2 = \sum_{i=0}^k y_i z_i. \quad (7.16)$$

Прибавим к последнему выражению $x^k z_{k+1}^2$.

$$x^k \sum_{i=0}^{k+1} z_i^2 = \sum_{i=0}^k y_i z_i + x^k z_{k+1}^2. \quad (7.17)$$

Заменим в выражении (7.16) k на $k+1$:

$$x^{k+1} \sum_{i=0}^{k+1} z_i^2 = \sum_{i=0}^k y_i z_i + y_{k+1} z_{k+1}. \quad (7.16a)$$

Вычтем выражение (7.17) из выражения (7.16a):

$$(x^{k+1} - x^k) \sum_{i=0}^{k+1} z_i^2 = y_{k+1} z_{k+1} - x^k z_{k+1}^2,$$

откуда получаем искомое рекуррентное соотношение

$$x^{k+1} = x^k + z_{k+1} (y_{k+1} - x^k z_{k+1}) \left/ \left(\sum_{i=0}^k z_i^2 + z_{k+1}^2 \right) \right. . \quad (7.18)$$

Выражение (7.18) аналогично (7.10), значение коэффициента шага

$$\alpha^k = z_{k+1} \left/ \left(\sum_{i=0}^k z_i^2 + z_{k+1}^2 \right) \right. . \quad (7.19)$$

Аналогичная процедура может быть применена для оптимизации многомерных задач, когда по результатам эксперимента определяется значение нескольких управляемых переменных.

Как показывает практика расчетов, лучшую сходимость обеспечивает выбор коэффициента α^k по выражению (7.19) по сравнению с (7.13). Приведем пример рекуррентного оценивания значения переменной x , которое было реализовано на ЭВМ «Наири-К». Истинное значение $x=2$, начальное приближение $x^0=3$, в качестве помехи использовалась равномерно распределенная в интервале $[-1; 1]$ случайная величина p . Погрешность измерений y задава-

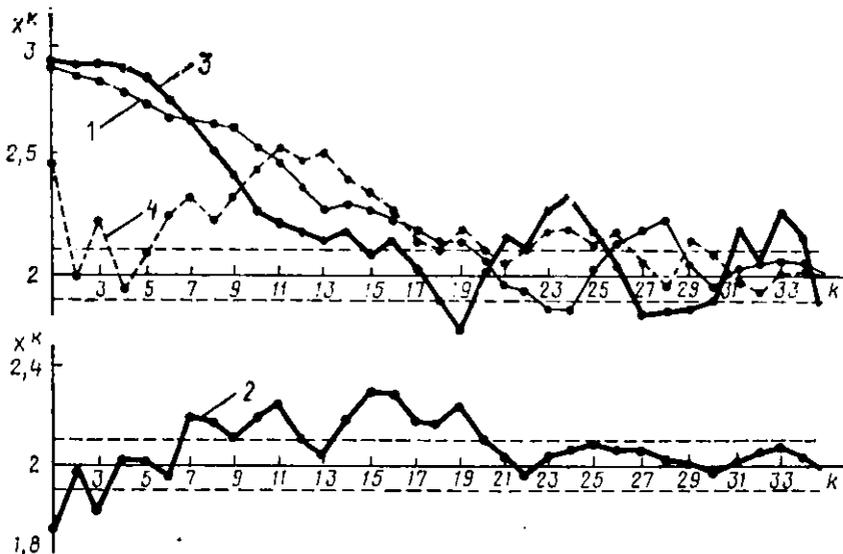


Рис. 7.10

лась в форме произведения трех величин y , p и e , т. е. $y \cdot p \cdot e$, где e — уровень помех. Таким образом, «измеренные» с погрешностями значения функции y вычислялись по формуле $y_{pi} = 2z_i(1 + ep)$, значения z_i варьировались в диапазоне $[1, 10]$.

При выборе α^k в формуле (7.13) были взяты значения параметров $b=1$; $c=0,5$. Результаты моделирования представлены на рис. 7.10, где кривые 1 и 3 для $\alpha^k = 1/(1+0,5k)$ получены при $e=0,25$ и $e=0,5$, а кривые 2 и 4 для α^k [определяемого из (7.19)] получены при $e=0,25$ и $e=0,5$ соответственно. При уровне помех $e=0,25$ оба подхода обеспечивают сходимость x^k к $x=2$ с точностью 0,1. При $e=0,50$ для кривой 3 процесс не сошелся за 35 шагов.

Рассмотренные выше подходы показывают, что кроме знаний конкретных методов необходимо понимать характер решаемой задачи, проявлять свой опыт и интуицию при выборе метода решения и его параметров, чтобы обеспечить правильное и быстрое решение.

§ 7.3. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ЭВМ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

В АСУ ТП решается большое число различных функциональных задач, связанных с обработкой информации и управлением. От качества решения функциональных задач, которые классифицируются как специальное математическое обеспечение, зависит эффективность всей системы управления. Для обеспечения решения функциональных задач создается так называемое *общее математическое обеспечение* — совокупность программ организации вычислительного процесса, контроля исполнения функциональных программ, программные средства автоматизации программирования и отладки программ. Объем общего математического обеспечения достаточно велик и в отдельных случаях может превосходить объем специального.

Создание математического обеспечения для управляющих вычислительных машин, работающих в реальном времени, ставит проблемы, которые не встречаются при разработке программ для вычислительных машин традиционного назначения. Сложность состоит в том, что в системах реального времени невозможно спланировать поступление заявок на обслуживание, так как запросы к системе меняются во времени, а это налагает специфические требования на разработку как специального, так и общего математического обеспечения АСУ ТП. Информация, введенная в управляющую вычислительную машину, должна быть обработана за определенное время, чтобы результат мог быть использован для выработки необходимых управляющих воздействий. Однако может создаться ситуация, когда в некоторый промежуток времени требуется выполнение нескольких программ. Это происходит потому, что не все программы выполняются с определенной периодичностью и за строго определенное время. Есть программы, время выполнения которых случайно. К ним относятся программы адресного опроса датчиков, программы регулирования при выходе управляемых величин за норму, программы включения и выключения исполнительных механизмов и т. п. Следовательно, может возникнуть ситуация, когда из-за задержки в выполнении одних программ другие вообще не будут выполнены. Поэтому всем программам в соответствии со степенью их важности для производства, частоты обращений к ним и времени их выполнения присваивают различные приоритеты. Степень важности зависит, например, от потерь в производстве, которые вызываются задержкой выполнения программы. Разбиение программ по приоритетам определяет очередность их выполнения. В первую очередь выполняются программы с более высоким приоритетом.

Общее математическое обеспечение. Оно подразделяется на отдельные системы.

Операционная система управляющей ЭВМ включает в себя совокупность программ, обеспечивающих начальный ввод

информации, пуск комплекса программ, управление последовательностью решения задач в реальном времени, обмен сообщениями с внешними абонентами системы управления и с внешней памятью. В тех случаях, когда в системе управления используется несколько ЭВМ, операционная система обеспечивает взаимодействие между отдельными ЭВМ вычислительного комплекса. Операционная система представляет собой одну из наиболее машинно-ориентированных компонент математического обеспечения, так как ее структура определяется не только характером решаемых задач но и логической структурой конкретной управляющей ЭВМ.

Система функционального контроля математического обеспечения представляет собой совокупность программ, которые предназначены для контроля исправности управляющей ЭВМ и внешних абонентов, обнаружения частичных отказов и сбоев. Система контроля должна обеспечивать проверку состояния аппаратуры ЭВМ перед началом работы, контроль ее исправности и функционирования в процессе решения задач, выполнение диагностических процедур для обнаружения искажения результатов.

Программные средства автоматизации программирования включают в себя транслятор (один или несколько) для автоматического перевода алгоритмов с внешнего алгоритмического языка в рабочие программы. В составе трансляторов предусматривается программа, которая обеспечивает контроль правильности записи алгоритма на входном языке. Программные средства отладки функциональных программ включают в себя программу-отладчик, обеспечивающую выявление синтаксических ошибок в отлаживаемых программах; различные моделирующие программы, предназначенные для моделирования управляющей ЭВМ на универсальной ЭВМ с целью более эффективной отработки программ; программы, предназначенные для испытаний рабочих программ перед вводом системы в эксплуатацию, различные обслуживающие (сервисные) программы, которые обеспечивают вывод оператору промежуточных результатов отладки программ.

Модульный принцип построения программ. Разработка комплекса программ значительно облегчается введением определенных правил построения математического обеспечения. Одним из основных правил, которые широко применяются в настоящее время, является модульное иерархическое построение сложных комплексов программ (модульное программирование). При модульном программировании сложная программа строится на основе небольших программных блоков объемом 500—1000 команд, каждый из которых выполняет законченную логическую функцию. Модульное программирование имеет ряд преимуществ по сравнению с монолитным программированием. При этом осуществляется декомпозиция общей задачи на частные задачи, что позволяет упростить связи и описание подпрограмм. Автономность и распараллеливание процессов разработки и отладки отдельных программ снижает трудоемкость и ускоряет проектирование всей системы. От-

дельные подпрограммы могут многократно применяться в различных местах общей программы, что сокращает общий объем разрабатываемых программ по сравнению с монолитным программированием, когда подпрограммы с идентичными функциями должны повторяться там, где они используются. Возможность контроля отдельных подпрограмм снижает общее количество ошибок в программах. Достоинства модульного программирования особенно явно проявляются при проектировании сложных программ объемом в десятки тысяч команд. Однако при модульном программировании в отдельных подпрограммах появляются элементы сопряжения и взаимодействия блоков, которые требуют некоторых дополнительных затрат команд. Обычно эти затраты составляют 2—5% от объема команд сопрягаемых программ. Длительность исполнения программ при модульном программировании возрастает на 10—15% по сравнению с монолитным программированием.

Типовая структурная схема комплекса управляющих программ. Характеристики и особенности компонент общего математического обеспечения зависят от функционального назначения управляющей системы и параметров используемой ЭВМ. Однако основные компоненты системы управляющих алгоритмов, которые определяют контроль и организацию последовательности решаемых задач, а также взаимодействие с внешними абонентами, могут быть представлены типовой схемой, не связанной с содержанием функциональных задач. Вариант такой типовой схемы, включающий в себя компоненты общего и специального математического обеспечения, показан на рис. 7.11. На схеме даны только компоненты, непосредственно связанные с организацией вычислительного процесса в реальном времени, с обменом данными и решением функциональных задач.

Поясним назначение некоторых программ схемы. Управляет программами обмена диспетчер прерываний, который управляет также программой анализа сбоев. Программа приема сообщений декодирует информацию с учетом характеристик применяемого помехозащищенного кода, накапливает поступающую информацию в виде отдельных слов и сообщений, маркирует поступившее сообщение шифром внешнего абонента, определяет буферную зону памяти и место хранения поступившего сообщения. Программа выдачи сообщений проверяет соответствие шифров подготовленных сообщений и освободившихся каналов передачи данных; выбирает конкретное сообщение, подлежащее передаче с учетом уровня приоритета; выдает сообщение и регистрирует завершение выдачи.

Программу начального пуска включает с пульту оператор, она позволяет сократить время на перевод управляющей ЭВМ из исходного состояния в заданный режим работы. Перечислим некоторые из ее функций: включение оперативного контроля состояния аппаратуры ЭВМ, систем передачи данных и внешних абонентов; начальный ввод констант, переменных, подготовку ЭВМ к функционированию в заданном режиме; ввод астрономического времени и установка начальных состояний всех датчиков времени. Программа тактировки периодических вычислений (таймер) осуществляет контроль счетчиков времени и возможность их переполнения, подготавливает заявки на включение периодических программ с учетом времени последнего включения и заданной периодичности.

Центральный и местный диспетчеры регламентируют последовательность включения программ в соответствии с типом программы и ее приоритетом. Местные диспетчеры включаются центральным диспетчером или функциональными программами после их завершения. Центральный диспетчер включается после завершения работы группы программ, решающей крупную функциональную или вспомогательную задачу. Программы взаимодействия ЭВМ обеспечивают обмен информацией между машинами и распределяют решение функциональных задач между ЭВМ для обеспечения необходимой пропускной способности системы управления или же для дублирования решения с целью повышения надежности

результата. Программы взаимодействия с внешними накопителями дают возможность увеличивать объем памяти для хранения программ и информации. Программы подготовки к обработке выполняют задачи, которые непосредственно связаны с функциональными задачами. Эти программы осуществляют перекодирование и масштабирование величин, дешифрацию признаков информации, контроль, предназначенный для выявления ложной и искаженной информации, перепись информации из зоны входных сообщений в зону массива, который

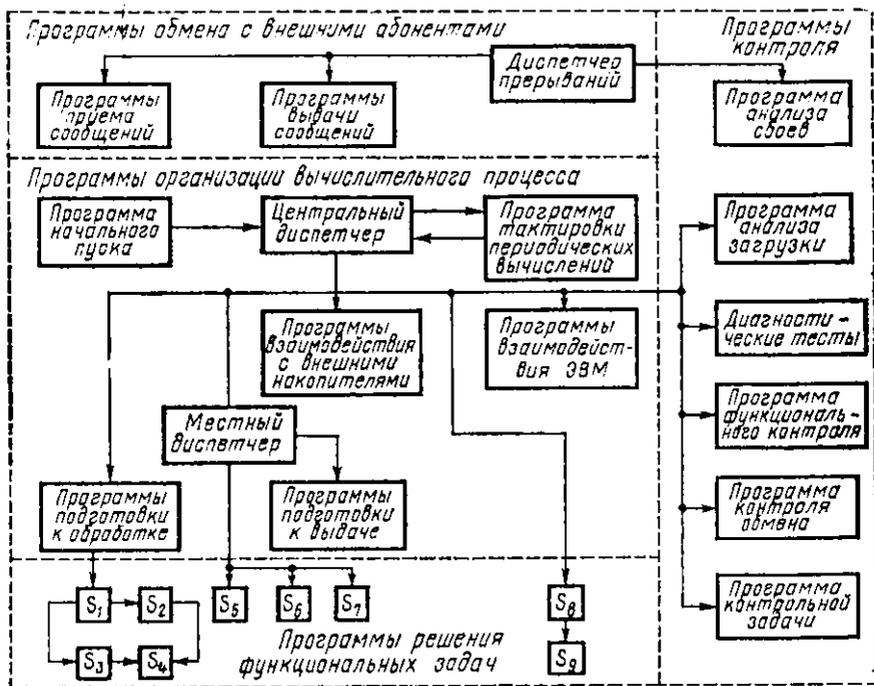


Рис. 7.11

следует обрабатывать в данный момент времени. Программы подготовки к выдаче формируют сообщение t -го типа для i -го абонента в зоне формуляров выдачи и перепишывают их в буферную зону выдаваемых сообщений.

Программы контроля обеспечивают функциональный контроль всей системы вне рабочего режима, а также контроль ЭВМ и управляющей системы в процессе рабочего функционирования в реальном масштабе времени. Программа анализа загрузки подсчитывает суммарное время работы по функциональным программам и в зависимости от этого устанавливает темп включения программ контроля. Программа контрольной задачи записывает имитируемые сообщения в память входных сообщений и сравнивает результаты их обработки с эталонами. Контрольная задача позволяет проверить ЭВМ в условиях, близких к реальному функционированию.

Программы решения функциональных задач (специальное математическое обеспечение) обозначены на рис. 7.11 через S_i . Их содержание полностью определяется конкретными задачами управляющей системы. Функциональные программы включают либо непосредственно передачей управления друг другу (S_1, S_2, S_3, S_4), либо через местный диспетчер (S_5, S_6, S_7), либо от центрального диспетчера с последующей передачей управления друг другу (S_8, S_9).

Неисправности технических средств и ошибки программ. К комплексам управляющих программ предъявляются повышенные требования к «программной устойчивости» при искажениях информации, сбоях, частичных отказах аппаратуры. Эти требования основаны на высокой степени автоматизации процессов управления в АСУ ТП и особой важности функций, которые выполняют в системе управляющие алгоритмы. Сложность автоматизированных систем управления возрастает быстрее, чем надежность используемой аппаратуры, поэтому особенно остра проблема обеспечения достоверности результатов и сохранения работоспособности системы. При решении этой проблемы применяются методы оперативного и функционального контроля, параллельное решение одних и тех же задач, совместная работа нескольких ЭВМ.

Ошибки по-разному влияют на результаты — от незначительного снижения точности до полного прекращения решения функциональных задач, поэтому исследование влияния ошибок различных типов на отклонение результатов от их истинных значений оказывается очень полезным для проектирования алгоритмов и соответствующих программ. На основании этих исследований можно оценить: трудоемкость проектирования алгоритмов; реальное состояние и качество системы в зависимости от длительности проектирования и характеристик выявленных ошибок; необходимую эффективность средств оперативного контроля; ресурсы управляющей ЭВМ по памяти и быстродействию для реализации алгоритма с учетом затрат, необходимых для устранения ошибок.

В работе [1] приводятся данные по анализу программы объемом 25 тыс. команд, которая перед отладкой содержала 2% команд с ошибками. Выявлено, что наибольшее число ошибок связано с командами передачи управления. Около 70% от общего количества ошибок было выявлено при автономной отладке подпрограмм, 15% — при проверке сопряжения подпрограмм, 10% — при комплексной отладке системы в статике, 2,5% — при внедрении и сдаче заказчику.

§ 7.4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Процесс переработки информации в управляющих комплексах состоит из операций ЭВМ, которые составляют содержание отдельных программ. Под операцией обычно понимается переработка информации, выполняемая под воздействием одной команды. Содержанием операции может быть выполнение вычислительных или логических действий над данными. Данные, над которыми производится операция, называются *операндами*. В команде указывается, над какими операндами выполняется операция, какая операция, куда следует поместить результат выполнения операции. Команды бывают трех-, двух- и одноадресные. Чем меньше адресов в команде, тем дольше каждое вычисление выполняется. С другой стороны, чем проще команда, тем меньше длина машинного слова, которая для управляющей ЭВМ, как правило, определяется именно размером команды, а не размерностью исходных данных. Сокращение машинного слова приводит почти к пропорциональному сокращению

аппаратуры управляющей ЭВМ, поэтому в большинстве случаев управляющие ЭВМ одноадресные. Это позволяет использовать для таких машин небольшую длину машинного слова. Наиболее часто применяется двухбайтное представление информации (байт --- единица информации, содержащая восемь двоичных разрядов). Обычно в управляющих ЭВМ применяется 50—100 типов операций (команд).

Программирование может осуществляться на уровне макрокоманд (автокоды), когда отдельная операция реализуется с помощью 5—10 команд ЭВМ. Количество типов макрокоманд в сложных алгоритмах примерно то же, что и количество типов команд. Дальнейшим укрупнением единицы программирования является использование стандартных подпрограмм, которые так же, как и макрокоманды, решают типовую вычислительную или логическую задачу, но по объему несколько большую, чем задача, решаемая макрокомандой. Стандартные подпрограммы больше специализированы относительно решаемых задач и реже используются по сравнению с макрокомандами. Примерами стандартных подпрограмм могут служить: вычисление тригонометрических функций, программа перевода числа из двоичной формы в десятичную и т. п. Программы функционального и общего математического обеспечения формируются из стандартных подпрограмм, макрокоманд и команд. Эти программы могут объединять несколько тысяч команд и решать автономную частную задачу системы управления.

Отладка программ. Программа алгоритма обычно делится на отдельные части (подпрограммы) таким образом, чтобы функциональные связи между этими частями были минимальны. После отладки отдельных подпрограмм они объединяются в блоки, отлаживаются блоки подпрограмм, затем отлаживается программа в целом. Таким образом, программа отлаживается по принципу последовательного увеличения объема и этот процесс имеет итерационный характер, т. е. осуществляется возврат к отладке более мелких частей программы. Отладка программы без связи с объектом называется *статической*. При статической отладке проверяются информационные и управляющие связи между подпрограммами и блоками.

Отладка программы с привязкой ее к реальному объекту (*динамическая отладка*) позволяет окончательно проверить взаимодействие решения различных функциональных задач в реальном времени. Однако включение реальных объектов связано с дополнительными затратами на их эксплуатацию и с риском порчи аппаратуры внешних абонентов из-за неправильных команд управления. Более экономична и удобна динамическая отладка на различного рода моделях и имитаторах внешних абонентов управляющей ЭВМ. При этом внешние абоненты представляются специальными программами или техническими устройствами, моделирующими поступающую информацию и объекты управления. Ограниченность возможностей полной имитации объектов, естественно, не позволяет полностью завершить комплексную отладку.

Для отладки программ, а также их совершенствования или введения новых программ в работающую систему могут использоваться моделирующие программы. Моделирующие программы позволяют имитировать машинный язык управляющей ЭВМ на другой машине, например на универсальной ЭВМ в вычислительном центре. Необходимость в моделирующих программах возникает из-за того, что ЭВМ, управляющая технологическим процессом, всегда (или почти всегда) находится в работе, решение задач управляющего алгоритма нельзя прерывать или откладывать для проведения других работ. Моделирующие программы позволяют отлаживать рабочие программы не на той машине, для которой они составлены. Однако для имитации одной команды управляющей ЭВМ обычно требуется 15—20 команд имитирующей машины, поэтому процесс реализации рабочих программ на модели протекает значительно медленнее, чем на управляющей ЭВМ. Но это уже не столь существенно, так как цель моделирования состоит в содержательном анализе отлаживаемой программы и проводится на универсальной ЭВМ, которая не работает в реальном времени.

Контроль работы управляющей системы. Для обнаружения ошибок в работе технических средств и определения места неисправности применяются как аппаратный контроль с помощью специальных контрольных схем, так и программный. Для обнаружения факта неисправности используются так называемые контрольные программы, а для определения того устройства, которое работает неверно, применяются диагностические программы. Если при разработке системы не уделяется должного внимания вопросам автоматического контроля и диагностики, то даже не очень существенные неисправности технических средств трудно найти и устранить, поэтому обслуживающий персонал, не имея возможности разобраться в сложном взаимодействии программ и аппаратуры, иногда предпочитает просто ее отключить и переходит на ручное управление. Развитый автоматический контроль и диагностика позволяет обслуживать систему управления, не вникая в тонкости ее программной и аппаратурной реализации. Таким образом, можно сказать, что автоматический контроль и диагностика способствуют высокой ремонтпригодности и доступности технических средств в процессе эксплуатации системы.

Компактность программ. Для управляющих ЭВМ, обрабатывающих большое число различных задач управления, существенное значение может иметь время выполнения отдельных программ и требуемый объем запоминающего устройства. На объем программы может влиять метод записи соответствующего алгоритма. Покажем это на двух примерах.

В алгоритмах управления часто возникает необходимость вычислять значение некоторой функции $y(x)$, заданной в виде полинома

$$y(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_1 x + a_0.$$

Нетрудно убедиться, что непосредственное программирование этого выражения потребует большого числа команд по сравнению с методом программирования по так называемой схеме Горнера:

$$y(x) = (\dots((0 + a_n)x + a_{n-1})x + a_{n-2})x + \dots + a_1)x + a_0.$$

В этом случае программируется цикл двух основных команд (сложение и умножение), организуется переадресация констант и контроль окончания повторения цикла.

Из курса теории автоматического управления известно, что при приближенном решении на цифровой ЭВМ дифференциального уравнения оно заменяется конечно-разностным уравнением на основе передаточной функции вида

$$W^*(z) = \frac{Y^*(z)}{X^*(z)} = \frac{b_n z^{-n} + b_{n-1} z^{-n+1} + \dots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_n z^{-n} + a_{n-1} z^{-n+1} + \dots + a_1 z^{-1} + 1}, \quad (7.20)$$

где $Y^*(z)$ и $X^*(z)$ есть Z -преобразование соответственно выходного сигнала $y(t)$ и входного $x(t)$; a_i, b_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$) — коэффициенты полиномов от z ; $z = e^{pT_d}$; p — оператор Лапласа; T_d — интервал дискретности поступления и выдачи информации.

Передаточная функция $W^*(z)$ соответствует во временной области конечно-разностному уравнению

$$y(v T_d) = b_0 x(v T_d) + b_1 x(v T_d - T_d) + \dots + b_{n-1} x[T_d(v - n + 1)] + b_n x[T_d(v - n)] + a_1 y(v T_d - T_d) - \dots - a_{n-1} y[T_d(v - n + 1)] - a_n y[T_d(v - n)] \quad (v = 1, 2, 3, \dots). \quad (7.21)$$

В общем случае в запоминающем устройстве ЭВМ должно храниться n коэффициентов a и $n+1$ коэффициентов b . Перед выполнением каждого очередного шага решения v должна выполняться переадресовка или пересылка исходных данных из одних ячеек памяти ЭВМ в другие:

$$x(v T_d) \rightarrow x(v T_d - T_d), \dots, x[T_d(v - n + 1)] \rightarrow x[T_d(v - n)];$$

$$y(v T_d) \rightarrow y(v T_d - T_d), \dots, y[T_d(v - n + 1)] \rightarrow y[T_d(v - n)].$$

На пересылку исходных данных потребуется $2n$ операций. Для хранения значений входного и выходного сигналов требуется $2n$ ячеек памяти. Количество операций и число ячеек, необходимое для решения уравнения (7.21), а также некоторый «сводный показатель», равный сумме числа операций и ячеек, представлены в табл. 7.10 («прямое» программирование).

Таблица 7.10

Методы программирования	Количество								Сводный показатель	
	операций			Итого	ячеек памяти для хранения					
	умножения	сложения (вычитания)	пересылки		коэффициентов	входных данных	выходных данных	команд программы		Итого
«Прямое»	$2n+1$	$2n$	$2n$	$6n+1$	$2n+1$	n	n	$6n+1$	$10n+2$	$16n+3$
«Последовательное»	$2n+1$	$2n$	$n+1$	$5n+2$	$2n+1$	1	n	$5n+2$	$8n+4$	$13n+6$
«Параллельное»	$2n$	$2n-1$	n	$5n-1$	$2n$	—	n	$5n-1$	$8n-1$	$13n-2$

Выражение (7.20) для передаточной функции (рис. 7.12, а) можно заменить двумя другими эквивалентными выражениями. В отличие от «прямого» программирования, соответствующего формуле (7.21), рассмотрим «последовательное» и «параллельное» программирование, которым соответствуют последовательное и параллельное соединения передаточных функций. Соответствующие схемы представлены на рис. 7.12. Предположим, что числитель и знаменатель $W^*(z)$ имеют только действительные и простые корни. Тогда выражение (7.20) можно представить в виде

$$W^*(z) = \prod_{i=1}^n W_i^*(z) = \frac{b_0(1 - c_1 z^{-1})}{1 - d_1 z^{-1}} \frac{1 - c_2 z^{-1}}{1 - d_2 z^{-1}} \dots \frac{1 - c_n z^{-1}}{1 - d_n z^{-1}}, \quad (7.22)$$

где c_i, d_i — соответственно корни полиномов числителя и знаменателя выражения (7.20), $i=1, 2, \dots, n$.

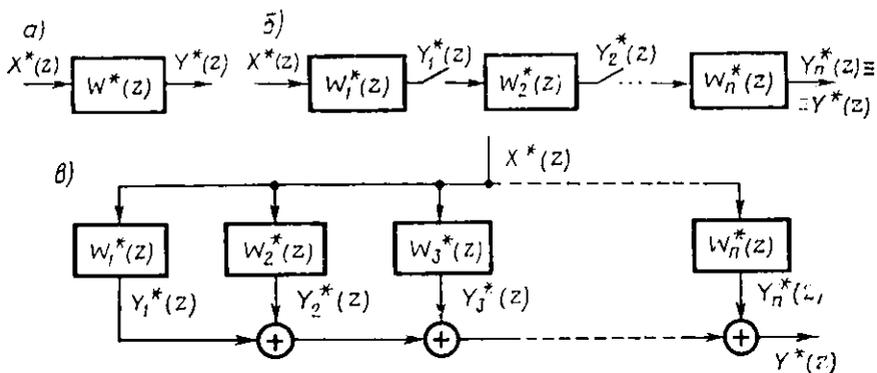


Рис. 7.12

Каждый множитель выражения (7.22) является передаточной функцией физически реализуемой программы (рис. 7.12, б). В соответствии с выражением (7.22) и обозначениями сигналов на рис. 7.12, б, осуществляя переход от Z -преобразования к оригиналам, получим систему уравнений

$$y_1(v T_x) = b_0 x_1^*(v_1^* T_x) - c_1 x(v T_x - T_x) + d_1 y_1(v T_x - T_x);$$

$$y_2(v T_x) = y_1(v T_x) - c_2 y_1(v T_x - T_x) + d_2 y_2(v T_x - T_x);$$

.....

$$y_n(v T_x) \equiv y(v T_x) = y_{n-1}(v T_x) - c_n y_{n-1}(v T_x - T_x) + d_n y_n(v T_x - T_x). \quad (7.23)$$

Количество операций и число ячеек памяти, необходимое для решения системы (7.23), представлено в табл. 7.10.

Запишем теперь выражение (7.20) в виде суммы элементарных дробей:

$$W^*(z) = \sum_{i=1}^n W_i^*(z) = \frac{l_1}{1 - d_1 z^{-1}} + \frac{l_2}{1 - d_2 z^{-1}} + \dots + \frac{l_n}{1 - d_n z^{-1}}, \quad (7.24)$$

где l_i — действительные числа, которые могут быть определены из условия равенства коэффициентов числителя выражения (7.20) коэффициентам числителя выражения (7.24) при соответствующих степенях z после приведения выражения

рассматриваются устройства сопряжения УВМ с объектами управления (УСО), поскольку они практически не изучаются в других учебных дисциплинах специальности 0639 «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов». В § 8.2 даны основные сведения о системе малых ЭВМ (СМ-ЭВМ), которые наиболее приспособлены для использования в АСУ ТП. В последнее время все более широкое распространение получают микропроцессоры и микро-ЭВМ, поэтому в § 8.3 рассмотрены основные особенности и характеристики этих устройств. В завершение главы даны общие сведения о быстро развивающемся направлении по созданию автономных систем механизации и автоматизации производственных процессов — роботостроению.

§ 8.1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ПРИНЦИПЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ

Комплекс технических средств (КТС), применяемый для построения АСУ ТП, называют техническим обеспечением АСУ ТП. КТС представляет собой совокупность вычислительных и управляющих устройств, устройств для передачи информации, датчиков информации и исполнительных устройств. Этот комплекс должен полностью обеспечивать выполнение всех функций АСУ ТП.

Технические средства АСУ технологического процесса можно условно подразделить на четыре основные группы. Первая группа включает в себя средства получения исходной информации — датчики и устройства ручного ввода-вывода, которые позволяют оператору вводить в систему те или иные данные. К этой же группе относятся преобразователи, трансформирующие сигналы от датчиков в унифицированные сигналы, аналоговые или цифровые. Ко второй группе относятся устройства, предназначенные для автоматической передачи информации на расстояние, а также средства телеизмерения, телесигнализации и телеуправления. Третья группа содержит устройства для анализа и обработки информации. Эта группа охватывает широкий круг устройств, начиная от простейшего регулятора и кончая вычислительным комплексом, содержащим несколько вычислительных машин. К этой группе относят также различное вспомогательное оборудование для представления оператору результатов функционирования системы. Четвертая группа — это различные дистанционно управляемые исполнительные устройства: шаговые двигатели, дроссельные регулирующие органы, дозаторы и т. п.

ЭВМ, применяемые для управления технологическими процессами, называют управляющими вычислительными машинами (УВМ). В отличие от универсальных ЭВМ эти машины имеют свои особенности в архитектуре построения и логической организации. Как правило, УВМ — это небольшие машины с упрощенной конструкцией, в которых особенно большое внимание уделяется надежности отдельных устройств и автоматическому контролю за правильностью функционирования. В УВМ часто используется одно-

адресная система команд, сокращенная длина машинного слова и ограниченное число команд. Предусматривается возможность работы с большим числом различных внешних устройств, которые обеспечивают связь как с объектом управления, так и с обслуживающим персоналом.

Применение УВМ в системе управления не исключает целесообразности использования других средств автоматизации. В хорошо организованных системах применяются разнообразные технические средства, дополняющие друг друга. Централизованную обработку информации с помощью УВМ обычно сочетают с местными устройствами локальной автоматики — автономными управляющими устройствами и отдельными регуляторами. Использование индивидуальных средств управления дает возможность построить систему управления наиболее целесообразным и экономичным образом, освободив УВМ от выполнения несложных функций, которые могут успешно выполняться локальными (местными) устройствами. При этом применение локальных устройств значительно повышает надежность системы в целом, так как выход из строя УВМ не приводит к полной потере управления, а только к ухудшению его качества.

Первоначально УВМ проектировались для решения конкретной задачи или для ограниченного класса родственных задач управления. В таких УВМ структура была жесткой, она с большим трудом поддавалась даже небольшим изменениям. Характеристики таких машин было практически невозможно корректировать. Однако вскоре стало очевидно, что путь индивидуального проектирования УВМ не очень экономичен в производственном отношении и неудобен при их эксплуатации, так как затруднено дальнейшее совершенствование и развитие системы управления, поэтому в настоящее время широко применяется принцип агрегатизации структуры.

Агрегатизация структуры — это переход от УВМ с фиксированными характеристиками к набору автономных функциональных блоков различного назначения, дающих возможность компоновать управляющие машины различной мощности. Каждый блок решает одну определенную функциональную задачу и сконструирован таким образом, что легко стыкуется с другими блоками данной агрегатной системы средств вычислительной техники. Это позволяет расширять возможности УВМ, увеличивая номенклатуру и количество функциональных блоков без их реконструкции. При этом современные УВМ создаются информационно и программно совместимыми. Информационная совместимость состоит в том, что для данной агрегатной системы принята одинаковая кодировка информации для всех блоков, т. е. каждый блок имеет унифицированные входы и выходы. Программная совместимость означает возможность непосредственного использования программ в машинах различной мощности. Дальнейшее развитие агрегатной системы осуществляется с соблюдением принципа информационной и программной совместимости. Это значит, что указанный принцип выполняется при разработке новых более совершенных функциональных

блоков. Агрегатная система средств вычислительной техники является, таким образом, открытой системой в том смысле, что допускает последовательную модернизацию и наращивание, замену устаревшей аппаратуры на более совершенную, изменение и усовершенствование внутреннего программного обеспечения. Агрегатизация позволяет компоновать системы с различными характеристиками и определенным сочетанием технических параметров по объе-

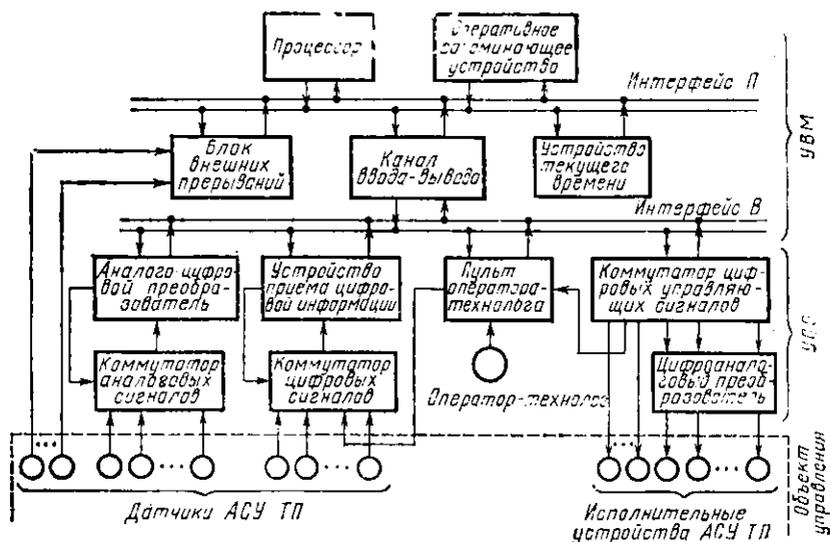


Рис. 8.1

му и виду принимаемой информации, способам и производительности ее обработки, а также по способам формирования выходной информации. Устройства одинакового функционального назначения, отличающиеся только некоторыми признаками (например, по числу входов или выходов), образуют ряд.

В настоящее время наиболее распространенными из современных агрегатированных комплексов, построенных на элементной базе ЭВМ третьего поколения, являются: Агрегатная система вычислительной техники (АСВТ); Единая система электронных вычислительных машин (ЕС ЭВМ); Агрегатная система средств телемеханики (АССТ); микропроцессы и микро-ЭВМ и др.

Упрощенная структурная схема комплекса технических средств АСУ ТП представлена на рис. 8. 1. В этой схеме выделены устройства сопряжения УВМ с управляемым объектом (УСО): устройства сбора, передачи и преобразования информации, поступающей в УВМ; устройства преобразования и выдачи сигналов из УВМ на объект управления. Как видно из схемы, существуют два основных потока информации: измерительной от датчиков к УВМ и управляющей (командой) от УВМ к исполнительным устройствам объек-

та. Средства, с помощью которых организуется поток измерительной информации, разделены на две группы соответственно для передачи аналоговых и двухпозиционных или цифровых сигналов от датчиков. Как средства передачи измерительной, так и средства передачи управляющей информации включают в себя коммутаторы сигналов и соответствующие преобразователи. Обмен информацией между отдельными устройствами происходит через интерфейсы (схемы сопряжения), с помощью которых передаются стандартные форматы информации. Каждый интерфейс содержит общие информационные магистрали для всех устройств, входящих в него. Интерфейс *И* обслуживает процессор, через него производится обмен информацией между процессором, оперативным запоминающим устройством и каналом ввода-вывода. Интерфейс *В* предназначен для устройств ввода-вывода. К нему подсоединяются все устройства связи УВМ с объектом управления, управление работой интерфейса *В* осуществляет канал ввода-вывода. Прием информации в УВМ от датчиков и вывод информации из УВМ к исполнительным устройствам проходит через канал ввода-вывода. Блок внешних прерываний процессора по сигналам от датчиков АСУ ТП и устройство текущего времени (электронные часы, таймер), формирующее сигналы для организации различных циклов обработки информации и управления объектом, подсоединены непосредственно к интерфейсу *П*. Пульт оператора-технолога связан с УВМ техническими средствами приема и выдачи информации в удобной для оператора форме. Рассмотрим подробнее УСО, а именно коммутаторы и преобразователи.

Характеристики сигналов в УСО. Для передачи информации в АСУ ТП в основном используются электрические сигналы. Это обусловлено не только удобством их передачи по линиям связи и наличием соответствующих датчиков, но и удобством их применения в УВМ и исполнительных устройствах АСУ ТП. Формирование сигналов, несущих информацию, происходит модуляцией одного из электрических параметров. Параметры, которые подвергаются модуляции, называют информационными. У постоянного тока имеется только один информационный параметр — напряжение или ток, у переменного тока три — амплитуда, частота и фаза, а у электрических импульсов число модулируемых параметров еще больше. В АСУ ТП широко применяются как датчики и исполнительные устройства с непрерывно изменяющимися во времени аналоговыми сигналами, так и дискретные датчики, сигналы которых изменяются в определенные моменты времени и принимают одно из дискретных значений. Сигналы, имеющие только два значения, называют двухпозиционными. С помощью таких сигналов представляется цифровая информация. При этом используют несколько двухпозиционных сигналов, образующих цифровые коды.

На проектирование каналов передачи информации в системах управления с УВМ существенное влияние оказывает величина и диапазон изменения модулируемых параметров в сигнале. В зависимости от величины этих параметров сигналы с амплитудной мо-

дуляцией подразделяют на сигналы низкого и высокого уровня. Диапазоны изменения информационных параметров в сигналах унифицированы и утверждены соответствующими стандартами. К аналоговым сигналам напряжения низкого уровня обычно относят сигналы с диапазонами изменения 0—100 мВ или (—50) — (+50) мВ. Для входных аналоговых сигналов напряжения высокого уровня (сигналов, поступающих от датчиков) установлен диапазон изменения 0—10 В, для выходных сигналов напряжения высокого уровня (сигналов, поступающих на входы исполнительных устройств) обычно используется диапазон изменения 0—24 В. Аналоговые сигналы тока высокого уровня характеризуются диапазонами изменения 0—5 мА или 0—20 мА. Аналоговая информация в каналах АСУ ТП передается как сигналами низкого, так и высокого уровня. Дискретная информация передается в основном с помощью сигналов высокого уровня.

Процессор УВМ в соответствии с заданными алгоритмами управления обрабатывает входную информацию о состоянии объекта и формирует управляющую информацию в виде цифровых кодов, которые должны быть преобразованы в управляющие воздействия для исполнительных устройств АСУ ТП. Так как исполнительные устройства используют различные сигналы (непрерывные во времени и импульсные с длительностью, значительно превышающей длительность сигналов командной информации с УВМ), то системы сопряжения УВМ с объектом управления должны содержать технические средства, запоминающие командную информацию до ее замены новой информацией, или средства, формирующие такие сигналы, которые могут быть восприняты входными цепями исполнительных устройств. В зависимости от места расположения этих средств (в УВМ или на исполнительных устройствах) для передачи командной информации в УСО используются различные сигналы.

Системы передачи командной информации от УВМ на исполнительные устройства импульсными сигналами имеют следующие преимущества по сравнению с системами, использующими непрерывные сигналы: 1) меньший объем используемой аппаратуры; 2) возможность обеспечить более высокую надежность системы управления вследствие сохранения командной информации в запоминающем элементе исполнительного устройства при возникновении неисправности в УВМ. Однако в таких системах сравнительно невелика скорость передачи информации и не все исполнительные устройства могут использовать импульсные сигналы, поэтому применяют различные сочетания тех и других систем.

Коммутаторы сигналов. Использование коммутаторов приводит к уменьшению объема оборудования, необходимого для организации приема и выдачи сигналов. В современных АСУ ТП число датчиков и исполнительных устройств достигает нескольких сотен и даже тысяч. Это приводит к необходимости использовать многоканальные устройства для передачи сигналов, основной частью которых являются коммутаторы. По функциональному значению коммутаторы делят на входные и выходные. Входной коммутатор под-

ключает раздельно во времени выходы нескольких датчиков ко входу приемника информации, например ко входу аналого-цифрового преобразователя (см. рис. 8.1). Выходной коммутатор раздельно во времени подключает выход одного источника сигнала, например цифроаналогового преобразователя, ко входу одного из нескольких приемников информации (исполнительных устройств), поэтому входной коммутатор иногда называют собира-тельным, а выходной — распределительным.

Схемы соединения входного и выходного коммутаторов с источниками и приемниками информации показаны соответственно на рис. 8.2, а; 8.2, б. Основными характеристиками коммутатора являются:

1. Число каналов n , оно определяет максимальное число датчиков или исполнительных устройств, которые могут быть подключены к входам или выходам коммутатора.

2. Коэффициент передачи включенного коммутатора, который является масштабным коэффициентом передачи входного сигнала канала на выход коммутатора при условии, что остальные каналы коммутатора выключены.

3. Максимальная абсолютная погрешность включенного канала коммутатора. Эта погрешность определяет максимально допустимую разность между действительным сигналом на выходе коммутатора и его расчетным значением.

4. Частота коммутации каналов. Эта характеристика определяет максимальную скорость переключения каналов в коммутаторе.

Сигналы с выходов датчиков поступают на входной коммутатор непосредственно либо через блок промежуточной обработки сигналов, который может содержать различные фильтры, усилители, вторичные преобразователи. На входы исполнительных устройств сигналы также поступают непосредственно или через блок промежуточной обработки, в состав которого могут входить усилители мощности, элементы гальванического разделения цепей и т. п.

Преобразователи. Как видно из рис. 8.1, кроме коммутаторов, в устройства УСО в качестве основных устройств входят преобразователи: аналого-цифровой (АЦП) и цифроаналоговый (ЦАП). В результате преобразования на выходе АЦП вырабатывается цифровой код, числовое значение которого с определенной точностью

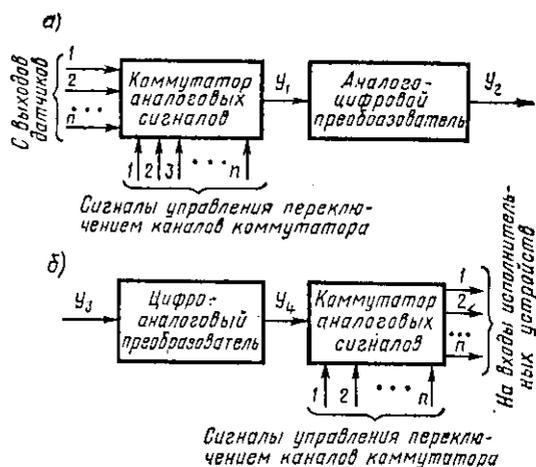


Рис. 8.2

соответствует величине преобразуемого аналогового сигнала. В системах управления АЦП должен быть многоканальным и обладать не только высокой точностью преобразования, но и повышенным быстродействием, чтобы УВМ имела возможность осуществлять автоматическое управление объектом в реальном времени. В процессе преобразования входного аналогового сигнала x , который может принимать произвольное значение в диапазоне от x_{\min} до x_{\max} , вырабатывается цифровой код с ограниченным числом разрядов n , что достигается квантованием сигнала x по уровню. При этом диапазон $N = (x_{\max} - x_{\min})$ разделяется на $m = 2^n - 1$ поддиапазонов, границы которых называют уровнями квантования. Уровни квантования отстоят друг от друга на величину кванта (шага квантования) $q = (x_{\max} - x_{\min}) / (2^n - 1)$. Вопросы выбора q подробно рассматривались в § 6 гл. 6.

Основными методами аналого-цифрового преобразования являются метод последовательного счета, метод поразрядного кодирования и метод считывания. В методе последовательного счета необходимо наличие аналоговых эталонов, равных по величине одному кванту. Преобразование заключается в последовательном суммировании этих эталонов и сравнении образуемой суммы с преобразуемой аналоговой величиной после каждого очередного прибавления эталона. Преобразование заканчивается, когда очередная сумма становится равной или большей величины x .

В методе поразрядного кодирования используют эталоны, значения которых пропорциональны весам разрядов двоичного кода (1, 2, 4, 8, ..., 2^{n-1} , всего n эталонов). Для n -разрядного преобразования уравнивание преобразуемого сигнала выполняется за n тактов и начинается со сравнения сигнала с эталоном, имеющим наибольший вес. В результате первого сравнения получается цифра старшего разряда выходного кода. Эта цифра равна нулю, если преобразуемый сигнал меньше эталона, или единице — в противном случае. При единичном значении старшего разряда эталон с наибольшим весом остается подключенным до конца преобразования. Для определения значения цифры следующего разряда образуются разность между преобразуемым сигналом и величиной старшего эталона, уравнивание которой производится путем сравнения с эталоном, имеющим наибольший вес из оставшихся. Аналогичные операции выполняются для образования всех последующих разрядов кода.

В методе считывания требуется иметь аналоговые эталоны, величины которых равны или пропорциональны всем уровням квантования (всего $2^n - 1$ эталонов), и такое же число сравнивающих устройств, которые одновременно выполняют сравнение этих эталонов с величиной преобразуемого сигнала. Преобразование выполняется за один такт и состоит в нахождении эталона, значение которого наиболее близко преобразуемому сигналу.

Самое высокое быстродействие обеспечивает метод считывания, однако при его реализации требуется много оборудования, поэтому его трудно использовать для построения многоразрядных преобра-

зователей. Наименьший объем оборудования требует АЦП, реализующий преобразование по методу последовательного счета, однако такой преобразователь обладает низким быстродействием. Оптимальен по оборудованию и быстродействию метод поразрядного кодирования.

При цифроаналоговом преобразовании (ЦАП) цифровой код однозначно преобразуется в выходную величину (ток, напряжение и т. п.). Известны три метода ЦАП: метод суммирования квантов аналоговой величины; метод суммирования аналоговых величин, значение которых пропорционально весам разрядов преобразуемого двоичного кода; метод однократного выбора из набора аналоговых величин, значения которых пропорциональны всем возможным значениям двоичного числа от 1 до $2^n - 1$. Указанные методы, как видно из определения, аналогичны рассмотренным выше трем методам аналого-цифрового преобразования. Наиболее широкое применение находят ЦАП, реализующие преобразование по второму методу. Суммирование аналоговых величин, значения которых пропорциональны весам разрядов преобразуемого кода может выполняться как последовательно во времени, так и одновременно (параллельно). Параллельные весовые ЦАП получили наибольшее распространение в АСУ ТП.

Структурная схема ЦАП с параллельным весовым преобразованием показана на рис. 8. 3. Регистр служит для приема и хранения кода числа, подлежащего преобразованию. Выходные сигналы этого регистра управляют элементами блока подключения эталонных сигналов, с помощью которых выходные сигналы блока формирования весовых эталонных сигналов подключаются к соответствующей схеме. Суммирующая схема суммирует подключенные эталоны и формирует выходной аналоговый сигнал напряжения или тока (y), который затем, как правило, усиливается в k раз по мощности ($k \cdot y$) и подается на вход исполнительного устройства объекта управления.

Упрощенная схема передачи управляющей команды от УВМ к регуляторам. Возможный вариант такой схемы с использованием

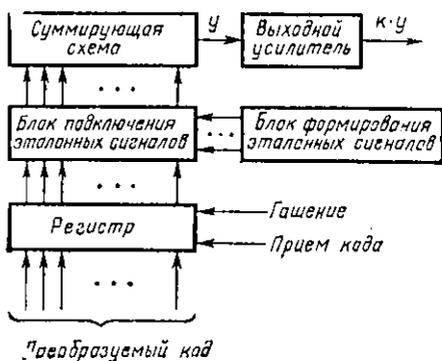


Рис. 8.3

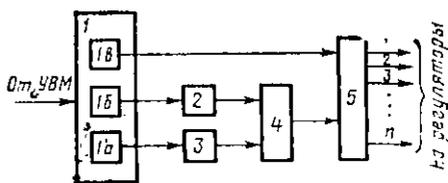


Рис. 8.4

рассмотренных выше элементов коммутации и преобразования представлен на рис. 8.4. Управление регуляторами обычно осуществляется с помощью уставок, поступающих от ЭВМ на вход регулятора в аналоговой форме, при этом цифровое значение управляющей команды поступает в регистр *1*; *1a* — адресная часть команды, определяющая регулятор, которому соответствует команда; *1б* — управляющая часть команды, пропорциональная значению уставки; *1в* — знак управляющего воздействия. Блок 2 является цифро-аналоговым преобразователем, блоки 3 и 4 выполняют функции коммутации, причем в блоке 3 осуществляется дешифрация адреса регулятора, открывающего один из ключей коммутатора (блок 4). Блок 5 изображает выходные схемы управления (обычно усилители мощности), число которых равно числу управляемых регуляторов *n*.

§ 8.2. АГРЕГАТИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Общая характеристика агрегатной системы средств вычислительной техники (АСВТ). Первая очередь системы, которая выполнялась на дискретных элементах, получила название АСВТ-Д. В ее рамках были созданы четыре модели, отличающиеся характеристиками процессора и составом модулей: М-1000, М-1010 («Ангара»), М-2000, М-3000. Вторая очередь комплекса (АСВТ-М) выполнялась на интегральных элементах третьего поколения. При этом была усовершенствована не только элементная база, но и структура системы. В рамках АСВТ-М были разработаны модели М-4000, М-6000. Дальнейшим развитием системы явилось создание комплекса М-7000 и серии комплексов СМ. Система представляет собой совокупность аппаратных и программных модулей, на основе которых можно компоновать информационные и управляющие вычислительные комплексы с различной производительностью, составом входов и выходов, емкостью памяти, надежностью и т. п. Современная архитектура и элементная база третьего поколения обеспечивают системе высокие технические параметры при относительно низкой стоимости и малых габаритах.

Основная область применения комплексов АСВТ — это системы управления в реальном времени, но они могут также использоваться для инженерных и исследовательских расчетов. На базе средств АСВТ можно осуществлять: сбор информации от различных типов датчиков (аналоговых, кодовых), включая ее предварительную обработку; контроль за состоянием технологического процесса, в том числе сигнализацию об отклонениях параметров и неисправностях на объекте управления; выработку управляющих воздействий на двухпозиционные исполнительные механизмы; непосредственное управление местными регуляторами; решение оптимизационных задач управления. Имеется возможность обеспечивать сопряжение с ЕС ЭВМ, АССТ и другими комплексами технических средств. Возможен выход на стандартные телефонные и телеграфные каналы связи.

Вся совокупность модулей АСВТ по своему функциональному назначению делится на следующие группы: 1) устройства центрального управления и переработки информации (процессоры); 2) устройства хранения информации; 3) устройства связи с объектами, которые обеспечивают связь информационной части системы с датчиками и исполнительными механизмами; 4) устройства связи с оперативным персоналом (это пульты оператора и программиста, различные регистраторы информации, устройства сигнализации и индикации, мнемосхемы, считыватели графической информации, графопостроители и т. п.); 5) устройства выхода на внешние (внесистемные) линии связи, которые обеспечивают подключение системы к телефонным, телеграфным, радиорелейным и другим линиям связи; 6) устройства внутрисистемной связи.

Для всех процессоров АСВТ принята единая система команд, соответствующая современному уровню машин третьего поколения. Основной единицей информации служит байт, который содержит восемь двоичных информационных разрядов и один разряд (девятый) контрольный. Машинное полуслово (слово) содержит 2 байта, полное слово — 4 байта, двойное слово — 8 байтов.

Команды комплекса АСВТ позволяют выполнять: арифметические операции над двоичными числами с фиксированной и плавающей запятой; арифметические операции с десятичными числами; основные логические операции над машинными словами и битами информации (конъюнкции, дизъюнкции, сравнения, сложения по модулю 2 и др.); операции передачи управления (условный и безусловный переходы) операции переключения состояния, предназначенные для формирования некоторого слова, характеризующего состояние программы, например, «работа — останов», «счет — операция»; операции ввода-вывода («начало ввода-вывода», «останов ввода-вывода», «проверка канала»). Например, в команде «начало ввода-вывода» указывается номер канала и номер устройства, которое должно осуществлять ввод-вывод. Все остальные действия по приему (передаче) информации осуществляет канал, а процессор переходит к выполнению новой команды. Параллельная работа канала и процессора значительно экономит машинное время.

В комплексе АСВТ имеется развитая система: 1) прерываний, которые могут осуществляться по запросу устройств ввода-вывода; 2) рабочей программы (при обнаружении ошибок); 3) внешних источников информации (в том числе по сигналам оператора, например нажатие кнопки); 4) устройств схемного контроля исправности системы; 5) программы диспетчера, обеспечивающей прохождение рабочих программ. Обмен информацией между вычислительным комплексом и внешними устройствами, а также обслуживающим персоналом осуществляет система управления вводом-выводом, которая входит в операционную систему внутреннего математического обеспечения.

Общие данные о системе малых ЭВМ (СМ ЭВМ). Система малых электронных вычислительных машин (мини-ЭВМ) создается в содружестве социалистических стран. В настоящее время

СМ-ЭВМ включает процессоры СМ-1П, СМ-2П, СМ-3П, СМ-4П. Производительность СМ-1, СМ-3—200 тыс., СМ-2—400 тыс., СМ-4—800 тыс. операций в секунду. Процессоры СМ-1П, СМ-2П соответствуют характеристикам отечественных ЭВМ М-6000 и М-7000, поэтому ЭВМ СМ-1, СМ-2 ориентированы прежде всего на применение в таких системах, где уже имеется большой задел программного обеспечения для ЭВМ М-6000, М-7000.

Вычислительный комплекс на базе процессора СМ-1П по объему памяти, быстродействию, числу подключаемых внешних устройств близок к комплексам М-6000, М-7000, но отличается более высокими эксплуатационными характеристиками. Он имеет более развитую систему контроля и диагностики, автоматизацию восстановления системы при сбоях, автоматизацию начальной загрузки программ и запуска системы. Комплексы типа СМ-1 могут использоваться совместно с комплексами М-6000, М-7000, ЕС ЭВМ.

ЭВМ СМ-3 и СМ-4 включают в себя большое число принципиально новых структурных решений, направленных на упрощение программирования, построение разнообразных вычислительных, управляющих, информационных, измерительных комплексов, которые оптимальным образом настраиваются на работу в конкретных условиях. Новые структурные решения, примененные в СМ-3 и СМ-4, обеспечивают аппаратную (не программную) реализацию большого числа системных функций в различных режимах: реального времени (обработка прерываний, сохранение информации и перезапуск задачи при кратковременном отключении питания, аппаратно-программный контроль); разделения времени (защита и динамическое перераспределение памяти, динамическое изменение приоритетов решаемых задач); решения информационно-поисковых задач (обработка информации различного формата — бит, байт, слово, двойное слово; обработка и пересылка массивов информации и др.). Аппаратное исполнение сложных системных функций происходит в процессоре на порядок быстрее, чем исполнение тех же функций с помощью программных модулей.

Конструктивно комплексы СМ-3 и СМ-4 выполнены в виде набора модулей: процессора, памяти и устройств связи с объектом (УСО). Комплексы могут включать в себя следующие модули: расширения УСО (от нескольких сотен до нескольких тысяч входных и выходных сигналов), расширения внешней памяти на магнитных носителях, построения двухпроцессорных систем. Возможности применения СМ-3 и СМ-4 расширяются благодаря устройствам связи с микропроцессорными ЭВМ, что позволяет строить распределенные информационные, управляющие и измерительные системы, в которых СМ-3 и СМ-3 выполняют функции центральной ЭВМ. Включение в номенклатуру СМ ЭВМ электронного планшетного графопостроителя (ЭПГ СМ) расширяет возможности работы с графической информацией в диалоговом режиме. Обмен информацией между всеми устройствами, включая процессор, оперативное запоминающее устройство, УСО, а также

специализированные устройства, осуществляется через магистральный интерфейс [устройство сопряжения «общая шина» (ОШ)].

СМ-3 и СМ-4 могут использовать пять типов устройств связи с объектом (УСО), которые обеспечивают различные наборы входных (выходных) сигналов с заданными характеристиками:

1. УСО с интерфейсом ОШ. К этому типу относится УСО, обеспечивающее ввод-вывод аналоговых (УВА) и дискретных (УВД) сигналов. Возможно комплектовать автономные комплектные блоки (64—256 сигналов) или стойки УСО (256—1024 сигнала). Удаление датчиков ввода аналоговых сигналов от СМ-3 и СМ-4 не должно превышать 600 м.

2. УСО с интерфейсом 2К (название устройств сопряжения из номенклатуры ЭВМ М-6000, М-7000, СМ-1, СМ-2). Для подключения этих устройств используются устройства сопряжения — соглашения ОШ/2К.

3. Модули международной системы стандартов КАМАК. Этот тип УСО повышает эффективность систем с часто перестраиваемой структурой (автоматизация научных исследований, контроль и измерение, обработка опытных процессов и т. п.).

4. Модули из номенклатуры агрегатных средств электронизмерительной техники (АСЭТ), которые предназначены для применения в контрольно-измерительных комплексах.

5. Одноплатные модули УСО из номенклатуры микро-ЭВМ СМ-1800 (см. § 8.3). С помощью интерфейсной платы ОШ/шина СМ-1800 микро-ЭВМ СМ-1800 со всеми своими внешними устройствами подключается к СМ-3 или СМ-4.

Элементы, применяемые в схемах, которые реализуют «общую шину», обеспечивают возможность подключения не более 20 нагрузок (приемников и передатчиков) при общей длине не более 15 м. Если в состав комплекса требуется подключить большее количество устройств или же если длина магистралей должна быть больше 15 м, то для продолжения магистралей необходимо использовать блоки расширения ОШ. После каждого такого блока расширения к магистральям ОШ может быть подключено дополнительно до 20 нагрузок и общая длина увеличивается на 15 м.

Для присоединения к ОШ устройств, находящихся от процессоров на расстояниях в несколько десятков метров и более, используются средства системы телеобработки данных. Это модемы М (название образовано от слов модуляция и демодуляция) и устройства преобразования сигналов (УПС). Модемы и УПС предназначены для преобразования двоичной информации, поступающей из управляющего вычислительного комплекса (УВК), в форму необходимую для передачи по линиям связи, а также для обратного преобразования. В случаях когда периферийное устройство (терминал) располагается в непосредственной близости от УВК, используется разновидность модема: пульс-модем. Для присоединения модемов и УПС к системным интерфейсам применяют адаптеры (АПД) и мультиплексоры (МПД) передачи данных. Как правило, мультиплексор в отличие от адаптера (устройство приспособления,

согласования) обеспечивает выход УВК на несколько каналов связи. Мультиплексором называется устройство, выбирающее данные от одного из двух и более входных информационных каналов и подающее их на свой выход. Демультиплексор подает данные, поступающие на его вход, на один из двух или более выходных информационных каналов. Кроме М, УПС, АПД и МПД в системах телеобработки данных применяются автоматические вызывные

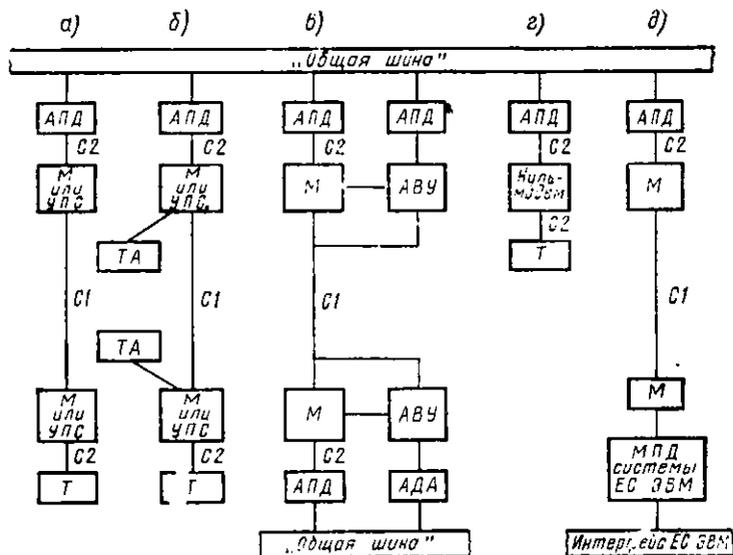


Рис. 8.5

устройства (АВУ), адаптеры автоматического вызова (АДА), устройства защиты от ошибок (УЗО), а также ряд терминалов (Т) различного состава и назначения.

На рис. 8.5 показано несколько вариантов возможного построения структур систем передачи данных с использованием средств СМ ЭВМ: связь УВК с удаленным терминалом (рис. 8.5, а); связь УВК с удаленным терминалом при обеспечении возможности проведения служебных телефонных разговоров через подсоединенный телефонный аппарат (ТА, рис. 8.5, б); связь двух УВК по выделенным или коммутируемым телефонным каналам с обеспечением возможности автоматического установления соединения (рис. 8.5, в); связь УВК с близко расположенным терминалом (рис. 8.5, г), связь УВК на основе средств СМ ЭВМ с комплексом системы ЕС ЭВМ (рис. 8.5, д). На рис. 8.5 через С1 и С2 обозначены стандартные стыки.

В качестве элементной базы в СМ ЭВМ используются интегральные микросхемы малой и средней степени интеграции. В от-

дельных узлах применяются большие интегральные схемы (БИС). Интегральные микросхемы СМ ЭВМ можно разделить на следующие крупные категории: логические интегральные микросхемы, интегральные микросхемы оперативной и постоянной памяти, интегральные микросхемы интерфейсного оборудования, линейные интегральные микросхемы. В ряде случаев в таких узлах, как блоки питания, фильтры, генераторы и т. п., применяются дискретные элементы: транзисторы, резисторы, трансформаторы, кварцевые резонаторы и т. п. Нормальными и рекомендуемыми климатическими условиями эксплуатации являются температура окружающего воздуха (20 ± 5)°С, относительная влажность воздуха (65 ± 15)%, атмосферное давление 84—107 кПа. Для размещения комплексов СМ-3 и СМ-4 необходима площадь не менее 15 м², для вспомогательного оборудования — не менее 10 м².

Архитектура СМ-3 и СМ-4 обеспечивает наибольшую эффективность при решении задач для систем автоматизации технологических процессов, научных экспериментов и АСУП. Под архитектурой ЭВМ понимается структура памяти, механизмы адресации, функциональная схема процессора, форматы команд, средства управления периферийными устройствами и т. п., т. е. все то, что машина предоставляет программисту, работающему на уровне машинных команд. По структуре команд все команды процессоров СМ-3П и СМ-4П можно условно разделить на двухадресные и одноадресные команды, условные переходы, команды управления кодами условий, специальные команды. Основной формат, принятый для представления адреса операндов, — 16-разрядное слово. Наименьшая адресуемая единица информации — 8-разрядный байт. Объем запоминающих устройств, который определяется 16-разрядным адресом, составляет $2^{16} = 64$ К байт ($K = 1024$) или $2^{15} = 32$ К слов. Для процессора СМ-4П объем памяти может быть увеличен до 128 К слов. Чтобы обеспечить работу с таким объемом памяти, в составе процессора СМ-4П имеется дополнительный блок-диспетчер памяти, отсутствующий в процессоре СМ-3П.

Комплекс средств сбора и подготовки данных на базе процессора СМ-1П (КСПД-1). Рассмотрим этот комплекс, предназначенный для автоматизации процессов регистрации, дистанционного сбора, концентрации, первичной обработки информации и организации обмена с центральной ЭВМ (М-4030, ЕС ЭВМ). Комплекс КСПД-1 обеспечивает:

дистанционный сбор цифровой и алфавитно-цифровой информации о ходе производственного процесса с пультовых регистраторов, установленных непосредственно на местах возникновения информации (цеха, склады и др.) в реальном времени работы оператора; независимую работу всех регистраторов информации, входящих в комплекс;

формирование сообщений в оперативной памяти и их обработку в соответствии с заданными выходными форматами сообщений;

поиск сообщения по запросу оператора и его выдачу на терминальное устройство;

обработку принятой информации, решение задач оперативного управления по программам пользователя в свободное от приема сообщений время;

связь с ЭВМ верхнего уровня.

КСПД-1 состоит из модулей технических средств и программного обеспечения. По количеству входящих в комплекс модулей технических устройств КСПД-1 имеет четыре варианта исполнения, представленных в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Устройство	Количество устройств, входящих в варианты комплексов КСПД-1			
	КСПД-1/1	КСПД-1/2	КСПД-1/3	КСПД-1/4
Комплекс базовый вычислительный СМ-1 № 4	1	1	1	1
Пультный регистратор информации	8	16	24	32
Аппаратура передачи данных АПД-МПП	9	18	27	36
Модуль сопряжения с аппаратурой передачи данных АПД-МПП А721-6/1	1	2	3	4
Согласователь сопряжения А711-1/6	1	1	1	1

Регистратор информации РИ-2401 обеспечивает ввод цифровой информации с клавиатуры, перфокарты, из канала связи; вывод цифровой информации на индикацию (16 разрядов), в канал связи. Регистратор РИ-6401 кроме операций, выполняемых РИ-2401, обеспечивает вывод на печать (узкий бланк). РИ-6402 выполняет те же операции, что и РИ-6401, но не только с цифровой, а с алфавитно-цифровой информацией. Аппаратура передачи данных АПД-МПП предназначена для обмена информацией между пультными регистраторами информации и СМ-1 № 4. Устанавливается АПД-МПП на расстоянии до 50 м от регистратора информации. Дальность передачи от АПД-МПП к СМ-1 № 4 уменьшается с увеличением скорости передачи. Предусмотрены режимы работы, при которых вероятность ошибочной передачи символа равна 10^{-6} :

Дальность, км	14	10	7	4
Скорость, бит/с	1200	2400	4800	9600

Модуль сопряжения АПД-МПП А721-6/1 осуществляет подключение АПД-МПП к СМ-1 № 4. Согласователь сопряжения А711-1/6 обеспечивает передачу информации между КСПД-1 и ЕС ЭВМ.

В КСПД-1 может использоваться дисплейный модуль типа ДМ-2000 А544-2, который предназначен для оперативного обмена информацией человека с ЭВМ. Размер изображения на экране дисплея 180×250 мм, емкость экрана 1920 знаков, количество знаков в строке — 80, количество строк — 24, размер знаков 4×3 мм. Алфавит индицируемых символов: русский алфавит — 32, латинский

алфавит — 26, цифры — 10, специальные символы — 28, дополнительные символы — 7.

Программное обеспечение (ПО) комплекса КСПД-1 обеспечивает функционирование и эффективное использование всех технических средств, входящих в него. ПО строится по модульному принципу с обеспечением возможности компоновки различных вариантов в зависимости от назначения, характера использования и состава конкретных систем КСПД-1. Предусмотрена возможность развития ПО путем введения новых модулей без изменения уже существующих. В состав ПО входят программы: операционной системы, системы подготовки программ, библиотека и пакеты прикладных программ, программы проверки функционирования оборудования.

Характеристика некоторых основных устройств СМ-3 и СМ-4. Процессор СМ-3П в зависимости от страны-изготовителя выпускается под различными шифрами (СМ-2103, СМ-2301, СМ-2303, СМ-2302), однако с тождественными характеристиками. Конструктивно процессор выполнен в виде автономного комплектного блока, в котором размещаются: собственно процессор, включая память микропрограмм и инженерную панель (пульт); оборудование для подключения периферийных устройств и оперативной памяти к ОШ; таймер; источники питания и вентиляторы. Этот блок может быть установлен на столе (приборный вариант) или размещен в шкафу вместе с другими комплектными блоками. Основные форматы обрабатываемой информации: числа с фиксированной запятой (16 разрядов), числа с плавающей запятой (32 и 48 разрядов), логические операнды (1, 8 и 16 разрядов). Максимальный объем адресуемого запоминающего устройства — 28 К 16-разрядных слов. Из общего объема памяти в 32 К, о которой упоминалось выше, объем в 4 К используется для обмена информацией (адресами, данными и управляющими сигналами) между процессором и памятью по тому же принципу, что и между процессором и внешними устройствами через интерфейс ОШ. При этом отпадает необходимость в специальных командах ввода-вывода процессора. Время выполнения коротких операций типа регистр — регистр — 5 мкс, масса 25 кг, потребляемая мощность 30 В·А.

Процессор СМ-4П (СМ-2104, СМ-2402) по сравнению с СМ-3П обладает повышенной производительностью и более широкими системными возможностями за счет расширенного базового набора команд и увеличения памяти. В нем предусмотрено автоматическое прерывание программы при изменении напряжения питающей сети сверх допустимых значений и автоматический пуск после восстановления напряжения (рестарт). В отличие от СМ-3П могут обрабатываться числа с фиксированной запятой по 8 и 16 разрядов, числа с плавающей запятой — 32 разряда. Время выполнения операций типа регистр — регистр — 1,2 мкс, типа регистр — память — 2,5 мкс, типа память — память — 3,9 мкс.

В качестве основных автономных блоков оперативной памяти используются блоки емкостью до 32 К слов: ферритовые устройства СМ-3100, СМ-3101, СМ-3103, а также память полупроводниковая автономная СМ-3501. В этих блоках предусмотрена возможность сохранения информации при отклонении питающего напряжения и блокировка обращения к 4К старшим адресам, которые не могут использоваться для адресации запоминающего устройства. Кроме того, могут использоваться следующие блоки емкостью до 16 К слов: устройства оперативной памяти СМ-3102, модуль полупроводниковой памяти СМ-3510. Для процессора СМ-4-20 предназначена память СМ-3511, в которой имеется возможность внутренними переключками определять различные варианты используемого объема памяти: 0—16 К; 0—32 К; 0—48 К; ...; 0—128 К слов.

Программируемый таймер предназначен для обработки заданных интервалов времени, измерения времени, контроля работоспособности УВК, формирования серии импульсов, используемых в других устройствах. Тактовые сигналы могут генерироваться с частотой 100 кГц, 10 кГц, 50 Гц и от внешних импульсов. Точность обработки интервалов времени — $\pm 0,01\%$.

Алфавитно-цифровые видеотерминалы СМ-7202, СМ-7203, СМ-7204; СМ-7205, СМ-7206, СМ-7209, СМ-7219 предназначены для ввода-вывода информации и обеспечивают быструю и удобную связь с комплексом как непосредственно, так и через линии передачи данных. Видеотерминал представляет собой настольное устройство, которое содержит: дисплей, предназначенный для отображения на экране выводимой из ЭВМ или набираемой на клавиатуре алфавитно-цифровой информации; клавиатуру, предназначенную для передачи в ЭВМ или на экран дисплея алфавитно-цифровой информации. Дисплей содержит: экранный пульт; устройство управления для выполнения всех управляющих функций, в том числе и операций редактирования текста; устройство сопряжения ввода-вывода; буферную память. Видеотерминал имеет независимый выход для печати, который позволяет с помощью подключенного печатающего устройства создавать копии информации, содержащейся на экране. В зависимости от типа видеотерминала размеры экрана дисплея изменяются от 200×137 до 258×180 мм, количество строк от 16 до 24, количество знаков в строке от 72 до 80, емкость буферной памяти от 1280 до 1920 знаков.

Устройство отображения графической информации СМ-7300 предназначено для отображения на экране электронно-лучевой трубки графической и алфавитно-цифровой информации, которая выводится из УВК, коррекции этой информации и ввода новой с помощью светового пера и клавиатуры. СМ-7300 включает в себя: устройство отображения (монитор) на основе электронно-лучевой трубки; клавишное устройство ввода; световое перо; дисплейный процессор, обеспечивающий управление обменом информацией с процессором СМ-3П или СМ-4П. Монитор обеспечивает воспроизведение графической и алфавитно-цифровой информации на экране и выдает в дисплейный процессор сигналы при срабатывании светового пера. Клавишное устройство предназначено для ввода символической информации и обращения к подпрограммам с целью выполнения стандартных операций над изображением. Размер изображения 240×240 мм, количество строк — 40, число символов в строке — 72, количество уровней яркости — 8, количество типов линий — 4, количество символов в алфавите — 128. Имеется возможность выделения элемента, указанного световым пером путем мерцания и путем изменения яркости.

Интеллектуальный алфавитно-цифровой терминал СМ-7401 предназначен для применения в качестве внешнего устройства, а также в качестве самостоятельной микро-ЭВМ, свободно программируемой пользователем. Он применяется в тех областях, где использование малых ЭВМ неэкономично, а также для построения сетей телеобработки данных, например: для управления и контроля технологическим процессом, для сбора, анализа и регистрации данных, для обработки информации.

Программируемое устройство сбора данных СМ-6900 используется для сбора данных и регистрации полученной информации на бумажной перфолене или на магнитной ленте. Устройство управления построено на основе микропроцессора. Для запоминания программ управления работой устройств и механизмов, а также программ сбора данных используется полупроводниковая память, общим объемом до 5 К байт. Скорость печати в непрерывном режиме до 45 знаков в секунду.

Адаптер дистанционной связи асинхронный СМ-8501 обеспечивает скорость передачи данных от 50 до 9600 бит/с. Количество каналов от 1 до 8, вид линий связи — телефонные, телеграфные, способ передачи — последовательный, разрядность передаваемого кода — 5, 6, 7 или 8. Модем-200 (СМ-8101) используется для передачи данных по двухпроводной коммутируемой или выделенной телефонной линии, скорость передачи до 300 бит/с. Подключение модема к терминалу осуществляется по стыку С2, а к каналу связи — по стыку С1 (см. рис. 8.5). Модем-1200 (СМ-8102) имеет две скорости передачи — 600 и 1200 бит/с, модем-2400 (СМ-8103) — 1200 и 2400 бит/с, нуль-модем (СМ-8105) до 48 000 бит/с.

Модуль ручного ввода и представления технологической информации СМ-9402 предназначен для ввода и вывода из ЭВМ данных, состоящих из десятичных цифр, промежуток-пробела и специальных управляющих команд. Ввод осуществляется оператором с помощью клавишей, а вывод производится на функциональные и цифровые индикаторы.

Устройство содержания вычислительных машин (УСВМ А71118) предназначено для организации многомашинных иерархических комплексов на базе моду-

ля М4030 в качестве управляющей машины и одного из комплексов СМ-4 в качестве управляемой. Устройство реализует подключение к каналу управляющей машины, передачу данных, начало и прекращение обмена информацией между машинами по инициативе любой из них, связь СМ-3 и СМ-4 с вычислительными машинами ряда ЕС ЭВМ.

Программное обеспечение СМ ЭВМ. Это обеспечение наряду с общими чертами программного обеспечения ЕС ЭВМ имеет существенные отличия, обусловленные техническими параметрами и особенностями областей применения малых ЭВМ. Для СМ ЭВМ приходится учитывать следующие особенности: ограниченность ресурсов процессора (малая длина слова, ограниченный объем оперативной памяти); использование ЭВМ для управления процессами и объектами в реальном времени; наличие широкого набора устройств связи с объектами, сбора, передачи, хранения и отображения данных; возможность работы пользователя в диалоге с системой в режиме разделения времени; большое разнообразие сфер применения, ориентация, в основном, на задачи средней сложности.

Для рационального сочетания универсальности и специализации предусмотрено подключение как программных, так и аппаратных модулей, выполняющих различные функции: логико-математической обработки данных (математические), которые реализуют численные и аналитические методы; сбора, передачи, ввода, организации, хранения, отображения и обработки (линеаризация, сглаживание, фильтрация и т. п.) информации (технологические); управления техническими средствами, обеспечивающими выполнение технологических функций (технические); контроля и проверки технических средств (тестовые); организации и управления вычислительным процессом (управляющие); упрощения связи человека с системой, создания максимальных удобств в работе пользователя (эргономические).

В системе программного обеспечения СМ-3 и СМ-4 имеется набор операционных систем (ОС) различного назначения. Среди этих систем имеются системы широкого назначения и узкоспециализированные, обеспечивающие эффективное решение задач. В набор ОС входят две системы общего назначения (перфоленточная — ПЛОС и дисковая ДОС), четыре системы реального времени (перфоленточная — ПЛОС РВ, дисковая ДОС РВ, фоновая-оперативная базовая операционная система — ФОБОС, многозадачная система широкого назначения — ОС РВ), две системы с разделением времени (диалоговая многопультная система — ДИАМС, дисковая операционная система — ДОС РВР).

ПЛОС представляет собой комплекс программ, предназначенных для подготовки, отладки и выполнения программ пользователя на языке АССЕМБЛЕР в однопрограммном режиме (для одного пользователя). ДОС предназначена для разработки, отладки и выполнения программ в пакетном и диалоговом режимах, написанных на языках ФОРТРАН-IV, АССЕМБЛЕР или МАКРОАССЕМБЛЕР, при неограниченном числе пользователей. ПЛОС РВ используется для решения широкого класса задач, возникающих в системах управления промышленными объектами. Одновременно может решаться до 128 задач, написанных на языках АССЕМБЛЕР или МАКРОАССЕМБЛЕР. ДОС РВ предназначена для создания

систем автоматизации научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, количество пользователей — до 128, языки программирования задач — АС-СЕМБЛЕР, МАКРОАСЕМБЛЕР, ФОРТРАН-IV. ФОБОС используется на базе процессоров СМ 2103 или СМ-2104 и применяется для автоматизации лабораторных экспериментов, управления быстро протекающими процессами при одном пользователе. Языки программирования в системах ФОБОС и ОС РВ те же, что и для ДОС РВ. Количество пользователей в ОС РВ, как и в ДОС, произвольное. ДИАМС ориентирована на управление базами данных и решение информационно-логических задач для АСУ ТП и других систем, где требуется сбор, хранение и обработка данных (на АС-СЕМБЛЕРЕ, МАКРОАСЕМБЛЕРЕ, ФОРТРАНЕ-IV) в режиме коллективного доступа к базам данных многих пользователей (до 40) с различных, в том числе и удаленных, терминалов. ДОС РВ предназначена для одновременного обслуживания удаленных пользователей (до 24) в интерактивном режиме (режим взаимодействия). ДОС РВ обеспечивает доступ пользователей к задачам и данным, находящимся в системе, и независимое выполнение их задач, написанных на языке высокого уровня диалогового типа БЕЙСИК-ПЛЮС.

Базовые пакеты прикладных программ СМ-3 и СМ-4 можно разделить на процедурно-ориентированные, технологически-ориентированные и проблемно-ориентированные. В состав процедурно-ориентированных входят пакеты программ: численного анализа, обработки данных методами математической статистики, методов оптимизации, методов сетевого планирования. Технологически-ориентированный пакет состоит из средств телеобработки данных (СТОД), программированного обеспечения устройств связи с объектами (ПО УСО), пакета машинной графики (ПМГ), пакета программ для ведения банков данных на иерархических многомашинных комплексах СМ-3, СМ-4 и М-4030 (ИРИС). СТОД предназначены для управления процессами передачи данных по линиям связи. ПО УСО обеспечивает решение задач: 1) сбора, обработки и вывода на терминал информации от аналоговых датчиков, устройств ввода-вывода дискретных сигналов; 2) локализации неисправностей технических средств УСО; 3) обеспечивает эффективное применение технических средств в АСУ ТП. ПМГ включает в себя программное базовое обеспечение графических систем (БОГС), построенных на основе ЭПГ СМ.

Основу БОГС составляет графический монитор, предоставляющий пользователю возможность писать свои прикладные задачи вывода графической информации на экран дисплея, а также задачи ввода от символьной и функциональной клавиатуры и светового пера. В БОГС включена прикладная задача, позволяющая вызвать на экран дисплея изображение для просмотра и редактирования. Имеются возможности добавить или удалить отрезок, провести ломаную линию, добавить графический элемент из библиотеки на диск. Наряду с этим БОГС включает в себя систему подготовки данных для станков с числовым программным управлением, которая позволяет просматривать на экране рассчитанную траекторию, выделять отдельные элементы траектории для их привязки к исходным операторам программы описания траектории. Такая система может использоваться при решении задач автоматизации раскройных и швейных изделий в подготовительно-раскройных подразделениях легкой промышленности (см. § 5.1).

Единая система электронных вычислительных машин (ЕС ЭВМ). Эта система представляет собой ряд машин, построенных по единому принципу работы, где применяются единая номенклатура внешних устройств и унифицированная элементная база. Ряд машин, которые входят в ЕС ЭВМ, включает в себя вычислительные машины различной мощности и производительности: быстродействие от 10 до 1500 тыс. операций в секунду, объем оперативной памяти от 8 до 2048 тыс. байтов. Все модели системы относятся к наиболее современным средствам вычислительной техники. На основе ЕС ЭВМ могут быть созданы системы хорошо приспособленные для реализации информационных задач, связанных со сбором и обработкой большого числа данных, т. е. для построения автоматизированных систем управления предприятием (АСУП) или отраслью (ОАСУ). Таким образом, эти машины используются не как средства непосредственного управления технологическим процессом, т. е. для АСУ ТП, а как управляющее звено более высокого уровня, которое имеет в своем подчинении машины нижнего уровня, например СМ-1. Это объясняется тем, что в составе ЕС ЭВМ нет технических средств непосредственной связи с объектом управления (с датчиками, исполнительными механизмами), тогда как в составе АСВТ имеется широкий набор этих средств.

Агрегатная система средств телемеханики (АССТ). Комплекс АССТ используется для управления технологическими процессами на базе вычислительной техники с повышенными требованиями по надежности. Он представляет собой набор функциональных блоков, которые ориентированы на создание:

устройств обработки информации, включая запоминание, логические и арифметические преобразования и вывод;

устройства, предназначенных для связи с обслуживающим персоналом (ввод и представление информации);

телемеханических устройств приема и передачи оперативно-технологических данных;

устройств сопряжения функциональных блоков с технологическими объектами и средств телемеханики со средствами вычислительной техники.

Блоки АССТ допускают сопряжение с агрегатированными комплексами, в частности с комплексом АСВТ, агрегатной системой электронизмерительной техники (АСЭТ), агрегатной системой первичной обработки информации (АСПИ), агрегатной системой контроля и регулирования (АСКР).

§ 8.3. МИКРОПРОЦЕССОРЫ И МИКРО-ЭВМ

Наряду с системами малых ЭВМ для эффективного управления технологическими процессами все большее значение приобретают микропроцессоры и микро-ЭВМ. Традиционный подход к созданию АСУ ТП по принципу централизованных систем управления не всегда обеспечивает требуемую живучесть системы, приводит к удорожанию ее в связи с многократным увеличением точек контроля. Это, в свою очередь, приводит к значительному снижению надежности системы, так как центральный процессор предназначается для выполнения многих второразрядных функций, не обеспечивает гибкости системы при изменении состава технологического оборудования, усложняет программирование задач управления. В связи с этим в создании систем управления технологическими процессами в последнее время наметился подход к разработке децентрализованных или частично децентрализованных систем, что стало возможным с появлением микропроцессоров.

Их применение в децентрализованных АСУ ТП обеспечивает ряд дополнительных преимуществ:

упрощение программирования в связи с распределением программ в децентрализованных АСУ между отдельными процессорами

ми, вследствие чего организация взаимодействия программ несравненно проще, чем в АСУ ТП с одним процессором;

ускорение реакции в реальном времени, резко упрощающее проблемы дисциплины обслуживания и установления приоритетов;

повышенную надежность благодаря возможности выполнять некоторые вычисления более чем в одном процессоре.

Некоторые рассмотренные выше принципы построения комплексов средств вычислительной техники, такие, как модульность, использование интегральных схем, наличие разнообразного периферийного оборудования, систем связи и тому подобного, характерны и для микро-ЭВМ, поэтому в данном параграфе рассмотрим только отличия и особенности указанных устройств.

Предпосылки создания микропроцессорной техники. Специфика управления технологическими процессами требует от устройств управления низкой удельной стоимости выполнения отдельной операции, высокой мобильности и большой надежности работы в условиях промышленных цехов. Установки с числовым программным управлением, различные роботы, транспортные системы, сложные химические, физические, тепловые и другие процессы наиболее эффективно могут управляться (особенно при малосерийном и часто изменяющемся производстве) от вычислительных систем, которые можно быстро перепрограммировать в соответствии с решаемыми задачами. Однако вычислительная техника типа ЕС ЭВМ, СМ ЭВМ не удовлетворяет полностью этим требованиям. Так, показатель удельной стоимости для ЕС ЭВМ составляет несколько рублей на операцию в секунду, для мини-ЭВМ около 0,1 руб., тогда как необходим уровень 0,05 руб. на операцию в секунду и ниже.

Основной проблемой, стоящей на пути построения широкого класса микропроцессорных систем, является проблема объединения небольших, но очень дешевых вычислительных мощностей в единую систему, способную решать сложные задачи. Кроме того, сам по себе процессор не может решать разнообразные задачи управления. Нужны еще запоминающие устройства и интерфейсы. Все это, вместе взятое, составляет микро-ЭВМ. Обладая большими вычислительными возможностями, микро-ЭВМ при крупносерийном производстве имеют низкую стоимость и малые габариты. В отличие от обычных ЭВМ микро-ЭВМ целиком выполняются по интегральной технологии на миниатюрном кристалле, который можно легко встраивать непосредственно в станки, технологические установки, транспортные средства и т. п.

В настоящее время под микропроцессором понимается законченное в функциональном отношении устройство обработки данных, построенное на одной или нескольких больших интегральных схемах (БИС). Изобретение микропроцессора является революционным событием в технологии БИС, а также схемотехники и вычислительной техники. Разрешилось противоречие между необходимой высокой степенью интеграции функциональных элементов и большим числом различных типов БИС, которое было необходимо для

создания достаточно широкого класса вычислительных устройств. До появления микропроцессоров на БИС применение так называемых заказных БИС было экономически оправданным только в отдельных случаях, когда обеспечивалась большая серийность их выпуска. В других случаях преимущество было на стороне схем малой и средней степени интеграции. Попытки создать небольшой набор стандартных БИС, который позволил бы, как и в агрегатированных комплексах, строить различные логические блоки по модульному принципу, не дали результата. В то же время быстро прогрессировала технология БИС запоминающих устройств (ЗУ). Благодаря однородной и регулярной структуре ЗУ удалось достичь такой плотности элементов, что БИС ЗУ по удельной стоимости на бит информации стали предпочтительнее ферритовых. Кроме того, полупроводниковые микросхемы ЗУ обеспечили невиданное ранее быстродействие — 10–100 нс на кристалл. Они нашли широкое применение, что обеспечило выделение больших средств на совершенствование технологии, и, наконец, наступил момент, когда уровень технологии БИС оказался достаточным, чтобы на одной микросхеме расположить большинство блоков простейшей ЭВМ. В результате пришли к созданию программируемой БИС, которая сочетает в себе такие свойства, как дешевизна серийного производства и гибкость универсальности устройства. При этом произошли изменения в самой методологии проектирования устройств обработки данных. Исчезла резкая грань между техническими средствами и программным обеспечением системы, и проектировщик получает возможность выбора как аппаратных, так и программных средств для реализации тех или иных системных функций. При этом разработка технических и программных средств проводится параллельно и рассматривается как единый процесс.

Современные микро-ЭВМ — это приборы, в которых на одной или нескольких БИС расположены процессор, ЗУ программ и исходных данных, схемы интерфейса.

На рис. 8.6, а показана упрощенная структурная схема микро-ЭВМ. Отдельные блоки соединяются между собой группами линий (по одной линии на каждый бит передаваемого слова), которые называются шинами. В схеме на рис. 8.6, а устройства ввода и вывода используют одну и ту же шину. Часто в микропроцессорах одна шина используется не только устройствами ввода-вывода, но и памятью, как показано на рис. 8.6, б. В этом случае микропроцессор обращается к этим устройствам как к элементу памяти. Существенным недостатком микропроцессоров является ограниченное быстродействие. Хотя внутри БИС схемы могут работать с частотой в десятки мегагерц, ограниченное число внешних выводов не позволяет всей системе полностью использовать возможности внутренней логики.

Микропроцессорная техника требует очень высокой квалификации инженеров-конструкторов. Если ранее конструктор занимался проектированием на уровне логических вентилей, временных диаграмм, спецификаций токов и напряжений, то теперь он дол-

жен уметь обращаться с крупными функциональными блоками, такими, как процессоры, ЗУ и интерфейсы, работу которых необходимо запрограммировать. При этом основными инструментами инженера вместо паяльника, осциллографа и измерительных приборов становятся ассемблеры, языки программирования высокого уровня, средства редактирования, интерактивные (взаимодействующие) системы отладки и многое другое, что ранее входило в арсенал средств математика-программиста. Конструирование систем на микропроцессорах — это качественно новый и гораздо более высокий уровень проектирования.

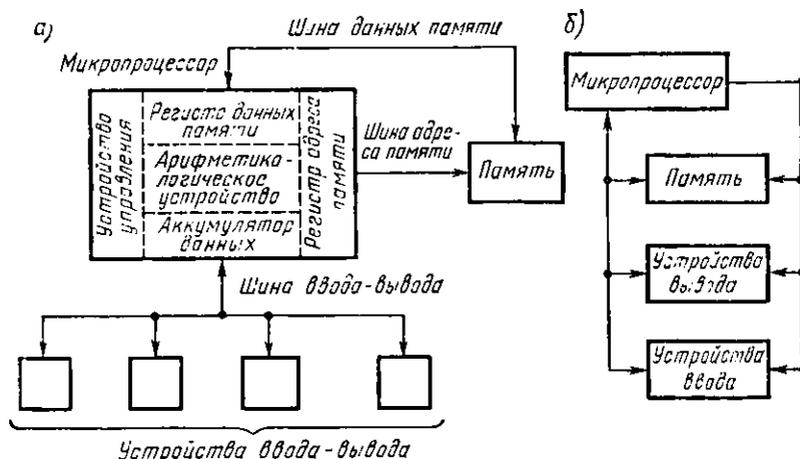


Рис. 8.6

Классификация микропроцессоров и их характеристики. Разработку системы управления обычно начинают с выбора конкретного микропроцессора. Признаками одной из возможных классификаций являются следующие: количество микросхем (БИС) на микропроцессор, разрядность, возможности интерфейса. По количеству БИС микропроцессоры делятся на однокристалльные, многокристалльные и микро-ЭВМ. Однокристалльные в основном предназначены для выполнения логических функций при управлении технологическим оборудованием. Многокристалльные микропроцессоры обычно состоят из трех типов схем: микросхемы обработки данных (арифметико-логическое устройство и регистры), микросхемы управления переходами в микропрограммах (устройство управления) и микросхемы ЗУ. Общее количество корпусов БИС для многокристалльных процессов 6—10 шт. В основном они используются для создания систем обработки данных, требующих производительности около $3 \cdot 10^5$ операций в секунду.

По разрядности микропроцессоры делятся на 2-, 4-, 8-, 12- и 16-разрядные. При этом они могут адресовать память от 1 до 64 К байт. Память состоит из внутренней сверхоперативной памяти ма-

лого объема, расположенной непосредственно в микропроцессоре, внешней оперативной памяти и внешней долговременной памяти. По возможностям интерфейса микропроцессоры подразделяются на имеющие и не имеющие средства интерфейса, на обладающие и не обладающие прерыванием, на допускающие и не допускающие прямой доступ к памяти, на имеющие вход сигнала реального времени и не имеющие этого входа.

Особенно большое внимание при конструировании микропроцессоров уделяется системе ввода-вывода. Наиболее распространены микросхемы с 16—42 внешними выводами в керамических или пластмассовых корпусах с двухрядным расположением выводов. Количество типов устройств, с которыми необходимо работать микро-ЭВМ, все время растет. Наряду с традиционными устройствами, применяемыми в комплексах на базе СМ-ЭВМ, применяются нестандартные для вычислительной техники устройства: привода станков с числовым программным управлением, контрольно-измерительные и электробытовые приборы, двигатели автомобилей и т. п. Многообразие периферийных устройств ставит проблему разработки универсальных микропроцессорных средств управления вводом-выводом.

Еще не определились четкие признаки определения микропроцессора и микро-ЭВМ. Системы с большими функциональными возможностями чаще называют микро-ЭВМ, с меньшими — микропроцессорами. Несмотря на то что отечественная микропроцессорная техника получила свое развитие недавно, мы уже сегодня имеем серии микропроцессоров, микро-ЭВМ и систем на их основе, что свидетельствует о ее успешном и быстром развитии.

Рассмотрим характеристики основных отечественных устройств.

Микропроцессоры серий К536, К580—К589. Основой построения многих микро-ЭВМ являются микропроцессорные комплекты БИС серий К536, К580—К589, основные характеристики которых представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Серия	Число кристаллов	Разрядность, бит	Число команд	Время цикла, мкс	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, мВт	Рабочая температура, °С
К536	7	8n	149	10,0	27	—	—10 ÷ +50
К580	1	8	79	2,0	+5; —5	300—750	—10 ÷ +70
К581	3	16	—	1,6	+5; —5	900	—10 ÷ +55
К582	1	4n	—	1,5	1,2	200	—10 ÷ +85
К584	1	4n	459	2,0	1,2	140	—10 ÷ +70
К587	4	4n	168	2,0	9	5	—60 ÷ +85
К588	4	16n	—	2,0	5	3	—60 ÷ +85
К589	7	2n	40	0,1	5	750	—10 ÷ +70

Примечание. В таблице n означает возможность наращивания кратно указанной разрядности.

В микропроцессорном комплекте серии К580 реализован асинхронный способ сопряжения с ЗУ, что дает возможность применять в сочетании с ним практически все известные серии БИС ЗУ. Комплект серии К580 включает в себя

различные БИС. Например, центральный процессор (К5801К80), который имеет следующие характеристики: быстродействие типа регистр — регистр — 500 тыс. операций/с, объем адресуемой памяти — 64 К байт, число уровней прерывания — 8, число выводов — 40. Программируемый последовательный интерфейс (К5801К51): длина одной посылки — 5—8 бит, скорость передачи информации в синхронном режиме — 56 кбод (в асинхронном — 9,6 кбод), число выводов — 31. Программируемый параллельный интерфейс (К5801К55): 24 линии ввода-вывода, 3 канала передачи информации, 40 выводов. Программируемый таймер (К5801К53): 3 независимых 16-разрядных счетчика, двоичный и двоично-десятичный режимы счета, работает как счетчик событий, ждущий мультивибратор, делитель частоты.

Серия К580 используется в микро-ЭВМ «Электроника К1-10», которая обладает соответствующими характеристиками БИС К580. При этом используется емкость оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) — 9 кбайт с возможностью расширения до 64 кбайт, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) — 2(16) кбайт, число параллельных линий ввода-вывода — 72 (возможно расширение до 144), потребляемая мощность около 250 В·А, габарит — 483×550×132 мм, масса — 20 кг.

Семейство микро-ЭВМ «Электроника С5». Это семейство включает в себя многоплатные модели, поставляемые в конструктивно и функционально законченном виде с возможностью использования в настольном и встраиваемом в оборудование варианте; одноплатные модели, предназначенные для встраивания в приборы и системы с целью реализации в них функций управления, контроля, обработки и приема-передачи данных; однокристалльные микро-ЭВМ (табл. 8.3). Разрядность всех моделей 16 бит, принята единая система команд: основных — 31, команд с модификацией — 256.

Модели семейства состоят из наборов функциональных модулей. Рассмотрим некоторые модули микро-ЭВМ «Электроника С5-12», предназначенные для построения систем локального контроля и управления на основе микро-ЭВМ. Они расширяют возможности применения «Электроники С5-12», обеспечивают

Таблица 8.3

Характеристики	Многоплатные		Одноплатные					Однокристалльные	
	модели микро-ЭВМ «Электроника»								
	С5-01	С5-02	С5-11	С5-12	С5-21	С5-41	С5-31	С5-21	
Быстродействие, тыс. операций в секунду	10	10	10	10	200	1000	150	200	
Объем ОЗУ, слов	(1÷6)К	(4÷10)К	128	128	256	(1÷4)К ОЗУ, ПЗУ	128	256	
Объем ПЗУ, слов	(2÷10)К	(4÷24)К	1К	2К	2К	—	1К	2К	
Число байтов параллельного ввода-вывода	10	17	4	4	4	4	3	—	
	9 входных, 9 выходных	15 входных, 15 выходных							
Число каналов последовательного ввода-вывода	3	4	—	—	4	4	1	4	
Число таймеров	4	4	3	3	4	4	1	—	

гибкость и универсальность при проектировании систем, имеют единое конструктивное исполнение и одинаковый габарит 298×165×29 мм. Аналого-цифровой преобразователь напряжения — код («Электроника С5-121») обеспечивает преобразование напряжения постоянного тока в диапазоне от —10 до +10 В, число каналов 15, время преобразования 10 мс, ошибка преобразования 0,4%. Модуль «Электроника С5-123» осуществляет сопряжение с устройствами ввода — вывода: перфолентами ПЛ-150, ПЛ-80, фотосчитывающими устройствами FS-1501, «Ридлом Р40» и др. «Электроника С5-124» предназначена для сопряжения с телеграфным аппаратом РТА-6 или его аналогом. «Электроника С5-125» — модуль ОЗУ с информационной емкостью 4096×16 бит и временем выборки ≤3,5 мкс. Модуль дисплейного адаптера «Электроника С5-126» обеспечивает вывод на видеоконтрольное устройство типа «Квант» символов русского и латинского алфавитов и цифровой информации, число строк на экране 14, число символов в строке 20.

В табл. 8.4 представлены эксплуатационные характеристики некоторых моделей «Электроника С5». Температура окружающей среды для указанных моделей от —10 до +50°С, относительная влажность воздуха до 95% при +35°С.

Таблица 8.4

Эксплуатационная характеристика	Модели микро-ЭВМ «Электроника С5»		
	С5-02	С5-12	С5-21
Напряжение питания, В	220	+5; +24; +1,3	+5; +12
Потребляемая мощность, Вт . .	150	30	20
Габарит, мм	460×415×245	284×298×30	309×252×29
Масса, кг	25	1,5	1,2

Модели «Электроника С5» предназначены для использования в системах, работающих в реальном времени. Они применяются в системах сбора, обработки и передачи данных в малых и средних АСУ ТП, для управления промышленными установками, в контрольно-измерительных системах и др.

Семейство микро-ЭВМ «Электроника НЦ». Оно состоит из архитектурно совместимых комплектов серий К587, К588, V830, НЦ-80 и др.; модулей памяти, адаптеров и т. п.; моделей микро-ЭВМ, отличающихся вычислительной и управляющей мощностью. Характеристики отдельных моделей микро-ЭВМ «Электроника НЦ» представлены в табл. 8.5.

Микро-ЭВМ «Электроника-60». Данная ЭВМ обладает тем достоинством, что программно совместима с мини-ЭВМ. Это позволяет использовать достаточно большой объем программного обеспечения общедоступных мини-ЭВМ. Центральный процессор ЭВМ «Электроника 60» размещен на одной печатной плате размером 280×240 мм и состоит из микропроцессора, памяти объемом 4К слов, приемо-передатчиков канала и дополнительной логики. Обмен информацией между различными устройствами осуществляется через единый канал ЭВМ. 16-разрядная длина адреса позволяет обращаться к памяти объемом до 64 кбайт. Использование в этой ЭВМ принципа общей магистрали позволило выполнить все функциональные блоки в виде конструктивно законченных устройств. Связь между ними осуществляется через единый канал, который является быстродействующей системой связи, соединяющей процессор, память и все внешние устройства. Обращение к регистрам внешних устройств осуществляется так же легко, как доступ к ячейкам оперативной памяти.

Пользователь может сам определять необходимый состав системы управления в зависимости от конкретного применения «Электроники 60». В его распоряжение кроме центрального процессора предоставляются платы управления «Консул-260», «Консул-260.1» с фотосчитывателями FS-1501, СП-3, а также устройства управления перфолентой ПЛ-150, устройства параллельного обмена и др. Прежде чем решить, какой состав лучше подходит, разработчик должен

Таблица 8.5

Характеристики	Модели микро-ЭВМ «Электроника ИЦ»					
	ИЦ-03Т	ИЦ-03Д	ИЦ-31	ИЦ-04Г	ИЦ-60	ИЦ-80-01
Разрядность слова, бит	16	16	16	16	16/32	16/32
Быстродействие, тыс. операций в секунду	100	100	130	200	550/250	550/250
Объем ОЗУ/ПЗУ, слов	8К	16К	8К, 32К	32К	128/1024	16К/ 76К
Число основных команд (с модификацией)	(190)	(188)	(280)	(328)	120	120
Число уровней прерывания	4	1	4	2	8	8
Напряжение питания, В/Гц	220/50	220/50	220/50	220/50	5,0	5,0; 12,0
Потребляемая мощность, Вт	50	150	100	70	1,5	10,0
Габарит, мм	483× ×360× ×221	483× ×360× ×88	483× ×300× ×290	483× ×360× ×221	32× ×26,6× ×2,9	180× ×300× ×20
Масса, кг	28	10	30	28	0,01	0,3

Примечание. В 1-й и 2-й строках для ИЦ-80 и ИЦ-80-01 под косой линией указана второй вариант характеристики (зависит от исполнения). У некоторых микро-ЭВМ имеется постоянное запоминающее устройство, объем которого указан под косой линией в 3-й строке. Если кроме основных имеются модифицированные команды, то их общее число указано в круглых скобках.

проанализировать все требования к системе — совокупность реализуемых функций, необходимый объем памяти и быстродействие.

Основные характеристики микро-ЭВМ: разрядность 16 бит, быстродействие 250 тыс. операций в секунду типа «регистр — регистр», объем ОЗУ в 8К при подключении дополнительных модулей может быть доведен до 56К, время выборки основной памяти до 0,7 мкс, число внешних подключаемых к каналу устройств 17. Модуль параллельного интерфейса позволяет подключать к микро-ЭВМ устройства параллельного действия и вести обмен информацией с использованием средств прерывания программы с максимальной скоростью 90К слов в секунду. Все модули объединены в единый конструктивный блок и работают от источников постоянного напряжения +5 и +12 В. Размеры блока без источника питания 540×325×85 мм. Перфоленточная система математического обеспечения включает в себя АССЕМБЛЕР, БЕЙСИК, стандартные и вспомогательные программы.

«Электроника-60» может оснащаться высокоэффективными комплексами, как, например: 3У емкостью 16К с временем выборки 150 нс, размещенные на одной плате размером 240×135 мм; алфавитно-цифровой дисплей с форматом изображения 24 строки по 80 знаков; устройство аналогового ввода с 8—24 входами, разрешающей способностью 10 двоичных разрядов, временем преобразования на 1 канал 100 мкс, диапазонами входных сигналов 0—(+5) В, 0—(+10) В, ±2,5 В, ±5 В, ±10 В; устройство аналогового выхода с четырьмя выходными каналами разрешающей способностью 10 двоичных разрядов, диапазонами выходных напряжений 0—(+5) В; 0—(+10) В; ±2,5 В, ±10 В.

Основными направлениями применения «Электроники-60» являются составные части высокопроизводительных вычислительных комплексов, автоматизированные системы управления технологическими процессами, устройства передачи данных (сложные средства коммутации, мультиплексоры, схемы обнаружения и исправления ошибок и аппаратура кодирования).

Вычислительные и управляющие микросистемы индивидуального пользования (ВУМС). Это массовые «персональные» вычислительные и управляющие средства для инженеров и ученых, имеющие большую вычислительную мощность, высокоорганизованные языки программирования, набор функционально законченных устройств (процессор, память, устройства ввода-вывода, источник питания и др.), объединенных в едином малогабаритном корпусе и выполненных в настольном варианте или в виде стойки.

К особенностям этих систем относятся готовность к работе сразу же после включения питания, возможность диалога с ЭВМ, наличие встроенных устройств ввода-вывода, простота обслуживания, возможность быстрой перестройки управляющей программы благодаря наличию встроенных диагностических и отладочных средств. Основные технические характеристики серийных отечественных моделей ВУМС приведены в табл. 8.6. Все модели, кроме «Электроники ТЗ-29», имеют символический язык программирования типа МАКРОАССЕМБЛЕРА.

Таблица 8.6

Характеристики	«Электроника ТЗ-16»	«Электроника ТЗ-16М»	15ВСМ-5	«Электроника ДЗ-28»	«Электроника ТЗ-29»
Язык программирования	Символический				БЕЙСИК
Объем памяти, кбайт	0,4	4	1	16	32
Быстродействие, мс:					
сложение десятичное	2	2	3	1,5	5
двоичное	—	—	—	0,5	0,01
элементарные функции	100—200	100—200	120—1500	100—200	60—100
Встроенные устройства ввода-вывода:					
клавиатура	Цифровая				Алфавитно-цифровая
дисплей	Цифровой				Алфавитно-цифровой
Габарит, мм	—	—	580 > 480	120	—
Масса, кг	—	18	25	24	25
Потребляемая мощность, Вт	80	100	120	120	85

Основная область применения ВУМС — автоматизация инженерного и научного эксперимента. Современные модели ВУМС успешно применяются в составе различных марок АСУ ТП отрасли.

Микро-ЭВМ СМ-1800. Эта ЭВМ построена по агрегатно-модульному принципу. В ее состав входят модули: центрального процессора; ОЗУ, ПЗУ; таймера; сопряжения с аналого-цифровыми видеотерминалами, перфоленточными устройствами ввода-вывода, интерфейсом «общая шина», модемом, пультом оператора; аналогового ввода, аналогового вывода; дискретного ввода на 16 и 32 канала, дискретного вывода; алфавитно-цифрового дисплея ВТ-340, алфавитно-цифрового видеотерминала АЦВ-МИКРО, видеотерминала АЦВ-СМ. Каждый модуль выполнен на печатной плате размером 240×280 мм. Модули устанавливаются в автономный комплектный блок размером 280×490×800 мм. Эти блоки могут устанавливаться в стойку с размерами 600×850×1800 мм либо использоваться в качестве настольной ЭВМ. Максимальная длина линий связи 3 км.

Разрядность ЭВМ 8 бит, максимальный объем адресуемой памяти 64 кбайт, время выполнения команд 2—8,5 мкс. Емкость ОЗУ 16 кбайт, длительность цикла записи 800 нс, чтения 650 нс, емкость ПЗУ 4 кбайт, длительность цикла чтения 200 нс. Модуль аналогового ввода имеет 16 входных каналов, диапазон преобразования сигналов ±5 В, цена младшего разряда 1 мВ, активное входное сопротивление не менее 1 МОм, максимальное время преобразования 60 мс, подавляемые помехи на частоте 1 Гц не менее 34 дБ, на частоте 50 Гц

не менее 60 дБ, на постоянном токе не менее 80 дБ. Модуль аналогового вывода имеет четыре выходных канала, погрешность по напряжению не более 0,2 В, по току не более 0,3 мА. Модуль дискретного ввода имеет 16 или 32 канала; уровень логического нуля может устанавливаться в пределах $0 - (\pm 2,4)$, $0 - (\pm 4,8)$, $0 - (\pm 9,6)$ В; уровень логической единицы устанавливается в пределах $(\pm 9,6) - (\pm 14,4)$, $(\pm 19,2) - (\pm 28,8)$, $(\pm 38,4) - (\pm 57,6)$ В; входной ток для каждого канала не более 20 мА. Модуль дискретного вывода имеет 16 каналов, максимальный коммутируемый ток 0,2 А, коммутируемое напряжение $(\pm 4,8) - (\pm 7,2)$, $(\pm 9,6) - (\pm 14,4)$, $(\pm 38,4) - (\pm 57,6)$ В; рабочая частота 10 кГц.

Средства программирования позволяют использовать при отладке программ все возможности операционной системы ДОС-2 АСВТ.

§ 8.4. РОБОТЫ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Развитие системы малых ЭВМ и микропроцессоров является одной из основных предпосылок создания роботов. В настоящее время еще не дано общепринятого понятия «робот». Это объясняется тем, что в роботостроении существуют два направления с различными целями: научно-исследовательское направление по созданию роботов как одна из ветвей искусственного интеллекта и исследовательское инженерно-конструкторское направление по производственным роботам.

Благодаря техническому прогрессу создавались все более совершенные роботы — программные, затем оцувствленные и наиболее совершенные на сегодняшний день — интеллектуальные. Они находят все более широкое применение как производственные (в промышленности, сельском хозяйстве, строительстве, транспорте, быту) и как исследовательские (в космических и океанологических исследованиях, проектировании, информационном поиске, искусстве). Производственные роботы — это автоматические манипуляторы, функциональные системы которых позволяют моделировать двигательные, управляющие и приспособительные функции человека, выполняющего трудовые операции, связанные со сложными пространственными перемещениями. Исследовательские роботы, создаваемые по линии искусственного интеллекта, можно определить как автоматические системы, способные обучаться в процессе активного взаимодействия с окружающей средой и предназначенные для имитации разнообразных операций, совершаемых человеком в процессе физического или умственного труда.

Действующие в настоящее время роботы (роботы первого поколения) могут выполнять задания лишь в особо приспособленных для них неизменных условиях, что существенно сужает область их применения. Второе поколение роботов, снабженных некоторыми элементами искусственного интеллекта, в состоянии приспособляться к изменениям окружающей среды и, следовательно, действовать более «разумно», «осваивать» значительно более сложные специальности. Появившиеся роботы третьего поколения, так называемые интеллектуальные роботы, ушли намного дальше своих предшественников прежде всего по возможности обработки информации и автономного, без помощи человека, целенаправленного поведения в меняющейся обстановке.

В зависимости от степени участия человека в процессе управления роботы подразделяются на дистанционно управляемые копирующие роботы, экзоскелетоны, роботы, управляемые человеком с пульта управления, полуавтоматические роботы и автономные.

Копирующие роботы имеют задающий орган (обычно манипулятор), полностью идентичный исполнительному (с определенным масштабом по геометрическим размерам и усилиям), средства передачи сигналов прямой и обратной связи, а также средства отображения для человека-оператора среды обитания робота. Управляющая система строится так, что движение, задаваемое человеком-оператором, полностью копируется с точностью до масштабного коэффициента исполнительным органом. Для этого по каждой координате обычно применяются следящие системы двустороннего действия, использующие обратную связь по усилиям или моментам, возникающим при работе исполнительного органа.

Экзоскелетоны — это конструкции, которые обычно «надеваются» на руки, ноги или корпус человека и служат для воспроизведения (копирования) их движений с некоторым масштабным коэффициентом по усилиям. Экзоскелетоны, как и копирующие роботы, управляются человеком-оператором с помощью следящих систем двустороннего действия.

У роботов, управляемых человеком с пульта управления, имеется система кнопок, клавишей или рукояток, связанных с исполнительными механизмами каналов управления по различным координатам. Кроме того, на пульте управления имеются средства отображения информации о среде функционирования робота, поступающей к человеку обычно по радиоканалу связи. Желаемое движение роботу задается человеком с пульта управления через систему исполнительных приводов.

Полуавтоматические роботы — это роботы, в которых ручное управление сочетается с автоматическим. Они находят широкое применение в тех случаях, когда невозможно заранее жестко запрограммировать все операции, которые робот должен выполнять, и в то же время экономически нецелесообразно или технически невозможно этот робот оснастить всеми требуемыми исполнительными органами чувств и элементами искусственного интеллекта. При этом человек-оператор вмешивается в процесс автономного функционирования робота не посредством перехода на ручное управление, а путем сообщения ему дополнительной информации (например, с помощью целеуказания, указания требуемой последовательности действий и т. п.).

Роботы с автономным, или автоматическим, управлением после их создания и наладки в принципе могут функционировать и без участия человека (исключая профилактический контроль и ремонт). Типичным примером автономных роботов являются роботы с элементами искусственного интеллекта.

По производственно-технологическому признаку современные промышленные роботы можно подразделить на три основные группы: технологические, подъемно-транспортные, управляющие. Техно-

логические роботы используются в сварочных, лакокрасочных, сборочных процессах, при пересыпании порошков и переливании жидкостей, при перемешивании растворов, резке материалов и т. п. К наиболее типичным подъемно-транспортным операциям, выполняемым роботами, относятся: перенос предметов с одного рабочего места на другое, доставка предмета от конвейера к рабочему месту и обратно и т. п. Управляющие роботы непосредственно управляют относительно простыми технологическими операциями, например открывают и закрывают краны и вентили технологических коммуникаций.

Отличие роботов от традиционных автоматических устройств и актуальность их создания. От других систем, предназначенных для обработки поступающей извне информации и получения управляющих воздействий, например от систем автоматического управления технологическим процессом, роботы отличаются следующие особенности: антропоморфизм, заключающийся в том, что робот может воспринимать те же сигналы от окружающей среды, что и человек, а его исполнительные механизмы могут выполнять сложные пространственные движения; способность адаптироваться к окружающей обстановке; сложность и разнообразие решаемых задач и гибкость структуры, позволяющие считать робота многоцелевой системой. При создании роботов преследуется цель не копировать человека, а разработать систему, способную лучше, чем человек, осуществлять некоторые операции, выполнение которых доступно пока только человеку. Понятие «лучше» используется здесь в том смысле, что робот может быть сильнее человека, быстрее выполнять определенные операции, его использование может быть экономически эффективнее. В отличие от простых автоматов роботы, как правило, выполняют несколько видов операций (задач), причем переход от одной операции к другой обычно производится сменой программ во входном устройстве робота или сменой захвата и инструмента. При смене детали, обрабатываемой с помощью робота, необходима лишь подналадка движений механической руки и захвата.

Необходимо различать решение конкретной задачи и серии задач определенного типа. Например, автоматы имеют дело с конкретной задачей — той жесткой операцией, для которой они служат. Решение серии задач — это единое предписание (метод, алгоритм), позволяющее решать любую конкретную задачу данной серии задач. Роботы имеют дело с сериями (классами) задач.

Универсальность роботов определяется совершенством их управляющей системы, а также разнообразием искусственных органов чувств и исполнительных механизмов. Роботы способны не только выполнять много разных операций, но и оперативно переобучаться с одной операции (задачи) на другую, при этом если даже каждая операция выполняется роботом по жесткой программе, обязательно имеются средства быстрой перестройки программы на другие операции в пределах функциональных возможностей робота. Обычно

это осуществляется, как будет показано в дальнейшем, путем обучения робота человеком.

Роботы становятся важным звеном комплексной автоматизации производства. Их внедрение имеет большое социальное значение, которое заключается в освобождении человека от необходимости выполнять вредную, тяжелую или монотонную работу. Робот никогда «не устает» и «не теряет интереса» к своей работе. Если нужно, то он будет «работать» целыми сутками с перерывами на еженедельное или ежемесячное профилактическое обслуживание. В условиях ритмично работающего производства при замене человека роботом производительность труда повышается в два-три раза. Применение роботов позволяет увеличить степень использования оборудования на 30—40%. Опыт их эксплуатации показывает, что они окупаются в течение двух—пяти лет работы при использовании в две-три смены.

Особенно велика роль роботов в таких вредных для здоровья человека производствах, как штамповка,ковка, литье под давлением, в условиях высоких или низких давлений и температур, радиации, вибрации и т. п. Одно из наиболее вредных и токсичных производств — это производство лакокрасочных и теплозащитных покрытий путем распыления или опускания деталей в краситель. Если «рука» робота обладает несколькими степенями свободы, то она может совершать сложные пространственные перемещения. Эти возможности используются, когда пульверизатор должен наносить покрытие наиболее быстрым и экономичным способом или когда на обрабатываемой поверхности требуется получить определенный рельеф жидкости или пасты.

Из производств легкой промышленности в этом отношении наиболее актуально применение роботов в производстве естественной кожи: в цехах жидкостной обработки кожевенного сырья; механической обработки шкур, например, в операциях мездрения, которая требует больших усилий: при операциях лакокрасочных покрытий в отделочных цехах. В производстве искусственной кожи имеются операции с вредными для здоровья человека химическими веществами, например с пожаро- и взрывоопасными растворителями. Нежелателен контакт со многими полимерами, в частности с полимерами, которые используются в качестве покрытий.

В настоящее время наиболее медленными темпами внедрение автоматизации происходит в технологических процессах, предусматривающих обработку различных по форме объектов в твердом агрегатном состоянии. Типичным примером в этом отношении служит машиностроение, сочетающее обработку разнообразных деталей, их транспортировку и сборку. Здесь имеется большое число таких операций, как установка и смена оснастки на станке или установка на конвейер подлежащих транспортировке изделий и снятие их с конвейера, т. е. операций, требующих участия человека. Роботы успешно используются для установки рабочих деталей в патронах, пуансонах и других зажимных устройствах, для выполнения посадочных операций. Эти операции заключаются в нахождении место-

положения отверстия и проверке их ориентации с помощью сигнала обратной связи от чувствительного элемента «кисти» робота. При разбросе местоположения отверстий в пределах нескольких миллиметров робот может выполнять посадочную операцию ощутую с точностью в несколько десятков микрометров.

Сборочное или мелкосерийное производство почти целиком базируется на использовании ручного труда. Таким образом, автоматизация современного машинного производства, с одной стороны, является залогом разрывания массового выпуска продукции, а с другой — хотя она и требует больших предварительных капиталовложений, достаточной гибкости не обеспечивает. Вместе с тем в настоящее время потребность в расширении ассортимента выпускаемых изделий влечет за собой необходимость перехода от массового выпуска изделий одного вида, что было типично до последнего времени, к выпуску товаров различных наименований. При современном уровне развития техники такие операции, как обработка материалов и сборка изделий на производстве, выпускающем изделия широкого ассортимента, чрезвычайно трудно поддаются автоматизации и почти целиком базируются на использовании ручного труда.

Основное достоинство промышленных роботов — возможность их быстрой перенастройки на новые программы работы — позволяет использовать их для автоматизации мелкосерийного производства. Весьма актуальна возникшая в последние годы социальная потребность в роботах. Люди, которые освобождаются в результате «роботизации», могут заниматься более квалифицированной работой. Образно говоря, люди создают роботы для того, чтобы самим не становиться роботами. В легкой промышленности выпуск широкого ассортимента продукции характерен для швейной и обувной подотраслей. В этих производствах комплексная автоматизация путем создания промышленных роботов наиболее перспективна в подготовительно-раскройных цехах и в процессах сборки готовых изделий (пошива одежды и обуви).

При комплексной механизации и автоматизации ручных работ необходимо тщательно координировать технологию производства. Это требование легко удовлетворяется при проектировании новых технологических участков, цехов и целых производств. Применять промышленные роботы гораздо труднее в сочетании с уже существующим оборудованием, которое далеко не всегда пригодно для автоматизации. Это говорит о том, что промышленные роботы следует широко применять при проектировании новых высокоавтоматизированных производств.

Основные принципы построения и конструкции роботов. Исследуя действия, совершаемые вручную, нетрудно убедиться, что их можно представить в виде сочетания сравнительно небольшого числа основных, базовых операций. Рассматривая задачу автоматизации ручной операции, ее разделение на базовые операции следует производить исходя из результатов логического анализа и результатов экспериментов, поставленных на основе теории автоматического

управления. Установив для каждой базовой операции соответствующие стереотипы поведения, задачи автоматизации различных ручных операций в дальнейшем можно решать единообразно.

Рука человека обладает большой подвижностью и может совершать 27 движений, большинство из которых приходится на кисть. Человек, взяв предмет рукой, может судить о его массе, шероховатости поверхности, форме, твердости, температуре и других характеристиках. Создание «механической руки», близкой по размерам к руке человека и обладающей всеми ее возможностями, в настоящее время вряд ли осуществимо, однако для выполнения большинства производственных операций не все из перечисленных свойств руки человека одинаково необходимы. В то же время наличие определенного числа движений, меняющихся по скорости и силе воздействия на предмет, всегда необходимо. Крайне важно для выполнения многих операций также ощущение усилий, действующих на исполнительном органе. Остальные свойства руки для выполнения производственных операций желательны, но не обязательны и могут отсутствовать у манипуляторов, поэтому манипуляторы общего назначения должны удовлетворять следующим основным требованиям: иметь достаточное число движений, регулируемую скорость, хорошую маневренность, необходимую зону обслуживания и грузоподъемность, высокую надежность и прочность, удобное управление и возможность контроля сил, действующих на исполнительный орган.

Число движений (степеней свободы) для манипуляторов общего назначения определяют из следующих соображений. Так как любой твердый предмет в пространстве может совершать шесть независимых движений (три поступательных — вдоль трех осей декартовой системы координат и три вращательных — вокруг этих осей), то и универсальный манипулятор также должен иметь не менее шести независимых движений и седьмое для удержания обрабатываемого предмета. Для увеличения зоны обслуживания, маневренности и удобства работы число движений манипулятора иногда делают больше семи. Для движений исполнительного органа может применяться любая из трех систем координат: прямоугольная, цилиндрическая или сферическая, а также различные их сочетания. Однако практика работы с манипуляторами показала, что лучшей для конкретных условий является та система координат, в которой операции выполняются при минимальном числе одновременно совершаемых движений манипулятора.

Для универсальных манипуляторов желательно иметь плановую регулировку скорости всех семи рабочих движений. Нижний предел скорости должен приближаться к нулю, а верхний — зависеть от выполняемых операций, грузоподъемности и других факторов. Часто в результате различных причин, например инерции (для механических манипуляторов) и ограниченной мощности приводных двигателей (для электромеханических и гидромеханических манипуляторов), верхний предел скорости значительно меньше максимально возможной скорости движения руки человека. Манипуля-

торы, предназначенные для выполнения простых операций, например для переноса грузов, могут иметь ступенчатую регулировку скорости или одну постоянную скорость, а число движений меньше семи.

Грузоподъемность манипулятора при выборе и проектировании надо принимать несколько большей, чем максимальный вес поднимаемых предметов, чтобы уменьшить возможность перегрузки при работе, так как это является главной причиной выхода манипуляторов из строя.

Замена человека, выполняющего ручную работу, не сводится к созданию технических устройств, способных повторять движения человеческих рук. Человек, даже выполняющий малоквалифицированную работу, наделен способностью анализировать информацию об окружающей среде, принимать решения в зависимости от конкретных ситуаций, осуществлять некоторые функции контроля соответствия объектов манипулирования определенным стандартам, общаться с другими исполнителями — людьми и механизмами и т. д. В связи с этим появилась необходимость использовать результаты исследований по искусственному интеллекту, касающиеся разработки экономически приемлемых средств имитации органов чувств у манипуляторов и программ, которые позволяют роботу автоматически реагировать на возникновение определенных ситуаций без поступления каких бы то ни было команд от человека-оператора.

Однако разработчики роботов столкнулись со значительными трудностями в реализации замыслов создания автономных роботов. Стало ясно, что практически возможными на сегодняшний день являются роботы, работающие совместно с человеком-оператором. Разделение труда между человеком и системой управления робота зависит от возможностей робота автоматически решать те или иные задачи целенаправленного поведения. Человек может передавать информацию роботу как путем непосредственного ее занесения в память управляющей системы, так и путем воздействия через искусственные органы чувств. В первом случае человек точно знает, какие алгоритмы реализует та или иная подпрограмма и где она находится в памяти робота. Человек может заложить любую информацию в память и заставить робота выполнить любую (в пределах его функциональных возможностей) последовательность операций. Во втором случае человек, как и учитель, не осуществляет непосредственного вмешательства в произвольную часть памяти робота. Он воздействует лишь на искусственные органы чувств робота.

Распространенным способом программирования промышленных роботов является метод обучения, при котором запись программы осуществляется непосредственно на рабочем месте опытным оператором, выполняющим первый цикл операций в режиме ручного управления. При этом замыкающее устройство фиксирует все движения, крайние и промежуточные положения рабочих органов робота. В автоматическом режиме работы все операции по ранее

записанной программе повторяются без участия человека. Для переналадки робота требуется, как правило, не более 30 мин. Еще одним направлением взаимодействия человека и робота является супервизорное управление. В этом случае оператор выдает роботу порции задания для автономного выполнения, анализируя информацию, получаемую им из зоны действия робота по телевизионному и другим каналам связи. Таким образом, обработка информации о среде и выработка целенаправленного поведения осуществляются в основном человеком.

Автоматизация системы управления робота требует решения многих задач, доступных пока только интеллекту человека. Решением этих задач с помощью технических устройств занимается область кибернетики, называемая областью

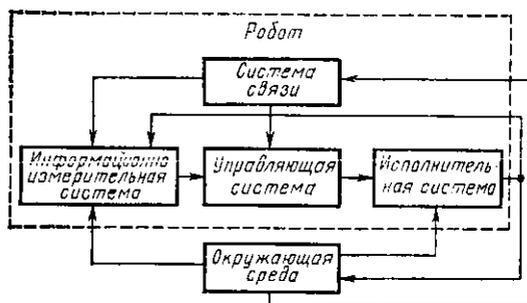


Рис. 8.7

искусственного интеллекта. В этой области исследуются пути автоматического решения таких задач, как распознавание зрительных образов и составление модели окружающей обстановки, планирование стратегии и тактики достижения цели, речевое общение с роботом и др.

В общем случае робот состоит из четырех основных частей: информационно-измерительной, управляющей, исполнительной систем и системы связи (рис. 8.7).

Информационно-измерительная система — это искусственные органы чувств робота (сенсорика). Они, как и органы чувств человека, предназначены для восприятия и преобразования информации о состоянии внешней среды и самого робота в соответствии с потребностями управляющей системы. В качестве элементов сенсорной системы робота обычно используются простейшие концевые выключатели, телевизионные и опико-электронные устройства, лазерные и ультразвуковые дальномеры, тактильные и контактные датчики, датчики положения, тахометры, акселерометры и т. п. Применяются также датчики для измерения таких сигналов, которые непосредственно органами чувств человека не воспринимаются, например: электромагнитные волны определенной длины, давление, температура и т. п. Наиболее широко применяются тактильные датчики, размещаемые на захватах манипуляторов и корпусе подвижного робота, датчики зрительной информации с устройствами автоматической наводки на резкость.

Управляющая система робота служит для выработки закона управления приводами (двигателями) механизмов исполнительной системы на основе сигналов обратной связи от сенсорной системы, а также для организации общения робота с человеком. Эта система обычно реализуется на базе управляющих ЭВМ, имеющих большой ассортимент входных и выходных преобразователей и каналов связи (от нескольких десятков до нескольких тысяч), по которым, как по нервной системе, могут передаваться дискретные и непрерывные сигналы. Управляющие ЭВМ для роботов строятся в малогабаритном транспортном исполнении и обладают повышенной надежностью. Обычно это микропроцессоры или микро-ЭВМ. В некоторых случаях, например при одновременной работе нескольких роботов, могут использоваться мини-ЭВМ (СМ ЭВМ), обладающие

большим объемом памяти. Интеллектуальные способности робота определяются главным образом алгоритмическим и программным обеспечением его управляющей системы.

Система связи робота необходима для организации обмена информацией между роботом и человеком или другими роботами. Цель такого обмена — формулировка человеком заданий роботу, организация диалога между человеком и роботом, контроль за функционированием робота, диагностика неисправностей. Обычно информация от человека поступает к роботу через устройство ввода или пульт управления. При этом чаще всего используются кнопки или клавиши, ключ телеграфного аппарата, перемещение педалей, вращение рулевого колеса и т. п. Однако в последнее время начинает применяться речевое общение. Информация, поступающая от робота к человеку, имеет, как правило, форму световых и звуковых сигналов. Носителями этой информации являются разного рода табло, цифровые индикаторы, дисплей, телекамеры и т. п.

Исполнительная система определяет «моторику» робота, т. е. его способности совершать разнообразные движения. Она служит для отработки управляющих сигналов, формируемых управляющей системой. В качестве исполнительных систем используются механические руки (манипуляторы), механические ноги (педипуляторы), самоходные тележки, а также их различные комбинации.

Важным направлением в роботостроении является синтез и управление исполнительными механизмами роботов. Известные способы изучения кинематики и динамики механических движений практически неприменимы для многосвязных механизмов с большим числом степеней свободы. Динамика располагает методами, которые в принципе позволяют получить уравнения движения систем с любым числом степеней свободы, однако эти уравнения трудно обозримы и сложны, так что даже само составление уравнений движений роботов представляет значительные трудности. Поэтому сейчас широко распространяются методы исследования многосвязных механизмов с помощью ЭВМ, для чего разрабатываются специальные алгоритмы.

Движения, выполняемые исполнительной системой, можно разделить на три группы: глобальные, региональные и локальные. Глобальные движения выполняются с целью межоперационного перемещения, благодаря которому робот может двигаться между обслуживаемым оборудованием. Региональные движения, т. е. движения в пределах рабочей зоны робота при неподвижном основании, осуществляются функциональным аналогом человеческой руки. Этот механизм имеет, как правило, три и более степени свободы. При этом возникает сложная задача целесообразного распределения движений по всем шарнирам «руки» робота для осуществления требуемого перемещения в пространстве.

Сюда входит также выбор траектории, при необходимости с обходом препятствий и оптимизацией управляемого процесса движения руки по каким-либо критериям. К локальным движениям относятся операции захвата и освобождения детали, соответствующие устройству (захваты) имеют одну или более степеней свободы. Обычно промышленный робот имеет одну или несколько механических рук со сменными захватами (типа клешей, магнитными, вакуумными и пр.), с помощью которых перемещает детали и инструменты по заданной программной траектории с определенной скоростью.

Наиболее распространенными видами привода являются электрогидравлические, гидравлические и пневматические. Электрогидравлические приводы используются в роботах нормальной и большой грузоподъемности (10—200 кг), гидравлические — в роботах средней грузоподъемности (10—15 кг) и пневматические — в моделях малой грузоподъемности (менее 10 кг). Стоимость промышленных роботов с пневматическим приводом в 2—3 раза ниже стоимости робота с электрогидравлическим и электрическим приводами той же грузоподъемности. К достоинствам пневматического привода относятся также простота конструкции, надежность и возможность работы в условиях с повышенной влажностью, запыленностью, взрывоопасных и т. п. Все это зачастую окупает pricey КПД пневматического привода.

В современных промышленных роботах применяются пневматические, гидравлические, электрические и электронные системы управления. Их можно разделить на две основные группы: цикловые системы и системы числового программного управления (ЧПУ). Основой цикловых систем является программный барабан с угорами и конечными выключателями. Эти системы просты и дешевы, однако возможности их ограничены сравнительно небольшим количеством программируемых перемещений (шагов), число которых не превышает нескольких десятков. Они реализуют лишь простейшие траектории движения рабочих органов роботов, состоящие из отрезков прямых и поворотов вокруг оси. Цикловые системы находят широкое применение при обслуживании роботом одного станка в случае, когда заготовка берется из одного и того же фиксированного места. Для цикловых систем характерен, таким образом, позиционный способ управления.

Системы ЧПУ позволяют реализовать позиционный, контурный, а также универсальный способы управления. Контурные системы управления обеспечивают движение рабочего органа робота-манипулятора по любой траектории. Универсальные отличаются сложным контурно-позиционным способом управления, причем могут управлять как одним, так и группой роботов. В универсальной системе могут присутствовать элементы адаптивного управления. Позиционные системы ЧПУ значительно превосходят цикловые системы по количеству программируемых шагов, число которых доходит до 200. Стоимость числовых позиционных систем управления незначительно превышает стоимость цикловых систем.

Отечественное роботостроение и перспективы его развития. В нашей стране создание промышленных роботов-манипуляторов началось после 1970 г. К настоящему времени разработано свыше 30 типов роботов (более двухсот модификаций), которые предназначены для обслуживания станков, прессов, литейного производства, выполнения сварочных работ, нанесения покрытий и т. п.

Одними из первых роботов можно назвать роботы МП-1 и УМ-1. Робот МП-1 был разработан с позиционной числовой системой управления (при наличии пяти степеней свободы), обеспечивающей точность позиционирования ± 2 мм. Обратная связь обеспечивалась с помощью вращающихся трансформаторов, основной вид привода — электродвигатель постоянного тока, грузоподъемность — до 20 кг, максимальная скорость перемещения «руки» — 0,5 м/с, «кисти» — 0,72 м/с. Устройство УМ-1 было выполнено с позиционной аналоговой системой управления, обеспечивало точность позиционирования ± 1 мм, использовался гидравлический привод, грузоподъемность 10—40 кг.

Отечественные погрузочно-разгрузочные работы «Универсал 15», ПР-35, ЦРВ-50 выполнены на уровне лучших зарубежных моделей данной группы промышленных роботов, имеют высокую степень подвижности рабочего органа (3—7 степеней свободы) и широкие функциональные возможности устройства управления манипуляторами: УПМ-331 (в ЦРВ-50), УПМ-552 (в ПР-35), УПМ-772 (в «Универсале-15»). Элементной базой этих устройств управления являются ИС (интегральные схемы) серии 155. Все устройства построены на базе специализированного вычислительного устройства микропроцессорного типа, они унифицированы в схемно-алгоритмической части и по конструкторско-технологическим решениям. В «Универсале-15» и ПР-35 используется следящий электро-

гидравлический привод, в ЦРВ-50 — шаговый электрический. Грузоподъемности роботов: «Универсал-15» — до 15 кг, ПР-35 до 35 кг, ЦРВ-50 до 50 кг. Манипулятор ЦРВ-50 используется для погрузочно-разгрузочных операций, связанных с обслуживанием одного металлорежущего станка; устройства ПР-35 и «Универсал-15» применяются для обслуживания группы металлорежущих станков (до четырех) или другого технологического оборудования.

Для комплексной автоматизации сборочных операций в приборостроении применяются технологические переналаживаемые системы с мини-роботами, оперирующими объектами массой до 2 кг. При этом детали укладываются в кассеты, их место и ориентация строго определены. Рука мини-робота имеет четыре степени свободы, оснащена струйным захватом и пневматическим приводом. В процессе сборки мини-робот осуществляет автопоиск местоположения детали на монтажной панели. Время переналадки системы от 5 до 15 мин, что позволяет использовать ее в условиях многопредметной сборки. Эти системы можно использовать не только на операциях сборки, но и при автоматизации штамповочных, упаковочных, контрольных и других операций.

Для автоматизации вспомогательных операций при обслуживании металлорежущих станков с горизонтальной осью шпинделя используется серия цикловых манипуляторов серии СМ-40. Манипуляторы построены по агрегатному принципу: 16 основных функциональных узлов позволяют компоновать 9 различных специальных модификаций, которые в совокупности обеспечивают обслуживание 30 разновидностей современных металлорежущих станков токарной группы.

В нашей стране разрабатываются также модели роботов с элементами искусственного интеллекта, например модель робота с системой искусственного зрения. Робот имеет три функциональные системы: информационную, управляющую и двигательную. Информационная система выполнена на базе «очувствленной» плоскости, содержащей сетку электрически активных точек, образующих информационную поверхность. На информационной поверхности фиксируется вся обстановка, в результате чего активизируются соответствующие чувствительные точки. Поверхность электрически связана с экраном, на котором отображается, а при необходимости и запоминается обстановка в зоне работы робота. Управляющая система включает в себя ЭВМ с пультом оператора и устройства сопряжения ЭВМ с экраном и роботом. Система позволяет оператору вмешиваться в процесс реализации движений, а также ставить новые задачи роботу и программным образом моделировать на информационной поверхности изменение обстановки при обработке новых алгоритмов управления. Двигательная система модели реализована в виде механической руки, каждое звено которой оснащено автономным приводом, управляемым от ЭВМ. Подвижные сочленения имеют датчики положения.

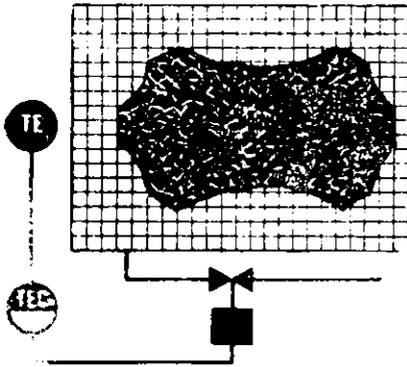
Дальнейшее развитие промышленных роботов связано, главным образом, с приданием им большей гибкости и автономности при поиске достижения задаваемых целей. Сейчас интенсивно ведутся работы по созданию второго и третьего поколений промышленных роботов с более сложной системой управления и возможностью самонастройки и адаптации к конкретным внешним условиям. У адаптивных роботов приспособление к изменяющимся условиям работы заключается в возможности автоматически изменять траекторию и параметры перемещения. Информацию, необходимую для правильного выполнения рабочих движений, они получают от более совершенных искусственных чувствительных элементов, дающих возможность «видеть» и «осознать» объекты, с которыми робот манипулирует. С помощью тактильных датчиков роботы могут осуществлять поиск и распознавание объектов для правильного их захвата. При наличии высокочувствительных датчиков усилий они автоматически меняют траекторию и скорость перемещения рабочего механизма и развивают необходимые усилия для опери-

рования объектом. Роботы с искусственным зрением способны находить нужный объект среди предметов, произвольно расположенных в зоне досягаемости рабочего органа манипулятора.

Успехи в роботостроении в значительной мере зависят от достижений вычислительной математики и вычислительной техники. В настоящее время сложность решаемых задач в области искусственного интеллекта вошла в противоречие с возможностями современных вычислительных машин. Выходом из этого положения может оказаться построение вычислительных машин и машинных языков на новых принципах. Предполагается, что их создание снимет принципиальные ограничения на количество элементов, сделает возможной программную перестройку структуры памяти и самой машины под структуру решаемых задач, позволит неограниченно распараллеливать вычислительные процессы. Роботостроение — это комплексная проблема, решение которой требует взаимодействия технической кибернетики, механики, бионики и других наук.

ЛИТЕРАТУРА

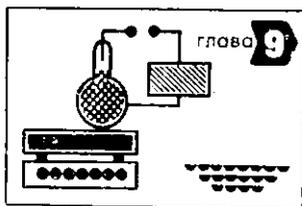
1. Касан Б. М., Воицелв А. Н., Лукьянов Л. М. Системы связи УВМ с объектами управления в АСУ ТП. М., 1978.
2. Хазоцкий В. Е. Управляющие машины и системы. М., 1976.
3. Малые ЭВМ и их применение / Дедов Ю. А., Островский М. А., Песелев К. В. и др. М., 1980.
4. Электронная промышленность, 1979, № 11 — 12.
5. Тимофеев А. В. Роботы и искусственный интеллект. М., 1978.



АВТОМАТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТРАСЛИ

В данной части рассматриваются конкретные технологические процессы как объекты автоматического управления с учетом особенностей применяемого оборудования, схемы автоматизации важнейших технологических процессов и вопросы проектирования систем автоматизации. Ограниченный объем пособия не позволяет провести рассмотрение всех технологических процессов легкой промышленности, поэтому в качестве примеров выбраны те из них, которые играют ведущую роль в основных производствах легкой промышленности (в кожевенно-меховом производстве, производстве полимерных и плочных материалов, обуви и швейных изделий). Такими процессами являются прессование, жидкостная обработка кожи и меха, сушка материалов. Кроме того, рассматриваются вопросы автоматизации очистки промышленных сточных вод, имеющие важное народнохозяйственное значение.

При рассмотрении технологических процессов как объектов автоматизации излагаются вопросы построения математических моделей на базе теоретических положений, приведенных в части I. При построении систем автоматического управления и регулирования режимов технологических процессов используется опыт автоматизации производства в легкой промышленности страны и зарубежный опыт. Уровень автоматизации рассматриваемых процессов определяется как требованиями к повышению качества управления технологическим оборудованием с целью обеспечения выпуска продукции высокого качества, так и возможностями отрасли.



ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕССОВ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРЕССОВАНИИ

В легкой промышленности при производстве обуви, галантерейных изделий, кожи, подошвенной резины и швейных изделий широко применяются процессы прессования. Основными показателями технологического процесса являются температура, давление и время прессования. При различных сочетаниях значений давления и температуры при прессовании необходимо различное время прессования для получения одинакового эффекта от воздействия на формуемый материал. Существуют оптимальные значения температуры и давления, при которых достигается желаемый эффект формования и наименьшее время прессования. Для обеспечения оптимального режима необходимо с высокой точностью выдерживать стабильность давления, температуры и времени прессования.

Высокая стабильность давления и выдержка времени при прессовании на современном оборудовании обеспечиваются с точностью, совпадающей с классом точности применяемых при этом контрольно-измерительных приборов. Стабилизация температуры представляет собой более сложную проблему. Температура влияет на характер протекания многих физико-химических процессов, их кинетику, в частности на скорость и длительность вулканизации и полимеризации резиновых деталей, искусственной кожи и пленочных материалов, сушильных процессов и т. п. Температура влияет на такие физико-химические свойства материалов, как вязкость, пластичность, реологические характеристики, играющие важную роль при формировании деталей и изделий из кожи, тканей, пластмасс, резиновых смесей и других материалов, вследствие чего температурный режим во многом определяет качество получаемого полуфабриката и продукта.

Обычно технологические требования ограничивают нестабильность в производственных процессах определенными допусками, часто довольно широкими ($\pm 10^\circ\text{C}$ и выше), но иногда и достаточно жесткими (± 2 и даже $\pm 1^\circ\text{C}$). В ряде случаев необходима стабилизация температуры или ее изменение по заданной программе во времени, причем бывает необходимо создать однородное температурное поле на большой поверхности (плиты вулканизационных прессов, пресс-формы для горячей вулканизации и пр.).

Из сказанного видно, что автоматическое управление температурой очень важная задача при совершенствовании и интенсификации технологических процессов многих производств легкой промышленности. Принципиальное решение этой задачи требует знания статических и динамических характеристик технологического

оборудования и технологических процессов как объектов автоматического управления. Ниже рассматриваются динамические характеристики широко распространенных в легкой промышленности тепловых объектов — прессов.

§ 9.1. ПРЕССЫ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК ОБЪЕКТЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для сравнительно низкотемпературных тепловых процессов, часто применяемых в легкой промышленности, в ряде случаев можно пренебречь неравномерностью температурного поля объекта автоматизации, а также считать коэффициенты теплоотдачи и теплоемкости постоянными в узком диапазоне рабочих температур.

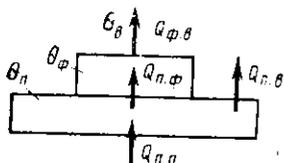


Рис. 9.1

Рассмотрим тепловой процесс в нагревательной плите пресса (с паровым обогревом) с установленной на плите пресс-формой (рис. 9.1). Теплоотдача от плиты к пресс-форме ограничена термическими сопротивлениями, из-за чего температура плиты и пресс-формы не одинакова. Плиты и пресс-форму рассматриваем как объекты с сосредоточенными параметрами, т. е. с одинаковыми температурами по всему их объему.

Введем следующие обозначения m — масса, кг; c — удельные теплоемкости, Дж/(кг·К); $^{\circ}\text{C}$ — температура. Введем также индексы: п — плита; ф — пресс-форма; в — воздух; пр — пар.

За единицу времени плита получает тепло от пара $Q_{пр}$. Часть этого тепла $Q_{п,п}$ аккумулируется плитой (расходуется на повышение ее температуры), часть $Q_{п,ф}$ идет на нагревание пресс-формы и часть $Q_{п,в}$ отдается окружающему воздуху. Тепло $Q_{п,ф}$, получаемое пресс-формой от плиты, частично расходуется на повышение температуры пресс-формы ($Q_{ф}$) и частично отдается окружающему воздуху ($Q_{ф,в}$).

В итоге в статике имеем тепловые балансы (Вт):

$$\text{плиты} \quad Q_{пр} = Q_{п,п} + Q_{п,ф} + Q_{п,в};$$

$$\text{пресс-формы} \quad Q_{п,ф} = Q_{ф} + Q_{ф,в};$$

$$\text{объекта в целом} \quad Q_{пр} = Q_{п,п} + Q_{ф} + Q_{п,в} + Q_{ф,в}. \quad (9.1)$$

Рассмотрим уравнение теплового баланса объекта за малый промежуток времени Δt при прогреве от температуры $\theta = \theta_v$ для малых изменений температуры $\Delta\theta$.

За малый промежуток времени Δt к плите будет подведена теплота $Q_{пр}\Delta t$, которая затратится на повышение температуры плиты на $\Delta\theta_n$, температуры пресс-формы на $\Delta\theta_{ф}$, потери в окружающую среду с поверхности плиты и потери с поверхности пресс-формы. При массе плиты m_n и удельной теплоемкости c_n на нагрев плиты за промежуток Δt затратится $m_n c_n \Delta\theta_n$, а на нагрев пресс-формы соответственно $m_{ф} c_{ф} \Delta\theta_{ф}$. Потери теплоты с поверхности плиты за

это время составят $Q_{п.в}\Delta t$, а с поверхности пресс-формы $Q_{ф.в}\Delta t$. Приравнявая приток и расход теплоты за время Δt , получим

$$Q_{пр}\Delta t = m_n c_n \Delta \theta_n + m_\phi c_\phi \Delta \theta_\phi + Q_{п.н}\Delta t + Q_{ф.в}\Delta t = W_n \Delta \theta_n + W_\phi \Delta \theta_\phi + (Q_{п.в} + Q_{ф.в}) \Delta t, \quad (9.2)$$

где W_n и W_ϕ — соответственно теплоемкости плиты и пресс-формы Дж/К.

Обозначим термические сопротивления (в К/Вт) от плиты к пресс-форме через $R_{п.ф}$, от плиты к воздуху — $R_{п.в}$, от пресс-формы к воздуху — $R_{ф.в}$. Считаем эти сопротивления при сравнительно малых изменениях температур θ_n , θ_ϕ (соответственно плиты и пресс-формы) и неизменной температуре воздуха $\theta_в$ постоянными. Получим уравнения теплового баланса за время Δt :

для плиты

$$Q_{пр}\Delta t = W_n \Delta \theta_n + [(\theta_n - \theta_\phi)/R_{п.ф} + (\theta_n - \theta_в)/R_{п.в}] \Delta t; \quad (9.3)$$

для пресс-формы

$$Q_{п.ф}\Delta t = (\theta_n - \theta_\phi) \Delta t / R_{п.ф} = W_\phi \Delta \theta_\phi + (\theta_\phi - \theta_в) \Delta t / R_{ф.в}. \quad (9.4)$$

От уравнений (9.3) и (9.4) при Δt , стремящемся к нулю, переходим к дифференциальным уравнениям:

$$W_n \frac{d\theta_n}{dt} + \left(\frac{1}{R_{п.ф}} + \frac{1}{R_{п.в}} \right) \theta_n = \frac{\theta_\phi}{R_{п.ф}} + \frac{\theta_в}{R_{п.в}} + Q_{пр};$$

$$W_\phi \frac{d\theta_\phi}{dt} + \left(\frac{1}{R_{ф.в}} + \frac{1}{R_{п.ф}} \right) \theta_\phi = \frac{\theta_n}{R_{п.ф}} + \frac{\theta_в}{R_{ф.в}}. \quad (9.5)$$

Полагая производные равными нулю, получим уравнения статики для плиты и пресс-формы:

$$Q_{пр0} = (1/R_{п.ф} + 1/R_{п.в}) \theta_{п0} - (\theta_{ф0}/R_{п.ф} + \theta_в/R_{п.в});$$

$$(\theta_{п0} - \theta_{ф0})/R_{п.ф} = (\theta_{ф0} - \theta_в)/R_{ф.в}. \quad (9.6)$$

Сложив эти выражения, получим

$$\theta_{пр0} = (\theta_{п0} - \theta_в)/R_{п.в} + (\theta_{ф0} - \theta_в)/R_{ф.в}, \quad (9.7)$$

т. е., как и следовало ожидать, при установившейся температуре вся подводимая к плите теплота расходуется на тепловые потери в окружающую среду.

Введем обозначения:

$$x = Q_{пр}/Q_{пр0}; \quad x_n = \theta_n/\theta_{п0}; \quad x_\phi = \theta_\phi/\theta_{ф0}; \quad k_1 = R_{п.ф}Q_{пр0}/\theta_{ф0};$$

$$T_n = W_n R_{п.ф} \theta_{п0}/\theta_{ф0}; \quad T_\phi = W_\phi R_{п.ф} \theta_{ф0}/\theta_{п0};$$

$$\delta_n = (1 + R_{п.ф}/R_{п.в}) \theta_{п0}/\theta_{ф0}; \quad \delta_\phi = (1 + R_{п.ф}/R_{ф.в}) \theta_{ф0}/\theta_{п0}. \quad (9.8)$$

После введения новых обозначений и несложных преобразований уравнения (9.5) примут вид:

$$T_n dx_n/dt + \delta_n x_n = x_\phi + k_1 x;$$

$$T_\phi dx_\phi/dt + \delta_\phi x_\phi = x_n. \quad (9.9)$$

Из системы двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка можем легко получить одно линейное дифференциальное уравнение второго порядка относительно x_Φ (или x_Π). Для этого продифференцируем второе уравнение по dt и, подставив dx_Π/dt в первое уравнение (9.9), получим

$$T_\Pi T_\Phi \frac{d^2 x_\Phi}{dt^2} + (T_\Pi \delta_\Phi + T_\Phi \delta_\Pi) \frac{d x_\Phi}{dt} + (\delta_\Pi \delta_\Phi - 1) x_\Phi = k_1 x,$$

или
$$T_1^2 \frac{d^2 x_\Phi}{dt^2} + 2\xi T_1 \frac{d x_\Phi}{dt} + x_\Phi = kx, \quad (9.10)$$

где $T_1^2 = T_\Pi T_\Phi / (\delta_\Pi \delta_\Phi - 1)$; $2\xi T_1 = (T_\Pi \delta_\Phi + T_\Phi \delta_\Pi) / (\delta_\Pi \delta_\Phi - 1)$; $k = k_1 / (\delta_\Pi \delta_\Phi - 1)$.

Так как $\delta_\Pi > 1$, $\delta_\Phi > 1$, $k_1 > 0$, то и $k > 0$, т. е. коэффициент k всегда положительная величина.

Передаточная функция для рассматриваемого объекта имеет следующий вид:

$$W(p) = k / (T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1). \quad (9.11)$$

Полученные выше дифференциальные уравнения (9.9), (9.10) и передаточная функция (9.11) могут быть использованы при анализе и синтезе автоматической системы управления температурным режимом.

Выходные координаты рассмотренного объекта, описываемого динамическими характеристиками (9.9) — (9.11), соответствуют некоторым средним температурам рабочих органов прессов, так как при их выводе не учитывалась неравномерность температурного поля, всегда имеющая место. Поэтому динамические характеристики вида (9.9) — (9.11) следует использовать с осторожностью, так как в реальных прессах температура в различных точках нагревательной плиты или пресс-формы может значительно отличаться от средней по объему и для разных точек может потребоваться применение различных зависимостей. Это учитывают как при выборе мест расположения в рабочих органах пресса чувствительных элементов автоматической системы управления режимом, так и при конструировании объектов. Естественно, что при решении задач анализа и синтеза систем автоматического управления температурным режимом, в частности оптимальных систем, во многих случаях необходимо учитывать распределенность координат в реальных объектах. Тогда динамические характеристики следует получать с учетом особенностей нестационарного температурного поля рабочих прессов, которое в общем виде описывается дифференциальным уравнением Фурье:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + q_v = c_v \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (9.12)$$

где x, y, z — пространственные координаты; t — время; $\lambda = \lambda(x, y, z, \theta)$ — коэффициент теплопроводности; $\theta = \theta(x, y, z, t)$ — темпера-

тура в точке с координатами x, y, z ; $q_v = q(x, y, z, t)$ — объемная плотность источников тепла; c_v — изохорическая теплоемкость единицы объема.

Решение (9.12) находится с учетом конкретных форм рабочих органов, начальных и граничных условий, имеющих место в исследуемой задаче. Для некоторых реальных объектов, в частности для прессов легкой промышленности, оказывается возможным, как это показано в [3], получить решение уравнения (9.12) в форме, удобной для анализа и синтеза автоматических систем.

§ 9.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭТАЖНЫХ ПРЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА ИСКУССТВЕННОЙ КОЖИ И РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Этажные прессы применяются в легкой промышленности для вулканизации резиновых изделий, а также для производства искусственной кожи. Подготовленные заготовки сырой смеси помещают в пресс-формы, размещаемые между нагревательными плитами вулканизационного пресса, расположенными одна за другой в несколько этажей. Смесь вулканизуется путем нагревания до определенной температуры и выдерживания в течение заданного времени под давлением. Обычно в цехе устанавливается несколько десятков вулканизационных этажных прессов, причем предусматриваются автоматический контроль и регулирование температурного режима [1].

На рис. 9.2 показана схема автоматизации этажного вулканизационного пресса с паровым обогревом и гидравлическим приводом. Жидкость под низким и высоким давлением (соответственно P_1 и P_2) подводится к гидродоцилиндру пресса 5 по трубопроводу 10. Пос-

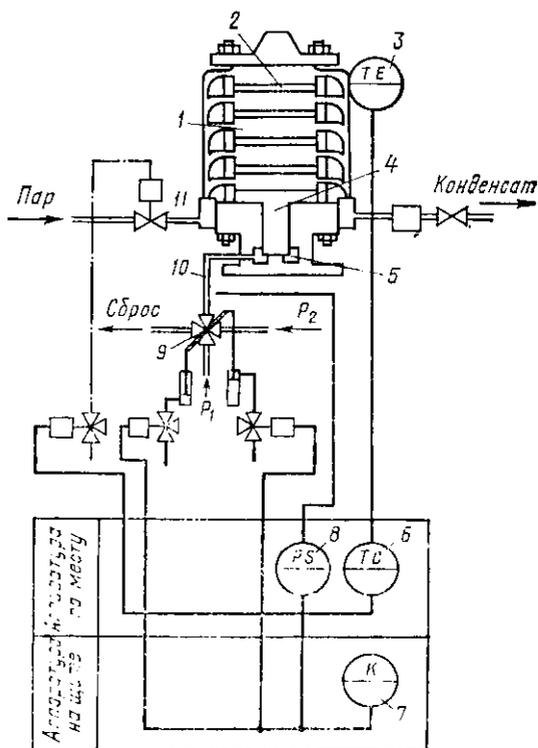


Рис. 9.2

ле «зарядки» пресса, т. е. после загрузки всех пресс-форм 2, расположенных на соответствующих нагревательных плитах 1, оператор включает программный прибор 7, подающий команду на дистрибутор 9, открывающий подачу жидкости низкого давления P_1 к цилиндру пресса 5. Под действием низкого давления плунжер 4 поднимается и замыкает все плиты 1 и пресс-формы 2, создавая некоторое давление, по достижении которого срабатывает реле давления 8, подающее сигнал на переключение дистрибутора 9 для подачи высокого давления P_2 в цилиндр 5. Одновременно закрывается клапан на линии низкого давления, жидкость высокого давления поступает в цилиндр пресса и происходит прессование вулканизируемых изделий при заданном давлении. По истечении времени вулканизации программный прибор 7 подает команду на дистрибутор, полость цилиндра соединяется с линией сбора жидкости, плунжер под действием веса опускается и пресс-формы разгружаются от изделий.

Температура по приведенной схеме контролируется с помощью манометрического прибора — термометра 6, чувствительный элемент которого 3 устанавливается в плите пресса. Исполнительным механизмом служит система из электромагнитного клапана и мембранного исполнительного механизма 11, управляющих клапаном подачи пара в нагревательные плиты. При электроннагреве нагревательных плит исполнительным механизмом АСР температуры служит электромагнитный контактор, переключающий нагревательные элементы на большую или на меньшую мощность.

Для правильного ведения вулканизационного технологического процесса необходимо строго выдерживать заданный температурный режим, причем температура пресс-формы не должна отклоняться от заданного значения более чем на 2—3°С. В прессах с обогревом насыщенным паром при постоянном давлении теплоносителя можно обеспечить достаточно высокую стабильность и равномерность температурного поля пресс-формы. Это справедливо, конечно, только при условии обеспечения соответствующего давления пара во всех точках каналов нагревательной системы и правильного размещения каналов в теле нагревательной плиты.

При электрическом обогреве температура нагревательных элементов значительно выше температуры вулканизации с существенным отличием процесса передачи теплоты к телу плиты от электронагревателя по сравнению с теплоотдачей пара, поэтому в плитах и пресс-формах с электрообогревом температурное поле необходимо рассчитывать с учетом температуры нагревателей, причем температурные поля различных нагревателей, расположенных в разных местах нагревательных плит, могут существенно различаться. Это означает, что температурное поле рабочих органов прессов с электрообогревом является более сложным объектом автоматического управления, нежели при паровом обогреве.

Ниже приведены примеры получения математических моделей температурных полей рабочих органов этажных прессов при паровом и электрическом обогреве.

Сначала рассмотрим температурное поле пресс-формы и нагревательных плит, расположенных сверху и снизу от нее при паровом обогреве. Считаем, что коэффициенты теплоотдачи с поверхности различных пресс-форм одного пресса не зависят от этажа, на котором расположена пресс-форма. Принятое допущение позволяет свести реальный объект к симметричному относительно пресс-формы, как показано на рис. 9.2.

Систему из нагревательной плиты и пресс-формы можно рассматривать как двухъёмкостный тепловой объект, у которого теплота подводится к первой тепловой емкости (плите) и передается от нее второй емкости (пресс-форме).

Пример. Рассматривая пресс-форму и плиты как объекты с сосредоточенными параметрами, составим уравнение теплового баланса и дифференциальные уравнения, аналогичные (9.6) и (9.9) при следующих исходных данных. Масса плиты 51 кг, ее удельная теплоемкость 0,46 кДж/(кг·К), масса пресс-формы 12,5 кг, ее удельная теплоемкость с учетом теплоемкости изделия 0,59 кДж/(кг·К).

Зададим $\theta_{п0}$ — установившуюся температуру плиты равной 157°С при температуре окружающего воздуха 20°С. Заданное значение устанавливается при полностью открытом вентиле подачи пара. Термическое сопротивление $R_{п.в}$ на свободной поверхности плиты приемем равным 0,17 К/Вт. Это сопротивление определяется по формуле

$$R_{п.в} = 1/(\alpha_{п} S_{п.в}),$$

где $\alpha_{п}$ — коэффициент теплоотдачи на свободной поверхности плиты, Вт/К·м²; $S_{п.в}$ — площадь свободной теплоотдающей поверхности плиты, м². Термическое сопротивление $R_{ф.в}$ на свободной поверхности пресс-формы, определяемое аналогично [2], приемем равным 0,36 К/Вт. Термическое сопротивление $R_{п.ф}$ между плитой и пресс-формой приемем равным 0,028 К/Вт [4].

Подставляя принятые значения коэффициентов в уравнения (9.6), получим для пресс-формы

$$Q_{п.ф0} = (157 - \theta_{ф0})/0,028; \quad Q_{ф.п0} = (\theta_{ф0} - 20)/0,36. \quad (9.13)$$

Из (9.13) находим установившуюся температуру пресс-формы $\theta_{ф0} = 147,1^{\circ}\text{C}$.

По формуле (9.7) определяем номинальное значение теплового потока через нагревательную плиту $Q_{п.р0} = (157 - 20)/0,17 + (147,1 - 20)/0,36 = 1160$ [Вт].

Вычислим коэффициенты дифференциальных уравнений динамики (9.8):

$$T_{п} = 51 \cdot 0,46 \cdot 10^3 \cdot 0,028 \frac{157}{147,1} = 710 \text{ с};$$

$$T_{ф} = 12,5 \cdot 0,59 \cdot 10^3 \cdot 0,028 \frac{147,1}{157} = 195 \text{ с};$$

$$a_{п} = \left(1 + \frac{0,028}{0,17}\right) \frac{157}{147,1} = 1,25;$$

$$a_{ф} = \left(1 + \frac{0,028}{0,36}\right) \frac{147,1}{157} = 1,013;$$

$$k_1 = \frac{0,028}{147,1} 1160 = 0,22.$$

Обозначим $x_1 = \Delta Q/Q_{п.р0}$; $x_2 = \Delta\theta_{ф}/\theta_{ф0}$; $x_3 = \Delta\theta_{п}/\theta_{п0}$. Система уравнений (9.8) запишется в виде

$$710 \frac{dx_3}{dt} + 1,25 x_3 = 0,22 x_1 + x_2;$$

$$195 \frac{dx_2}{dt} + 1,013 x_2 = x_3, \quad (9.14)$$

Отсюда получим дифференциальное уравнение двухемкостного объекта (9.10):

$$0,515 \cdot 10^6 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + 0,36 \cdot 10^4 \frac{dx_2}{dt} + x_2 = 0,82 x_1$$

или

$$34,5 \cdot 1,49 \cdot 10^4 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + (34,5 + 1,49) 10^2 \frac{dx_2}{dt} + x_2 = 0,82 x_1. \quad (9.15)$$

Передаточная функция (9.11) с учетом (9.15) запишется в форме

$$W_{\Phi}(p) = 0,82 / [(34,5 \cdot 10^2 p + 1)(1,49 \cdot 10^2 p + 1)]. \quad (9.16)$$

При необходимости автоматически регулировать температуру в пресс-форме возникает вопрос: где целесообразнее установить датчик температуры — в пресс-форме или в плите. На первый взгляд может показаться, что ошибки регулирования будут меньше при получении информации о рассогласовании в той части объекта, выходная координата которой регулируется. Но при позиционном регулировании амплитуда автоколебаний выходного сигнала в последней емкости будет всегда меньше и сигнал датчика будет запаздывать относительно выходной координаты первой емкости. Таким образом, динамическая точность регулирования выходной координаты θ_{Φ} в рассматриваемом случае ниже при регулировании по рассогласованию θ_{Φ} , чем при установке воспринимающего элемента для θ_{Π} (т. е. выходного сигнала первой емкости). При этом одновременно с уменьшением динамической ошибки регулирования (при использовании информации о рассогласовании θ_{Π}) возрастает статическая ошибка двухпозиционного регулирования θ_{Φ} из-за отставания (по значению и во времени) амплитуды ее автоколебаний от координаты θ_{Π} . Эту ошибку можно снизить соответствующей настройкой регулятора на срабатывание при более высоком, чем это требуется для координаты θ_{Φ} , значении координаты θ_{Π} .

Для производства искусственной кожи (по типу резины) особое значение имеет автоматическое регулирование температуры плит этажного вулканизационного прессы с электрообогревом. На эти плиты устанавливают пресс-формы с вулканизируемыми резиновыми смесями.

Этаж вулканизационного прессы имеет три тепловые емкости (нагреватель, плиту и пресс-форму). Используя принятый выше метод, дадим в дополнение к прежним обозначениям индекс «э» нагревательному элементу.

Схема теплового баланса объекта показана на рис. 9.3. Выделяющаяся в нагревательном элементе теплота $Q_{\text{нр}}$ расходуется на повышение температуры самого элемента ($Q_{\text{э}}$) и на нагрев плиты. Теплота, поступающая в плиту, частично ею аккумулируется ($Q_{\text{п}}$), частично поступает в пресс-форму и частично отдается окружающему воздуху ($Q_{\text{п.в}}$). Часть теплоты, поступающей от плиты в пресс-

форму, ею аккумулируется (Q_{ϕ}), а остальное отдается окружающему воздуху ($Q_{\phi,в}$).

Таким образом, тепловой баланс элемента

$$Q_{np} = Q_{\text{э}} + Q_{\text{п}} + Q_{\phi} + Q_{\text{п,п}} + Q_{\phi,в}. \quad (9.17)$$

Для малого промежутка времени Δt уравнение теплового баланса

$$Q_{np}\Delta t = W_{\text{э}}\Delta\theta_{\text{э}} + W_{\text{п}}\Delta\theta_{\text{п}} + W_{\phi}\Delta\theta_{\phi} + (Q_{\text{п,п}} + Q_{\phi,в})\Delta t, \quad (9.18)$$

где W_i с соответствующими индексами — теплоемкость нагревательного элемента, плиты и пресс-формы (удельная теплоемкость пресс-формы учитывает и ее содержимое), Дж/К.

Обозначим сопротивление теплопереходу от элемента к плите через $R_{\text{э,п}}$, К/Вт. Считаем это сопротивление (как и от плиты к пресс-форме, от плиты к воздуху и от пресс-формы к воздуху) при сравнительно малых изменениях температур $\theta_{\text{э}}$, $\theta_{\text{п}}$, θ_{ϕ} и неизменной температуре воздуха $\theta_{\text{в}}$ постоянным.

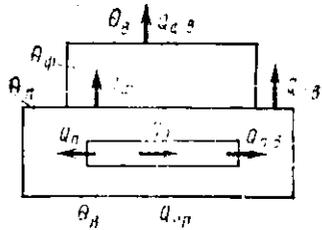


Рис. 9.3

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} T_{\text{э}} &= W_{\text{э}} R_{\text{э,п}} \frac{\theta_{\text{э}0}}{\theta_{\text{н}0}}; \quad T_{\text{п}} = W_{\text{п}} R_{\text{п,ф}} \frac{\theta_{\text{п}0}}{\theta_{\phi 0}}; \quad T_{\phi} = W_{\phi} R_{\text{п,ф}} \frac{\theta_{\phi 0}}{\theta_{\text{н}0}}; \\ \delta_{\text{э}} &= \frac{\theta_{\text{э}0}}{\theta_{\text{н}0}}; \quad \delta_{\text{п}} = \frac{\theta_{\text{п}0}}{\theta_{\phi 0}} \left(1 + \frac{R_{\text{п,ф}}}{R_{\text{э,п}}} + \frac{R_{\text{п,ф}}}{R_{\text{п,в}}} \right); \quad \delta_{\phi} = \frac{\theta_{\phi 0}}{\theta_{\text{н}0}} \left(1 + \frac{R_{\text{п,ф}}}{R_{\phi,в}} \right); \\ k_1 &= Q_{\text{п}0} \frac{R_{\text{э,п}}}{\theta_{\text{н}0}}; \quad k_2 = \frac{\theta_{\text{э}0} R_{\text{п,ф}}}{\theta_{\phi 0} R_{\text{э,п}}}. \end{aligned} \quad (9.19)$$

По аналогии с (9.9) получим:

$$\begin{aligned} T_{\text{э}} \frac{dx_{\text{э}}}{dt} + \delta_{\text{э}} x_{\text{э}} &= x_{\text{п}} + k_1 x; \\ T_{\text{п}} \frac{dx_{\text{п}}}{dt} + \delta_{\text{п}} x_{\text{п}} &= x_{\phi} + k_2 x_{\text{э}}; \\ T_{\phi} \frac{dx_{\phi}}{dt} + \delta_{\phi} x_{\phi} &= x_{\text{п}}. \end{aligned} \quad (9.20)$$

Полученная система линейных дифференциальных уравнений первого порядка легко решается. Продифференцируем третье уравнение:

$$\frac{dx_{\text{п}}}{dt} = T_{\phi} \frac{d^2 x_{\phi}}{dt^2} + \delta_{\phi} \frac{dx_{\phi}}{dt}$$

и подставим во второе уравнение значения x_{II} и dx_{II}/dt :

$$T_{II} \left(T_{\Phi} \frac{d^2 x_{\Phi}}{dt^2} + \delta_{\Phi} \frac{dx_{\Phi}}{dt} \right) + \delta_{II} \left(T_{\Phi} \frac{dx_{\Phi}}{dt} + \delta_{\Phi} x_{\Phi} \right) - x_{\Phi} = k_2 x_3.$$

Затем продифференцируем полученное уравнение:

$$T_{II} \left(T_{\Phi} \frac{d^3 x_{\Phi}}{dt^3} + \delta_{\Phi} \frac{d^2 x_{\Phi}}{dt^2} \right) + \delta_{II} \left(T_{\Phi} \frac{d^2 x_{\Phi}}{dt^2} + \delta_{\Phi} \frac{dx_{\Phi}}{dt} \right) - \frac{dx_{\Phi}}{dt} = k_2 \frac{dx_3}{dt}$$

и подставим в первое уравнение значения dx_3/dt , x_3 и x_{II} . В итоге получим линейное дифференциальное уравнение третьего порядка:

$$T_1^3 \frac{d^3 x_{\Phi}}{dt^3} + T_2^2 \frac{d^2 x_{\Phi}}{dt^2} + T_3 \frac{dx_{\Phi}}{dt} + x_{\Phi} = kx, \quad (9.21)$$

где $T_1^3 = T_9 T_{II} T_{\Phi} (\delta_{II} \delta_{\Phi} \delta_9 - \delta_9 - k_2 \delta_{\Phi})$;

$$T_2^2 = (T_9 T_{II} \delta_{\Phi} + T_9 T_{\Phi} \delta_{II} + T_{II} T_{\Phi} \delta_9) / (\delta_{II} \delta_{\Phi} \delta_9 - \delta_9 - k_2 \delta_{\Phi});$$

$$T_3 = (T_9 \delta_{II} \delta_{\Phi} + T_{II} \delta_9 \delta_{\Phi} + T_{\Phi} \delta_9 \delta_{II} - T_9 - k_2 T_{\Phi}) / (\delta_{II} \delta_{\Phi} \delta_9 - \delta_9 - k_2 \delta_{\Phi});$$

$$k = k_1 k_2 / (\delta_{II} \delta_{\Phi} \delta_9 - \delta_9 - k_2 \delta_{\Phi}).$$

Для пресс-формы с учетом (9.21) передаточная функция запишется в виде

$$W_{\Phi}(p) = k / (T_1^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_3 p + 1). \quad (9.22)$$

Полученные динамические характеристики для пресса с электрообогревом следует использовать с осторожностью, не забывая о наличии существенной неравномерности реального температурного поля.

Уравнения (9.20) характеризуют некоторые средние температуры, но могут приводить к значительным погрешностям при определении температуры в конкретной точке, например в области размещения воспринимающего элемента автоматической системы регулирования.

Для учета реальной неравномерности температурного поля рабочих органов используем уравнение Фурье (9.12), полагая [2] теплофизические свойства материала плиты и пресс-формы не зависящими от координат и температуры в рассматриваемом объеме конструкции. Уравнение теплопроводности (9.12) запишем в форме

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{q(x, y, z, t)}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (9.23)$$

где a — температуропроводность; λ — теплопроводность.

Приближенное решение для нестационарного температурного поля плиты или пресс-формы можно представить [2] в форме конечной суммы членов ряда

$$\begin{aligned} \theta(x, y, z, t) = & \\ = & \sum_{k=1}^l \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^s \left[A_{kmn} - (A_{kmn} - C_{kmn}) e^{-a(\beta_k^2 + \gamma_m^2 + \tau_n^2) t} \right] \times \\ & \times X_k(x) Y_m(y) Z_n(z), \end{aligned} \quad (9.24)$$

где A_{kmn} — коэффициенты разложения в ряд по собственным функциям решения для стационарного поля; C_{kmn} — коэффициенты разложения в соответствующий ряд функции начальных условий; $X_k(x)$, $Y_m(y)$, $Z_n(z)$ — собственные значения функций разложения; β_k , φ_m и γ_n — собственные числа, см. [3].

Вид функций $X_k(x)$, $Y_m(y)$, $Z_n(z)$ выбирается в зависимости от формы рабочих органов и граничных условий [2]. Расчет переходных процессов в прессе по формуле (9.24) требует привлечения специалистов по теплопроводности и применения ЭВМ.

§ 9.3. ПРЕСС ДЛЯ ВЛАЖНО-ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ШВЕЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Прессы влажно-тепловой обработки (ВТО) широко применяются в легкой промышленности на промежуточных и отделочных операциях производства швейных изделий [3]. Обработка швейных изделий на прессах ВТО требует автоматизации управления температурным режимом на гладильных поверхностях, давлением, дозировкой увлажнения. Задачи автоматизации ВТО решают путем создания полностью автоматизированных прессов с механизированной подачей и съемом деталей. Ниже прессы ВТО рассматриваются как тепловые объекты автоматизации.

На рис. 9.4 показана схема автоматизации пресса ВТО с электрическим обогревом и механическим приводом. На прессах ВТО наряду с механическим широко применяется пневматический привод. Привод обеспечивает закрытие и открытие пресса и управляется путем нажатия кнопок ручного управления 1 и 2, включающих магнитный пускатель 5. Для выдержки времени прессования применяется реле времени 4. Ключ 3 предназначен для перевода с полуавтоматического управления приводом на ручное. Электродвигатель 6 служит для перемещения верхней гладильной подушки 9, оснащенной электронагревателем. Конечные выключатели 7 и 8 предназначены для остановки привода в заданных предельных положениях.

Для контроля температуры верхней и нижней гладильных подушек применены термопары 11 и 13, соединенные переключателем с контрольно-измерительным прибором 17. Датчиком автоматической системы регулирования температуры служит dilatометрический

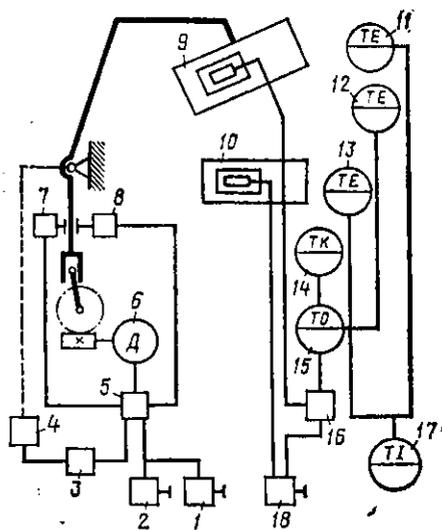


Рис. 9.4

преобразователь 12, соединенный с позиционным регулятором 15. На схеме показан также задатчик температурного режима 14. На практике dilatометрические преобразователи применяются еще достаточно широко, несмотря на серьезные их недостатки (сравнительно большую зону нечувствительности, невысокой надежности и т. п.), однако на многих конструкциях прессов в качестве датчиков АСР температуры применяют терморезисторы в комплексе с электронными мостовыми контрольно-измерительными и регулирующими приборами. На отечественных прессах типа ПСП и некоторых других применяется АСР температуры с термоэлектрическим термометром в качестве датчика и регулирующим пирометрическим милливольтметром. Применяются также многоточечные системы контроля и управления температурным режимом [5]. Магнитный пускатель 16 предназначен для усиления сигнала регулятора 15 и управляет включением и выключением нагревателя верхней гладильной подушки. Температурой нижней подушки 10 в этом случае не управляют. Ключ 18 обеспечивает отключение питания всей системы обогрева.

Возможны и другие схемы управления режимов ВТО, подробно описанные в [5] (например, с подачей увлажняющего пара к подушкам). Мы рассмотрим простейший пример ВТО на прессе с проутюжильником, увлажненным известным количеством воды при обогреве верхней подушки с помощью электрических нагревателей.

Даже для этого простейшего случая математическая модель объекта оказывается достаточно сложной. Тепловой поток, подводимый к обрабатываемому на прессе ВТО изделию, зависит от разности температур рабочей поверхности гладильной подушки и поверхности изделия. Если тело гладильной подушки сплошное, как у некоторых прессов ВТО без парового увлажнения изделия, то температурное поле подушки в первом приближении можно рассчитать, как и для вулканизационных прессов, по формуле (9.24) с учетом потерь теплоты на испарение влаги из изделия и проутюжильника.

Если гладильная подушка состоит из нескольких конструктивных элементов, имеющих форму пластин, через которые последовательно передается теплота изделию, как в некоторых современных конструкциях с подачей пара для отпаривания изделий, то учитывают термические сопротивления между элементами конструкции, это еще более усложняет математическую модель гладильной подушки как теплового объекта автоматизации. В таких случаях удобно в первом приближении полагать градиент температуры по нормали к контактирующей поверхности внутри каждого конструктивного элемента подушки равным нулю и вести расчет для некоторых средних значений температур конструктивных элементов.

С этой целью составляются для каждого конструктивного элемента дифференциальные уравнения теплового баланса в форме

$$W_i d\theta_i/dt + (\theta_i - \theta_{i+1})/R_{i,i+1} + (\theta_i - \theta_{i-1})/R_{i,i-1} = 0; \quad (9.25)$$

$$W_i d\theta_i/dt + (\theta_i - \theta_{i+1})/R_{i,i+1} + (\theta_i - \theta_{i-1})/R_{i,i-1} = Q_i, \quad (9.26)$$

где Q_i — мощность тепловыделения в i -м элементе подушки, кВт; $R_{i, i+1}, R_{i, i-1}$ — контактные термические сопротивления между соприкасающимися элементами, К/кВт; $\theta_{i-1}, \theta_i, \theta_{i+1}$ — средние температуры контактирующих элементов, число которых может быть и больше трех; W_i — полная теплоемкость i -го элемента, К/кДж.

Решая систему уравнений вида (9.25), (9.26), можно получить зависимость температуры i -го элемента от времени, начальных условий и возмущений, задаваемых в форме изменения тепловыделения или температур некоторых элементов. Если значения внутренних термических сопротивлений соизмеримы с контактными, то их

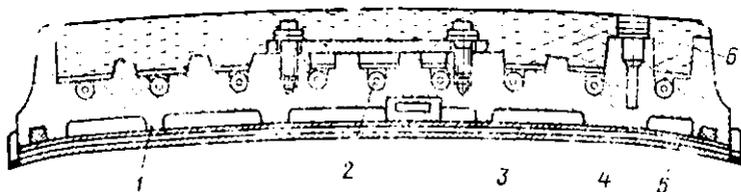


Рис. 9.5

можно суммировать со значениями контактных термических сопротивлений, определенных по известной методике [4], и полученная сумма рассматривается как расчетное контактное термическое сопротивление. Термическое удельное контактное сопротивление (К·м²/Вт) микрошероховатостей металлических поверхностей согласно [4] определяют по формуле

$$R_{i, i+1} = 3\sigma_n \Delta (2,1 p \lambda), \quad (9.27)$$

где σ_n — предел прочности менее пластичного из двух контактирующих металлов, Н/м²; Δ — высота микрошероховатости, м; p — удельное давление на поверхности, Н/м²; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), который при контактировании разных металлов определяется по формуле

$$\lambda = 2\lambda_i \lambda_{i+1} / (\lambda_i + \lambda_{i+1}). \quad (9.28)$$

Так, при обработке контактирующих поверхностей по 5-му классу чистоты и при удельной нагрузке $p = 1 \cdot 10^3$ Н/см² удельное контактное термическое сопротивление для пары материалов сталь — сталь составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ м²·К/Вт.

Рассчитывать температуры конструктивных элементов рабочих органов с учетом контактных термических сопротивлений удобно исходя из предложения об одномерности пространственного теплового потока.

Метод учета контактных термических сопротивлений между конструктивными элементами рабочих органов при расчете температуры этих элементов иллюстрируется ниже на примере верхней гладильной подушки (рис. 9.5). Конструкция подушки включает в себя корпус 1 электронагревателя 2, перфорированный алюминиевый лист 3, парораспределитель 5, гладильный лист 4 и теплоизолятор 6. Клапан, соединяющий греющую камеру с пропаривающей, относим к корпусу подушки. Крепежные детали, служащие для сое-

динения подушки с приводным устройством, отнесем к приводному устройству. Гладильный лист покрывается проутюжилником, который следует считать элементом рассматриваемой системы. Таким образом, система конструктивных элементов рассматриваемой гладильной подушки включает в себя корпус, алюминиевый лист, парораспределитель, гладильный лист, проутюжилник и теплоизоляцию. Какое-то количество тепла подводится через паровую камеру корпуса, однако в первом приближении считаем, что подушка обогревается только нагревательными элементами, условно объединяемыми в один расчетный нагревательный элемент.

Как указано выше, считаем в первом приближении температурное поле одномерным, а тепловые потоки от нагревателя направленными по нормали к гладильной поверхности. Для простоты считаем гладильную поверхность плоской. Перепадом температуры в теле каждого конструктивного элемента пренебрегаем. В такой постановке задачи расчет температурного поля сводится к расчету температуры в многослойной плоской пластине.

Зная средний расход теплоты на ВТО Q_1 , значения термических сопротивлений и задавая температуру проутюжилника θ_y , определяем установившееся значение температуры гладильного листа

$$\theta_r = \theta_y + R_{r,y} Q_1; \quad (9.29)$$

аналогично получим температуру парораспределителя

$$\theta_{п.г} = \theta_r + R_{п.г} Q_1; \quad (9.30)$$

температуру алюминиевого перфорированного листа

$$\theta_{л.п} = \theta_{п.г} + R_{л.п} Q_1; \quad (9.31)$$

температуру корпуса гладильной подушки

$$\theta_k = \theta_{л.п} + R_{к.л} Q_1, \quad (9.32)$$

где Q_1 — средний расход теплоты на ВТО, Вт; $R_{r,y}$ — полное термическое сопротивление теплопереходу от гладильного листа к проутюжилнику, К·Вт; $R_{п.г}$ — полное термическое сопротивление теплопереходу от парораспределителя к гладильному листу, К/Вт; $R_{л.п}$ — полное термическое сопротивление теплопереходу от листа к парораспределителю, К/Вт; $R_{к.л}$ — полное термическое сопротивление теплопереходу от корпуса к алюминиевому листу, К/Вт.

Объединяя (9.29) — (9.32), запишем

$$\theta_k = \theta_y + (R_{r,y} + R_{п.г} + R_{л.п} + R_{к.л}) Q_1$$

или, обозначая $R_{к,y} = R_{r,y} + R_{п.г} + R_{л.п} + R_{к.л}$, окончательно запишем

$$\theta_k = \theta_y + R_{к,y} Q_1, \quad (9.33)$$

где $R_{к,y}$ — полное суммарное термическое сопротивление теплопереходу от корпуса подушки к проутюжилнику.

Располагая значением температуры корпуса θ_k , можно определить температуру поверхности нагревательного элемента

$$\theta_n = \theta_k + R_{н,к} Q_1, \quad (9.34)$$

где $R_{н,к}$ — полное термическое сопротивление между нагревателем и корпусом.

При паровом обогреве температуру греющего пара можно приближенно считать равной температуре корпуса.

Значения коэффициентов теплоотдачи на внешней поверхности теплоизолирующего слоя находим последовательным приближением, для начала задаваясь каким-либо значением температуры поверхности. Расчет значения конвективных и радиационных коэффициентов теплоотдачи производится по известным формулам [2].

Для учета теплоты, расходуемой на испарение влаги из изделия, в первом приближении можно написать [3]

$$W_{\text{н}} \frac{d\theta_{\text{н}}}{dt} + m_{\text{в}} k_{\text{в}} = \frac{\theta_{\text{г}} - \theta_{\text{н}}}{R_{\text{г,н}}}, \quad (9.35)$$

где $k_{\text{в}}$ — скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг; $m_{\text{в}}$ — скорость испарения, являющаяся функцией времени, температуры, скорости отсасываемого воздуха и зависящая от конструктивных особенностей пресса, кг/ч.

Дифференциальные уравнения систем (9.25) и (9.26) получены для некоторых средних температур конструктивных элементов гладильной подушки при электрообогреве.

Количество воды, превращенной в пар в единицу времени, в первом приближении можно задать в виде функции времени [3]

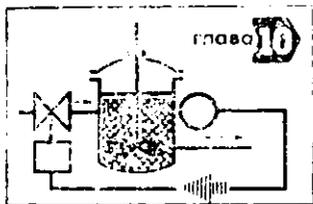
$$m_{\text{в}} = Ae^{-Bt}, \quad (9.36)$$

где коэффициенты A и B определяются экспериментально для каждого вида изделия и типа гладильного пресса при заданном режиме увлажнения (пропаривания), прессования и отсоса отработанного пара.

Полученная выше система дифференциальных уравнений позволяет построить структурную схему гладильной подушки как теплового объекта, состоящего из последовательного соединения аperiodических звеньев с перекрестными связями [3]. Проиндексируем цифрами температуры по направлению теплового потока, полагая $Q_{\text{пр}} = x_1$; $\theta_{\text{н}} = x_2$; $\theta_{\text{к}} = x_3$; $\theta_{\text{г}} = x_4$; $\theta_{\text{н}} = x_5$; $\theta_{\text{т}} = x_6$. При открытом прессе выходным сигналом является температура гладильного листа x_4 , которая должна поддерживаться в заданных технологических пределах. При рабочем положении считают выходной величиной температуру изделия x_5 . Место расположения датчика АСР обычно зависит от конструктивных особенностей подушки. Как правило, датчик устанавливается в корпусе гладильной подушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киннис А. Б. и др. Эксплуатация автоматических устройств в легкой промышленности. М., 1975.
2. Пятов Л. И., Наумов В. Н. Термические расчеты и автоматизация прессов с обогревом. М., 1966.
3. Наумов В. Н., Пятов Л. И. Оптимизация управления температурными режимами обработки швейных изделий. М., 1977.
4. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А. Контактный теплообмен. Теплопередача между соприкасающимися металлическими поверхностями. М. — Л., 1963.
5. Орлов И. В., Дубровный В. А. Основы технологии и автоматизации тепловой обработки швейных изделий. М., 1974.



АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЖИДКОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В различных производствах легкой промышленности имеется много процессов, связанных с жидкостной обработкой материалов. Здесь рассматриваются вопросы автоматизации жидкостных операций кожевенного производства (преддубильные и дубильные операции), а также весьма важный вопрос автоматизации приготовления растворов на химических станциях. Рассматривается также вопрос автоматизации процессов нанесения покрытия на основу (из раствора полимера) в производстве искусственных кож. Автоматизация этих процессов (объектов) является в настоящее время весьма актуальной.

Отметим общие особенности, присущие в основном всем жидкостным операциям легкой промышленности. Жидкостные операции при аналитическом представлении физико-химической сущности являются комплексными процессами, сочетающими гидродинамические, массообменные, тепловые и химические процессы. Все эти процессы идут последовательно и одновременно, с различной интенсивностью в разные отрезки времени после начала обработки, что и создает комплексность, сложность их аналитического представления. Сырье, полуфабрикат — суть гетерогенные системы; как правило, это капиллярно-пористые системы весьма сложного волокнистого строения, особенно для натуральных кож и меха. Рабочие растворы также являются гетерогенными системами, поэтому разработка аналитических моделей для жидкостных операций встречает значительные трудности. В основном применяется экспериментальный метод, подобный описанному в § 2.4. Жидкостные операции играют важную роль в формировании структуры обрабатываемого полуфабриката, что обеспечивает физико-механические и некоторые гигиенические показатели качества готовой продукции. Отсюда следует важность автоматизации, автоматического управления этими процессами для получения готового материала высокого качества.

§ 10.1. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЖИДКОСТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОЖИ

В производстве кожи к жидкостным операциям относятся большинство отмочно-зольных, преддубильных, дубильных и красильно-жировальных операций [1]. В гл. 1 на примере процесса дубления отмечались особенности, затрудняющие автоматизацию подобных объектов. Одной из таких особенностей является многомерность объектов, т. е. наличие большого числа входных воздействий X и

выходных переменных Y (см. рис. 1.1). С целью уменьшения размерности объектов для разработки моделей был использован метод экспертной оценки, изложенный в гл. 2 (§ 2.2). В качестве объектов рассматриваются жидкостные операции производства хромовых кож для верха обуви (до жирования).

Десяти экспертам были предложены анкеты относительно семи типов жидкостных операций (проводимых в подвесных барабанах) с указанием наименований факторов и соответствующих множеств входных воздействий X по каждой операции:

Отмока

- X_1 — температура раствора,
- X_2 — жидкостный коэффициент*,
- X_3 — длительность процесса,
- X_4 — наличие поверхностно-активных веществ,
- X_5 — частота вращения.

Обезволаживание

- X_1 — температура раствора,
- X_2 — жидкостный коэффициент,
- X_3 — длительность процесса,
- X_4 — начальная концентрация извести,
- X_5 — начальная концентрация сернистого натрия,
- X_6 — частота вращения,
- X_7 — pH раствора.

Зольение

- X_1 — температура раствора,
- X_2 — жидкостный коэффициент,
- X_3 — длительность процесса,
- X_4 — начальная концентрация извести,
- X_5 — начальная концентрация сернистого натрия,
- X_6 — возраст зольной жидкости,
- X_7 — скорость вращения,
- X_8 — pH раствора.

Обеззольвание

- X_1 — температура раствора,
- X_2 — жидкостный коэффициент,
- X_3 — длительность процесса,
- X_4 — начальная концентрация сульфата аммония
- X_5 — частота вращения.

Мягчение

- X_1 — температура раствора,
- X_2 — жидкостный коэффициент,
- X_3 — длительность процесса,
- X_4 — начальная концентрация мягчителя,
- X_5 — активность мягчителя,
- X_6 — pH раствора,
- X_7 — частота вращения.

Пикелевание

- X_1 — температура раствора,
- X_2 — жидкостный коэффициент,
- X_3 — длительность процесса,
- X_4 — начальная концентрация соли,
- X_5 — начальная концентрация кислоты,
- X_6 — частота вращения.

Дубление

- X_1 — температура раствора,

* Определяется как отношение объема раствора в литрах к массе обрабатываемого полуфабриката (голя) в килограммах.

- X_2 — жидкостный коэффициент,
- X_3 — длительность процесса,
- X_4 — начальная концентрация дубителя,
- X_5 — основность дубителя,
- X_6 — частота вращения.

При проведении опроса в анкетах была указана цель ранжирования — использование результатов для автоматизации операции. Обработка результатов опроса экспертов по указанной в § 2.2 мето-

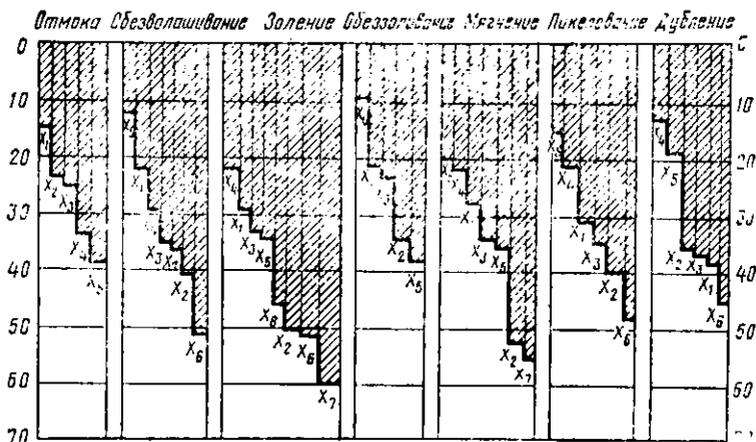


Рис. 10.1

дике позволила построить диаграммы рангов X по рассмотренным типам операции (рис. 10.1). Анализ результатов, представленных на рис. 10.1, позволяет сделать следующие выводы:

распределение рангов на диаграммах неравномерное, возможно отсеивание ряда входных воздействий как несущественных (например, скорость вращения барабанов, жидкостный коэффициент (ж. к.) для операции обезволивания, мягчения, пикелевания);

для всех операций наиболее существенными являются воздействия, связанные с начальными концентрациями рабочих растворов.

Рассмотрим подробнее в качестве объекта автоматизации процесс хромового дубления кож для верха обуви [1]. Эффект дубления достигается введением специальных дубящих веществ во внутреннюю структуру полуфабриката кожи — голяя — и физико-химическим взаимодействием этих веществ с коллагеном.

В свете современных научных данных дубление рассматривают как сложное явление, состоящее из наиболее простых взаимосвязанных процессов, протекающих как последовательно, так и одновременно. Дубление начинается с внешнего проникновения дубящих соединений в структуру коллагена по капиллярам и диффузии (внутренней) этих соединений из капилляров к центрам непосредственного реагирования (массообменные процессы). Между дубя-

шими соединениями и коллагеном происходят адсорбционные химические взаимодействия, которые обеспечивают создание структуры, обладающей определенными свойствами.

Следствием процесса дубления является упрочнение пространственной структуры коллагена за счет образования поперечных связей дубящими веществами между молекулярными цепями белковой структуры. Прочность этих связей зависит от природы дубящего соединения и режима дубления. Процесс дубления является необратимым процессом. Исследованиями установлено, что для различных дубящих соединений имеются различные оптимальные сочетания длительности процесса, начальных концентраций рабочих растворов и их температур и тому подобных показателей, которые в совокупности составляют режим дубления. Оптимальность здесь понимается с точки зрения получения выдубленного полуфабриката, обеспечивающего производство готового материала с экономически обоснованными наилучшими (оптимальными) показателями качества.

Кожу дубят в барабанах, шнековых аппаратах и других подобных агрегатах. Для интенсификации процесса дубления на внутренних стенках барабанов установлены полки, с этой же целью применяется вращение барабанов.

В последнее время развернуты широкие научно-исследовательские работы по разработке принципиально новых видов оборудования, которое позволило бы перейти от партионного к поштучному принципу обработки полуфабриката при существенно более высокой степени интенсивности процессов. Пока предлагаемые решения уступают в экономической эффективности традиционному оборудованию, поэтому здесь в качестве объекта управления рассматривается подвесной барабан.

Особенностями кожевенного производства, затрудняющими автоматизацию, являются: чередование партионной и поштучной обработки сырья и полуфабриката, многообразие ассортимента перерабатываемого сырья и выпускаемой продукции, недостаточная приспособленность применяемого оборудования (барабаны) для автоматизации, отсутствие инструментальных методов оценки качественных показателей полуфабриката в ходе обработки (ряд важнейших качественных показателей оценивается органолептически, другие определяются в результате лабораторных анализов), низкий уровень механизации основных и вспомогательных операций, значительная неоднородность перерабатываемого сырья.

Поскольку в стоимости продукции кожевенного производства основную долю составляет стоимость сырья, то экономическая эффективность от автоматизации должна заключаться прежде всего в повышении качества выпускаемой продукции благодаря более точному соблюдению регламентов технологических процессов.

До недавнего времени затраты на внедрение и эксплуатацию технических средств автоматизации не окупались в полной мере, так как и без автоматизации обеспечивался приемлемый (обычно минимальный) качественный уровень выпускаемой продукции. В послед-

ные годы положение коренным образом переменилось. Резко повысились требования к качеству выпускаемой продукции, с 1971 г. осуществлен переход к единой системе аттестации качества, в частности введено деление продукции по уровню качества на три категории: высшую, первую и вторую. Удельный вес выпуска продукции высшей категории пока невелик.

Для повышения качественных показателей продукции в настоящее время все шире применяются новые химические материалы, совершенствуются традиционные технологические процессы. В этих условиях требования к стабильности технологических режимов в соответствии с задаваемыми регламентами становятся более жесткими. Решение этих задач невозможно без повышения уровня автоматизации. Следует отметить, что простое применение современных технических средств автоматизации и вычислительной техники на существующем производстве без предварительной тщательной подготовки только увеличит себестоимость продукции без существенного улучшения ее качества, т. е. не будет достигнут экономический эффект.

Предварительная подготовка состоит в исследовании технологических процессов как объектов управления: определение выходных переменных Y , входных воздействий X , аналитическая и экспериментальная разработка математических моделей объектов (статических, динамических), предварительное технико-экономическое обоснование автоматизации.

Прежде чем перейти к конкретному анализу процессов дублирования как объектов управления, отметим существенные отличия в подходах к автоматизации технологических процессов.

Первый подход. Автоматизируется управление агрегатами по времени: приготовление рабочих растворов (начальные концентрации, температура и т. п.) и их подача в оборудование, загрузка и выгрузка полуфабриката и т. д. Предполагается, что если зафиксированы на заданном уровне начальные условия режима (концентрация рабочего раствора, жидкостный коэффициент и т. д.), то независимо от неоднородности сырья (в пределах отобранной партии) на выходе (по окончании процесса) получается полуфабрикат с качественными показателями, отвечающими заданным допускам. При этом подходе обязательна тщательная сортировка сырья по партиям с точки зрения однородности, высокие требования к стабильности характеристик химикатов, идущих на приготовление рабочих растворов.

Второй подход. В дополнение к программному управлению агрегатами во времени и стабилизацией начальных условий вводится автоматическое управление режима обработки по принципу отрицательной обратной связи. При этом требуется, чтобы технологическое оборудование (барабаны) было оснащено датчиками рН, концентрации веществ, температуры и т. п., а также оснащено исполнительными устройствами, позволяющими управлять режимами обработки путем изменения материальных и энергетических потоков в объект. Датчики и исполнительные устройства включаются в кон-

тур управления, в который могут входить также регистрирующие приборы, регуляторы, ЭВМ, человек-оператор.

Реализация второго подхода к управлению требует увеличения капитальных и эксплуатационных затрат, однако он позволяет оперативно устранять возникающие в ходе процессов отклонения в режимах обработки и поэтому обеспечивает в целом управление более высокого качества. Ниже рассматривается автоматизация в виде второго, комплексного подхода.

Анализ процесса дубления как объекта управления начнем с выбора основных выходных переменных. В качестве примера рассмотрим процесс дубления кож дубящими соединениями хрома при выработке кож для верха обуви.

Согласно § 2.2 в качестве основных выходных переменных процесса дубления выбираем (см. рис. 2.6): Y_1 — температура сваривания, °С; Y_3 — содержание Cr_2O_3 в полуфабрикате, %; Y_4 — содержание Cr_2O_3 в рабочем растворе, г/л; Y_5 — pH раствора. Стандарты на готовую кожу дают значения для $Y_3 \geq 3,5\%$ и $Y_1 \geq 90^\circ C$. С учетом материального баланса процесса перехода оксида хрома из рабочего раствора в полуфабрикат, при условии, что начальное содержание Cr_2O_3 в голье равно нулю, можно записать:

$$Y_3(t) = -k \Delta Y_4(t), \quad (10.1)$$

где $Y_3(t)$ — содержание Cr_2O_3 , % в полуфабрикате в момент времени t ; k — коэффициент пропорциональности; $\Delta Y_4(t) = Y_4(t) - (Y_4)_{нач}$ — приращение содержания Cr_2O_3 , г/л в рабочем растворе в момент времени t по отношению к начальному содержанию $(Y_4)_{нач}$.

Исследования показали (рис. 10.2, кривая 1), что изменение содержания Cr_2O_3 в рабочем растворе $Y_4(t)$ в ходе процесса дубления носит убывающий характер, близкий к экспоненте, при $t \rightarrow \infty$ величина $Y_4(t)$ стремится к $(Y_4)_{\infty} = (Y_4)_{min}$; в соответствии с (10.1) величина $Y_3(t)$ — кривая 2 возрастает по экспоненте. Из (10.1) следует, что при автоматизации необходимо контролировать обе величины $Y_3(t)$ и $Y_4(t)$; в связи с наличием линейной связи можно ограничиться изменением одной из них, например $Y_4(t)$. Дело в том, что определение $Y_3(t)$ в процессе обработки затруднено, так как требует вырезания образца и химического лабораторного анализа для оценки. Определить $Y_4(t)$ в ходе обработки возможно автоматически, например с использованием автоматических концентратометров.

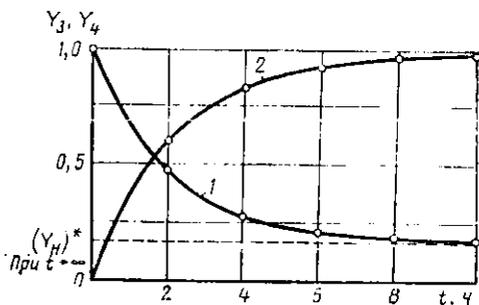


Рис. 10.2

Результаты исследований и теоретические представления [1, 2] о процессе дубления позволяют утверждать, что между $Y_1(t)$ и $Y_3(t)$ должна быть значительная корреляция, а именно: чем больше содержание Cr_2O_3 в полуфабрикате ($Y_3(t)$), тем выше температура сваривания ($Y_1(t)$) при прочих равных условиях. Температура сваривания определяется согласно существующим методикам путем лабораторного анализа вырезанного образца размером 50×3 мм, поэтому $Y_1(t)$ неудобен для автоматизации. Следовательно, в качестве основных выходных технологических переменных процесса дубления можно использовать $Y_4(t)$, $Y_5(t)$. В работе [2] на основе активного эксперимента была разработана статическая модель процесса хромового дубления свиных кож (без пикельной обработки). В дополнение к входным воздействиям процесса дубления, указанным в табл. 2.1, были учтены два входных воздействия операции додубливания, которая следует за операцией дубления.

Ниже названы входные воздействия X_i с указанием диапазона их изменения от $(X_j)_{\min}$ до $(X_j)_{\max}$:

Температура раствора	$X_1 = (18 \div 25)^\circ \text{C}$
Жидкостный коэффициент	$X_2 = (0,5 \div 1,4) \text{ л/кг}$
Длительность процесса	$X_3 = (5 \div 8) \text{ ч}$
Начальная концентрация дубителя	$X_4 = (1,9 \div 3) \%$
Основность дубителя	$X_5 = (25 \div 35) \%$
Температура раствора при додубли-	
вании	$X_6 = (30 \div 45)^\circ \text{C}$
Продолжительность додубливания	$X_7 = (1 \div 2) \text{ ч}$

Скорость вращения согласно диаграмме рангов (X_6 на рис. 10.1) в модель объекта не введена.

В результате применения метода регрессионного анализа (см. § 2.4) была разработана модель объекта, которую после проверки значимости параметров можно представить в виде

$$(\hat{Y}_3)_m = 7,3 + 0,6x_1 - 0,4x_2 + 0,6x_4 + 0,2x_5 + 0,1x_6 + 0,1x_7, \quad (10.2)$$

где все x_j ($j=1, 2, 4, \dots, 7$) есть входные воздействия в стандартизованном масштабе:

$$x_j = (X_j - \bar{X}_j) / [(X_j)_{\max} - (X_j)_{\min}], \quad -1 \leq x_j \leq +1.$$

В модели (10.2) отсутствует входное воздействие X_3 — длительность процесса дубления, которое оказалось при проверке значимости модели (10.2) несущественным. Очевидно для заданных условий процесса дубления диапазон изменения X_3 от 5 до 8 и был несущественным с точки зрения влияния его на изменение Y_3 . Однако не следует торопиться с рекомендациями по уменьшению продолжительности дубления. Дело в том, что оксид хрома в начальной фазе дубления (первые 2—3 ч) находится в структуре полуфабриката в относительно слабой физико-химической связи с коллагеном, т. е. оксид хрома «доставлен» в структуру, но еще не связан достаточно прочно с этой структурой. Основной же эффект дубления определяется именно прочными, необратимыми связями оксида хрома с коллагеном. Эти связи устанавливаются через значительно больший

отрезок времени, в том числе в ходе обязательной пролежки после дубления, операций додубливания и т. д. Существующий метод анализа оксида хрома позволяет оценить только общую массу оксида хрома, введенного в состав кожи.

Модель (10.2) может применяться только для приведенного нами конкретного примера процесса, модель для дубления хромовых кож из шкур крупного рогатого скота для верха обуви будет отличаться от модели (10.2) и, возможно, не только величиной параметров, но и структурой. При изменении химических реагентов (например, типа дубителя) модель (10.2) также меняется.

При анализе модели (10.2) с целью использования ее для построения системы автоматического управления необходимо учесть, что входные воздействия X_1, X_2, X_4, X_5 относятся к начальным характеристикам процесса дубления, т. е. они контролируются только в начальный момент времени ($t=0$).

В модели (10.2) не учитывается ввод различных добавок в барабан в ходе процесса дубления, который осуществляется по временной программе в соответствии с технологической методикой (добавка хромпика, раствора сульфата натрия и т. п.). В то же время применение второго, комплексного подхода оправдано здесь только в том случае, если получаемая в ходе процесса дубления информация оперативно используется для его коррекции с целью получения полуфабриката хорошего качества. Для реализации этого подхода необходимо исследовать объект с целью разработки его модели, учитывающей управляемые входные воздействия, которые, действуя на объект в ходе процесса дубления, оказывают существенное влияние на изменение его выходных переменных, например на $Y_3(t)$. В модели, безусловно, должны учитываться и начальные условия, т. е. воздействия X_1, X_2, X_4, X_5 . Для каждого типа сырья формируется множество оптимальных значений начальных условий (X_1, X_2, X_4, X_5), обеспечивающих при прочих равных условиях проведение технологического процесса с целью получения полуфабриката высокого качества. При использовании в качестве выходной переменной $Y_3(t)$ необходимо обеспечить достижение заданной величины $(Y_3)_{доп}$ в конце процесса дубления (при заданной постоянной продолжительности $t_{зд}$ дубления), т. е. условие оптимальности можно записать в виде

$$Y_3(t) \geq (Y_3)_{доп} \text{ при } t = t_{зд}. \quad (10.3)$$

Входные воздействия, действующие на объект в ходе процесса дубления, должны обеспечить выполнение условия (10.3) при фактических возмущениях, связанных с неоднородностью сырья, химикатов, изменением характеристик оборудования и т. п.

Следовательно, полную модель процесса дубления можно представить в виде

$$(\hat{Y}_3)_м = f[(X_i)_{нач}, (X_j)_{пр}], \quad (10.4)$$

где $(X_i)_{нач}$ — входные воздействия, формирующие начальные условия процесса дубления; $(X_j)_{пр}$ — входные воздействия, действующие

шие на объект в ходе процесса дубления. Для автоматического управления $Y_3(t)$ необходимо получить информацию об ее изменении.

В связи с отсутствием методов и приборов для автоматического изменения $Y_3(t)$ до настоящего времени не было возможности обеспечить оперативную обратную связь в ходе процесса дубления. Однако в последнее время появились опытные образцы приборов для непрерывного автоматического измерения содержания оксида хрома в рабочих растворах [$Y_4(t)$], пригодных для использования в системах автоматизации процесса дубления. При этом для получения информации о $Y_3(t)$ по измеренным $Y_4(t)$ используется (10.1). На ряде кожевенных заводов ведутся научно-исследовательские работы с целью определения модели типа (10.4) и построения системы автоматического управления процессом дубления с учетом этой модели. Необходимым этапом в этих исследованиях является построение системы контроля (измерения) основных входных воздействий X и выходных переменных Y процесса дубления, действующей в режиме нормального функционирования объекта, т. е. применение пассивного экспериментального метода исследования объекта. Такая система должна автоматически регистрировать X , Y во время процесса дубления; полученные реализации $X(t)$, $Y(t)$ можно использовать для оценки статистических характеристик объекта, разработки предварительных моделей, выбора шага дискретности Δt регистрации и т. п.

На рис. 10.3 показан вариант функциональной схемы системы контроля процесса дубления, которая была использована для получения реализаций $X(t)$, $Y(t)$. Система контролирует температуру, рН и содержание оксида хрома в растворе [$Y_4(t)$]. Для непрерывного измерения этих выходных переменных применено специальное пробоотборное устройство 3, в котором циркулирует рабочий раствор. На внешнем участке пробоотборного устройства насос 7 прокачивает часть раствора через трубу 8, в которой установлены первичные измерительные преобразователи 4—1, 5—1, 6—1 указанных переменных, на щите около барабана установлены соответствующие вторичные преобразующие, регистрирующие приборы 4—2, 5—2, 6—2. Привод 1 приводит во вращение барабан 2; пневматический клапан 9 служит для управления подачей растворов от химстанции в барабан.

На рис. 10.4 показан эскиз наиболее ответственного узла участка пробоотборного устройства. При вращении барабана часть жидкости захватывается в трубопровод 1 «улитки» и через внутреннюю трубу 2 за счет гидростатического давления столба жидкости при ее подъеме вверх в отрезке «улитки» поступает во внешний участок пробоотборного устройства. Входная часть «улитки» 1 защищена ограждением 8. Внешний участок пробоотборного устройства состоит из накопительной емкости 5, в которой установлен датчик температуры 4 (термометр сопротивления), наружной неподвижной трубы 6, наружной вращающейся трубы 7. Порция контролируемой жидкости из трубы 2 поступает в накопительную емкость 5, из которой часть контролируемой жидкости прокачивается через кольцевой

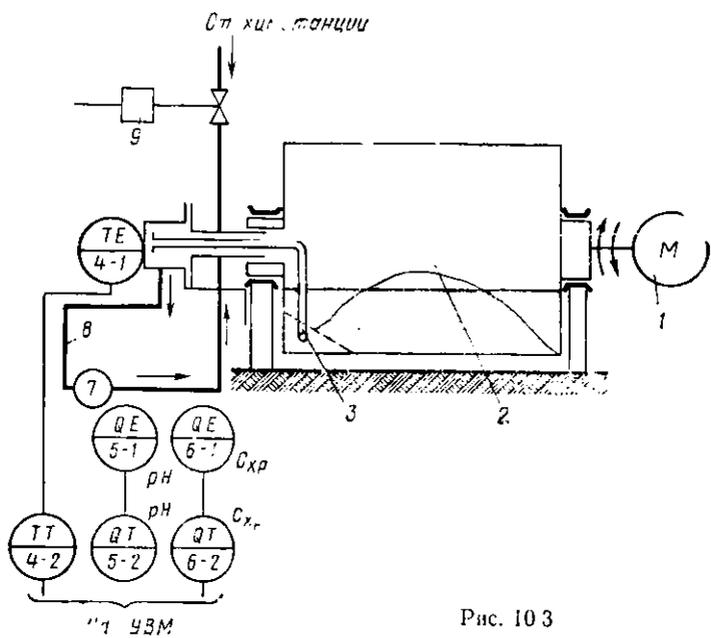


Рис. 10.3

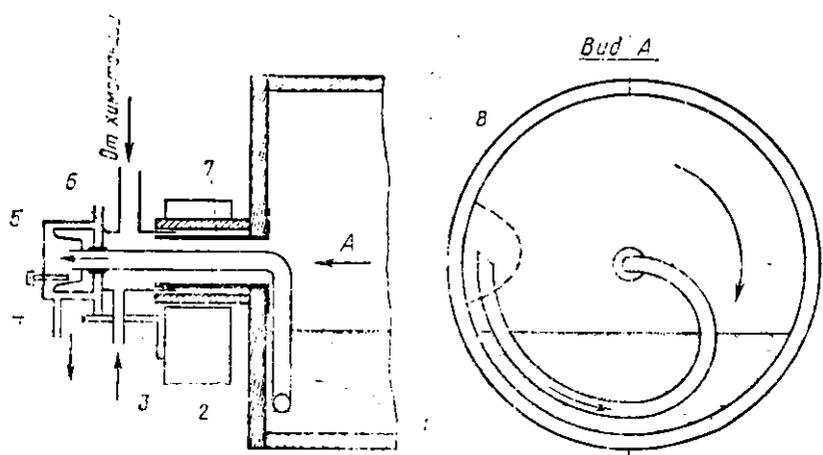


Рис. 10.4

участок трубопровода (на рис. 10.4 не показан), где установлены датчики рН и концентрации $C_{хр}$. Из этого трубопровода контролируемая жидкость поступает во внешнюю трубу 6, затем в трубу 7 и сливается обратно в барабан. Внешняя часть пробоотборного устройства опирается на консольную опору 3.

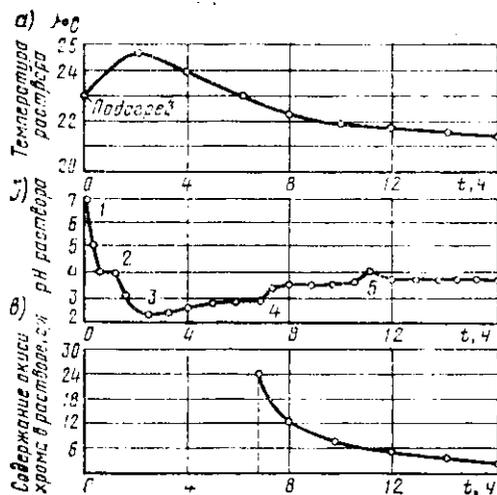


Рис. 10.5

По данным пассивного эксперимента с помощью системы контроля согласно (рис. 10.3) построены графики изменения температуры (рис. 10.5, а), рН раствора (рис. 10.5, б) и содержания оксида хрома в рабочем растворе (рис. 10.5, в) в ходе совмещенного процесса пиклевания — дубления. На рис. 10.5, б обозначено: 1 и 2 — первое и второе введение H_2SO_4 соответственно; 3 — загрузка голяя; 4 — добавка хромового дубителя; 5 — добавка Na_2SO_4 .

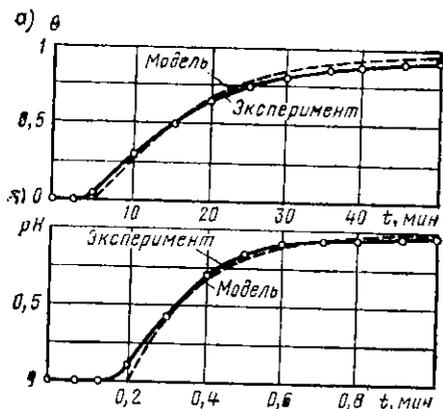


Рис. 10.6

Кривые изменения указанных сигналов во времени типичны для процесса дубления в барабане. На рис. 10.6 показаны типичные переходные характеристики по каналам объекта:

входной скачкообразный сигнал в виде подачи тепловой энергии (добавка горячей воды), выходной сигнал — изменение температуры раствора θ (в безразмерной форме) во времени t ;

входной скачкообразный сигнал в виде подачи определенного объема кислоты, выходной сигнал — изменение рН раствора (в безразмерной форме) во времени t .

Эти переходные процессы были определены по режиму холостого хода (без полуфабриката) на барабане объемом $1,2 \text{ м}^3$, с жидкостным коэффициентом равным 1.

В первом приближении можно аппроксимировать эти каналы передаточной функцией апериодического звена с запаздыванием:

$$W_M(p) = ke^{-p\tau} / (1 + pT),$$

где по каналу температуры для данного барабана имеем: $T \approx 13,5$ мин; $\tau = 5$ мин; по каналу рН имеем: $T = 0,185$ мин; $\tau = 0,2$ мин.

На рис. 10.7 представлена функциональная схема автоматизации (один из возможных вариантов) участка дублирования, состоящего из m однотипных подвесных барабанов. Каждый из барабанов имеет пробоотборное устройство $ПУ_j$ (j — номер барабана, $j = 1, 2, \dots$).

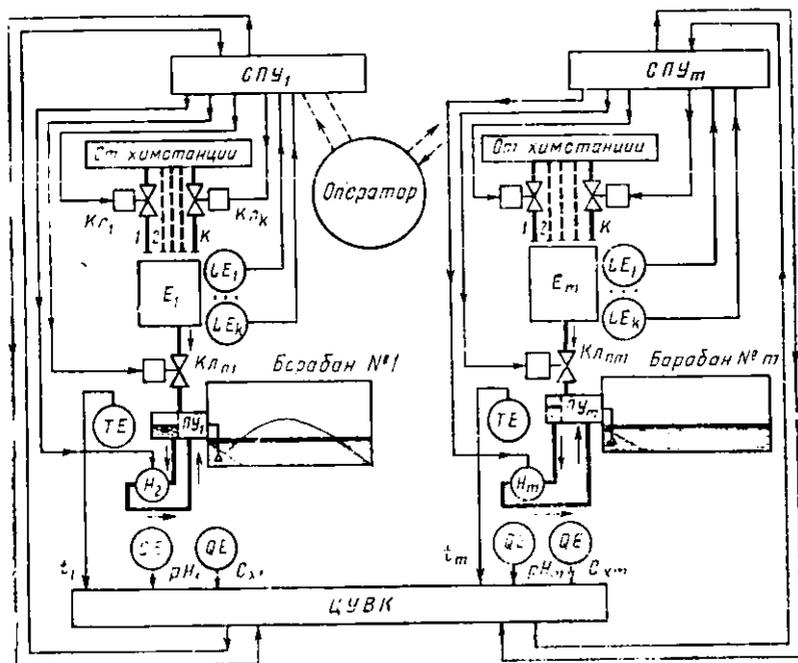


Рис. 10.7

m) описанной выше конструкции (см. рис. 10.3) с датчиками температуры ($ТЕ$), рН и концентрации оксида хрома рабочего раствора, а также с насосом $Н_j$. Информация о текущих значениях температуры, рН и концентрации оксида хрома поступает на центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК). Около каждого барабана установлена рабочая емкость E_j , в которую поступают от химстанции концентрированные растворы химических реагентов и вода.

К емкости E_j подведены k трубопроводов, на каждом из которых установлен пневматический клапан ($Кл_1, Кл_2, \dots, Кл_k$). В емкости E_j установлены соответственно датчики LE_1, LE_2, \dots, LE_k сигнализаторов уровня; рабочие растворы, обеспечивающие требуемые начальные условия, приготавливаются объемным методом (по уровню) с учетом последовательности поступления химических реагентов в емкость E_j . Управляет приготовлением рабочего рас-

творя для каждого j -го барабана свой стенд программного управления (СПУ $_j$).

В соответствии с заданной программой СПУ $_j$ посредством клапанов K_{li} ($i=1, 2, \dots, k$) управляет подачей в емкость E_j от химстанции заданных объемов концентрированных растворов и воды по трубопроводам 1, ..., k (поочередно). При этом клапан $K_{лпj}$ подачи рабочих растворов в j -й барабан закрыт. После того как соответствующий датчик уровня LE_i ($i=1, 2, \dots, k$) даст сигнал о достижении i -й жидкости заданного значения уровня в емкости E_j , закрывается соответствующий клапан K_{li} и открывается клапан $K_{лпj}$, ириготовленная порция компонента i рабочего раствора поступает в барабан. Если кроме компонента i необходимы компоненты $i+1, i+2, \dots, k$, то их приготавливают в емкости E_j и подают в барабан аналогично.

Кроме приготовления рабочих растворов СПУ $_j$ управляет вращением барабана (пуск, реверс, останов) и периодической работой насоса H_j в кольцевом трубопроводе пробоотборного устройства. Периодический режим работы насоса H_j целесообразен вследствие большой инерционности процесса дубления; в зависимости от конкретных условий процесса дубления можно рекомендовать режим работы насоса: 2—3 мин включен, 15—30 мин отключен.

Датчики переменных $TE_j, QE(pH_j), QE(C_{xj})$ передают информацию о ходе процесса дубления на ЦУВК, который анализирует эту информацию и в соответствии с разработанной моделью типа (10.4) формирует управляемые входные воздействия $(X_i)_{пр}$ для осуществления условия (10.3). Оператор контролирует правильность работы СПУ $_j$ и ЦУВК.

Если необходимо реализовать управляемое входное воздействие $(X_i)_{пр}$ в виде добавки раствора какого-либо i -го реагента, то ЦУВК через СПУ $_j$ управляет автоматическим приготовлением такой добавки в емкости E_j и затем введением ее в барабан (аналогично процессу приготовления рабочего раствора и введения его в барабан в начале процесса, описанного выше).

§ 10.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ КОЖЕВЕННЫХ ЗАВОДОВ

Технологические процессы производства кожи связаны с периодическим потреблением рабочих растворов и воды. Рабочие растворы заданных параметров (состав, температура и объем) и вода (температура, объем) готовят на автоматизированных химстанциях (АХС) кожзаводов. В связи с интенсификацией технологических процессов повышаются требования к стабильности заданных характеристик рабочих растворов и воды. Рабочие растворы готовят, как правило, в два этапа: на первом этапе путем смешения двух или нескольких компонентов (вода и твердый химический реагент) готовят концентрированные растворы (экстракты); на втором этапе путем смешения экстрактов и разбавления водой готовят рабочие растворы требуемых начальных условий. Соотноше-

ние компонентов обеспечивается, как правило, дозировкой (весовой или объемной). АХС обеспечивают эффективное выполнение указанных задач. Ниже рассматриваются основные применяющиеся и перспективные функциональные схемы АХС; данный материал базируется в основном на работах [3, 4].

АХС обычно организуется по принципу централизации или автономности. В первом случае АХС обеспечивают централизованное приготовление и подачу растворов в оборудование. Их общий не-

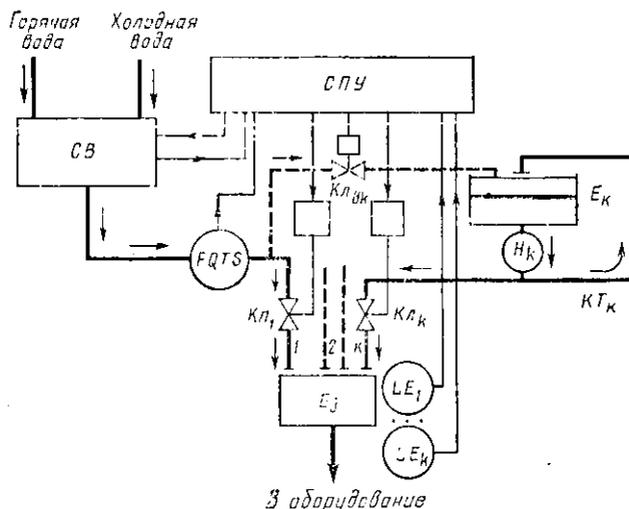


Рис. 10.8

достаток — большая протяженность трубопроводов для подачи растворов. Автономные АХС располагаются непосредственно в цехах около участков технологического оборудования (например, участок пикелевания — дубления, участок жирования и т. д.), что создает большую гибкость для управления процессами.

Рабочие растворы готовят по схемам периодического приготовления в промежуточных емкостях или непрерывного приготовления в потоке. Более распространена первая схема, как более надежная в эксплуатации.

На рис. 10.8 приведена функциональная схема АХС по одному из вариантов фирмы «Хюни» (Швейцария). Концентрированные растворы готовятся в подготавливающих емкостях E_i ($i=2, 3, \dots, k$; i — номер компонента), в которые подаются сыпучие (или жидкие) компоненты и вода заданной температуры и объема. Вода готовится в специальной системе водоподготовки (СВ), эта система описана ниже (см. рис. 10.11). Вода подается от СВ в емкость E_i через клапан $Кл_{вк}$, управляемый от СПУ. Хорошо перемешивание концентрированного раствора достигается благодаря его перегонке насосом $Н_i$ по кольцевому трубопроводу $КТ_i$. Подготовленные раство-

ры и вода поступают в рабочую емкость E_i и далее в оборудование. Управление всем процессом приготовления растворов и водоподготовки осуществляет СПУ₁ (см. пояснения к рис. 10.7), информация о расходе воды поступает от счетчика-дозатора FQIS в СПУ₁.

Разработаны и другие варианты управления АХС. На рис. 10.9 показана блок-схема организации централизованных АХС.

В соответствии со схемой приготовление рабочих растворов проводится по следующим этапам: 1) растворение сухого химического

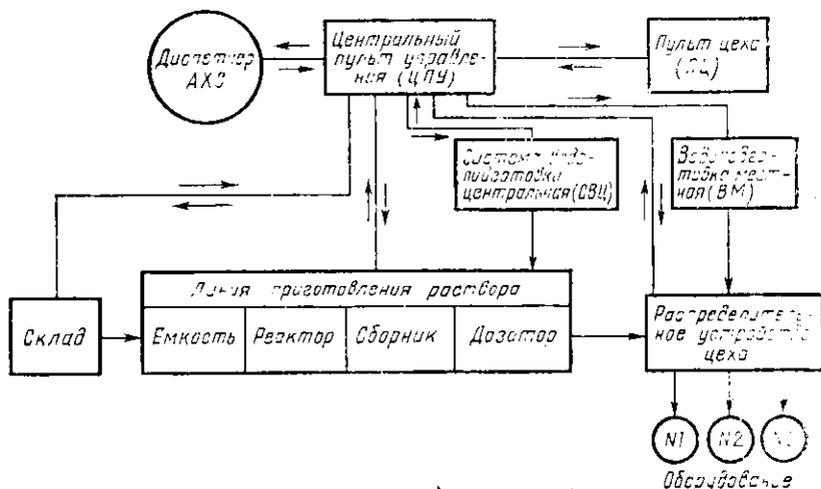


Рис. 10.9

материала и приготовление стабилизированного насыщенного раствора (путем соответствующего регулирования его температуры); 2) приготовление запаса стандартного раствора; 3) отмеривание заданного количества стандартного раствора; 4) выдача дозы стандартного раствора и дозы воды требуемой температуры из системы водоподготовки в технологическое оборудование с приготовлением рабочего раствора в трубопроводе. 1, 2 и 3-й этапы выполняются на централизованной АХС, на линиях приготовления растворов. Приготовленные растворы подаются в оборудование через распределительные устройства по заказу из цеха.

Если температуру насыщенного раствора стабилизировать на заданном уровне, то приготовление рабочего раствора становится простой операцией смешивания в заданных пропорциях доз воды и насыщенного раствора. Приготовление рабочего раствора продолжается до полного растворения веществ, т. е. осадка в емкости не должно быть. Такая схема приготовления рабочих растворов позволяет уменьшить количество и габариты емкостной аппаратуры на АХС, сократить количество трубопроводов и запорной арматуры, упростить эксплуатацию АХС. Эта схема применима для приготовления раствора любого химического материала.

Линия приготовления рабочего раствора (рис. 10.9) состоит из емкости для растворения сухого химического материала; реактора, оснащенного соответствующим оборудованием и средствами автоматизации; сборника для хранения суточного запаса концентрированного раствора; дозатора для отмеривания заданного количества раствора. Связи линии с другими объектами видны на рис. 10.9.

Центральный пульт управления (ЦПУ) предназначен для контроля и управления работой всей АХС. Он связан со всеми элементами АХС, а также со складом химических материалов, эксплуатационными службами, производственными цехами.

При необходимости подачи какого-либо раствора необходимо дать «вызов» этого раствора, для чего в цехе предусмотрен пульт цеха (ПУ), на котором задается количество раствора и номер оборудования, куда надо подать раствор. Раствор подается в оборудование автоматически, без участия диспетчера АХС. В случае необходимости диспетчер может взять управление на себя.

Система водоподготовки центральная (СВЦ) является самостоятельным элементом АХС. Она управляется дистанционно и имеет устройства, регулирующие температуру подаваемой воды. В цехах целесообразно использовать самостоятельные (местные) водоподготовки (ВП). Распределительное устройство цеха управляется дистанционно от ЦПУ и имеет обратную связь, дающую в ЦПУ информацию о соответствии выбранного адреса заданному.

Такая структура АХС и описанная процедура управления могут явиться типовыми для АХС кожевенных заводов, выпускающих хромовые кожи.

Функциональная схема одного из вариантов АХС, построенной по структурной схеме рис. 10.9, показана на рис. 10.10. Рассмотрим работу этой АХС.

Сухое химическое вещество-реагент поступает со склада и засыпается в реактор 1, сюда же из системы центральной водоподготовки 3 заливается также вода требуемой температуры через клапан 21. Когда уровень раствора в реакторе 1 достигает датчика уровня 19, включается насос 17, при этом клапан 18 открыт, клапан 15 закрыт. Раствор в реакторе благодаря рециркуляции интенсивно перемешивается. Температура раствора регулируется локально АСР, состоящей из датчика 2, позиционного регулятора 14 и теплообменника 16. Когда уровень раствора в реакторе 1 достигает датчика уровня 20, то клапан 21 закрывается и подача воды в реактор 1 прекращается. Через интервал времени, необходимый для полного растворения реагента в реакторе 1, клапан 15 открывается, клапан 18 закрывается и насос 17 начинает перекачивать готовый раствор в сборник 8. При достижении уровня раствора в сборнике 8 датчика уровня 6 подача раствора из реактора 1 прекращается (клапан 15 закрывается, клапан 18 открывается), в сборник 8 начинает поступать вода из системы водоподготовки 3. Когда раствор достигает уровня датчика 5, подача воды в сборник 8 прекращается. Для получения однородности раствор перемешивается мешалкой 9. Необходимая доза раствора отмеривается в

дозаторе-мернике 12. При открывании клапана 10 раствор заполняет мерник до уровня, определяемого установкой датчика уровня 11, после чего клапан 10 закрывается. Раствор в оборудование подается с помощью распределительного устройства 14. Датчики уровня 7 и 22 дают информацию об опорожнении емкостей 8 и 12. Регулятор уровня LC1 управляет уровнем в реакторе 1, командный аппарат KS1 переключает клапаны 15 и 18; управление расходом

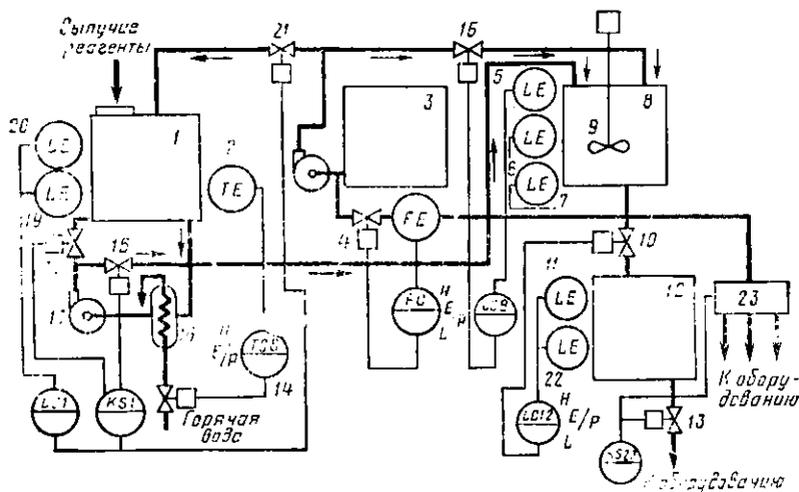


Рис. 10.10

воды в распределительное устройство 23 осуществляется локальной системой регулирования расхода, состоящей из нормальной диафрагмы FE, регулятора FC и пневматического клапана 4. Подачей воды в сборнике 8 управляет локальная система регулирования уровня, состоящая из датчика уровня 5, регулятора уровня LC8, пневматического клапана 16. Управление уровнем в дозаторе 12 осуществляется с помощью локальной системы регулирования уровня, состоящей из датчика 11, регулятора уровня LC12 и пневматического клапана 10. Работой распределительного устройства 23 и клапана 13 управляет командный аппарат KS23. Данная схема АХС и ее варианты пригодны к включению в АСУ ТП кожзаводов.

Технология выработки кож связана с расходом большого количества воды, температура которой в зависимости от процесса составляет 18—60° С. Известно, что расход воды на основной технологический процесс составляет 60—80 м³ на 1 т сырья, считая на массу сырья. При этом расход воды на разных заводах колеблется в широких пределах. На большинстве кожевенных заводов еще отсутствуют специальные установки, отмеривающие заданный объем воды требуемой температуры. Это приводит к потерям воды и нарушениям технологии. Приготовление воды заданных характе-

ристик и автоматическая подача ее в технологическое оборудование позволят сократить нежелательные простои и тем самым повысить производительность труда, снизить энергетические потери, повысить качество продукции.

Водой требуемой температуры производственные цеха могут снабжаться централизованно и децентрализованно. В первом случае применяется несколько установок, каждая из которых снабжает потребителей водой только одной определенной температуры, во втором — каждый аппарат или группа аппаратов имеют индивиду-

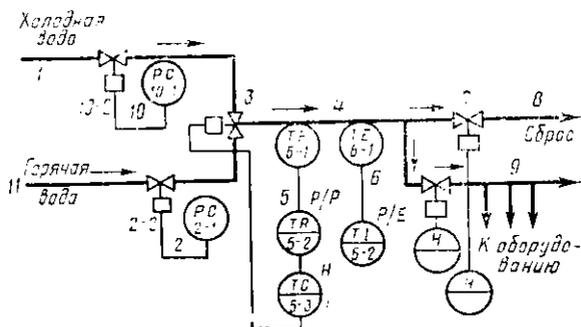


Рис. 10.11

альную водоподготовительную установку, которая обеспечивает подачу воды заданной температуры. Вода готовится как в емкостях, так и непосредственно в трубопроводах. Автоматические установки для приготовления воды в емкостях просты по конструкции, удобны в эксплуатации, достаточно надежны, однако требуют использования значительных производственных площадей и не позволяют достичь высокой производительности, поэтому как в нашей стране, так и за рубежом, с успехом применяются установки, в которых приготовление воды заданной температуры производится путем смешивания горячей и холодной воды непосредственно в трубопроводе.

Функциональная схема автоматизации одного из вариантов такой системы водоподготовки приведена на рис. 10.11. Система состоит из трубопроводов горячей 11 и холодной 1 воды, регуляторов давления холодной 2 и горячей 10 воды, трехходового смешительного клапана 3, позиционной системы регулирования температуры смеси 5, трубопровода смеси 4, системы блокирования 6, трубопроводов сброса 8 и подачи воды потребителям 9. Система терморегулирования устанавливает положение трехходового смешительного клапана 3 таким образом, чтобы температура воды в трубопроводе смеси была равна заданной. В случае если температура воды отклоняется от заданной на величину больше допускаемой ошибки, система блокировки предотвращает ее подачу к потребителям и от-

хрывает клапан сброса воды 7 в резервуар системы оборотного водоснабжения.

По сравнению с устройствами приготовления воды заданной температуры в емкостях описанная система обладает большей гибкостью и быстродействием. Использование регуляторов давления холодной и горячей воды позволило практически исключить колебания температуры воды на выходе, которые наблюдались в ранее применявшихся устройствах без таких регуляторов.

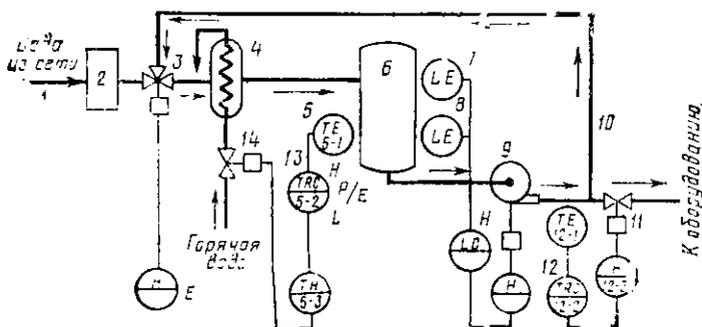


Рис. 10.12

Эта система водоподготовки позволяет получить воду требуемой температуры, но не управляет ее расходом. Кроме того, неизбежны дополнительные затраты энергии на перекачивание воды, так как в случае отклонения ее температуры от заданной, например вследствие остывания при длительных перерывах в подачах, вода сбрасывается в резервуар системы оборотного водоснабжения.

В ряде случаев жесткость воды превышает установленные на производстве нормативы, что отрицательно сказывается на качестве кож. Поэтому была разработана установка [3] УВПУ-34М, предназначенная для приготовления воды заданной температуры с одновременным умягчением жесткой воды, исключая сброс воды. Функциональная схема установки показана на рис. 10.12. Установка работает следующим образом: холодная вода из водопроводной сети по трубопроводу 1 поступает в натрий-катионитовый фильтр 2, умягчается и через рециркуляционный клапан 3 поступает в теплообменник 4. Клапан 3 может занимать два положения: I — в теплообменник подается вода из фильтра, рециркуляционная линия перекрыта; II — в теплообменник подается вода из рециркуляционной линии, линия из фильтра перекрыта. Из теплообменника вода подается в гидроаккумулятор 6. Температура воды в гидроаккумуляторе измеряется термометром 5, регулируется позиционным регулятором 12, управляющим клапаном 14 подачи горячей воды или пара в теплообменник. Уровень воды в гидроаккумуляторе контролируется датчиками уровня 7 и 8. При достижении водой верхнего уровня датчик верхнего уровня 7 переводит рециркуляционный клапан в

положение II, прекращая тем самым приток воды из водопровода. Вода подается из гидроаккумулятора 6 насосом 9 к оборудованию, вследствие чего уровень воды в гидроаккумуляторе понижается и при достижении водой нижнего уровня датчик нижнего уровня 8 отключает насос 9 и переводит рециркуляционный клапан в положение I, при этом вновь гидроаккумулятор 6 заполняется умягченной водой из сети. Позиционный регулятор температуры 12 открывает клапан подачи воды 11 в оборудование только при достижении водой заданной температуры. При выходе температуры воды из заданных пределов клапан 11 закрывается, препятствуя тем самым подаче воды в оборудование. В этом случае вода рециркулирует в системе через обводную рециркуляционную линию 10 — рециркуляционный клапан 3 — теплообменник 4 — гидроаккумулятор 6 до тех пор, пока температура воды не достигнет заданной. За счет применения обводной рециркуляционной линии 10 исключается сброс воды — недостаток, свойственный системе рис. 10.11.

§ 10.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВУ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ

Нанесение полимерного покрытия на рулонную основу из раствора (расплава) полимера является одним из важнейших технологических процессов в производстве искусственных кож. Покрытие наносится на специальных наносных устройствах различной конструкции — ракельных, валковых и др. Здесь в качестве примера объекта автоматизации рассматривается ракельное наносное устройство на валковой опоре (рис. 10.13).

Выходная переменная этого объекта — толщина покрытия $Y(l)$ в миллиметрах по длине рулона l . При постоянной скорости движения основы v можно перейти от длины l к времени t , т. е. вместо $Y(l)$ ввести $Y(t)$. Тогда оценку неравномерности толщины покрытия определим в виде выборочного среднего квадратичного отклонения $S(Y)$ (см. § 2.1):

$$S(Y) = \left\{ \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} [Y(t) - \bar{Y}]^2 dt \right\}^{1/2}, \quad (10.5)$$

где t_n — интервал наблюдения (время регистрации) $Y(t)$; $Y(t)$ — текущее значение Y ; \bar{Y} — среднее значение Y на интервале t_n ;

$$\bar{Y} = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} Y_i(t) dt. \quad (10.5a)$$

При дискретных измерениях Y_i с шагом дискретности Δt получим для $S(Y)$:

$$S(Y) = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [Y_i - \bar{Y}]^2 \right\}^{1/2}, \quad (10.6)$$

где

$$N = t_H / (\Delta t), \quad \bar{Y} = (1/N) \sum_{i=1}^N Y_i. \quad (10.6a)$$

Целью рассматриваемого процесса является получение покрытия со средним значением толщины \bar{Y} , равным заданному значению

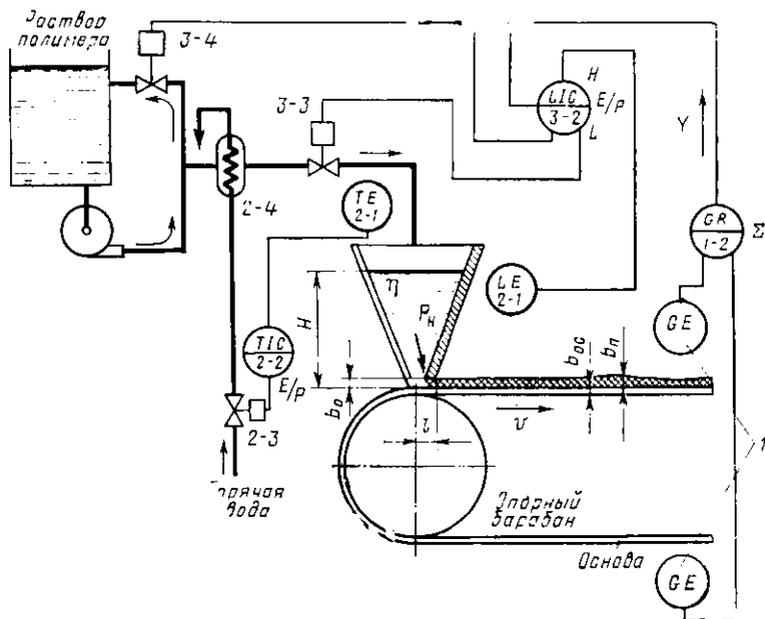


Рис. 10.13

$Y_{\text{зад}}$, и минимальным значением $S(Y)$, т. е. условие оптимальности процесса запишется в виде

$$\bar{Y} \rightarrow Y_{\text{зад}}, \quad (10.7)$$

$$S(Y) \rightarrow \min. \quad (10.8)$$

Для разработки системы автоматического управления необходима модель объекта. В гл. 2 были изложены в примерах некоторые результаты исследований данного объекта с целью разработки его модели. В § 2.3 определены шаг дискретности $\Delta t = 10$ с и интервал наблюдения $t_H = 41$ мин для разработки статической модели объекта. В § 2.4 найдена статическая модель (в виде регрессионного уравнения), связывающая входные воздействия X — толщину основы с выходной переменной Y — толщиной покрытия. Однако для построения системы автоматического управления такая модель мало пригодна, так как толщина основы не является управляемым входным воздействием.

В работе [5] проведено исследование данного объекта с целью получения модели, пригодной для использования в системе автоматического управления.

Ниже названы входные воздействия X_i , учитываемые в модели, с указанием диапазона их изменения от X_{\min} до X_{\max} (см. рис. 10.3).

Зазор между кромкой ракли и основной (b_0)	$X_1 = (0,9 \div 1,7)$ мм
Скорость движения (v)	$X_2 = (0,8 \div 4,0)$ м/мин
Эффективная вязкость раствора полимера (η)	$X_3 = (2 \div 10)$ Па·с
Удельное давление раствора полимера (P_n)	$X_4 = (200 \div 800)$ Па

В результате проведенного активного эксперимента была получена статическая модель объекта в виде

$$\bar{Y}_m = 1,128 + 0,254x_1 - 0,205x_2 - 0,079x_3 + 0,147x_4 - 0,041x_1x_2 - 0,04x_1x_4 + 0,038x_2x_3 - 0,042x_2x_4 + 0,042x_1^2 + 0,052x_2^2, \quad (10.9)$$

где все $x_{i,j}$ — входные воздействия в стандартизованном безразмерном виде (в отличие от X_i ; — размерных величин).

Модель (10.9) содержит эффекты взаимодействия (слагаемые x_i и квадратичные слагаемые), т. е. она нелинейна относительно входных воздействий.

Входное воздействие $X_1(t)$ связано с толщиной основы $b_{oc}(t)$:

$$X_1(t) = b_0 - b_{oc}(t), \quad (10.10)$$

где b_0 — зазор между кромкой ракли и поверхностью опорного валика (см. рис. 10.4), $b_0 = \text{const}$.

Удельное давление $X_4(t)$ связано функционально с уровнем H раствора полимера в емкости (см. рис. 10.13) согласно формуле

$$X_4 = P_n = H\rho g, \quad (10.11)$$

где ρ — плотность раствора полимера, $\rho = \text{const}$; g — ускорение силы тяжести.

Управление уровнем H осуществляется регулированием расхода полимера, подаваемого в емкость; система регулирования расхода описана ниже. Анализ данного процесса позволил получить оценку аналитической модели в виде (для ньютоновской жидкости) [5]:

$$(\bar{Y}_m)_1 = (b_0 - b_{oc})/2 + (b_0 - b_{oc})^3 \bar{P}_n(H) / (12l\bar{v}\bar{\eta}), \quad (10.12)$$

где l — условная длина кромки ракли, м; v в м/с; b_0, b_{oc} в мм; $\bar{\eta}$ в Па·с; $\bar{P}_n(H)$ в Па.

При переводе в обозначения, примененные выше для X_1 — X_4 , получим модель (10.12) в виде

$$(\bar{Y}_m)_1 = 0,5\bar{X}_1 + \frac{(\bar{X}_1)^3}{12l\bar{X}_2\bar{X}_3} \bar{X}_4(H). \quad (10.13)$$

Экспериментальная проверка [6] показала, что аналитическая модель типа (10.13) в целом соответствует объекту, но ошибка $\varepsilon = (\bar{Y}_m)_1 - (Y_{об})_1$ больше, чем для модели (10.9).

Наиболее целесообразно построение системы автоматического управления данным объектом по следующему принципу: воздействия X_2 , X_3 должны стабилизироваться путем применения локальных АСР; в этом случае основным возмущением будет изменение $b_{oc}(t)$, т. е. изменение x_1 в модели (10.9).

Для выполнения условия оптимальности процесса необходимо управлением уровня H раствора полимера (т. е. X_4) согласно (10.11) и модели (10.9) корректировать процесс. Опыт эксплуатации подобных устройств показал, что величина b_0 должна быть в ходе процесса постоянной, так как изменение b_0 приводит к увеличению $S(Y)$, т. е. к увеличению неравномерности покрытия. Функциональная схема одного из вариантов систем автоматизации данного объекта приведена на рис. 10.13.

Информация о текущем значении толщины покрытия Y поступает с радионизотопного толщиномера I через сумматор GR на управляющее устройство LIC . Вязкость η полимера стабилизируется за счет применения локальной АСР, стабилизирующей температуру раствора полимера (датчик TE , регулятор TIC , клапан 2—3, теплообменник 2—4).

Текущее значение уровня $H(t)$ измеряется уровнемером LE , информация о величине $H(t)$ передается на управляющее устройство LIC , где сравнивается с заданным $H_{зад}$. Если условие (10.7) осуществляется, то LIC поддерживает уровень $H(t)$ постоянным: $H = H_{зад} = \text{const}$, т. е. получаем локальную стабилизирующую АСР. Если толщиномер I отметит отклонение средней толщины покрытия \bar{Y} от величины $Y_{зад}$ сверх допускаемой ошибки, то управляющее устройство LIC изменяет значение уровня $H_{зад}$ в емкости до тех пор, пока вновь не будет выполняться условие (10.7), т. е. в этом случае получаем следящую АСР. Управление уровнем осуществляется за счет изменения расхода полимера посредством клапанов 3—4, 3—3.

Особенностью рассматриваемой системы управления является то, что фактически управляемой величиной (выходной переменной) объекта должно быть не мгновенное значение толщины покрытия $Y(t)$, а средняя толщина \bar{Y} , рассчитываемая непрерывно или (чаще) дискретно согласно (10.5а) или (10.6а) на определенном интервале $[0, t_n]$. Величина интервала $[0, t_n]$ определяется согласно § 2.3.

Выполнение одного условия (10.7) недостаточно. Чтобы процесс был оптимальным, необходимо еще выполнение условия (10.8).

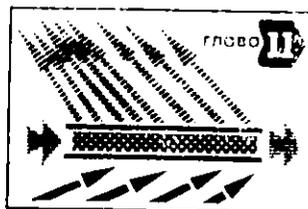
Исследования показали, что для каждого типа основы и полимера имеются также множества значений X_j , которые обеспечивают для каждого конкретного их сочетания выполнение условия (10.8). Следовательно, для реализации оптимальной системы управления в управляющем устройстве должно быть вычислительное устройство (ВУ), рассчитывающее \bar{Y} и $S(Y)$ по текущим мгновенным значениям $Y(t)$ с последующей проверкой условий (10.7) и (10.8). Если эти условия не выполняются, то в соответствии с моделью (10.9) посредством изменения $H(t)$ добиваются осуществления условия (10.7). Затем в соответствии с заданным алгоритмом оптимизации меняют в относительно небольших пределах воздействия X_1 и X_3 .

Вычислительное устройство при этом проверяет условия (10.7) и (10.8). При достижении условий (10.7), (10.8) система управления стабилизирует все X_j около найденных оптимальных значений.

Поскольку в качестве выходной переменной фактически выступает среднее значение \bar{Y} , рассчитываемое за интервал $[0, t_n]$, то в качестве входных воздействий также следует использовать средние величины \bar{X}_j , рассчитываемые по тому же значению интервала $[0, t_n]$. В связи с достаточно высоким быстродействием объекта (переходные процессы по различным каналам X_j длятся от 2 до 38 с) на первом этапе статическая модель вида (10.9) вполне достаточна для расчета системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химия и технология кожи и меха/ Под ред. И. П. Страхова. М., 1979.
2. *Видревич Л. Л., Афонская Н. С., Черняк Л. Б.* Моделирование процесса дубления кож с целью его оптимизации.— Кожевенно-обувная промышленность, 1977, № 3.
3. Автоматизация жидкостных процессов кожевенной промышленности: Обзорная информация, кожевенная промышленность. М., ЦНИИТЭИлеглопром, 1979, вып. 1.
4. Эксплуатация автоматических устройств в легкой промышленности/ Кипнис А. Б., Стороженко Ю. И., Айзенберг Л. Т., Мамедов-Браз А. И. М., 1975.
5. *Кочеров А. В.* Автоматический контроль толщины покрытий рулонной искусственной кожи на тканевой основе. Автореферат канд. техн. наук/ Моск. тех. ин-т легкой промышленности. М., 1967.
6. *Полтаев В. Ф., Евдокимов В. В.* Применение метода математического планирования эксперимента в производстве искусственной кожи.— Изв. вузов. Технология легкой промышленности, 1972, № 3.



АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ

Процесс сушки играет значительную роль в технологии получения многих видов продукции легкой промышленности. Сущность сушки заключается в удалении избыточной влаги из гигроскопического материала. Режим сушки влияет на качество продукции и определяет производительность сушильного оборудования. Сушка требует большой затраты тепловой энергии на удаление влаги, поэтому показатель экономичности сушки имеет важное значение.

Основной и самый распространенный способ сушки материалов легкой промышленности — воздушно-конвективный. Другим, более производительным способом сушки является конвективно-контактный. Дальнейшее повышение интенсивности сушки достигается при-

менением вакуум-контактного способа и с помощью инфракрасных лучей. В конструкциях промышленных сушильных установок учитывают специфические особенности обрабатываемого материала (например, большие размеры и сложную конфигурацию кож, низкую скорость миграции влаги из внутренних слоев кожи к наружным при большой ее толщине и др.), а также технологические требования. Наибольший эффект достигается при автоматизации сушильных установок непрерывного действия. В связи с тем что конструкции сушильного оборудования весьма разнообразны, а вопросы автоматизации установок воздушно-конвективной сушки являются общими для сушильных установок с другими способами сушки, ограничимся рассмотрением построения автоматической системы контроля и регулирования камеры воздушно-конвективной сушки непрерывного действия.

§ 11.1. АНАЛИЗ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

Исходными данными для обоснования выбора схемы автоматизации сушильной установки являются характеристики технологического процесса и виды основных возмущающих воздействий. Собственно процесс сушки осуществляется в сушильной камере. Режим сушки задается на основе технологических требований с учетом параметров и коэффициентов массопереноса высушиваемого материала. Управляющие воздействия и необходимые соотношения параметров динамической модели управляемого процесса выясняются с учетом механизма сушки.

Общие сведения о сушке. При конвективной сушке подвод тепла влажному материалу и удаление влаги осуществляются нагретым воздухом (при конвективно-контактной сушке материал нагревается путем соединения с нагретой металлической поверхностью с одной стороны, а влага удаляется с другой стороны). Рассмотрим кратко основные понятия теории сушки [1].

Статика сушки. В состоянии равновесия удельного влагосодержания материала с влагой окружающего воздуха температура поверхности материала θ_m равна температуре воздуха θ , а давление водяного пара (или другой испаряемой жидкости) в материале P_m равно парциальному давлению пара в воздухе P_n (молекулярное равновесие). Влагосодержание материала u определяется количеством влаги, приходящимся на единицу массы сухого материала [другой параметр — влажность ω определяется количеством влаги, приходящимся на единицу массы влажного материала, $\omega = u/(1+u)$].

Равновесное влагосодержание материала u_p зависит от температуры θ , влажности окружающего воздуха и способа достижения равновесия [2]. Если равновесие устанавливается в процессе сушки (десорбции), то зависимость между влагосодержанием u_p и давлением пара в материале P_m при постоянной температуре θ пред-

ставляют графиком, называемым изотермой десорбции. Учитывая, что при этом выполняются соотношения $P_{\Pi} = P_M$ и

$$P_{\Pi} \approx \varphi P_{\Pi} \quad (11.1)$$

где φ — относительная влажность воздуха; P_{Π} — давление насыщенного пара при данной температуре θ и заданном барометрическом давлении P_b , изотерму десорбции рассматривают в виде зависимости $u_r(\varphi)$. Изотерма сорбции получается путем достижения равновесия в результате поглощения материалом влаги из окружающего воздуха, т. е. в процессе увлажнения (сорбции). Обычно изотермы сорбции и десорбции не совпадают, как показано на рис. 11.1, так как связь влаги с материалом носит различный характер, изменяющийся в зависимости от состояния материала и параметров окружающей среды.

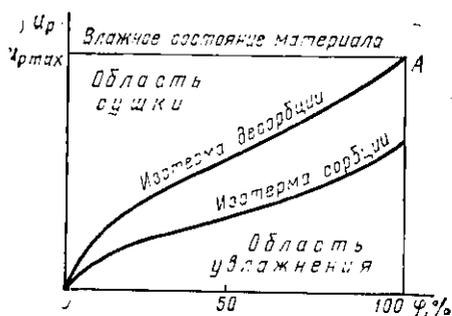


Рис. 11.1

Поверхностная и заполняющая крупные капилляры материала влага наиболее прочно связана с материалом (механическая связь). Влага, поглощаемая поверхностью мелких капилляров (адсорбционная влага) или проникающая вследствие диффузии внутрь клеток материала (структурная и осмотически связанная влага), более прочно связана с материалом. Влага, химически связанная с материалом (гидратная или кристаллизационная), в процессе сушки обычно не удаляется.

Точке А (рис. 11.1) соответствует полное насыщение среды влагой, когда при данной температуре θ имеем равенство $P_{\Pi} = P_M = P_{\Pi}$. Если $u_r > u_{r \max}$, то материал находится во влажном состоянии, при котором пары влаги над его поверхностью насыщены ($P_M = P_{\Pi}$). При $P_M < P_{\Pi}$ материал находится в гигроскопическом состоянии и может либо высушиваться (область сушки), либо поглощать влагу из окружающей среды (область увлажнения).

Кинетика сушки позволяет оценить процесс сушки по усредненным параметрам, характеризующим удаление влаги из материала и определяемым, например, путем взвешивания образцов материала в начале сушки и далее по мере удаления влаги при заданных режимных условиях. По полученным данным кинетика сушки представляется графической зависимостью среднего влагосодержания n от продолжительности сушки, называемой «кривой сушки» и показанной на рис. 11.2. Основным периодом сушки предшествует стадия прогрева материала до температуры сушки. На рис. 11.2 исходное значение влагосодержания материала обозначено $u_{\Pi 0}$, а начальное значение после прогрева материала — u_{Π} .

На графике зависимости $u(t)$ различают два основных периода сушки: период постоянной скорости, когда испарение происходит со

свободной поверхности жидкости (температура поверхности материала равна температуре мокрого термометра $\theta_{м.т.}$), и период падающей скорости, когда интенсивность испарения определяется внутренней диффузией, т. е. перемещением влаги изнутри материала к его поверхности (температура поверхности материала повышается до температуры окружающего воздуха). Граница перехода с одного периода на другой отмечена на графике $u(t)$ критической

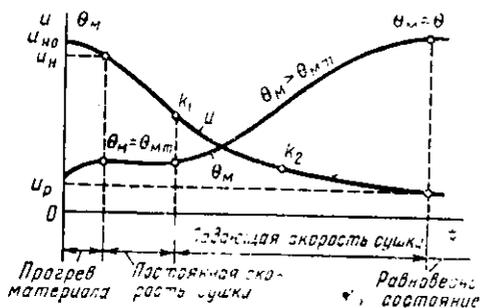


Рис. 11.2

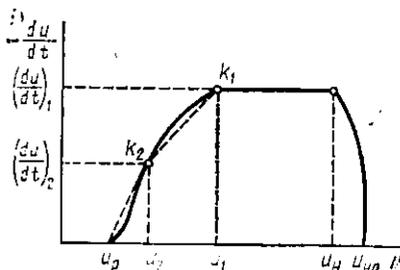


Рис. 11.3

точкой k_1 . Этой точке на графике $\theta_m(t)$ соответствует увеличение температуры материала выше значения температуры мокрого термометра $\theta_{м.т.}$. Период падающей скорости может содержать участки, разделенные критическими точками, которые выбирают из условия упрощающих аппроксимаций рассматриваемых далее зависимостей параметров. Точка k_2 соответствует разделению периода падающей скорости на две зоны.

По графику «кривой сушки» получают график «кривой скорости сушки» (рис. 11.3), отражающей зависимость $du/dt=f(u)$. Аппроксимируя график периода падающей скорости двумя отрезками прямых (двухзонный метод) с параметрами критического влагосодержания $u=u_1$, $du/dt=(du/dt)_1$ и $u=u_2$, $du/dt=(du/dt)_2$, определяем интервалы времени сушки t^* без учета стадии прогрева следующим образом:

из уравнения $u=u_{н}-(du/dt)_1 t^*$ при $u_1 \leq u(t) \leq u_{н}$

$$t^* = \frac{u_{н} - u}{(du/dt)_1}; \quad (11.2)$$

из уравнения

$$u = \frac{(u_1 - u_2)(du/dt)_1 e^{-\frac{(du/dt)_1 - (du/dt)_2}{u_1 - u_2} t^*} + u_2(du/dt)_1 - u_1(du/dt)_2}{(du/dt)_1 - (du/dt)_2}$$

при $u_2 \leq u(t) < u_1$

$$t^* = \frac{u_1 - u_2}{(du/dt)_1 - (du/dt)_2} \times \ln \frac{(du/dt)_1 (u_1 - u_2)}{(du/dt)_2 u_1 - (du/dt)_1 u_2 + [(du/dt)_1 - (du/dt)_2] u}; \quad (11.3)$$

из уравнения

$$u = (u_2 - u_p) e^{-\frac{(du/dt)_2}{u_2 - u_p} t^*} + u_p \quad \text{при } u_p < u(t) < u_2$$

$$t^* = \frac{u_2 - u_p}{(du/dt)_2} \ln \frac{u_2 - u_p}{u - u_p}, \quad (11.4)$$

где t^* — продолжительность сушки на каждом рассматриваемом интервале.

Продолжительность сушки с изменением влагосодержания от начального значения u_n до $u_k < u_2$ определяется по формуле

$$t_c = t_1 + t_2 + t_3. \quad (11.5)$$

с учетом выражений (11.2) при $u = u_1$, $t^* = t_1$, (11.3) при $u = u_2$, $t = t_2$ и (11.4) при $u = u_k$, $t = t_3$, где u_k — конечное влагосодержание на последнем интервале периода падающей скорости сушки (полагаем, что при $u = u_k$ сушка завершается). По (11.5) выясняется зависимость $u_k(t_c)$ с учетом свойств массопереноса во влажном материале, изменяющихся в процессе сушки.

Динамика сушки заключается в изменении распределения влагосодержания u и температуры θ_m внутри материала в процессе сушки. Миграция влаги внутри материала при сушке сопровождается двумя основными элементарными процессами: теплообменом и массообменом. Взаимовлияние этих процессов рассматривают обычно в линейных соотношениях изменения координат, справедливых для малых отклонений температуры θ_m и влагосодержания u от исходных значений. Нестационарный процесс теплопередачи и влагопереноса при сушке листового материала, представляемого условно в виде неограниченной пластины (одномерная задача) с распределением температуры θ_m и влагосодержания u по толщине материала с координатой x , описывается дифференциальными уравнениями [1]:

$$c \rho_0 \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta_m}{\partial x} \right) - r_0 \zeta \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t}; \quad (11.6)$$

$$g = \rho_0 a_m \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_0 a_0 \frac{\partial \theta_m}{\partial x} + D \rho_0 \frac{\partial P_{II}}{\partial x}, \quad (11.7)$$

где c , ρ_0 — удельная теплоемкость и плотность сухого материала соответственно; λ — коэффициент теплопроводности; g — удельный поток влаги внутри материала; r_0 — удельная теплота, расходуемая на испарение влаги ($r_0 = 2500$ кДж/кг); ζ — коэффициент внутреннего испарения, характеризующий относительное изменение влагосодержания за счет испарения по отношению к общему изменению влагосодержания в данной точке (коэффициент ζ изменяется от 0 до 1, $\zeta = 0$ при изменении влагосодержания только за счет переноса влаги, $\zeta = 1$ при изменении влагосодержания только за счет испарения); a_m — коэффициент диффузии влаги ($\lambda_m = a_m \rho_0$ — коэффициент массопроводности); a_0 — коэффициент термодиффузии влаги; D — коэффициент молярного переноса пара; $\partial P_{II}/\partial x$ — градиент избыточного давления P_{II} .

Обычно при $\theta_m < 100^\circ \text{C}$ имеем $\partial P_{II}/\partial x = 0$. При $\theta_m > 100^\circ \text{C}$ в уравнении (11.7) слагаемое с коэффициентом D аналогично слагаемому

с коэффициентом a_m . При двусторонней воздушно-конвективной сушке в середине по толщине материала имеем $x=0$. Испарение влаги с поверхности материала создает градиент влагосодержания, способствующий перемещению влаги из внутренних слоев к наружным. Образование температурного градиента внутри материала противодействует переносу влаги к поверхности испарения.

Решение уравнений (11.6) и (11.7) находят для определенных граничных и начальных условий [1]. Коэффициенты влагопереноса a_m , a_0 и термодинамические параметры λ , c , ξ зависят от влагосодержания u и температуры θ_m , т. е. линеаризация уравнений (11.6) и (11.7) применяется при небольших интервалах изменения Δu и $\Delta \theta_m$.

В период постоянной скорости влага в материале перемещается в виде жидкости ($\xi=0$), а температура в любой точке материала одинакова и равна температуре мокрого термометра θ_{MT} , определяемой по формуле

$$\theta_{MT} = \theta - r_0 g / \alpha, \quad (11.8)$$

где θ — температура воздуха; α — коэффициент конвективного теплообмена; g — удельный поток испаряемой влаги, определяемый по формуле $g = \rho_0 R_V (du/dt)_1$; R_V — отношение объема материала к площади его поверхности.

Формула (11.8) получается из уравнения баланса теплоты: количество теплоты, подведенное к материалу конвективным обменом $\alpha(\theta - \theta_{MT})$, равно теплоте, затраченной на испарение влаги в единицу времени. Интенсивность сушки в этот период определяется температурой θ и коэффициентом α .

В период падающей скорости в результате углубления поверхности испарения теплота к месту образования пара подводится путем теплопроводности через слой сухого материала ($\xi > 0$), а для описания влагообмена между поверхностью материала и окружающей средой можно использовать формулу

$$g = \beta \rho_0 (u_n - u_p), \quad (11.9)$$

где β — коэффициент влагообмена, м/с; u_n — влагосодержание поверхностного слоя материала.

Величина коэффициента β зависит от температуры θ и влагосодержания u_n . Влагообмен возрастает с повышением температуры θ , при этом значение коэффициента a_m также увеличивается.

Целенаправленно выбирая режим сушки с учетом динамики процесса, можно сокращать продолжительность t_c , однако чрезмерная интенсификация процесса сушки сопровождается неравномерной усадкой материала и появлением внутреннего объемно-напряженного состояния, что может быть причиной образования трещин и порчи материала. Поэтому необходимо соблюдать технологические ограничения на проведение процесса сушки, а поддержание режимных условий получения наилучших показателей производительности и экономичности сушильной камеры достигается путем применения автоматических устройств в системе управления сушильной установкой.

Конструкция сушильной камеры. Промышленные сушильные установки или агрегаты представляют собой сложные объекты автоматизации, объединяющие в своей конструкции устройства и механизмы, предназначенные для выполнения различных технологических процессов, в число которых кроме сушки могут входить: нанесение покрытия на листовый или рулонный материал (основу) и

дублирование, жидкостная обработка и отжим, разматывание и наматывание рулонного материала. С целью упрощения изложения рассмотрим отдельно сушильную камеру как объект автоматизации. Конструктивное исполнение ее с учетом принципиальных особенностей, характерных для многих типов машин легкой промышленности, показано на рис. 11.4. Стены и потолок камеры собраны из теплоизоляционных элементов, укрепленных на каркасе корпуса. Внутри камеры размещены составные части объекта: устройство перемещения материала (транспорт), рециркуляционная система с элементами для соплового обдува материала горячим воздухом, блок парового calorифера для подогрева воздуха в системе рециркуляции (K — канал для слива конденсата). Влажный воздух удаляется из сушильного пространства вентилятором, совмещенным с отводным воздуховодом.

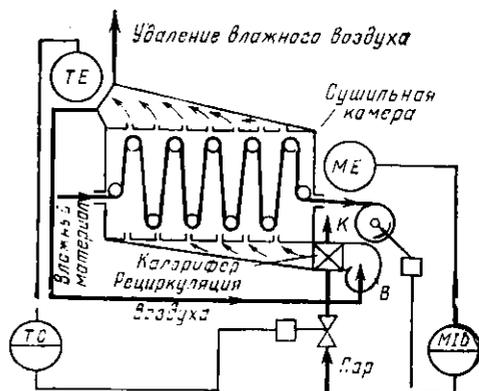


Рис. 11.4

Рециркуляционная вентиляционная система оказывает решающее влияние на распределение температуры θ и относительной влажности ϕ воздуха в сушильном пространстве, в значительной мере выравнивает температурное поле по ширине и по длине камеры, создает условия эффективной теплоотдачи блока подогрева воздуха и обеспечивает малую величину транспортного запаздывания передачи возмущающих и управляющих воздействий через воздушную среду на материал и датчики контролируемых величин θ и ϕ .

Конструкция устройства перемещения материала соответствует виду высушиваемого материала. Рулонный материал перемещается по направляющим элементам перематывающим механизмом, дискретно-штучный материал укрепляется на транспортере с помощью рам либо зажимных элементов.

Средства контроля сушки. Средства контроля сушки обеспечивают наблюдение за ходом выполнения технологического процесса, получение сигналов для формирования управляющего воздействия, определение показателей качества и экономичности. Проектирование системы управления процессом сушки начинается, как правило, с анализа технических средств автоматического контроля, с рассмотрения обеспеченности автоматических систем необходимыми датчиками и измерительными преобразователями.

Основными контролируемыми величинами являются: температура и относительная влажность воздуха в сушильном пространстве, определяющие режим сушки; конечное влагосодержание материала, характеризующее качество сушки; скорость перемещения

материала, указывающая на производительность установки; начальное влагосодержание материала и параметры теплоносителя, позволяющие оценить возмущающие воздействия. К числу технических вопросов, которые приходится решать инженеру, относятся: выбор места расположения датчиков температуры и относительной влажности воздуха в сушильном пространстве, разработка специальных датчиков влагосодержания материала, получение и использование сигналов возмущающих воздействий. Так, например, с целью усреднения распределенной величины температуры воздуха датчик располагают вблизи отводного трубопровода вытяжной вентиляционной системы. Целесообразный метод измерения и конструкция датчика влагосодержания материала определяются особенностями характеристик этого материала и условиями работы датчика в конкретной производственной машине. Получение сигналов главных возмущающих воздействий позволяет применить средства автоматической компенсации этих возмущений.

§ 11.2. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

Важной принципиальной особенностью статических характеристик сушильной камеры является необходимость учета большого количества величин, относящихся как к режиму сушки, так и к параметрам материала. Эти величины определяются для стационарных процессов нагревания воздуха, собственно сушки и перемещения материала. Динамические характеристики по той или иной выходной величине выясняются из рассмотрения общей структурной схемы динамической модели объекта регулирования.

Основные статические зависимости сушильной камеры. Статические характеристики сушильной камеры основываются на уравнениях теплового и материального балансов, записываемых для установившихся состояний в виде

$$Q_k = rG_n + Lc_n(\theta - \theta_n) + \sum_{v=1}^n S_v k_v (\theta_v - \theta_n); \quad (11.10)$$

$$G_n = L(d - d_n) = (u_n - u_k) \nu m, \quad (11.11)$$

где Q_k — расход энергии на подогрев воздуха в блоке калорифера, кВт; G_n — поток влаги, выделяемый при сушке и удаляемый с воздухом через воздухопровод вытяжного вентилятора, кг/с; L — расход сухого воздуха, поступающего из цеха в сушильную камеру, кг/с; ν — скорость движения транспортера с материалом, м/с; m — масса сухого материала, приходящаяся на единицу длины транспортера, кг/м; u_n и u_k — начальное и конечное влагосодержание материала, кг влаги/кг сухого материала соответственно; r — рассматриваемое ниже среднее значение удельной теплоты испарения влаги с поверхности материала, кДж/кг влаги, $r > r_0$; S_v , k_v , θ_v — площадь поверхности теплопередачи через элемент ограждения камеры с номером v в окружающий воздух и соответствующие этому элементу

коэффициент теплопередачи и температура воздуха внутри камеры; θ и d — усредненные температура и влагосодержание воздуха, удаляемого из камеры; $\theta_{и}$, $d_{и}$, $c_{и}$ — соответственно температура, влагосодержание и удельная теплоемкость воздуха, поступающего в камеру из цеха.

В выражении (11.10) расход теплоты на нагрев материала не учитывается.

В небольшом диапазоне отклонений температур θ и $\theta_{и}$ можно приближенно записать:

$$\sum_{v=1}^n S_v k_v (\theta_v - \theta_{и}) = S_0 k_{ср} (\theta - \theta_{и}), \quad (11.12)$$

где $S_0 = \sum_{v=1}^n S_v$ — полная площадь поверхности теплопередачи из камеры в окружающую среду; $k_{ср}$ — усредненный коэффициент теплопередачи через ограждения камеры, и заменить соответствующее слагаемое в выражении (11.10) по соотношению (11.12).

Удельная теплоемкость воздуха, поступающего в сушильную камеру из цеха [3]:

$$c_{и} = c_{и0} + A_d d_{и}, \quad (11.13)$$

где $c_{и0}$ — средняя удельная теплоемкость сухого воздуха [для температур в интервале 0—100°С принимают $c_{и0} = 1,005$ кДж/(кг·°С); $A_d = 1,8068$ кДж/(кг·°С) — средняя удельная теплоемкость водяного пара; $d_{и}$ — влагосодержание воздуха в цехе, кг влаги/кг сухого воздуха.

Величину r с учетом температуры θ , до которой нагревается пар, определяют по эмпирической формуле

$$r = r_0 + A_d' d. \quad (11.14)$$

Подставляя выражения (11.12), (11.13) и (11.14) в (11.10), получаем статические характеристики в виде

$$G_n = [Q_k + Q_{и} - (c_{и} L + S_0 k_{ср}) \theta] / r, \quad (11.15)$$

где $Q_{и} = (c_{и} L + S_0 k_{ср}) \theta_{и}$ — тепловой поток, поступающий в сушильную камеру с воздухом из цеха.

Принимая неизменными величины $\theta_{и}$, $d_{и}$ и L , аддитивную связь конечного влагосодержания u_k с величинами θ , L , $u_{и}$ удобно представить обобщенной статической характеристикой $G_n(Q_k)$ для некоторого значения $u_{и}$, построенной на семействе графиков $G_n(Q_k)$ для различных постоянных значений температуры θ по (11.15), как показано на рис. 11.5. График обобщенной статической характеристики $G_n(Q_k)$ показан на рис. 11.5 утолщенной линией, которая определяется либо по данным кинетики сушки (см. § 11.1), либо на основании экспериментальных замеров. Каждому значению Q_k соответствует определенная интенсивность сушки и величина G_n , зависящая от характеристик тепло- и влагопереноса мате-

риала и переменных величин: температуры θ и относительной влажности воздуха φ . Таким образом, в обобщенной статической характеристике сушильной камеры учитываются особенности конструкции объекта, в частности распределенность контролируемых величин по длине перемещения материала. Зависимость $u_{ii}(G_{ii})$ раскрывается по (11.11) и записывается в виде $u_{ii} = u_{ii} - G_{ii}/\theta m$. Семейство графиков $G_{ii}(Q_{ii})$ по (11.15) показано на рис. 11.5 тонкими наклонными линиями при $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \dots$

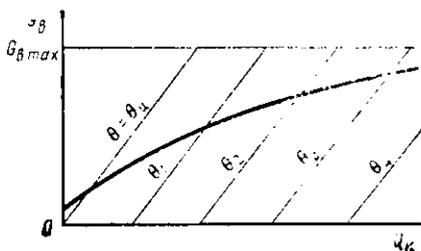


Рис. 11.5

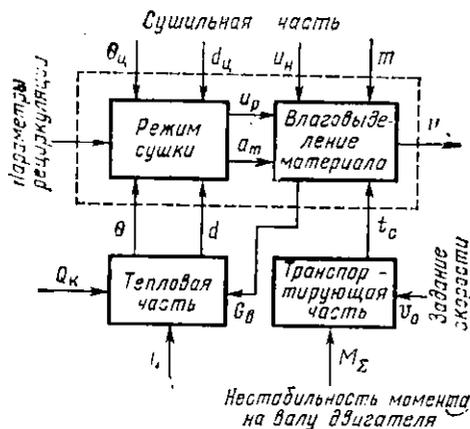


Рис. 11.6

На основе рассмотрения рис. 11.5 можно отметить, что с увеличением интенсивности сушки крутизна обобщенной статической характеристики уменьшается в связи с повышением удельного расхода теплоты на удаление влаги, приближаясь асимптотически к линии предельного влаговыделения $G_{ii \max}$.

Динамическая модель камеры конвективной сушки как объекта регулирования температуры воздуха и конечного влагоудержания материала. На рис. 11.6 показана укрупненная структурная схема модели сушильной камеры. Для изображения связей между элементарными процессами нагревания воздуха и влажного материала, перемещения высушиваемого материала в

рабочей зоне и влаговыделения из него схема разделена на тепловую, транспортирующую и сушильную части.

На основе схемы рис. 11.6 составляется детализированная структурная схема рассматриваемого объекта управления. Эта схема (рис. 11.7) изображена при упрощающем предположении — малой инерционности нагревания влажного материала, влиянием которой на другие процессы пренебрегаем. В тепловой части схемы основное звено 1, отражающее интегральный процесс нагревания без учета потерь теплоты, охвачено двумя параллельными обратными связями через звенья 2 и 3. Звенья 2 и 3 учитывают расход теплоты с удаляемым влажным воздухом и в окружающее пространство через теплоизолирующие ограждения конструкции камеры. Звенья 4—7 определяют взаимосвязь параметров воздуха и материала, ха-

рактически характеризующих режим сушки. Звено 5 учитывает зависимость отклонения влагосодержания воздуха Δd от влаговыделения ΔG_B и начального значения влагосодержания поступающего воздуха Δd_{II} . В звене 6 сигнал Δd преобразуется в сигнал относительной влажности воздуха $\Delta \phi$ с учетом значения температуры θ . Согласно статике сушки относительная влажность воздуха ϕ определяет равновесное влагосодержание материала u_p и его отклонение, что учитыва-

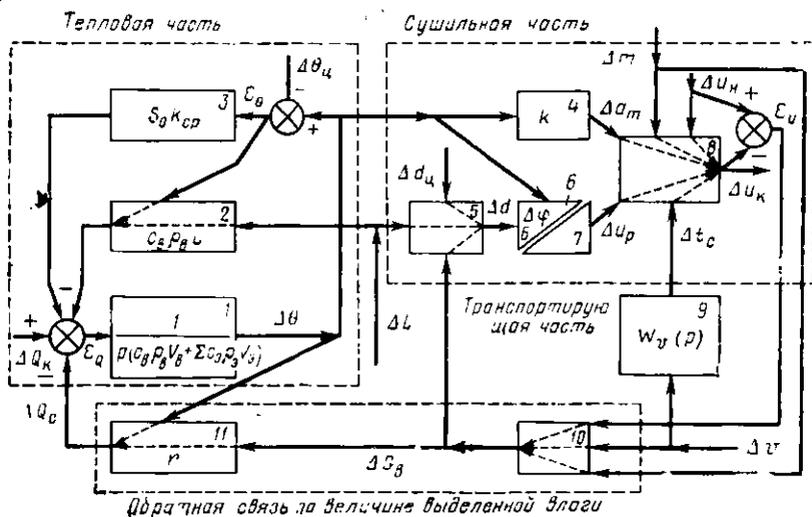


Рис. 11.7

ется в звене 7. Влияние температуры θ на процесс диффузии влаги внутри материала отражено звеном 4. Собственно процесс сушки представлен звеном 8. Звено 9 отражает основной процесс операции транспортирования — преобразование входного сигнала Δv в величину отклонения продолжительности сушки Δt_c . Звенья 10 и 11 описывают свойство принудительной сушки — влияние выделенной влаги на процесс сушки в виде отрицательной обратной связи с воздействием на тепловую и сушильную части. При естественной сушке звенья 10 и 11 отсутствуют.

На рис. 11.7 внешние воздействия на процесс сушки показаны отклонениями теплового потока ΔQ_K , выделяемого калорифером, расхода удаляемого влажного воздуха ΔL , скорости перемещения материала Δv и величин $\Delta \theta_p$, $\Delta \phi_p$.

Для определения динамических характеристик сушильной камеры как теплового объекта полагаем, что температура θ удаляемого воздуха есть усредненное значение температуры воздуха в сушильном пространстве, а также расположенных в нем элементов конструкции. Тогда, пренебрегая расходом теплоты на нагрев ма-

териала, запишем уравнение теплового баланса сушильной камеры в линеаризованной дифференциальной форме

$$\left[V_n c_n \rho_n + \sum_i (V_i c_i \rho_i) \right] \frac{d\Delta\theta}{dt} = \Delta Q_k - \Delta Q_c - L c_n \rho_n (\Delta\theta - \Delta\theta_{II}) - S_0 k_{cp} (\Delta\theta - \Delta\theta_{II}), \quad (11.16)$$

где i — порядковый номер элементов конструкции сушильной камеры, нагреваемых воздухом в сушильном пространстве до температуры θ ; V_n — объем, занимаемый воздухом в сушильном пространстве; c_n, ρ_n — средние значения удельной теплоемкости и плотности воздуха соответственно; V_i — объем, занимаемый i -м элементом конструкции; c_i, ρ_i — удельная теплоемкость и плотность материала i -го элемента соответственно; Q_c — тепловой поток, потребляемый собственно процессом сушки материала.

Уравнение (11.16) преобразуем к виду

$$T_\theta \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = k \Delta Q_k + k_n \Delta\theta_{II} - k_c \Delta Q_c, \quad (11.17)$$

где $k = k_c = 1 / (L c_n \rho_n + S_0 k_{cp})$;

$$T_\theta = k \left[V_n c_n \rho_n + \sum_i (V_i c_i \rho_i) \right]; \quad k_{II} = k (L c_n \rho_n + S_0 k_{cp}).$$

Постоянная времени T_θ определяется величиной общей теплоемкости воздуха и элементов конструкции, интенсивностью воздухообмена, т. е. значением L , и потерями теплоты через ограждения сушильной камеры. Поэтому при достаточно большой величине L , несмотря на большие габаритные размеры сушильной камеры, постоянная времени T_θ может составлять лишь несколько минут, что определяет целесообразность применения малоинерционного датчика температуры. Рассматривая сигналы $\Delta\theta_{II}$ и ΔQ_c как возмущения, из (11.17) находим передаточную функцию

$$W_\theta(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta Q_k(p)} = \frac{k}{1 + p T_\theta} \quad (11.18)$$

без учета сушильной части схемы рис. 11.7. В дальнейшем в динамике теплового объекта учтем зависимость $\Delta Q_c(0)$.

Динамические характеристики основного звена транспортирующей части будем оценивать для малых отклонений входной и выходной величин передаточной функцией $W_r(p) = \Delta t_c(p) / \Delta v(p)$, выражение которой получается с учетом распределенности выходной координаты Δt_c по длине перемещения материала в рабочей зоне сушильной камеры. Рассмотрим составление и решение линеаризованного дифференциального уравнения, на основе которого получается выражение передаточной функции $W_v(p)$.

Отклонение продолжительности сушки t_c на величину Δt_c от исходного значения t_{c0} определим как функцию отклонения скорости v на величину Δv от исходного значения v_0 по координатам време-

ни t и по длине l пути перемещения материала. Зависимость $t_{c0}(v_0)$ представляется статической характеристикой $t_{c0} = l_0/v_0$, где l_0 — длина пути перемещения материала в рабочей зоне. Условие материального баланса определяется выражением

$$t_{c0} \pm \Delta t_c = l_0 / (v_0 \mp \Delta v). \quad (11.19)$$

Учитывая, что выходной сигнал $t_c(l, t)$ согласно физической сущности процесса зависит от интеграла входного сигнала $v(t)$, линейризованное дифференциальное уравнение объекта регулирования продолжительности сушки для малых величин Δv и Δt_c запишем в виде

$$k_t \frac{d\Delta t_c}{dt} + k_l \frac{d\Delta t_c}{dt} = -\Delta v, \quad (11.20)$$

где k_t и k_l — коэффициенты, определяемые соответственно из условий

$$k_t = -\frac{\Delta v}{d\Delta t_c/dt} \text{ при } d\Delta t_c/dt = 0$$

и

$$k_l = -\frac{\Delta v}{d\Delta t_c/dl} \text{ при } d\Delta t_c/dl = 0.$$

Каждое слагаемое левой части уравнения (11.20) одинаково справедливо для каждого участка по длине l .

Вызванное сигналом Δv приращение Δt_c на небольшом участке Δl находим из соотношения

$$\Delta t_c = \frac{\Delta l}{v_0 + \Delta v} - \frac{\Delta l}{v_0} = -\frac{\Delta v}{v_0(v_0 + \Delta v)} \Delta l. \quad (11.21)$$

Учитывая, что $\Delta v \ll v_0$, и полагая $\Delta l \rightarrow 0$, из (11.21) получаем

$$d\Delta t_c/dl = -\Delta v/v_0^2. \quad (11.22)$$

Для неподвижной точки с координатой l отношение приращений $\Delta t_c/\Delta t$ определяем по формуле

$$\frac{\Delta t_c}{\Delta t} = \frac{\Delta l(v_0 + \Delta v) - \Delta l/v_0}{\Delta l/v_0} = -\frac{\Delta v}{v_0 + \Delta v}. \quad (11.23)$$

При $\Delta v \ll v_0$ и $\Delta t \rightarrow 0$ из (11.23) получаем

$$d\Delta t_c/dt = -\Delta v/v_0. \quad (11.24)$$

Используя (11.22) и (11.24), находим формулы для коэффициентов k_t и k_l :

$$k_t = v_0; \quad (11.25)$$

$$k_l = v_0^2, \quad (11.26)$$

а исходное дифференциальное уравнение (11.20) запишем в форме

$$\frac{d\Delta t_c}{dt} + \frac{1}{v_0} \frac{d\Delta t_c}{dt} = -\frac{\Delta v}{v_0^2}. \quad (11.27)$$

После преобразования по Лапласу функций $\Delta v(t)$ и $\Delta t_c(t)$ получаем

$$\frac{d \Delta t_c(p)}{d l} + \frac{p}{v_0} \Delta t_c(p) = -\frac{\Delta v(p)}{v_0^2}. \quad (11.28)$$

Решение уравнения (11.28) представляется выражением

$$\Delta t_c(p) = - \left[\int_0^l \frac{\Delta v(p)}{v_0^2} e^{\int_0^l (p/v_0) d l} d l + A \right] e^{-\int_0^l (p/v_0) d l}, \quad (11.29)$$

где A — постоянная интегрирования, определяемая из (11.29) с учетом начального условия $l=0$ (когда $\Delta t_c=0$) по выражению

$$A = - \int_0^l \frac{\Delta v(p)}{v_0^2} e^{\int_0^l (p/v_0) d l} d l. \quad (11.30)$$

Так как v_0 и $\Delta v(p)$ не зависят от l , имеем

$$\Delta t_c(p) = -\frac{\Delta v(p)}{p v_0} - A e^{-p l / v_0} = -\frac{\Delta v(p)}{p v_0} (1 - e^{-p l / v_0}). \quad (11.31)$$

Учитываем, что если $l=0$, то $t_c=t_{c0}$. Тогда получаем полное выражение для продолжительности сушки

$$t_c(p) = \Delta t_c(p) + t_{c0} e^{-p l / v_0}. \quad (11.32)$$

Для нулевых начальных условий из (11.31) получаем передаточную функцию основного звена транспортирующей части структурной схемы рис. 11.7 в виде

$$W_v(p) = \frac{\Delta t_c(p)}{\Delta v(p)} = -\frac{1 - e^{-p l / v_0}}{p v_0}. \quad (11.33)$$

Отклонение потока выделяемой при сушке влаги ΔG_v определяется изменением конечного влагосодержания материала и скоростью его перемещения согласно соотношению

$$G_{v0} + \Delta G_v = (u_n - u_k - \Delta u_k)(v + \Delta v) m, \quad (11.34)$$

где $G_{v0} = (u_n - u_k) m v$ — исходное значение потока влаги G_v .

Величина ΔG_v из (11.34) представляется приближенным выражением

$$\Delta G_v = [(u_n - u_k - \Delta u_k) \Delta v - (v + \Delta v) \Delta u_k] m. \quad (11.35)$$

§ 11.3. ВЫБОР СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Сушильные установки легкой промышленности автоматизируют, не используя различные принципы построения автоматических систем. При этом виды возмущений и возможности имеющихся технических средств автоматизации часто являются главными факто-

рами, определяющими построение схемы управления процессом сушки и применение автоматических систем. Рассмотрим вопросы обоснования одновременного регулирования режима сушки и конечного влагосодержания материала. ✓

Виды возмущающих воздействий на процесс сушки. Часто основными возмущениями процесса сушки являются нестабильность тепловой мощности блока подогрева воздуха и количества влаги, поступающей с влажным материалом и определяемой величиной mvu_n . Так как действие случайных возмущений Δu_n , Δm , $\Delta \theta_n$ и температуры поверхности нагревателя ведет к отклонению температуры воздуха θ при постоянной скорости v , контроль и стабилизацией температуры воздуха θ обычно является первоочередной задачей при разработке системы регулирования сушильной камеры. При этом влияние возмущения $\Delta(mvu_n)$ компенсируется лишь частично даже при условии обеспечения постоянного значения относительной влажности воздуха ϕ путем изменения расхода воздуха L (см. статические характеристики сушильной камеры). Поэтому следующий шаг по пути совершенствования схемы автоматизации процесса сушки — это применение автоматических устройств, устраняющих влияние возмущения $\Delta(mvu_n)$.

Результатирующее действие всех возмущений проявляется на отклонении конечного влагосодержания материала u_k от заданного значения. Как уже было отмечено, величина u_k определяется начальным влагосодержанием u_n , величиной m , продолжительностью сушки t_c , равновесным влагосодержанием u_p и коэффициентом диффузии влаги a_m . При этом величину ϕ целесообразно устанавливать неизменной по значению, определяемому технологическими требованиями. Так, с повышением величины ϕ резко возрастает неравномерность влагосодержания высушенного материала в соответствии с нестабильностью величины u_n и толщины материала (или значения m) по отдельным участкам, а с понижением величины ϕ ниже некоторого значения, обусловленного характеристиками материала, самовыравнивание конечного влагосодержания u_k становится весьма существенным. Чрезмерное снижение величины ϕ с целью ускорения процесса сушки сопровождается понижением экономичности режима работы сушильной камеры и, кроме того, может быть причиной появления больших внутренних напряжений материала. При поддержании заданного режима сушки влияние нескомпенсированных возмущений эффективно устраняется изменением продолжительности сушки t_c , например путем изменения скорости v .

В тех случаях, когда имеется возможность автоматического измерения величины u_k в процессе перемещения высушиваемого материала, целесообразно применение системы регулирования влагосодержания u_k , работающей совместно с АСР температуры θ . При этом система регулирования влагосодержания u_k обеспечивает устранение влияния медленно изменяющегося возмущения $\Delta(mvu_n)$ путем изменения скорости v . Рассмотрим взаимодействие обеих систем регулирования.

Автоматические системы связанного регулирования температуры воздуха и конечного влагосодержания материала. На рис. 11.8 показана упрощенная структурная схема модели объекта и системы связанного регулирования температуры воздуха θ и конечного влагосодержания материала u_k . Здесь обведенная пунктирной линией структурная схема динамической модели объекта получена

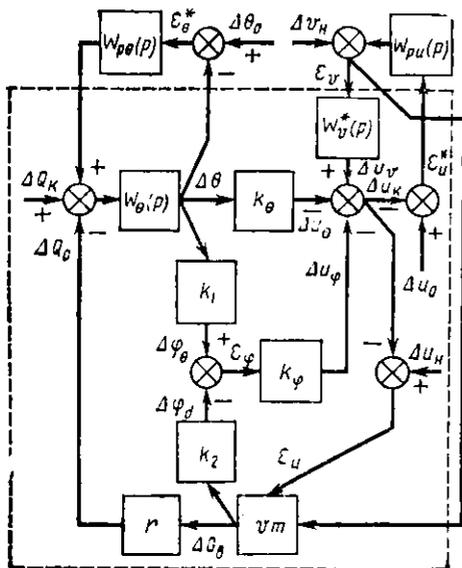


Рис. 11.8

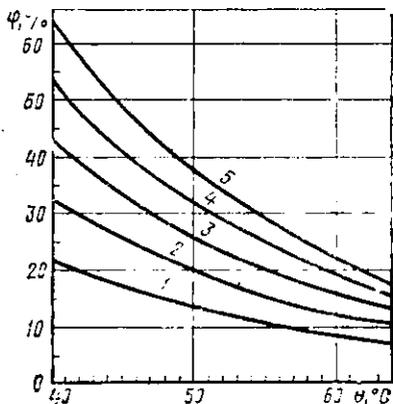


Рис. 11.9

по схеме рис. 11.7, причем мы пренебрегли возмущающими воздействиями $\Delta\theta_u$ и ΔL , а также влиянием величины $\Delta\theta$ на зависимость $Q_c(G_n)$.

Звенья 1, 2 и 3 по схеме рис. 11.7 представлены на рис. 11.8 звеном с передаточной функцией $W_\theta(p)$ согласно (11.18), а звено 9 по схеме рис. 11.7 вошло на схеме рис. 11.8 в звено с передаточной функцией $W_v^*(p)$.

На рис. 11.8 передаточная функция регулятора температуры обозначена $W_{1\theta}(p)$, а передаточная функция регулятора влагосодержания u_k обозначена $W_{p\theta}(p)$. Сигналы внешнего воздействия по заданию обозначены соответственно $\Delta\theta_0$ и Δu_0 для каждого регулятора. ε_θ^* и $\varepsilon_{u_k}^*$ — сигналы рассогласования соответственно на входе регулятора температуры θ и влагосодержания u_k . Сигнал возмущающего воздействия на механизм перемещения материала, обусловленный отклонением момента нагрузки либо напряжения в сети питания, обозначен Δv_n .

Коэффициент k_θ отражает влияние изменения температуры θ на изменение конечного влагосодержания u_k (см. передачу сигнала через звено 4 на схеме рис. 11.7), а коэффициент k_φ — влияние

относительной влажности воздуха φ на величину u_k (см. передачу сигналов через звенья 5, 6, 7 на схеме рис. 11.7). Коэффициенты k_1 и k_2 представляют крутизну зависимостей $\Delta\varphi(\Delta\theta)$ и $\Delta\varphi(\Delta d)$, определяемых, например, по $I-d$ -диаграмме. На рис. 11.9 показаны полученные по $I-d$ -диаграмме графики $I-5$ зависимости $\varphi(\theta)$ при постоянных значениях влагосодержания воздуха d для барометрического давления $P_0 = 1013,25$ гПа (760 мм рт. ст.). Для выбранного исходного режима, заданного величинами θ , d и φ , по линии постоянного значения d для малого отклонения $\Delta\varphi$ находится соответствующее отклонение $\Delta\theta$ и $k_1 = \Delta\varphi/\Delta\theta$, а по линии постоянного значения θ для малого отклонения Δd также находится соответствующее отклонение $\Delta\varphi$ и $k_2 = \Delta\varphi/\Delta d$.

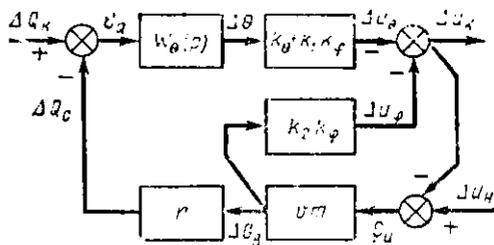


Рис. 11.10

Влияние одной из рассматриваемых систем регулирования на другую удобно выяснить путем анализа и эквивалентного преобразования части структурной схемы объекта, отражающей зависимость $\Delta u_k(\Delta\theta)$. На рис. 11.10 показана эквивалентная схема тепловой части модели объекта, полученная на основе рис. 11.8. По этой эквивалентной схеме находим выражение для изменения температуры воздуха в операторной форме

$$\Delta\theta(p) = \frac{(1 - vmk_2k_\varphi)W_\theta(p)}{1 + vm[kr(k_\theta + k_1k_\varphi) - k_2k_\varphi]} \Delta Q_k(p) = \frac{k^*}{1 + \sigma T^*} \Delta Q_k(p), \quad (11.36)$$

где

$$T^* = T_0 \frac{k^*}{k}; \quad k^* = \frac{k(1 - vmk_2k_\varphi)}{1 + vm[kr(k_\theta + k_1k_\varphi) - k_2k_\varphi]}.$$

Сравнив результат по (11.36) с данными по (11.17) и (11.18), замечаем, что $k^* < k$ и $T^* < T_0$.

Отклонение температуры воздуха θ оказывает влияние на величину Δu_k главным образом в результате изменения равновесного влагосодержания u_p . Изменение скорости v даже на небольшую величину $\Delta v \ll v_0$ вызывает заметное отклонение величины u_k согласно рис. 11.5 и (11.11). При этом наблюдается незначительное изменение влаговыделения и режима сушки, обусловленные перераспределением стадий сушки материала по длине его перемещения в рабочей зоне. Это означает, что в переходных процессах АСР температуры θ оказывает гораздо большее влияние на работу АСР влагосодержания u_k , чем АСР влагосодержания на АСР температуры. Поэтому выбором закона регулирования и настройкой параметров регулятора обеих систем регулирования важно обеспечить

такое быстрое действие АСР температуры, чтобы оно значительно превосходило быстрое действие АСР влагосодержания. Таким образом, достигается ослабление колебаний параметра u_k при действии возмущений, вызывающих отклонение температуры θ от заданного значения.

Оптимизация процесса сушки. Во многих подотраслях легкой промышленности значительная доля тепловой энергии, потребляемой предприятием, расходуется на сушку материалов, поэтому важным средством экономии энергии является оптимизация процесса сушки. При этом должны выполняться в том или ином соотношении противоречивые требования: уменьшение удельных затрат энергии на каждую единицу испаряемой влаги, с одной стороны, получение высокой производительности сушильной установки — с другой.

При анализе статической характеристики сушильной камеры было отмечено, что заданное значение конечного влагосодержания u_k может быть получено при различных режимных условиях сушки. Наибольшая производительность сушильной установки достигается поддержанием режима сушки с предельно допустимыми параметрами воздуха: температуры θ и относительной влажности φ , однако чем выше температура воздуха в сушильной камере и ниже его относительная влажность, тем больше потери тепла с удаляемым влажным воздухом и, следовательно, больше затраты энергии на каждый килограмм влаги, испаряемой в процессе сушки.

Для технической реализации оптимального процесса сушки необходимо применение в системе управления оптимизатора, действующего совместно с системами регулирования режима сушки и конечного влагосодержания материала. В общем виде целевая функция, определяющая работу оптимизатора:

$$\Phi = \left(\psi_1 + \psi_2 \frac{Q_k}{u_n - u_k} \right) / (m v), \quad (11.37)$$

где Φ — вычисляемая и минимизируемая оптимизатором величина, руб/кг сухого материала; ψ_1 и ψ_2 — весовые коэффициенты, величины которых отражают значимость соответственно производительности и экономичности процесса сушки.

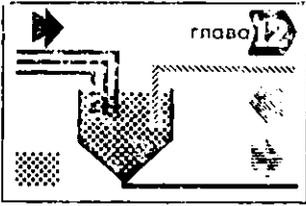
Величина ψ_1 содержит затраты на обслуживание сушильной установки и слагаемые, учитывающие влияние производительности сушильной установки на экономические показатели работы всего предприятия. Коэффициент ψ_2 складывается из средней стоимости единицы тепловой энергии на предприятии и доли капитальной составляющей, учитывающей влияние на стоимость тепловой энергии изменения потребления этой энергии на сушку. Нахождение коэффициентов ψ_1 и ψ_2 относится к экономическим задачам, решаемым на предприятиях при централизованном управлении технологическими процессами и при использовании АСУ ТП.

Практически управляющее воздействие оптимизатора заключается в посылке точной коррекции задания АСР температуры θ так, чтобы обеспечивался минимум величины Φ , оцениваемой по (11.37). При этом технологические ограничения на допустимые отклонения режима сушки соблюдаются с помощью средств автоматического контроля, действующих совместно с системами регулирования температуры воздуха и конечного влагосодержания материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теория сушки. М., 1968.
2. Пикитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М., 1968.
3. Пестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. М., 1971.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД



Процессы очистки сточных вод являются важной составной частью технологии многих предприятий легкой промышленности, в частности кожевенного и мехового производств, рассмотренных, например, в [1]. При выполнении технологических операций жидкостной обработки материалов потребляемая вода загрязняется минеральными и органическими веществами. Загрязняющие вещества могут находиться в растворенном, коллоидном и взвешенном состоянии. Канализацию загрязненных промышленными отходами сточных вод предшествует их обработка на станциях очистки в составе предприятия с целью снижения концентрации содержащихся в них примесей до допустимых пределов, предусмотренных санитарными правилами. При этом нормируются содержание растворенного кислорода ($4-6 \text{ г/м}^3$) и потребность в кислороде для биохимического окисления, которая сокращенно называется БПК. Измеряется БПК в миллиграммах кислорода на 1 г вещества (часто определяется потребность кислорода за 5 сут, например БПК₅, или за 20 сут, например БПК₂₀) либо в граммах на 1 м³, например БПК₂₀ ($2-3$) г/м³. Кроме того, нормируется количество плотного осадка (1000 г/м^3), величина рН ($6,5-8,5$). В сточной воде ограничивается содержание токсичных веществ, не допускается наличие возбудителей заболеваний.

При очистке промышленных стоков используются гидромеханические процессы перемешивания или смешения (усреднения) и отстаивания, химические и физико-химические процессы реагентной обработки (при нейтрализации, осаждении металлов, окислении — восстановлении, коагуляции), биологические процессы окисления микроорганизмами органических загрязнений с разрушением сложных соединений веществ загрязнений. Названные процессы преимущественно применяются на станциях очистки сточных вод промышленных предприятий и являются основными процессами. Другие прогрессивные процессы, например электрохимические и ионообменные, пока применяются редко и здесь не рассматриваются.

Типовое оборудование станций очистки сточных вод обычно бывает непрерывного действия. Технологические требования к режимам работы этого оборудования предполагают получение высокой эффективности обработки сточных вод и определяют необходимость применения средств автоматического контроля и регулирования.

§ 12.1. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

На отводных каналах основного технологического оборудования предприятий легкой промышленности устанавливают прежде всего простые механизмы непосредственного улавливания макрозагрязнений сточных вод (клочков обрабатываемого материала, волос и пр.) с помощью решеток, граблей, транспортеров. Функции автоматических устройств в этих случаях сводятся обычно к защите от переполнения, сигнализации о нарушении режима при засорении отводного канала, контролю за работой электроприводных меха-

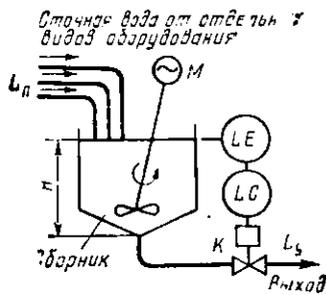


Рис. 12.1

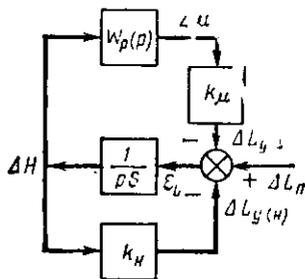


Рис. 12.2

низмов. К числу важнейших гидромеханических процессов относятся процессы смешения с целью усреднения сточных вод за достаточно большой интервал времени и отстаивание, выполняемое для выделения из сточной воды частиц примесей, находящихся во взвешенном состоянии.

Усреднители. Для станций очистки сточных вод предприятий легкой промышленности характерна нестабильность расхода поступающей на обработку сточной воды и различный состав загрязняющих примесей стоков отдельных видов технологического оборудования [1], поэтому на начальной стадии обработки сточных вод важное значение приобретает операция усреднения, выполняемая в резервуаре-сборнике путем интенсивного смешения поступающей сточной воды с определенным запасом ее. Объем сборника выбирается достаточно большим с учетом фактической неравномерности состава и расхода поступающих на станцию очистки сточных вод и обычно равен четырех—восьмичасовому притоку для наполнения. В связи с тем что результат взаимодействия различных сточных вод, получаемый за счет усреднения, повышается с увеличением продолжительности удержания воды в гидравлической емкости сборника, время пребывания этой воды регулируют путем изменения расхода сливного канала по величине запаса, т. е. по положению уровня в резервуаре-сборнике, задаваемого в исходном режиме на возможно большей высоте. На рис. 12.1 показана схема АСУ уровня воды в сборнике-усреднителе (обозначения: L_p — расход поступающей в сборник сточной воды, L_γ — расход удаляемой воды, H — уровень воды в сборнике). Для эффективного выравнивания состава посту-

пающих от отдельных видов технологического оборудования сточных вод применена мешалка с электроприводом. Управляющее воздействие осуществляется изменением расхода L_y сливного канала с помощью клапана K . В широком диапазоне перемещения штока клапана, положение которого определяется координатой μ , зависимость $L_y(\mu)$ нелинейна.

Исходное уравнение для описания процесса накопления воды в сборнике с постоянным значением S площади поверхности зеркала воды представляется в виде

$$S \frac{d\Delta H}{dt} = \Delta L_n - \Delta L_y, \quad (12.1)$$

где ΔL_n — отклонение от исходного установившегося значения L_0 потока поступающей в сборник воды; ΔL_y — отклонение от значения L_0 удаляемого потока.

После преобразования по Лапласу из (12.1) находим в операторной форме выражение для отклонения уровня

$$\Delta H(p) = [\Delta L_n(p) - \Delta L_y(p)] / (pS). \quad (12.2)$$

Отклонение удаляемого потока L_y обуславливается как изменением уровня, так и перемещением штока регулирующего клапана и записывается линеаризованным уравнением

$$\Delta L_y = \Delta L_{y(H)} + \Delta L_{y(\mu)}, \quad (12.3)$$

где $L_{y(H)} = k_H \Delta H$; $\Delta L_{y(\mu)} = k_\mu \Delta \mu$; k_H — коэффициент крутизны статической характеристики $L_y(H)$ для выбранного исходного положения регулирующего органа μ ; $k_H = \partial L_y / \partial H$; k_μ — коэффициент расходной характеристики регулирующего клапана $L_y(\mu)$ для исходного значения уровня H ; $k_\mu = \partial L_y / \partial \mu$.

Зависимость $L_y(H)$ учтем в структурной схеме системы регулирования дополнительной отрицательной обратной связью с коэффициентом k_H , как показано на рис. 12.2, где $\varepsilon_L = \Delta L_n - L_{y(H)} - \Delta L_{y(\mu)}$.

В случае пропорционального закона регулирования передаточная функция регулятора

$$W_p(p) = \Delta \mu(p) / \Delta H(p) = k_p, \quad (12.4)$$

где k_p — коэффициент усиления регулятора.

Передаточную функцию замкнутого контура АСР при внешнем воздействии, представляемом сигналом ΔL_n , с учетом (12.4) получаем в виде

$$W(p) = \frac{\Delta L_y(p)}{\Delta L_n(p)} = \left(\frac{k_H + k_p k_\mu}{pS} \right) / \left(1 + \frac{k_H + k_p k_\mu}{pS} \right) = \frac{1}{1 + pT}, \quad (12.5)$$

где $T = S / (k_H + k_p k_\mu)$ — постоянная времени.

Таким образом, пропорциональное регулирование запаса воды ведет к уменьшению изменения удаляемого потока при резких отклонениях поступающего потока в соответствии с передаточной

функцией (12.5). Отклонение уровня определяется по схеме рис. 12.2 и записывается в операторной форме:

$$\Delta H(p) = \frac{1_r(pS)}{1 + k_p k_n + k_n} \Delta L_n(p) = \frac{k \Delta L_1(p)}{1 + pT}, \quad (12.6)$$

где $k = 1/(k_n + k_p k_n)$.

Из (12.6) следует, что пропорциональное регулирование позволяет уменьшить изменение запаса воды в сборнике при возмущающем воздействии ΔL_n путем выбора большой величины k_p .

Другим важным результатом действия усреднителя является выравнивание состава поступающих сточных вод. При идеальном смешении поступающая в усреднитель сточная вода мгновенно перемешивается с имеющейся в объеме W и состав воды принимается одинаковым во всем этом объеме. Тогда концентрация компонента a , находящейся в объеме W в количестве W_a , записывается:

$$C_a = W_a/W. \quad (12.7)$$

Оценивая нестабильность поступления со сточной водой компоненты a концентрацией общего подаваемого потока C_{an} , получаем формулы для потока поступления компоненты a в виде $L_{an} = L_n C_{an}$ и для потока удаления в виде $L_{ay} = L_y C_a$.

Изменение запаса компоненты a определяется выражением

$$W_a(t) = W_a(0) + \int_0^t [L_{an}(t) - L_{ay}(t)] dt, \quad (12.8)$$

где $W_a(0)$ — начальное значение запаса при $t=0$.

Поделив левую и правую части (12.8) на W , получаем

$$C_a(t) = C_a(0) + \int_0^t \{[L_{an}(t) - L_{ay}(t)]/W\} dt, \quad (12.9)$$

где $C_a(0)$ — начальное значение концентрации компоненты a .

Далее для упрощения обозначение аргумента t при функциях опускаем. Продифференцируем левую и правую части уравнения (12.9) и после преобразований получаем уравнение

$$T dC_a dt + C_a = C_{an}, \quad (12.10)$$

где $T = W/L_y$ — постоянная времени, равная времени нахождения воды в сборнике с объемом W .

Как следует из рассмотрения уравнения (12.10), кратковременные отклонения концентрации компоненты a поступающего потока сточной воды сглаживаются благодаря инерционным свойствам сборника-усреднителя.

Отстойники. На станциях очистки сточных вод нерастворенные грубодисперсные примеси выделяют из обрабатываемой воды отстаиванием, т. е. в процессе осаждения под действием силы тяже-

ления очистки сточных вод. В сточных водах промышленных предприятий нерастворимые примеси представляют собой различные по величине, форме и весу частицы, в связи с чем часто почти невозможно теоретически установить характер их выпадения. Кинетику процесса выпадения взвеси для различных сточных вод устанавливают экспериментально и описывают эмпирическими зависимостями [1].

Время нахождения воды в отстойнике, определяемое по формуле

$$T = V_i/L, \quad (12.11)$$

должно обеспечивать осаждение частиц, перемещающихся по всей высоте уровня жидкости H . Обозначив скорость свободного движения частиц v_0 , уменьшение средней скорости стесненного осаждения учтем коэффициентом δ и, сравнивая значение времени T по формуле

$$T = H/(\delta v_0) \quad (12.12)$$

с (12.11), получим необходимый расход L обрабатываемой воды

$$L = V\delta v_0/H. \quad (12.13)$$

Чтобы обеспечить высокую производительность отстойника в условиях изменяющегося состава и начальной концентрации примесей в сточной воде, необходима АСР остаточной концентрации взвешенных частиц путем изменения расхода L в ограниченном диапазоне, определяемом ламинарным характером движения воды в отстойнике.

Осадок со дна отстойника удаляют различными способами. Автоматическое управление выпуском осадка без останова отстойника возможно при наличии средств измерения уровня осадка путем перемещения задвижки, устанавливаемой на выпускном отверстии, предназначенном для самотечного выдавливания осадка под гидростатическим напором столба жидкости в отстойнике, либо с помощью насосов. На рис. 12.3 показана схема АСР уровня осадка с помощью червячного транспортера (ЧТ).

Полагая, что при ламинарном течении воды через отстойник ступенчатое изменение расхода воды на небольшую величину ΔL вызывает линейное отклонение концентрации остаточной взвеси со скоростью $\Delta C/T$ на интервале $t \leq T$ (где ΔC — отклонение концентрации C , соответствующее величине ΔL по статической характеристике объекта; $T = V/L$), динамическую характеристику объекта регулирования концентрации C при условии завершения переходных процессов регулирования за время T представим передаточной функцией

$$W(p) = \Delta C(p)/\Delta L(p) = 1/(pT). \quad (12.14)$$

Если учесть чистое запаздывание τ , обусловленное смещением места расположения датчика концентрации от места выхода осветленной воды из отстойника, то выражение передаточной функции

(12.14) дополняется последовательным звеном чистого запаздывания и принимает вид

$$W(p) = e^{-p\tau} / (pT). \quad (12.15)$$

Тогда в случае пропорционального закона регулирования с коэффициентом усиления регулятора k_p , учитывая, что предельная частота $\omega_{пр} = \pi / (2\tau)$, предельный коэффициент усиления определяется по формуле (см. гл. 4)

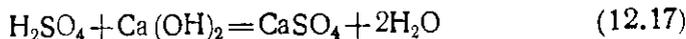
$$k_{p,пр} = \omega_{пр} T = \pi T / (2\tau), \quad (12.16)$$

а высокое быстродействие АСР достигается выбором достаточно большой величины k_p при $T/\tau > 20$. Последнее условие практически обычно выполняется.

§ 12.2. ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Широко распространенным видом реагентной очистки сточных вод является реакция нейтрализации кислот и щелочей в малоемкостных смесителях — реакторах ершового и перегородчатого типов, которые не требуют для перемешивания внешних источников энергии.

Смеситель ершового типа и схема АСР процесса нейтрализации по величине рН и расходу стоков показаны на рис. 12.4. В качестве нейтрализующего реагента при понижении кислотности, например при нейтрализации серной кислоты, обычно используют известковую суспензию как наиболее дешевую щелочь. Учитывая свойство известковой суспензии интенсивно зашламлять щели и проходные отверстия, дозирующее устройство снабжают регулирующим органом специальной конструкции. Один из таких дозаторов — ДИМБА разработан во ВНИИВОДГЕО [2]. Известковая суспензия подается в дозатор в избытке, излишек возвращается обратно в устройство ее приготовления. Реакция нейтрализации серной кислоты представляется уравнением



Скорость реакции нейтрализации описывается уравнением

$$dC/dt = -kC, \quad (12.18)$$

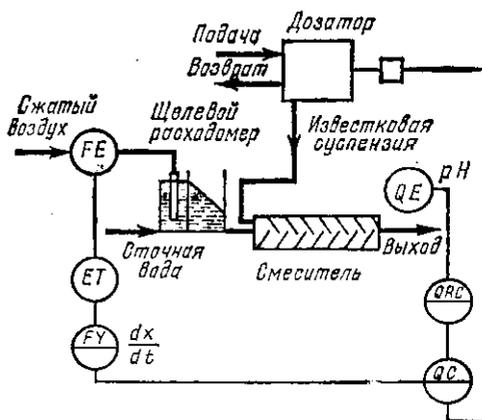


Рис. 12.4

где C — концентрация серной кислоты; k — константа скорости реакции.

В смесителе ершового типа перемешивание осуществляется с помощью специальных перегородок, установленных на пути перемещения смеси в рабочей камере. Дифференциальное уравнение, описывающее смешение, выводится на основе рассмотрения гидродинамики процесса с учетом особенностей конструкции смесителя и кинетики химической реакции. Полагаем, что для смесителя ершового типа выполняются условия: в любом поперечном сечении распределение концентрации веществ однородно (практически принимаем некоторое среднее по площади поперечного сечения значение концентраций); в рабочей камере происходит турбулентное перемешивание смеси, причем коэффициент турбулентной диффузии D и скорость переноса фронта концентраций вдоль смесителя v постоянны по сечению и по длине камеры. Тогда дифференциальное уравнение диффузии для ершового смесителя записывается в виде [2]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - v \frac{\partial C}{\partial l} - kC, \quad (12.19)$$

где l — расстояние по направлению перемещения вдоль рабочей камеры; $\partial C/\partial t$, $D\partial^2 C/\partial l^2$, $v\partial C/\partial l$ и kC — составляющие, учитывающие соответственно изменение концентрации во времени, турбулентную диффузию, изменение концентрации в результате переноса и кинетику реакции.

Рассмотрим решение уравнения (12.19) посредством преобразования по Лапласу временной зависимости $C(l, t)$. Поскольку дифференцирование по l и преобразование по Лапласу можно менять местами в последовательности выполнения операций и после перехода в пространстве изображений производная по времени исключается, частную производную по l заменяем обыкновенной производной. В результате из (12.19) получаем дифференциальное уравнение

$$D \frac{d^2 C(l, p)}{dl^2} - v \frac{dC(l, p)}{dl} - (p + k)C(l, p) = 0. \quad (12.20)$$

Решение уравнения (12.20) записываем в виде

$$C(l, p) = Ae^{s_1 l} + Be^{s_2 l}, \quad (12.21)$$

где A и B — параметры, определяемые с учетом граничных условий; s_1 и s_2 — корни характеристического уравнения

$$Ds^2 - vs - (p + k) = 0; \quad (12.22)$$

$$s_{1,2} = \frac{v \pm \sqrt{v^2 + 4D(p + k)}}{2D}. \quad (12.23)$$

Анализ корней уравнения (12.22) показывает, что один корень, допустим s_1 , имеет при $p=0$, т. е. в установившемся режиме, отрицательное значение, а другой — положительное значение. Слагаемое в (12.21) с положительным корнем, т. е. $Be^{s_2 l}$, указывает на возрастание концентрации с увеличением l , что противоречит существу рассматриваемого процесса, поскольку реакция нейтрализации протекает в направлении уменьшения концентрации $C(l, p)$. Следовательно, это слагаемое не должно учитываться в решении уравнения.

Из граничного условия $l=0$, когда $C(0, p) = C_{\text{вх}}(p)$, выражение для A при-

нимает вид

$$A = C_{\text{нх}}(p). \quad (12.24)$$

Окончательно решение уравнения (12.20) записывается выражением

$$C(l, p) = C_{\text{нх}}(p) e^{[v - \sqrt{v^2 + 4D(k+p)}] l / (2D)}. \quad (12.25)$$

Установившееся распределение параметра концентрации определяется по выражению (12.25) при $p=0$.

Полагая входное воздействие в виде сигнала $C_{\text{вх}}(p)$ по выражению (12.25) получаем передаточную функцию смесителя

$$W(p) = C(l, p) / [C_{\text{вх}}(p)] = e^{[v - \sqrt{v^2 + 4D(k+p)}] l / (2D)}. \quad (12.26)$$

Заменяя p на $j\omega$, из (12.26) находим частотную характеристику

$$W(l, j\omega) = e^{[v - \gamma(\cos \psi + j \sin \psi)] l / (2D)}, \quad (12.27)$$

где

$$\gamma = \sqrt{v^2 + 4Dk^2 + (4D\omega)^2}, \quad \psi = 0,5 \arctg [4D\omega / (v^2 + 4Dk)].$$

Из выражения (12.27) получаем амплитудно-частотную характеристику

$$|W(l, j\omega)| = e^{(v - \rho \cos \psi) l / (2D)} \quad (12.28)$$

и фазочастотную характеристику

$$\varphi(l, \omega) = -\rho l \sin \psi / (2D). \quad (12.29)$$

Из рассмотрения (12.28) и (12.29) выясняются фильтрующие свойства объекта регулирования. При $\omega \rightarrow \infty$ имеем $|W(l, j\omega)| \rightarrow 0$. На рис. 12.5 показаны ЛЧХ ершового смесителя, полученные из (12.28) и (12.29) при $k=0,125 \text{ с}^{-1}$, $v=0,5 \text{ м/с}$, $D=0,014 \text{ м}^2/\text{с}$, $l=10 \text{ м}$. Из рассмотрения частотных характеристик рис. 12.5 следует, что данный объект по своим динамическим характеристикам является фильтром низкой частоты, а в модели объекта имеется звено чистого запаздывания. На рис. 12.6 показан график переходной характеристики ершового смесителя с указанными параметрами k , v , D и l . Эта характеристика получена в результате периодизации входного воздействия Δt ступенчатой формы (частота периодизации $\omega_1=0,1$) и последующего определения суммы передаваемых через модель объекта восьми гармоник с шагом изменения времени $\Delta t=0,5 \text{ л}$ (подробнее см. определение процессов регулирования линейной АСР в гл. 4).

С целью упрощения выбора регулятора концентрации (методика выбора линейного регулятора рассмотрена в гл. 4) динамические характеристики данного объекта, усложненные распределенностью регулируемой величины, аппроксимируют на основе ЛЧХ эквивалентной комбинацией последовательно соединенных типовых звеньев, собственных элементов с сосредоточенной выходной величиной.

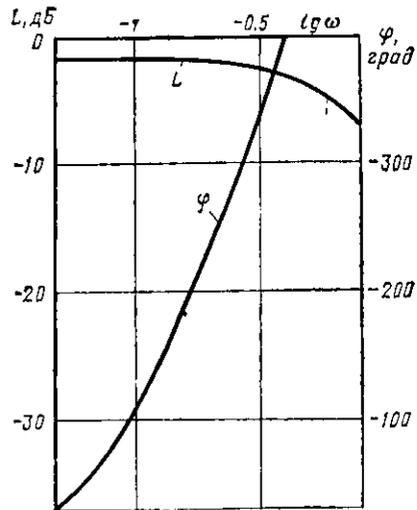


Рис. 12.5

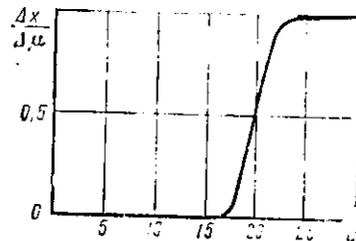


Рис. 12.6

Процесс нейтрализации сточной воды согласно схеме рис. 12.4 регулируют по величине рН (показателю активной концентрации водородных ионов) с коррекцией задания регулируемой величины по производной изменения расхода сточной воды. При выборе параметров настройки АСР учитывают нелинейную зависимость величины рН от расхода нейтрализующего реагента, а также изменение инерционности электродов рН-метров в зависимости от направления отклонения концентрации водородных ионов. Для обеззараживания сточных вод применяют хлораторные устройства с хлорсодержащими реагентами. В этом случае автоматические устройства предназначены для пропорционального дозирования растворов и суспензий в соответствии с количеством обрабатываемой воды. Принцип действия регулирующих элементов обычно основывается либо на изменении площади отверстия, через которое подается реагент, либо на изменении напора, под которым он поступает в поток обрабатываемой воды.

§ 12.3. ПРОЦЕССЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

Основным показателем биологической очистки сточных вод является снижение их биохимической потребности в кислороде (БПК). Содержащиеся в сточных водах органические вещества в процессе биологической очистки окисляются микроорганизмами при принудительной аэрации воздухом. Сущность процесса биохимического окисления загрязнений заключается в потреблении их в качестве питательной среды живыми организмами (это одноклеточные — жгутиковые и ресничные инфузории, амебы; многоклеточные — коловратки, круглые черви, водные клещи), совокупность которых образует активный ил. Типовым видом технологического оборудования, в котором проводится биологическая очистка сточных вод, является аэротенк, представляющий собой железобетонный герметичный резервуар прямоугольной формы в плане. Рабочий объем аэротенка разделен продольными перегородками на несколько коридоров, при этом каждая перегородка, имеющая начало у одной из торцевых стен, до противоположной не доходит. Количество коридоров может быть три-четыре. Очищаемые сточные воды поступают во второй либо в начало третьего коридора, смешиваясь с активным илом, подаваемым в предшествующую часть рабочего объема аэротенка по направлению движения сточной воды. Для ввода сточных вод и активного ила, а также для вывода обработанной воды вдоль торцевой стенки аэротенка располагаются каналы. Для предотвращения оседания (отстаивания) взвешенных частиц каналы продувают воздухом.

Эффективность биологической очистки сточных вод в значительной мере зависит от системы аэрации. Распределительные каналы или трубы подачи сжатого воздуха обеспечивают помимо распыления воздуха на мелкие пузырьки с помощью специальных устройств — аэраторов образование циркуляционных потоков в поперечном направлении, что приводит к интенсивному перемешиванию

ванию среды активного ила с водой и улучшению условий для растворения кислорода в воде.

При избытке кислорода и притоке органических веществ, содержащихся в сточной воде, в активном иле бурно развивается микрофлора и микрофауна. Бактерии склеиваются в хлопья, обладающие большой рабочей поверхностью (около 1200 м^2 в 1 м^3 ила) и обильно выделяют ферменты, расщепляющие органические загрязнения до молекул простых минеральных веществ. В процессе биологического окисления на границе раздела фаз происходит газообмен с потреблением кислорода и выделением углекислого газа, азота и других продуктов метаболизма. Бактерии активно делятся, их масса растет, что приводит к интенсивному развитию микроорганизмов, потребляющих бактерии. Таким образом, загрязнения из сточной воды переходят в активный ил и частично удаляются в виде выделяющихся газов и растворенных минеральных солей. Новые клетки микроорганизмов активного ила увеличивают его концентрацию. Для выделения активного ила сточная вода из аэротенка поступает во вторичный отстойник, в котором продолжается процесс биологической очистки. Активный ил, оседающий во вторичном отстойнике, способен агломерироваться и проявлять свойства коагулянта, сорбирующего взвешенные частицы, не вошедшие в хлопья ила в процессе очистки в аэротенке. Часть выделенного активного ила возвращается в аэротенк в количестве, обеспечивающем заданную технологическим регламентом концентрацию ($2\text{--}4 \text{ кг/м}^3$). Избыточный активный ил отводится, подсушивается и используется для нужд сельского хозяйства.

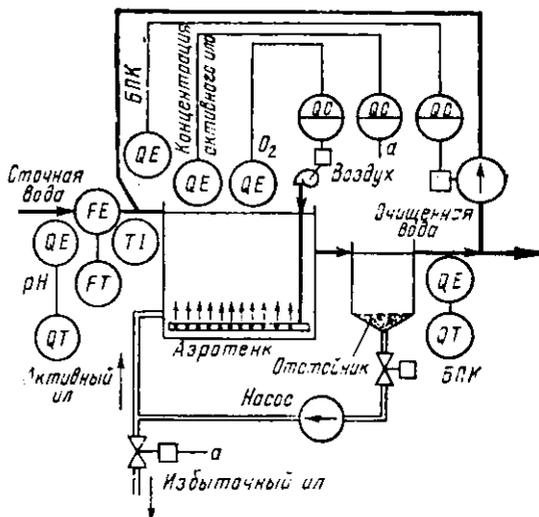


Рис. 12.7

Устройства автоматического контроля и регулирования обеспечивают баланс веществ в процессе биологической очистки сточных вод при заданных параметрах производительности и качества очистки. На рис. 12.7 показана схема автоматизации аэротенка со вторичным отстойником [3]. Главные величины регулирования аэротенка: содержание растворенного кислорода ($8\text{--}10 \text{ г/м}^3$), концентрация активного ила, начальное значение БПК.

Необходимое содержание растворенного кислорода обеспечивается изменением расхода воздуха, т. е. интенсивности аэрации с помощью АСР. Концентрация активного ила поддерживается в за-

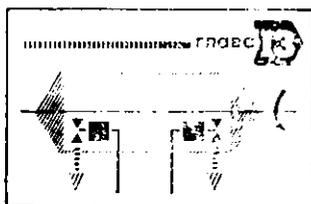
данных пределах путем изменения потока возвратного ила при ограниченном отклонении соотношения возвратного и удаляемого потоков активного ила. Слишком большое значение БПК подаваемой в обработку воды снижается до необходимого начального значения путем разбавления сточной воды очищенной водой. В случае чрезмерно малого значения БПК подаваемой сточной воды требуется подача питательных веществ для сохранения активной жизнедеятельности микроорганизмов.

Контролируется температура подаваемой на обработку воды, которая должна быть в пределах от 12 до 36° С, а также расход сточной воды и величина ее рН.

Повышение конечного значения БПК выше допустимого предела требует вмешательства оператора в ход процесса биологической обработки сточной воды. Для интенсификации процесса очистки во вторичный отстойник добавляют биогенные вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев С. В., Ласков Ю. М. Очистка сточных вод предприятий легкой промышленности. М., 1972.
2. Смирнов Д. Н., Дмитриев А. А. Автоматизация процессов очистки сточных вод химической промышленности. М., 1972.
3. Кисель Е. М. Эксплуатация канализационных очистных сооружений. Киев, 1978.



ВВЕДЕНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Создание АСУ ТП — одно из важных направлений в организации высокоэффективных производств товаров народного потребления на предприятиях легкой промышленности. АСУ ТП можно создавать на действующем предприятии или одновременно со строительством (реконструкцией) предприятия. При строительстве (реконструкции) предприятия раздел «Автоматизация технологических процессов» является обязательной и неотъемлемой частью комплексного проекта промышленного строительства. Уровень и объем автоматизации в каждом конкретном случае определяют, исходя из технико-экономической целесообразности, при этом проект систем локальной автоматизации выполняют во всех случаях, а создание АСУ ТП в связи с большой трудоемкостью разработки и высокой стоимостью технических средств предусматривают только

при наличии особого требования в задании на проектирование или при обоснованной технико-экономической целесообразности данного мероприятия.

В данной главе рассмотрены основные стадии создания АСУ ТП и систем локальной автоматизации, состав и содержание технической документации, разрабатываемой на различных этапах создания систем автоматизации.

§ 13.1. СТАДИИ СОЗДАНИЯ АСУ ТП И СОСТАВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Стадии создания

Создание АСУ ТП предусматривает следующие стадии: предпроектную, разработку технического проекта, разработку рабочего проекта, ввод в эксплуатацию и анализ функционирования. Анализ функционирования выполняется в процессе промышленной эксплуатации АСУ ТП, причем только в тех случаях, если системы предполагается использовать как повторно применяемые или типовые. Результаты работ на каждой стадии отражают в технической документации на АСУ ТП, представляющей собой комплекс взаимосвязанных документов, в которых полностью отражены все решения по созданию и эксплуатации системы. В соответствии со стадийностью разработки техническая документация на АСУ ТП разделяется на *предпроектную*, содержащую обоснование целесообразности создания системы, требований к ней и порядок выполнения работ по ее созданию, *проектную*, содержащую проектные решения по созданию и эксплуатации системы, и *приемо-сдаточную*, подтверждающую соответствие системы поставленным требованиям и готовность АСУ ТП к эксплуатации.

Проектная документация на АСУ ТП состоит из общесистемной документации и документации по отдельным составным частям АСУ ТП, т. е. по ее функциональной части, информационному, техническому, математическому, программному, организационному обеспечению и оперативному персоналу.

Информационное обеспечение АСУ ТП — это совокупность системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, сигналов, характеризующих состояние объекта управления, массивов данных и документов, необходимых для выполнения всех функций АСУ ТП.

Математическое обеспечение АСУ ТП — это совокупность математических методов и алгоритмов для решения задач и обработки информации с применением вычислительной техники.

Программное обеспечение — это совокупность программ, обеспечивающая реализацию функций АСУ ТП, заданное функционирование комплекса технических средств и предполагаемое развитие системы.

Техническое обеспечение — это комплекс технических средств, предназначенных для обеспечения АСУ ТП, включающий в себя средства получения информации о значениях параметров технологического процесса и состоянии технологического оборудования, средства формирования и передачи информации, средства локального регулирования и управления, средства вычислительной техники, средства представления информации оперативному персоналу системы, исполнительные устройства.

Организационное обеспечение — это совокупность описаний функциональной, технической и организационной структуры, инструкций и регламентов для оперативного персонала АСУ ТП, обеспечивающих заданное функционирование автоматизированного технологического комплекса.

В состав *оперативного персонала* АСУ ТП входят технологи-операторы, управляющие автоматизированным процессом, а также эксплуатационный персонал, т. е. инженеры, сменные дежурные операторы и др., обеспечивающие обработку информации и правильность функционирования комплекса технических средств АСУ ТП. Ремонтный персонал АСУ ТП в состав оперативного персонала не входит.

Общесистемная документация содержит описание, обоснование и оценку принятых решений по системе в целом и подготовке объекта к вводу АСУ ТП в эксплуатацию.

Документация *функциональной части* содержит решения по функциям управления объектом, функциональной структуре и постановкам задач.

Документация *информационного обеспечения* содержит решения по информационной базе, системе кодирования и классификации и технологическому процессу обработки информации.

Документация *технического обеспечения* содержит решения по комплексу технических средств.

Документация *математического обеспечения* содержит описание применяемых алгоритмов.

Документация *программного обеспечения* содержит решения по применяемым программам и программному обеспечению в целом.

Документация *организационного обеспечения* содержит решения по организационной структуре и инструкции персоналу АСУ ТП.

Часть проектной документации на АСУ ТП, предназначенная для обеспечения ее функционирования, называется *эксплуатационной* документацией, часть проектной документации, входящая в состав проектов промышленного строительства, называется *проектно-сметной* документацией.

Стадии создания АСУ ТП регламентированы ГОСТ 20913—75, состав технической документации по АСУ определен ГОСТ 24.101—80. Разработка АСУ ТП выполняется в соответствии с «Общотраслевыми руководящими методическими материалами по созданию и применению АСУ ТП в отраслях промышленности» (ОРММ-2-АСУ ТП), ГОСТами и другими руководящими материалами, принятыми в легкой промышленности.

Проектно-сметная документация на АСУ ТП и проекты систем локальной автоматизации разрабатываются в соответствии с СН 202—81 «Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектов и смет на строительство предприятий, зданий и сооружений» и с ВСН 281—75 «Временные указания по проектированию систем автоматизации технологических процессов».

При разработке АСУ ТП следует широко применять типовые проектные решения (ТПР), обеспечивающие максимальную экономию трудозатрат, повышение эффективности и качества АСУ ТП

за счет использования технических решений, прошедших практическую проверку.

ТПР могут касаться комплекса технических средств (ТПР КТС) математического обеспечения (ТПР МО), функционального обеспечения (ТПР ФО).

ТПР КТС могут определять состав датчиков и периферийных устройств, системы сбора информации, оперативно-диспетчерского оборудования, управляющего вычислительного комплекса.

ТПР МО представляет собой комплекс пакетов прикладных программ и математических методов, предназначенных для реализации задач контроля и управления технологическим процессом, построения математических моделей и идентификации технологического объекта управления, разработки алгоритмов оптимального управления. В частности, в ТПР МО включаются пакеты прикладных программ по статистическому анализу временных рядов, по идентификации технологических объектов на основе экспериментальных данных, по формированию выходных документов, по адаптивной идентификации технологических объектов в реальном времени и т. п.

ТПР ФО определяют состав и содержание задач АСУ ТП, подлежащих решению для данного вида технологических процессов. При этом также в составе ТПР ФО унифицируется система классификации и кодирования информации, сигналов и других элементов различных видов обеспечения.

Все ТПР, ориентированные на определенный вид технологического процесса, должны быть информационно, технически, математически и структурно увязаны между собой, что позволяет привязывать их к конкретным условиям и на их базе создать АСУ ТП как единую систему.

Предпроектная стадия создания АСУ ТП

Технико-экономическое обоснование (ТЭО). Основная цель работ на стадии ТЭО состоит в разработке обоснованного с точки зрения заказчика предложения о создании АСУ ТП с определенными функциями и техническими характеристиками. На этой стадии проводится технико-экономическое обследование объекта и существующей системы управления, анализируются известные АСУ ТП для аналогичных объектов. При обследовании выявляются возможности использования автоматизации управления для вскрытия и использования резервов сокращения расходов ресурсов и как результат — снижения себестоимости и увеличения выпуска продукции. В результате работ формулируются исходные технические требования к АСУ ТП. ТЭО создания АСУ ТП выполняет заказчик системы с привлечением в необходимых случаях других организаций.

Техническое задание (ТЗ). Основной целью работ на стадии ТЗ является подтверждение целесообразности и обоснование возможности создания эффективной АСУ ТП, отвечающей требованиям ТЭО, а также разработка плана на все виды работ, необходимых для создания АСУ ТП. На этой стадии создания АСУ ТП автоматизируемый технологический процесс предварительно обследуется, выполняются предпроектные научно-исследовательские работы, проводится эскизная разработка АСУ ТП, разработка технического задания на АСУ ТП.

При выполнении предпроектных научно-исследовательских работ технологический процесс анализируется как объект управления и разрабатываются его предварительные математические

модели, анализируются информационные потоки, формулируется критерий управления и ограничения, предварительно выбираются методы синтеза алгоритмов контроля и управления. Эти вопросы подробно рассматривались в гл. 2, 6, 7. Результаты выполнения предпроектных научно-исследовательских работ оформляются в виде отчета.

Эскизная разработка АСУ ТП включает в себя предварительную разработку функционально-алгоритмической структуры системы, предварительный анализ основных алгоритмов контроля и управления, их экспериментальную проверку, предварительный выбор и обоснование технических средств, определение задач модернизации технологического оборудования, сравнительный анализ разрабатываемой системы и ее аналогов.

Разработка технического задания является завершающим этапом предпроектной стадии и включает в себя определение полного перечня функциональных задач, корректировку технико-экономического обоснования создания системы, плана-графика работ, в том числе и научно-исследовательских на последующих стадиях создания АСУ ТП. Техническое задание на создание АСУ ТП оформляется в соответствии с ГОСТ 23252—78.

Техническое задание на создание АСУ ТП является основным исходным документом для проектирования системы, которому она должна полностью соответствовать, разрабатывает организация-разработчик системы с участием заказчика.

Проектные стадии создания АСУ ТП

АСУ ТП проектируется, как правило, в две стадии: технический и рабочий проект. Для повторно реализуемых АСУ ТП возможно проводить одностадийное проектирование с выпуском технорабочего проекта.

Технический проект. Целью работ, выполняемых на данной стадии проектирования, является разработка основных технических решений по создаваемой АСУ ТП и окончательное определение всех видов затрат на ее создание.

На стадии «Технический проект» выполняется системотехнический и аппаратно-технический синтез системы, составляются задания на разработку в смежных частях проекта объекта автоматизации, на разработку новых средств автоматизации и оперативно-диспетчерского оборудования. Разрабатываются также сметы на создание АСУ ТП, составляются ведомости оборудования и материалов, рассчитывается ожидаемая технико-экономическая эффективность АСУ ТП, составляется патентный формуляр, проводится сравнительная оценка разрабатываемой АСУ ТП и известных ее аналогов, готовится техническое задание на проектирование и выполняется техническое проектирование специального математического и информационного обеспечения.

При выполнении системотехнического синтеза разрабатываются функциональная структурная схема системы, постановки всех за-

дач, решаемых системой, перечень инициативных и измеряемых сигналов и требований к точности измерения, формулируются технические требования к системам локальной автоматики, разрабатывается организационная структура системы, схемы информационных потоков, прорабатываются вопросы совместимости АСУ ТП со смежными системами и системами более высокого уровня (АСУП и др.).

Аппаратурно-технический синтез АСУ ТП включает в себя разработку систем локальной автоматики и планов размещения местных средств локальной автоматики, разработку блок-схемы, состава и планов размещения средств информационно-управляющего комплекса.

Техническое проектирование специального математического и информационного обеспечения АСУ ТП является продолжением системотехнического синтеза системы и включает в себя разработку всех алгоритмов АСУ ТП и подготовку основных решений по информационному обеспечению функций системы. В техническом проекте АСУ ТП находят отражение все принципиальные решения, касающиеся системы, определяются затраты на ее создание и эффективность, разрабатывается проектно-сметная документация, специальное математическое и информационное обеспечение. Состав документации технического проекта приведен в табл. 13.1.

Рабочий проект. Целью работ данной стадии является выпуск рабочей документации на создаваемую систему. Проектно-сметная документация выпускается в объеме, необходимом и достаточном для приобретения, монтажа и наладки КТС системы. Документация программного и организационного обеспечения дает возможность производить наладку и эксплуатацию АСУ ТП. Программы специального программного обеспечения выпускаются на машинных носителях. Состав документации рабочего проекта приведен в табл. 13.1. Как правило, в рабочий проект включают целый ряд документов, разработанных в техническом проекте и уточненных и детализированных при рабочем проектировании. В случае одностадийного проектирования в состав технорабочего проекта включаются почти все документы, приведенные в табл. 13.1.

В состав проектно-сметной документации, включаемой в раздел «Автоматизация технологических процессов» проекта промышленного строительства, если АСУ ТП создается в рамках строительства (реконструкции) предприятия, входят: ведомость документов проекта, пояснительная записка, описание постановок задач, схема функциональной структуры, схема организационной структуры, документация технического обеспечения, за исключением проектной оценки надежности комплекса технических средств, смета затрат, расчет экономической эффективности. При этом в общей пояснительной записке раздела проекта «Автоматизация технологических процессов» дополнительно освещаются вопросы, связанные с созданием АСУ ТП. В сводной смете на строительство предприятия учитываются все затраты на создание АСУ ТП, т. е. затраты на приобретение комплекса технических средств, его монтаж, разработку

Таблица 13.1

Наименование документа	Вид документации		
	ТП	ГП	ТПГ
Документация общесистемная			
Ведомость проекта	+	+	+
Опись частей и томов проекта	+	+	+
Опись документов тома	+	+	+
Ведомость эксплуатационных документов	—	+	+
Пояснительная записка	+	+	+
Расчет экономической эффективности	+	0	+
Патентный формуляр	0	—	0
Смета затрат	+	0	+
Общее описание АСУ ТП	—	+	+
Формуляр системы	—	+	+
Документация функциональной части			
Описание функциональной части	0	—	0
Схема функциональной структуры	+	+	+
Описание постановки задачи	+	—	+
Документация математического обеспечения			
Пояснительная записка	+	—	+
Описание алгоритма контроля и управления	+	—	+
Описание алгоритма функционирования системы	+	—	+
Описание алгоритма контрольной задачи	0	—	0
Техническое задание на программирование	+	—	+
Документация информационного обеспечения			
Описание информационного обеспечения	+	—	+
Описание организации информационной базы	0	+	+
Описание системы классификации и кодирования	0	0	0
Перечень входных сигналов и данных	+	—	+
Перечень выходных сигналов и документов	+	—	+
Описание массива информации	+	—	+
Чертеж формы документа (видеограммы)	+	—	+
Документация технического обеспечения			
Описание КТС (пояснительная записка)	+	+	+
Схема структурная КТС	+	+	+
Схема структурная вычислительного комплекса	+	+	+
Схема автоматизации	+	+	+
Схема принципиальная	—	+	+
Проектная оценка надежности КТС	+	—	+
План расположения	+	+	+
Чертеж общего вида	—	+	+
Таблица соединений и подключений	—	+	+
Схема соединений внешних проводов	—	+	+
Схема подключений внешних проводов	—	+	+
Чертеж установки технических средств	—	+	+
Ведомость оборудования и материалов	+	+	+
Заказная спецификация	—	+	+

Наименование документа	Вид документации		
	ТП	РП	ТРП
Перечень заявок на разработку новых технических средств	о	—	о
Перечень заданий на проектирование в смежных частях проекта	+	—	+
Технические требования к технологическому объекту управления	о	—	о
Задание на проектирование в смежных частях проекта	+	—	+
Документация организационного обеспечения			
Описание организационной структуры	+	+	+
Схема организационной структуры	+	+	+
Инструкция по эксплуатации	—	+	+
Технологическая инструкция	—	+	+
Должностная инструкция	—	+	+
Документация программного обеспечения			
Спецификация	—	+	+
Текст программы	—	+	+
Описание программы	—	+	+
Описание контрольного примера	—	о	о
Формуляр	—	о	о
Общее описание (описание применения)	—	о	о
Руководство программиста	—	+	+
Руководство оператора	—	+	+

Примечание. Сокращенно обозначены: ТП — технический проект; РП — рабочий проект; ТРП — технорабочий проект; «+» — документ обязателен; «о» — необходимость разработки документа определяется проектировщиком; «—» — документ не составляется.

АСУ ТП, включая разработку математического и программного обеспечения.

В состав эксплуатационной документации входят: общее описание АСУ ТП, чертежи форм документов (видеограмм), формуляр системы, ведомость эксплуатационных документов, технологические инструкции, должностные инструкции, инструкции по эксплуатации, ряд программных документов (формуляр, общее описание, руководство программиста и руководство оператора).

Ввод в эксплуатацию

Ввод в эксплуатацию — это чрезвычайно важный этап работы, включающий в себя подготовку объекта к внедрению АСУ ТП, наладку, опытную эксплуатацию, приемо-сдаточные испытания и сдачу АСУ ТП комиссии.

При подготовке объекта к внедрению АСУ ТП комплектуется система, выполняются строительно-монтажные работы, проводятся

организационно-технические мероприятия, связанные с внедрением системы, обучение ремонтного и эксплуатационного персонала, модернизация технологического оборудование. Выполнение работ на этой стадии фиксируется соответствующими актами.

В процессе наладки АСУ ТП налаживается комплекс технических средств системы, производится автономная отладка программ решения отдельных задач и отладка программы, реализующей общий алгоритм функционирования системы. Завершает этот этап комплексная наладка, предварительные испытания системы, корректировка эксплуатационной документации.

По окончании наладки система сдается в опытную эксплуатацию. В процессе опытной эксплуатации определяются эксплуатационные характеристики системы, дополнительно отлаживаются программы и технические устройства, корректируется документация. Опытная эксплуатация проводится по утвержденной программе.

Основным документом на данном этапе является журнал опытной эксплуатации, где находят отражение функционирование технических средств, программного обеспечения. Завершающим этапом являются приемо-сдаточные испытания системы, в ходе которых устанавливается соответствие системы требованиям технического задания. В отдельных случаях при создании типовой системы и необходимости последующего тиражирования выполняется также анализ функционирования системы, в ходе которого оценивается ее фактическая технико-экономическая эффективность, разрабатываются рекомендации по ее развитию.

На стадии «Ввод в эксплуатацию» разрабатывают следующие документы: акт приемки в опытную эксплуатацию, акт приемки в промышленную эксплуатацию, акт завершения работ, план-график работ, приказ о составе приемной комиссии, приказ о проведении работ, программа работ, протокол испытаний, протокол согласования.

Анализ функционирования

Анализ функционирования проводят в ходе промышленной эксплуатации АСУ ТП с целью получения объективных и систематизированных данных о качестве созданной системы и ее фактической эффективности.

Основное внимание уделяется экспериментально-статистическим исследованиям, в ходе которых собираются данные о технико-экономической эффективности АСУ ТП, функционально-алгоритмической развитости, эксплуатационной надежности. Результаты работ в виде научно-технического отчета, содержащего техническое заключение и рекомендации, используются для развития и совершенствования данной системы, а также разработки унифицированных и типовых проектных решений и повторного применения системы для аналогичных объектов.

Проектирование систем локальной автоматике

Проекты систем автоматизации технологических процессов (систем локальной автоматике) выполняются на основании и в соответствии с заданием на проектирование предприятия, с исходными данными и материалами, которые должны содержать: перечень производств, цехов, агрегатов, охватываемых проектом автоматизации, предложения по структуре управления объектом, по объему и уровню автоматизации, предложения по размещению центральных и местных пунктов управления, щитов и пультов, технологические схемы, перечни контролируемых и регулируемых параметров, необходимые требования к системе управления и пр.

Локальные системы автоматизации технологических процессов проектируются, как правило, в одну стадию рабочего проекта. Для впервые проектируемых систем автоматизации, систем автоматизации сложных технологических процессов проектирование осуществляется в две стадии: проект и рабочая документация.

В проекте намечаются и обосновываются основные технические решения по автоматизации: уровень автоматизации, основные технические средства, стоимость осуществления проекта.

В рабочей документации детально разрабатываются принятые технические решения и обеспечивают заказ и изготовление технических средств, необходимых для автоматизации.

Объем и содержание проекта автоматизации технологических процессов соответствует объему проектно-сметной документации АСУ ТП, относящемуся к системам локальной автоматике. Указанная документация включается в раздел «Автоматизация технологических процессов» общего проекта промышленного строительства или реконструкции.

§ 13.2. ПРЕДПРОЕКТНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Технико-экономическое обоснование

Технико-экономическое обоснование создания АСУ ТП (ТЭО АСУ ТП) разрабатывается на основе результатов предпроектных работ.

Документ ТЭО АСУ ТП состоит из введения и следующих разделов: характеристика объекта и существующей системы управления; цели, критерии и ограничения создания АСУ ТП; функции и задачи создаваемой АСУ ТП; ожидаемые технико-экономические результаты создания АСУ ТП; выводы и предложения.

Во введении указывается основание для проведения работ, наименование организации-разработчика и организаций-участников работ, сроки начала и окончания работ по созданию АСУ ТП, источники, объемы, порядок финансирования работ, перечень нормативно-технических документов, методических материалов, использованных при разработке ТЭО.

В разделе «Характеристика объекта и существующей системы управления» дается общая характеристика объекта, характеристика производственно-хозяйственной деятельности, организацион-

ной и производственной структуры объекта, описывается существующая система управления, ее структурные элементы, распределение функций управления между элементами организационной структуры, приводится характеристика функций управления, используемых методов и средств управления, дается перечень и характеристика недостатков в организации управления объектом, производится оценка производственных потерь, возникающих из-за недостатков в организации управления по объекту в целом и его частям, оценивается готовность объекта к созданию АСУ ТП. Особое внимание в этом разделе уделяется результатам анализа потерь сырья, материалов, энергии, затрат труда, простоев оборудования и оценке возможности их уменьшения. Подробно должна быть рассмотрена возможность сокращения численности работающих.

Раздел «Цели, критерии и ограничения создания АСУ ТП» содержит формулировку производственно-хозяйственных, научно-технических и экономических целей и критериев создания АСУ ТП, характеристику ограничений по созданию АСУ.

В разделе «Функции и задачи создаваемой АСУ ТП» приводятся обоснование выбора перечня автоматизированных функций и комплексов задач управления с указанием очередности внедрения, требования к качественным характеристикам реализации функций и задач управления, дополнительные требования к АСУ ТП, ее частям, учитывающие специфику объекта управления и создаваемой АСУ ТП.

Раздел «Ожидаемые технико-экономические результаты создания АСУ ТП» содержит перечень основных источников экономической эффективности, получаемой в результате создания АСУ ТП (например, экономия сырья и материалов, сокращение численности работающих и т. п.), оценку ожидаемых изменений основных технико-экономических, социальных показателей производственно-хозяйственной деятельности объекта (например, снижение себестоимости продукции, повышение рентабельности предприятия, улучшение условий работы). Приводятся также ожидаемые затраты на создание АСУ ТП с распределением их по очередям создания и по годам и ожидаемые обобщающие показатели экономической эффективности АСУ ТП.

В разделе «Выводы и предложения» содержатся выводы о производственно-хозяйственной необходимости и экономической целесообразности создания АСУ ТП, предложения по совершенствованию организации и управления и рекомендации по созданию АСУ ТП.

В рекомендациях по созданию АСУ ТП приводятся предложения по совместимости создаваемой АСУ ТП с другими АСУ и неавтоматизируемой частью существующей системы управления, по организационной и функциональной структурам системы, по составу и характеристикам подсистем и видов обеспечения, по составу организаций-разработчиков, источникам финансирования и рациональной организации создания АСУ ТП.

Техническое задание

Техническое задание (ТЗ) на создание АСУ ТП состоит из разделов: вводная часть, характеристика технологического объекта управления, назначение АСУ ТП, технико-экономические показатели АСУ ТП, требования к АСУ ТП, требования к заказчику по подготовке объекта, состав и содержание работ по созданию АСУ ТП, порядок ввода АСУ ТП в промышленную эксплуатацию.

В разделе «Вводная часть» указывается полное наименование системы, основание для проектирования, сроки начала и окончания работ, наименование организации — заказчика системы.

Раздел «Характеристика технологического объекта управления» должен содержать сведения о технологическом оборудовании, о технологическом процессе, регламенте и режиме работы объекта, о степени механизации и автоматизации.

Приводятся данные об используемых энергоресурсах, характеристики входного сырья, потребляемых материалов и готовой продукции. Раздел должен также содержать общие сведения о предприятии, на котором создается АСУ ТП, сведения об условиях эксплуатации, характеристиках помещений и особенностях технологического объекта управления и окружающей среды (пожаро- и взрывоопасность, наличие химически активной среды и т. п.).

В разделе «Назначение АСУ ТП» описываются цель и критерий управления (технико-экономический или технологический) или комплекс критериев, приводится перечень функций системы, обеспечивающих достижение сформулированных целей управления. Функции системы разбивают на информационные и управляющие, при необходимости включают функции защиты окружающей среды.

Приводится перечень функциональных задач, описывается место АСУ ТП в общей структуре управления, характеризуются этапы развития системы.

В раздел «Технико-экономические показатели АСУ ТП» включают ожидаемые технико-экономические показатели с указанием затрат на создание системы, годового экономического эффекта и источников его возникновения, коэффициента экономической эффективности затрат. Кроме того, в раздел могут включаться другие сведения, характеризующие технико-экономическую целесообразность создания системы.

Годовой экономический эффект представляет собой суммарную экономию всех производственных ресурсов (живого труда, материалов, капитальных вложений), которую получит народное хозяйство в результате внедрения АСУ ТП. Годовой экономический эффект от применения АСУ ТП рассчитывают по разности прибылей, получаемых потребителем после и до внедрения системы.

Раздел «Требования к АСУ ТП» содержит подразделы: требования к системе в целом, требования к качеству выполнения отдельных функций, требования к составным частям системы.

Подраздел «Требования к системе в целом» включает значения показателей надежности системы в целом и реализуемых ею

отдельных функций, указания о способе обмена информацией (автоматически, машинными носителями и пр.) со смежными системами управления, сведения по патентной чистоте. Приводятся также требования к необходимой степени унификации проектных и технических решений, эргономические требования к системе (способы и форма представления информации оперативному персоналу, рациональная компоновка технических средств, удобство обслуживания, комфортность пунктов управления и т. п.), требования к сохранности информации при авариях в системе энергоснабжения и других аналогичных случаях.

Надежность АСУ ТП определяется как способность системы выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей. Надежность АСУ ТП является комплексным свойством, включающим безотказность, ремонтпригодность и долговечность.

Надежность АСУ ТП оценивают по трем вариантам с учетом: 1) надежности только технических средств АСУ ТП; 2) надежности технических средств, особенностей программ и алгоритмов; 3) надежности технических средств, особенностей программ и алгоритмов, а также действий оперативного персонала.

Отказом функции АСУ ТП, подсистемы АСУ ТП или АСУ ТП в целом, учитываемом при оценке надежности АСУ ТП, является полная потеря способности системы выполнять эту функцию или нарушение хотя бы одного из требований, предъявляемых к качеству выполнения функции.

Требования к безотказности и ремонтпригодности устанавливают для отдельных функций АСУ ТП, подсистем или АСУ ТП в целом, а требования к долговечности — для отдельных подсистем или для АСУ ТП в целом.

Важнейшими показателями надежности АСУ ТП являются показатели безотказности и ремонтпригодности, которые устанавливают для всех АСУ ТП. В отдельных случаях могут устанавливаться также показатели долговечности.

Основными регламентируемыми показателями безотказности АСУ ТП могут быть параболка на отказ i -й функции T_i , j -й подсистемы $T_{пj}$, АСУ ТП в целом T_c , вероятность безотказного выполнения в течение заданного времени τ i -й функции — $P_i(\tau)$, j -й подсистемы $P_{пj}(\tau)$, АСУ ТП в целом — $P_c(\tau)$.

Основными регламентируемыми показателями ремонтпригодности АСУ ТП могут быть среднее время восстановления способности АСУ ТП к выполнению i -й функции $\bar{T}_{иi}$, среднее время восстановления работоспособности j -й подсистемы $\bar{T}_{пj}$ или АСУ ТП в целом $\bar{T}_{вс}$, а также вероятность восстановления в течение заданного времени τ способности АСУ ТП к выполнению i -й функции $F_{иi}(\tau)$, работоспособности j -й подсистемы $F_{пj}(\tau)$ или АСУ ТП в целом $F_{вс}(\tau)$.

В качестве комплексных показателей, характеризующих совместно ремонтпригодность и безотказность АСУ ТП, можно использовать коэффициент готовности по i -й функции $E_{иi}$, j -й подсистеме $E_{пj}$ и АСУ ТП в целом E_c , коэффициенты технического использования по i -й функции $K_{тi}$, j -й подсистеме $K_{тпj}$, АСУ ТП в целом $K_{тc}$ и коэффициенты оперативной готовности по i -й функции $K_{огi}$, j -й подсистеме $K_{огпj}$.

Для совместной характеристики безотказности, ремонтпригодности и эффективности функционирования АСУ ТП ее надежность можно характеризовать комплексными показателями, определяющими снижение технических или экономических результатов функционирования АСУ ТП из-за ее ненадежности, напри-

мер отношением соответствующего технико-экономического показателя при данном уровне надежности АСУ ТП к его максимальному значению в предположении абсолютной надежности системы. Основными показателями долговечности АСУ ТП является средний срок службы j -й подсистемы $T_{с.л.j}$ или АСУ ТП в целом $T_{с.л.}$.

Требования, предъявляемые к надежности АСУ ТП, к показателям надежности, а также методы оценки и контроля уровня надежности конкретно указываются в техническом задании и проектной документации в соответствии со специфическими особенностями АСУ ТП.

Подраздел «Требования к качеству выполнения отдельных функций» содержит подробную характеристику по каждой функции или функциональной задаче. По каждой информационной функции указывается периодичность и форма представления информации в каждом месте контроля, характер использования информации (оперативно-технологическая, учетная). По каждой управляющей функции приводятся режимы управления (информационно-советующий, прямого управления и пр.) и требования к качеству управления. Указывается необходимая точность и быстродействие выполнения каждой функции, требования одновременности выполнения группы функций.

Подраздел «Требования к составным частям системы» характеризует требования к техническому, программному, организационному и информационному обеспечению АСУ ТП. Предварительно формулируются требования к численности и квалификации оперативного и ремонтного персонала, к режиму его работы. В данном разделе в случае необходимости приводятся также дополнительные требования к системе.

Раздел «Требования к заказчику по подготовке объекта» содержит предварительный перечень основных работ по подготовке объекта к вводу в АСУ ТП и ее вводу в промышленную эксплуатацию, перечень мероприятий, обеспечивающих подготовку персонала, обслуживание системы и эффективную организацию работ по ее созданию. Весьма важными являются в данном разделе требования к технологическому оборудованию, в том числе по установке измерительной и регулирующей аппаратуры, необходимой для функционирования системы.

В разделе «Состав и содержание работ по созданию АСУ ТП» содержится план-график с указанием стадий и этапов, организаний-исполнителей, сроков выполнения, а также результатов и отчетных материалов по отдельным этапам создания системы. Приводится очередность внедрения системы и перечень функций, внедряемых в составе каждой очереди.

Раздел «Порядок ввода АСУ ТП в промышленную эксплуатацию» определяет виды испытаний системы (по ГОСТ 17195--76), а также в случае необходимости дополнительные требования к порядку проведения приемо-сдаточных испытаний.

К техническому заданию прилагаются материалы обследования предприятия и отчет о предпроектных научно-исследовательских работах, на основе которых проводится разработка АСУ ТП.

Техническое задание оформляют в соответствии с требованиями ГОСТ 2105—79 на форматах 11 по ГОСТ 2301—68 или А4 по СТ СЭВ 170—74 без рамки, основной надписи и дополнительных граф к ней.

§ 13.3. ДОКУМЕНТАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Общесистемная документация

Перечень документов технического проекта, содержащий наименование всех материалов и их коды, приводится в «*Ведомости документов технического проекта*». Ведомость заполняют по разделам — частям проекта АСУ ТП: общесистемная документация, документация функциональной части, документация технического обеспечения, документация информационного обеспечения, документация математического обеспечения, документация организационного обеспечения.

«*Пояснительная записка к проекту*» должна содержать разделы: основание для разработки, краткая характеристика объекта управления, проектные решения по АСУ ТП, состав проекта.

В разделе «Основание для разработки» приводят наименование объекта, на котором создается АСУ ТП, наименование документов, на основании которых ведется разработка АСУ ТП, дают перечень организаций, участвующих в разработке АСУ с указанием заказчика, головного разработчика и соисполнителей.

Раздел «Краткая характеристика объекта управления» содержит характеристику объекта управления и его основные технико-экономические показатели. В данном разделе приводятся данные об объеме, ассортименте выпускаемой продукции, численности персонала предприятия, структуре предприятия, технологическом процессе и организационной структуре управления. Описываются существующие системы автоматизации и приводятся их характеристики.

В разделе «Проектные решения по АСУ ТП» указывается перечень научно-исследовательских работ, использованных при разработке проекта, дается обоснование и краткая характеристика основных решений по функциональной и обеспечивающим частям АСУ ТП, приводится описание общих принципов функционирования и общий регламент функционирования АСУ ТП. Кроме того, приводятся сведения о соответствии показателей, характеризующих качество создаваемой АСУ ТП, установленным в техническом задании и сведения об обеспечении совместимости АСУ ТП с АСУ других уровней и других функциональных назначений.

Раздел «Состав проекта» содержит указания места нахождения основных проектных решений в соответствующих документах проекта АСУ ТП.

«*Смета затрат*» включает в себя все затраты на создание АСУ ТП и состоит из следующих разделов: пояснительная записка, сводная смета на создание АСУ ТП, объектные сметы и локальные сметы. В пояснительной записке дается общая характеристика за-

трат на создание АСУ ТП, приводятся источники для определения стоимости оборудования и отдельных работ по созданию АСУ ТП. Сводная смета содержит все затраты на создание АСУ ТП, разделенные по объектам строительства (например, здание вычислительного центра, внешние кабельные линии) и статьям затрат (подготовка эксплуатационных кадров, проектные и изыскательские работы, прочие затраты). Объектные сметы составляются на каждый объект строительства, локальные сметы — на каждый вид затрат по объектной смете (строительные работы, на приобретение и монтаж технических средств АСУ ТП и т. п.).

Стоимость пусконаладочных работ в смету затрат не включается.

Документ «Расчет экономической эффективности» содержит следующие разделы: исходные данные для расчета, расчет экономической эффективности системы, результаты расчета.

В разделе «Исходные данные для расчета» приводится ссылка на методику определения экономической эффективности, перечень факторов, обуславливающих повышение эффективности функционирования объекта управления при создании АСУ ТП, исходные данные, необходимые для расчета согласно принятой методике, ссылка на источники получения исходных данных, обоснование выбора базы для сравнения.

Раздел «Расчет экономической эффективности системы» содержит расчет затрат на создание АСУ ТП, расчет затрат на содержание и эксплуатацию системы, расчет ожидаемой экономии по основным технико-экономическим показателям и ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения АСУ ТП в целом, расчет коэффициента эффективности и срока окупаемости затрат.

Годовой экономический эффект рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = [(U_2 - C_2) - (U_1 - C_1)] - E_n(K_2 - K_1),$$

где U_1 и U_2 — годового объем реализации продукции в оптовых ценах предприятия до и после внедрения АСУ ТП, тыс. руб.; C_1 и C_2 — себестоимость годовой реализуемой продукции до и после внедрения АСУ ТП, тыс. руб.; K_1 и K_2 — капитальные вложения до и после внедрения АСУ ТП, тыс. руб.; E_n — отраслевой нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, руб./руб. (для средств вычислительной техники в легкой промышленности $E_n = 0,15$).

Годовой объем реализации продукции после внедрения АСУ ТП рассчитывается по формуле

$$U_2 = \sum_{q=1}^Q U_{1q} \gamma_q,$$

где U_{1q} — объем реализации q -го вида продукции до внедрения АСУ ТП, тыс. руб.; Q — количество видов или групп калькулируемой продукции; γ_q — коэффициент роста объема q -го вида продукции при внедрении АСУ ТП.

Себестоимость годовой реализуемой продукции после внедрения АСУ ТП рассчитывается по формуле

$$C_2 = C_1 + H_{доп} - \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i,$$

где $I_{доп}$ — дополнительные эксплуатационные затраты, связанные с функционированием АСУ ТП, тыс. руб.; $\sum_{i=1}^m \Delta_i$ — сумма экономий, достигаемых за счет

увеличения объема производства, сокращения расхода материалов и энергетических затрат, снижения затрат на текущий ремонт и содержание оборудования, повышения качества продукции, снижения потерь от брака, уменьшения численности обслуживающего персонала и пр.

В легкой промышленности основными факторами, обеспечивающими технико-экономическую эффективность АСУ ТП, являются снижение расхода материалов и повышение качества продукции:

$$K_2 - K_1 = K_{нпр} + K_n \pm K_b \pm K_{об} \pm K_c,$$

где $K_{нпр}$ — затраты на разработку АСУ ТП; K_n — прямые капитальные вложения, тыс. руб.; K_b — изменение стоимости действующих основных производственных фондов, тыс. руб. («+» — увеличение, «-» — уменьшение); $K_{об}$ — изменение величины оборотных средств, тыс. руб.; K_c — сопряженные капитальные вложения в смежных отраслях, тыс. руб.

Относительную экономическую эффективность АСУ ТП характеризует срок окупаемости затрат на АСУ ТП:

$$T_p = (K_2 - K_1) / [(U_2 - C_2) - (U_1 - C_1)],$$

представляющий собой отношение дополнительных затрат на разработку и внедрение системы к годовому приросту прибыли.

Величину дополнительной прибыли на 1 руб. затрат на АСУ ТП показывает коэффициент сравнительной экономической эффективности

$$E_p = [(U_2 - C_2) - (U_1 - C_1)] / (K_2 - K_1) = 1/T_p.$$

Нормативный коэффициент экономической эффективности на создание АСУ и внедрение вычислительной техники по легкой промышленности $E_{нвт}$ составляет 0,43. Рассчитанный коэффициент E_p должен быть равен или должен превышать нормативный, т. е. $E_p \geq E_{нвт}$, в этом случае создание АСУ ТП целесообразно, а система достаточно эффективна. Расчет экономической эффективности может также прилагаться к техническому заданию на создание АСУ ТП.

В разделе «Результаты расчета» приводятся: основные результаты по определению затрат на создание системы, на ее содержание и эксплуатацию, результаты расчета ожидаемого годового экономического эффекта от создания системы, коэффициента эффективности капитальных вложений, срока окупаемости затрат, сравнение расчетного коэффициента эффективности и срока окупаемости затрат с нормативными.

«План мероприятий по подготовке объекта к вводу АСУ ТП в эксплуатацию» содержит перечень основных работ, выполнение которых обеспечивает подготовку объекта к вводу системы в эксплуатацию. По каждой работе указываются ее содержание, характеристика, срок выполнения, организации-исполнители и форма завершения.

«Патентный формуляр» отражает результаты анализа разрабатываемой системы на патентную чистоту и составляется в соответствии с ГОСТ 2.110—68.

Документация функциональной части

В «Описании функциональной части» и «Схеме функциональной структуры» отражают основные проектные решения по функциям, выполняемым системой. Элементами схемы функциональной структуры являются условные обозначения функций системы, комплексов задач или задач, входящих в АСУ ТП. Условным обозначением является прямоугольник с соотношением сторон в $b = 1,5a$, где a (высота) принимается равной 20, 25, 30, 35 или 40 мм.

Элементами схемы могут быть, например, такие функции, как централизованный контроль, оптимизация, изменение уставок регулятора, выдача советов оператору, прямое цифровое управление и др. Поясняющие надписи на схеме отражают распределение функций по уровням управления, объектам, подразделениям и пр.

Распределение выполнения функций системы между отдельными уровнями функциональной структуры и между уровнями управления в значительной степени определяется организационной структурой АСУ ТП и структурой комплекса технических средств. Вместе с тем разумная декомпозиция сложных функций на типовые унифицированные задачи позволяет строить иерархическую функциональную структуру

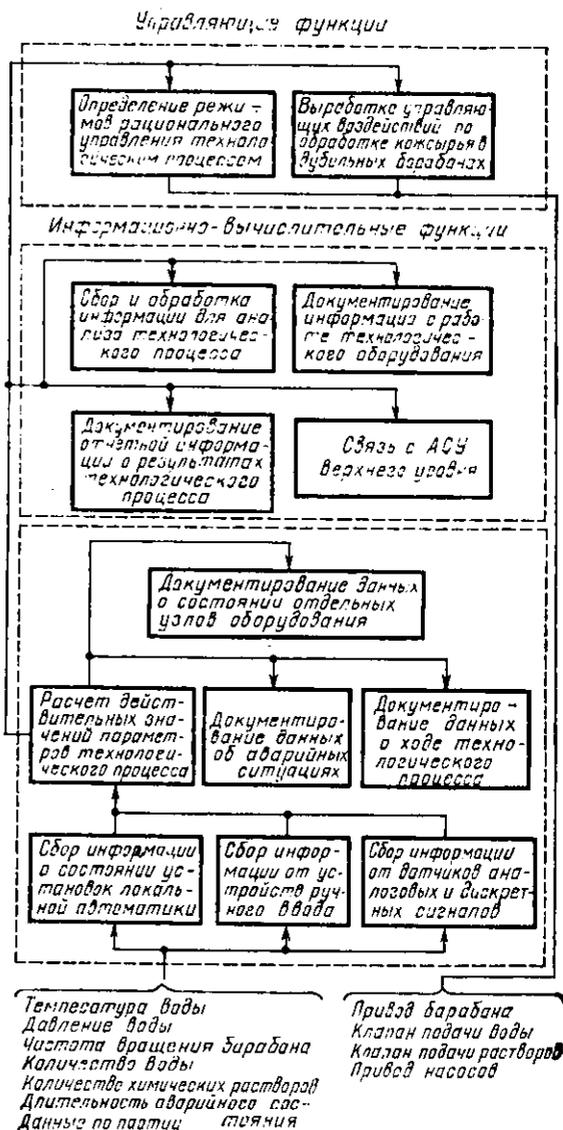


Рис. 13.1

АСУ ТП повышенной надежности с возможностью самостоятельного функционирования задач нижнего уровня и с резервированием функций нижнего уровня на следующем уровне. На рис. 13.1 показан пример схемы функциональной структуры (дублильное отделение АСУ ТП кожевенного производства, которое подробно рассматривалось в гл. 10).

В «*Описании функциональной части*» приводят цель создания АСУ ТП, функции разрабатываемой системы, перечень задач, входящих в АСУ ТП, описание схемы функциональной структуры и описание функционирования АСУ ТП в реальном масштабе времени.

В документах «*Описание постановки задачи (комплекса задач)*» общие цели и функции АСУ ТП детализируют применительно к комплексам задач или отдельным задачам. В документах приводят характеристику комплекса задач, выходную информацию и входную информацию. Как правило, в данные документы включается также «*Описание алгоритма*», входящее в документацию математического описания АСУ ТП.

В разделе «*Характеристика комплекса задач*» определяют цель, назначение, технико-экономическую сущность комплекса задач или задачи, обосновывают целесообразность его решения. Дают перечень и характеристику объектов управления, описывают использование выходной информации, периодичность решения и ограничения по длительности и времени выдачи выходной информации. Характеризуют требования к поступлению и обеспечению достоверности входной информации. Особое внимание уделяют требованиям к функционированию комплекса задач в пусковом и аварийном режимах, определяют условия, при которых прекращается решение комплекса задач автоматизированным способом. Описывают связь данного комплекса задач с другими комплексами задач АСУ ТП, используемые технические средства и распределение функций управления между персоналом и техническими средствами при различных ситуациях в решении данного комплекса задач.

Разделы «*Выходная информация*» и «*Входная информация*» содержат перечень и описание выходных и входных сообщений и сигналов.

В приложение включают чертежи форм документов, видеogramм и т. п. для входной и выходной информации.

Документация информационного обеспечения

Документ «*Описание информационного обеспечения АСУ ТП*» состоит из следующих разделов: принципы организации информационного обеспечения, организация сбора и передачи информации, построение системы классификации и кодирования, организация внутримашинной информационной базы, организация внешнемашинной информационной базы.

В разделе «*Принципы организации информационного обеспечения*» приводят состав, структуру и принципы организации инфор-

мационного обеспечения, обоснование выбора носителей данных и принципы распределения информации по типам носителей, описание принятых видов и методов контроля информации, описание решений, обеспечивающих информационную совместимость АСУ ТП с другими связанными с ней системами управления.

В разделе «Организация сбора и передачи информации» описываются способы сбора информации, состав и назначение входной, промежуточной и выходной информации.

Основная часть информации в АСУ ТП вводится автоматически от датчиков. Выходной информацией могут быть управляющие воздействия, выходные документы или видеограммы, позволяющие оператору вести процесс соответствующим образом. В разделе в случае необходимости может включаться схема информационных потоков, изображающая каналы, направление движения и функциональное назначение информации.

Разделы «Организация внутримашинной информационной базы» и «Организация внешнемашинной информационной базы» содержат описание принципов построения баз, их характеристик и объема. К внешнемашинной информационной базе относится совокупность всех документированных сведений (данных) и сообщений, используемых в АСУ ТП. К внутримашинной информационной базе относится совокупность всех данных на машинных носителях, сгруппированных по определенному признаку.

Документ «*Описание организации информационной базы*» составляется на внутримашинную и внешнемашинную информационные базы и содержит данные о составе и структуре информационных баз и организации их ведения.

Документ «*Описание системы классификации и кодирования*» содержит описание метода кодирования, структуру и длину кода, данные о системе классификации и другие сведения.

«*Чертежи форм документов (видеограмм)*» содержит изображения форм документов и видеограмм и необходимые пояснения.

Документ «*Описание массива информации*» — по каждому массиву внутримашинной информационной базы содержит наименование массива, обозначение массива, наименование носителя информации, перечень реквизитов в порядке их следования в записях, оценку объема массива и другие его характеристики.

Документ «*Перечень входных сигналов и данных*» содержит разделы: перечень входных сигналов и перечень входных данных. В разделе «Перечень входных сигналов» для каждого аналогового сигнала приводится наименование измеряемой величины, единицы измерения, диапазона изменения, необходимой точности и периодичности измерения, тип сигнала. Для каждого дискретного сигнала дается его наименование, разрядность, периодичность, тип сигнала. Для каждого сигнала типа «да — нет» (инициативного) указывается источник его формирования, тип сигнала (напряжение, ток, «сухой контакт»).

Документ «*Перечень выходных сигналов (документов)*» содержит перечень сигналов и перечень выходных документов. По вы-

ходным сигналам приводится их наименование, единицы измерения, диапазон изменения, способ представления, указывается пользователь информации.

По выходным документам дают их наименования, кодовые обозначения, перечень и значимость реквизитов и пользователей информации. На рис. 13.2 показана упрощенная схема информационных потоков комплекса задач контроля и управления процессами дублирования в АСУ ТП кожевенного производства, из которой становится ясно назначение основных документов по информационному обеспечению.

Документация технического обеспечения

Документ «*Описание КТС*» содержит разделы: общие положения, структура КТС, вычислительный комплекс, абонентские пункты, аппаратура передачи данных. В этот же документ самостоятельным разделом обычно включаются «*Схема структурная КТС*» и «*Схема структурная вычислительного комплекса*».

В разделе «*Общие положения*» должны быть приведены исходные данные, использованные при проектировании технического обеспечения АСУ ТП: предпроектные материалы, номенклатурные перечни заводов-изготовителей, руководящие материалы и др.

Разделы «*Структура КТС*» и «*Схема структурная КТС*», «*Схема структурная вычислительного комплекса*», а также схемы автоматизации являются основными материалами и отражают сущность принятых проектных решений.

В разделе «*Структура КТС*» приводится обоснование выбора структуры КТС, описание функционирования КТС, в том числе в пусковых и аварийных режимах, описание размещения технических средств на объектах управления и на производственных площадях с учетом выполнения требований техники безопасности и соблюдения технических условий эксплуатации, обоснование применения несерийных технических средств, обоснование методов защиты технических средств от механических, тепловых, электромагнитных и других воздействий, защиты информации при различных аварийных ситуациях. В разделе приводятся также результаты проектной оценки надежности КТС.

Структура КТС должна соответствовать функциональной и организационной структуре АСУ ТП. Обычно структура КТС представляет собой многоуровневую иерархическую структуру, на нижнем уровне располагаются измерительные преобразователи, исполнительные элементы, щиты управления локальной автоматики и устройства ввода-вывода информации, установленные непосредственно у оборудования и используемые оперативным персоналом АСУ ТП на нижнем уровне управления.

Следующий уровень предназначен для преобразования и обработки информации с целью решения более сложных функциональных задач. На данном уровне располагаются устройства связи с объектом, устройства ввода-вывода и отображения информации, средства вычислительной техники, щиты централизованного контроля и управления, аппаратура передачи данных на технические средства верхнего уровня.

В ряде случаев при значительном удалении вычислительного центра на данном уровне структуры организуются абонентские пункты, т. е. пункты подготов-

ки, сбора, регистрации информации и ее передачи на вычислительный комплекс, пункты получения обработанной информации, ее отображения и осуществления воздействия на объект управления. Абонентские пункты, как правило, не имеют в своем составе вычислительных устройств и используют для сложной обработки информации централизованный вычислительный комплекс. Технические средства данного уровня располагаются в отдельных помещениях — щитовых автоматки, пунктах управления участком, цехом и т. п. На верхнем уровне помещаются средства вычислительной техники, диспетчерские щиты с соответствующими устройствами подготовки данных, ввода-вывода информации и пр.

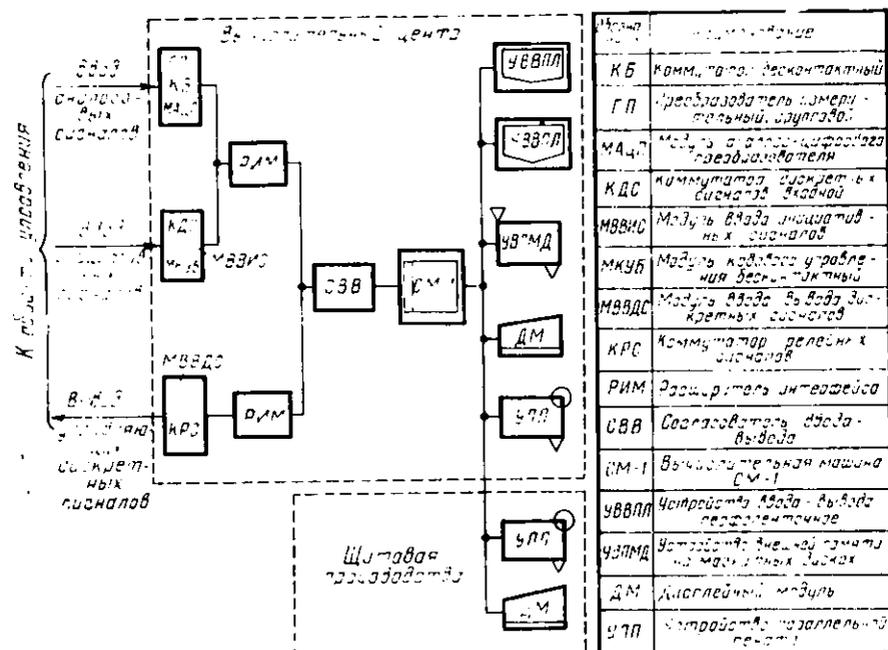


Рис. 13.3

Структура КТС изображается на структурной схеме, которая показывает состав комплекса технических средств и связи между отдельными техническими средствами или группами технических средств. Технические средства на схеме изображают в соответствии с ГОСТ 24.303—80, при этом приборы и средства автоматизации технологических процессов изображают так, как они изображаются на схемах автоматизации, т. е. в соответствии со стандартами системы проектной документации для строительства. Структурная схема КТС может быть представлена несколькими схемами, первой из которых является укрупненная схема в целом. В качестве примера на рис. 13.3 показана структурная схема КТС АСУ ТП дублирного отделения кожевенного производства.

В разделе «Вычислительный комплекс» приводятся обоснование и описание основных решений по выбору типа ЭВМ, описание

структурной схемы технических средств, размещенных в вычислительном центре (ВЦ), описание основных решений по выбору типов периферийных технических средств управляющего вычислительного комплекса (УВК), результаты расчета или расчет числа технических средств УВК, обоснование численности персонала, обеспечивающего функционирование УВК в пусковом, нормальном и аварийном режимах, принятая технология обработки информации.

Раздел «Абонентские пункты» в случае наличия содержит обоснование и описание решений по выбору технических средств абонентских пунктов и по выбору периферийных технических средств, т. е. средств получения, контроля, подготовки, сбора, регистрации, передачи, отображения информации и воздействия на объект управления. Кроме того, в данном разделе приводят расчет или результаты расчета по определению необходимого числа технических средств каждого абонентского пункта, обоснование численности персонала, необходимого для обеспечения функционирования каждого абонентского пункта, технические решения по оснащению рабочих мест оперативного персонала абонентских пунктов, описание особенностей функционирования абонентских пунктов в различных режимах работы.

В разделе «Аппаратура передачи данных» приводят: 1) обоснование и описание решений по выбору средств телеобработки и передачи данных, в том числе по выбору каналов связи; 2) решения по выбору технических средств, обеспечивающих сопряжение с каналами связи; 3) показатели надежности, достоверности и других технических характеристик средств телеобработки и передачи данных.

Схемы автоматизации являются техническим документом, отражающим характер автоматизации технологического процесса, оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации и их размещение. Рациональный уровень и объем автоматизации выбирают, исходя из особенностей технологического процесса и технико-экономической целесообразности.

Так, например, в кожевном производстве осуществляется автоматическое управление отмочно-зольными, дубильными и красильно-жировальными процессами, охватывающее приготовление, дозирование, подачу рабочих растворов и технологической воды, слив отработанных растворов и воды, режим движения аппарата, выполнение ручных операций (разгрузка, выгрузка, контроль полуфабриката и пр.), автоматический контроль и регулирование параметров при сушке кож, управление работой оборудования и пр. (см. также гл. 10, 11).

В производстве искусственных кож каландровым методом автоматизируются процессы транспортирования, дозирования, подачи и смешения компонентов, процессы каландрирования, желирования, отделки, сортировки, складирования готовой продукции и др.

При выборе средств автоматизации и размещении щитов и аппаратуры управления учитывают специфические особенности условий производственных помещений автоматизируемых производств. Так, для пожаро- и взрывоопасных помещений предприятий искусственных кож и пленочных материалов, для сырых помещений с наличием агрессивных жидкостей и паров кожевенных и меховых предприятий, как правило, применяют пневматические средства автоматизации, а щиты управления с основной аппаратурой выносят в отдельные щитовые с

нормальными условиями окружающей среды. При высоких требованиях к быстродействию и значительных расстояниях между приемниками и источниками сигналов используют электрические системы приборов. Гидравлические системы применяют в легкой промышленности сравнительно редко. В большинстве случаев применяют комбинированные (электропневматические или электрогидравлические) системы, когда для обработки информации используют электрические устройства, а для осуществления управляющего воздействия — регулирующие и исполнительные органы с пневмо- или гидроприводом.

Схему автоматизации технологических процессов выполняют в виде чертежа, на котором условными обозначениями изображают технологическую схему или агрегаты, подлежащие автоматизации, коммуникации, органы управления с исполнительными механизмами, отборные устройства, первичные и вторичные измерительные, преобразовательные и регулирующие приборы, аппаратуру управления и сигнализации, комплексные устройства (например, машины централизованного контроля), приборы и средства автоматизации, поставляемые комплектно с технологическим оборудованием.

Технологическое оборудование и коммуникации изображают упрощенно. Щиты, пульта, машины централизованного контроля и вычислительные машины изображают в виде прямоугольников в нижней части чертежа. Приборы и средства автоматизации изображают в месте их установки, причем устройства, механически связанные с конструкциями, встроенными в технологическое оборудование (например, исполнительные механизмы и регулирующие органы), должны изображаться на схеме в непосредственной близости к этим конструкциям.

Приборы и аппаратура, устанавливаемые по месту, но не связанные конструктивно с технологическим оборудованием, размещаются в прямоугольнике в нижней части чертежа. Устройства, устанавливаемые на щитах и пультах, изображают в соответствующих прямоугольниках в нижней части чертежа.

Для указания основных контролируемых и регулируемых величин, а также функциональных признаков приборов и регуляторов применяются буквенные обозначения, которые вписываются в верхнюю и нижнюю части изображения. Связь между приборами и аппаратурой указывается с помощью соединительных линий, на которых приводят пределы значений измеряемых и регулируемых параметров. В качестве примера на рис. 13.4 показана схема автоматизации дубильного отделения.

План расположения на стадии технического проекта определяет расположение пунктов управления и средств технического обеспечения, требующих специальных помещений или отдельных площадей для размещения. На плане обычно указывается расположение устройств управляющего вычислительного комплекса, щитов и пультов управления. На рис. 13.5 в качестве примера показан фрагмент плана расположения средств технического обеспечения АСУ ТП кожевенного производства (здесь 1 — щитовые, 2 — помещение вычислительного комплекса).

Документ «Перечень заявок на разработку новых технических средств» содержит наименования разработок с указанием их назна-

чения, наименования организаций-разработчиков, ориентировочные сроки и стоимость выполнения работ. Заявки на разработку оформляются в виде тематических карточек ТК-1 по ГОСТ 16084—75.

Документ «Ведомость оборудования и материалов» составляется по разделам: средства вычислительной техники, средства телемеханики, средства оргтехники, приборы и средства автоматизации,

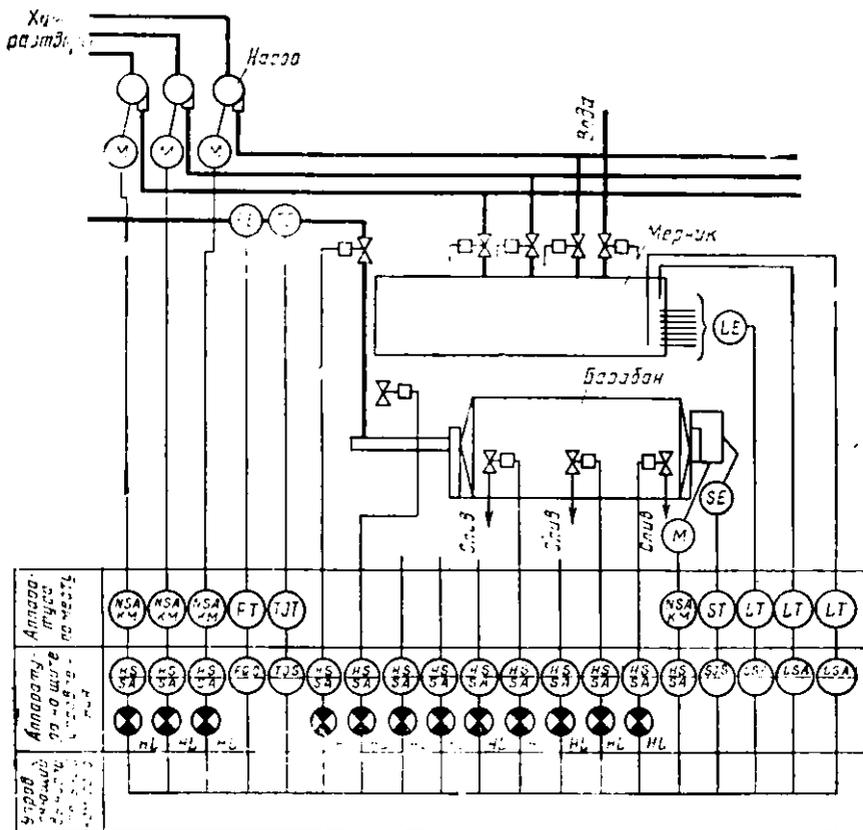


Рис. 13.4

электроаппаратура и т. д. В «Ведомость» включаются все технические средства, необходимые для функционирования АСУ ТП. В требуемых случаях выбор технических средств обосновывается расчетом. Ведомость должна в полном объеме содержать сведения, необходимые для составления смет на приобретение и монтаж средств технического обеспечения системы.

Документ «Технические требования к технологическому объекту управления» содержит требования по изменению, доработке и модернизации оборудования, связанные с установкой регулирующих органов, отборных устройств, датчиков и т. п.

Перечень заданий на проектирование в смежных частях проекта и сами задания составляют при необходимости выполнения проектных работ, связанных с созданием АСУ ТП, в смежных частях проекта.

Обычно создание АСУ ТП связано с дополнительными работами в строительной и санитарно-технической частях проекта (обору-

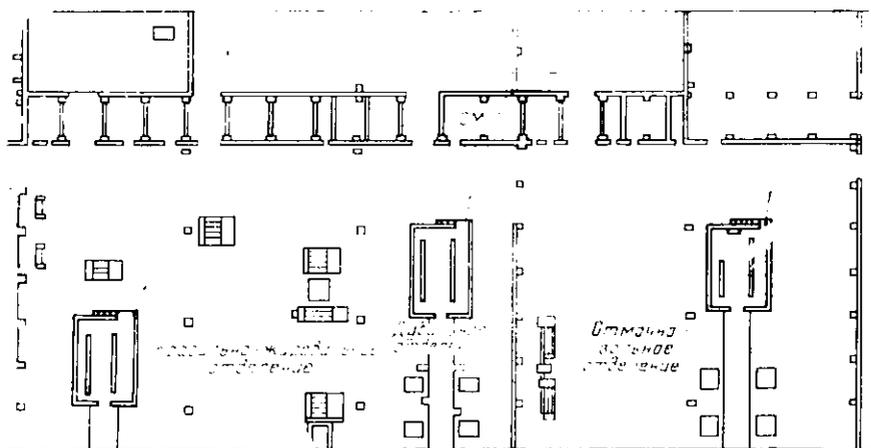


Рис. 13.5

дование помещений для размещения КТС и обслуживающего персонала), с дооснащением технологического оборудования и трубопроводов средствами автоматизации, с обеспечением технических средств энергоносителями (электроэнергией, сжатым воздухом), с проектированием средств связи и сигнализации и другими работами.

К помещениям залов вычислительных центров, в которых размещают вычислительные комплексы, предъявляются определенные требования. Высота помещений должна быть 3,6 м. В залах ЭВМ, как правило, должны быть съемные полы (фальшполы) для размещения кабелей и подачи кондиционированного воздуха к устройствам ЭВМ. Высота подпольного пространства должна быть не менее 200 мм. Помещения должны быть оборудованы системами вентиляции и кондиционирования. Отделка потолков и стен должна обеспечивать шумопоглощение. В помещениях ВЦ предусматривается автоматическое газовое пожаротушение. Помещение для ЭВМ не допускается размещать в подвале, смежно с производствами категорий А, Б и В или производствами с мокрыми технологическими процессами, а также над и под этими производствами.

При входах в зал ЭВМ должны быть тамбуры-шлюзы, оборудованные самозакрывающимися дверями. Через помещения машинных залов не должны проходить технологические трубопроводы и воздуховоды, в помещениях не должно быть вибрации и шума. Ми-

нимальную запыленность обеспечивают специальными мероприятиями (установкой фильтров в системах приточной вентиляции и кондиционирования и пр.).

Кроме машинных залов в составе ВЦ предусматриваются помещения руководства, подготовки данных, бюро технического обслуживания, бюро сопровождения задач и программирования, архив. Пример компоновки помещений ВЦ показан на рис. 13.6.

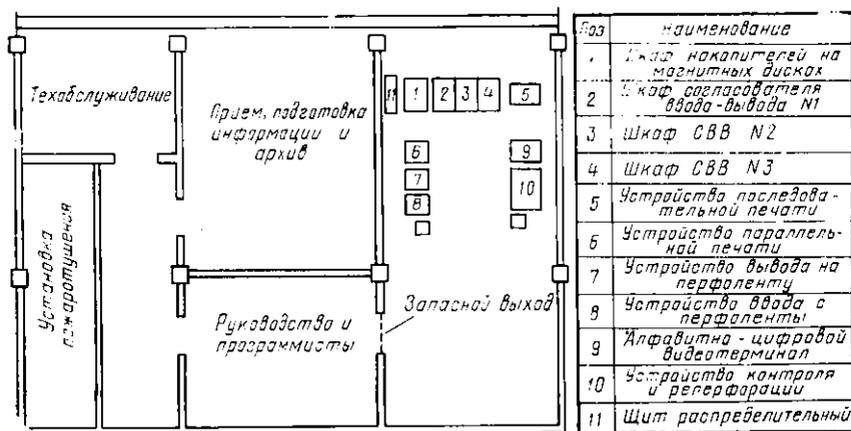


Рис. 13.6

Помещения для вычислительных центров проектируются в соответствии с СН 512—78 «Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин».

Документ «Проектно-оценка надежности комплекса технических средств» содержит исходные данные для расчета и результаты расчета. В качестве исходных данных используют паспортные или статистические данные технических средств по интенсивности отказов и восстановлению работоспособности, периодичность решения функциональных задач в АСУ ТП, перечень применяемых при решении задачи или выполнении соответствующей функции технических средств, структуру КТС, т. е. наличие резервирования, и др. Приводят также график загрузки технических средств, составляемый на основе данных о периодичности и длительности решения задач и используемых при этом технических средствах.

При расчете показатели надежности определяют отдельно по каждой функции или по группе функций. На основе графика загрузки отдельных устройств КТС определяют показатели надежности КТС в целом и при необходимости отдельных технических средств.

Показатели надежности, определяемые в данном документе, по своей номенклатуре и количественным значениям должны соответствовать требованиям технического задания на создание АСУ ТП.

Документация математического обеспечения

Документы «Описание алгоритма контроля и управления» составляют на комплексы задач или задачи и обычно включают в документ «Описание постановки задачи» документации функциональной части. Объем описания алгоритмов контроля и управления должен быть достаточен для составления рабочих программ и для определения требований к техническим средствам. Алгоритмы оформляют в виде схем в соответствии с правилами выполнения, предусмотренными ГОСТ 19.002—80, с использованием условных графических обозначений (символов) по ГОСТ 19.003—80.

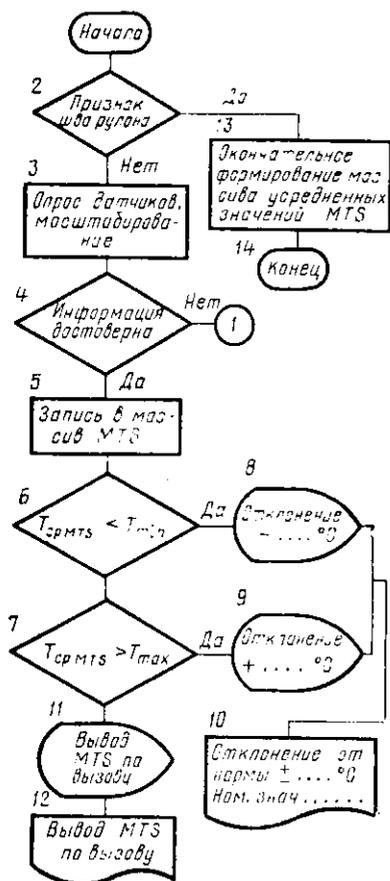


Рис. 13.7

(блок 10). Кроме этого, возможно по вызову вывести на видеотерминал и отпечатать текущие усредненные значения температур (блоки 11 и 12). По окончании данного рулона массив MTS передается для дальнейшего использования.

Документ «Описание алгоритма функционирования системы» увязывает в реальном времени отдельные алгоритмы контроля и управления и обеспечивает работоспособность, надежность и возможность развития системы. Особое внимание уделяется функционированию системы в пусковом, аварийном режимах и других сложных ситуациях. Алгоритм может оформляться в виде схем, таблиц, графа, текстового материала.

Объем документа «*Описание алгоритма контрольной задачи*» должен быть достаточным для разработки программ задач контроля правильности функционирования КТС.

«*Техническое задание на программирование*» содержит описание алгоритмов, указания о составе используемых технических средств, об языке программирования, операционной системе. Документ содержит также требования к точности, надежности, времени ожидания, длительности решения, перечень входных и выходных данных и документов (видеограмм) с указанием их форм.

Документация организационного обеспечения

Документация организационного обеспечения на стадии технического проектирования предназначена для описания изменений организационной структуры управления объектом, связанных с созданием АСУ ТП.

На «*Схеме организационной структуры*» указывают подразделения или должностных лиц, обеспечивающих функционирование АСУ ТП либо использующих при управлении информацию, полученную от АСУ ТП, а также связи между подразделениями и отдельными должностными лицами, указанными на схеме, и их соподчиненность. Эта схема отражает структуру управления объектом с соблюдением иерархии системы и взаимосвязей между пунктами контроля и управления. Построение рациональной системы управления является результатом анализа технологического процесса, транспортных, материальных и энергетических потоков.

Для большинства технологических процессов легкой промышленности, как уже указывалось, может применяться трехступенчатая иерархическая структура управления. На нижней ступени обеспечивается управление отдельными машинами, агрегатами, установками посредством местных систем контроля, автоматического управления и регулирования. Пункты нижнего уровня управления располагаются непосредственно у оборудования и оснащаются соответствующими техническими средствами: щитами и пультами контроля и управления, контрольно-измерительными приборами, регуляторами, аппаратурой управления и сигнализации.

На среднем уровне осуществляется управление отдельными производственными подразделениями: цехами, отделениями, имеющими общий технологический процесс. На этом уровне управления реализуется централизованный контроль, сбор и обработка информации. Наряду с традиционными средствами автоматизации применяют машины централизованного контроля, вычислительные машины, что облегчает труд оператора благодаря представлению информации в компактной и удобной форме.

Верхняя ступень системы управления предназначена для сбора и обработки информации, решения сложных взаимосвязанных задач управления, для диспетчеризации производства, а также для координации работы производственных и вспомогательных подразделений. Верхний уровень оснащается соответствующими техническими средствами — информационными и вычислительными комплексами, диспетчерскими щитами и другим оборудованием.

На рис. 13.8 в качестве примера показана укрупненная схема организационной структуры дубильного отделения АСУ ТП кожевенного производства.

При создании АСУ ТП одновременно со строительством (реконструкцией) предприятия или в случае разработки только систем ло-

кальной автоматикой в состав проектно-сметной документации в качестве документа, характеризующего изменения в организационной структуре, включают структурную схему управления.

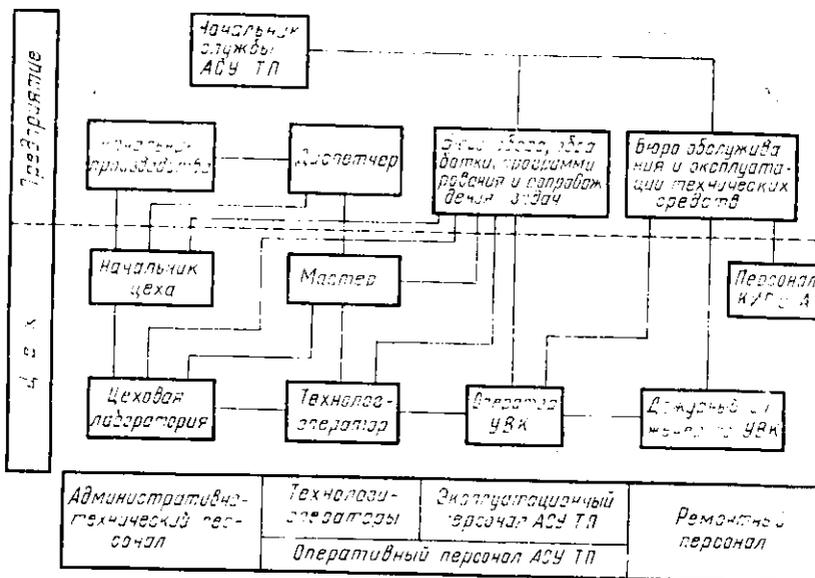


Рис. 13.8

Структурные схемы выполняются, как правило, на одном чертеже. При выполнении пункты управления и линии связи оперативного контроля и управления показываются условными обозначениями. Пункты управления, имеющие оперативные щиты, обозначают прямоугольниками, в верхней части которых дается наименование щита, в средней вписываются условные буквенные обозначения оперативных связей данного щита с другими щитами, постами и агрегатами, в нижней указывают наименование должностного лица, ответственного за работу данного участка. Технологическое оборудование изображают прямоугольниками, в верхней части которых дается наименование агрегата, в нижней — название отделения или участка, к которому эти агрегаты относятся. Если на оборудовании имеется оперативный рабочий пост, то в середине прямоугольника указывают наименование рабочего поста. Диспетчерскую обозначают кружком. Службы, не имеющие щитов контроля и управления, показываются кружками меньшего диаметра.

Пункты управления соединяются линиями связи, над которыми наносятся условные буквенные обозначения оперативных и диспетчерских связей. Стрелками на линиях связи указываются направление поступления информации, выдачи команд, распоряжений и т. п.

В качестве примера на рис. 13.9 показан фрагмент структурной схемы трехуровневого управления производством искусственной кожи. Обозначениями указаны основные функции управления, реализуемые в системе на различных уровнях.

Документ «Описание организационной структуры» состоит из разделов: изменения в организационной структуре управления объектом, организация подразделений, реорганизация существующих подразделений управления.

Раздел «Изменения в организационной структуре управления объектом» содержит проектные решения по изменению организационной структуры управления объектом и их обоснование, описание изменений во взаимосвязях между подразделениями.

Раздел «Организация подразделений» содержит данные по вновь организуемым подразделениям: описание организационной структуры и функций подразделений, создаваемых с целью обеспечения функционирования АСУ ТП, описание регламента работы этих подразделений, перечень категорий работников и число штатных единиц.

Раздел «Реорганизация существующих подразделений управления» содержит описание изменений, которые необходимо осуществить в действующих подразделениях управления объектом, т. е. в их организационной структуре, функциях, регламенте работы и составе персонала.

Создание АСУ ТП может быть связано с изменением характера работы целого ряда должностных лиц (технологов, диспетчеров и др.), с сокращением численности технологического персонала, обусловленным механизацией целого ряда функций контроля и управления и реорганизацией служб технического контроля. Для обеспечения функционирования АСУ ТП на предприятии должно быть организовано новое подразделение — отдел (или служба) АСУ ТП. Отдел создается в составе начальника отдела, заместителя начальника отдела, бюро обслуживания и эксплуатации технических средств и бюро сбора, обработки, программирования и сопровождения задач. Численность отдела АСУ ТП на стадии разработки документации — 13 человек, при функционировании АСУ ТП на базе одного управляющего вычислительного комплекса — 33 человека, на базе двух управляющих вычислительных комплексов — 40 человек. В состав отдела технологи-операторы, управляющие процессом в условиях функционирования АСУ ТП, не входят.

§ 13.4. ДОКУМЕНТАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЕКТА

Документация рабочего проекта АСУ ТП включает в себя общесистемную документацию, документацию информационного, технического, программного и организационного обеспечения.

Общесистемная документация

В общесистемную документацию рабочего проекта АСУ ТП входят ведомость документов рабочего проекта, ведомость эксплуатационных документов, общее описание АСУ ТП, смета затрат, формуляр системы и ведомость держателей подлинников.

«Ведомость документов рабочего проекта» содержит полный перечень рабочей документации АСУ ТП и составляется по окончании всех работ стадии рабочего проектирования.

В «Ведомость эксплуатационных документов» включают только те документы, которые необходимы при эксплуатации, а именно: чертежи форм документов, общее описание АСУ ТП, формуляр системы, технологические инструкции, должностные инструкции, инструкции по эксплуатации, формуляр программ, общее описание программ, руководство программиста и руководство оператора.

«Общее описание АСУ ТП» включает в себя разделы: название АСУ ТП, описание АСУ ТП, место АСУ ТП в системе управления объектом, связь АСУ ТП с другими системами управления.

«Общее описание АСУ ТП» содержит сведения, поясняющие и дополняющие проектную документацию с целью организации приобретения, монтажа и наладки комплекса технических средств, работ по вводу АСУ ТП в эксплуатацию, организации управления технологическим процессом и эксплуатации АСУ ТП. В случае необходимости в «Общее описание АСУ ТП» могут быть включены те или иные разделы «Пояснительной записки» технического проекта.

В разделе «Назначение АСУ ТП» приводится назначение системы и ее основные функции.

Раздел «Описание АСУ ТП» включает в себя описание АСУ ТП в целом и ее частей, перечень и краткое описание основных проектных решений, назначение каждой из основных частей системы (подсистемы, комплексов задач, комплекса технических средств, устройств и т. д.).

Раздел «Место АСУ ТП в системе управления объектом» показывает, на какие подразделения, объекты управления и функции управления распространяется действие АСУ ТП, т. е. характеризует комплексность охвата автоматизацией процессов управления.

В разделе «Связь АСУ ТП с другими системами управления» приводится перечень систем, с которыми связана разрабатываемая АСУ ТП, характеризуются связи между системами.

Документ «Смета затрат» выполняют на основе уточненных данных рабочего проекта. Общая стоимость работ по «Смете затрат» и стоимость отдельных видов работ (научно-исследовательские работы, капитальные вложения и др.) не может превышать стоимостей, предусмотренных сметой, утвержденной в составе технического проекта.

«Формуляр АСУ ТП» является документом, отражающим ход эксплуатации системы, и содержит разделы: основные параметры и технические характеристики АСУ ТП, сведения о состоянии технического обеспечения АСУ ТП.

В первом разделе приводят общие указания по эксплуатации системы, основные технические данные и комплектность АСУ ТП, перечень эксплуатационной документации. Второй раздел заполняют в ходе эксплуатации системы сведениями о рекламациях, данными по учету работы АСУ ТП, по учету неисправностей, сведениями о проведении проверок измерительных устройств, о профилактических работах, о ремонте устройств, об изменениях схем и программного обеспечения.

Документация информационного обеспечения

Документация информационного обеспечения на стадии рабочего проектирования содержит уточненные документы технического проекта: «Описание организации информационной базы» и «Описание системы классификации и кодирования».

Документация технического обеспечения

На стадии рабочего проектирования наибольший объем работ приходится на документацию технического и программного обеспечения.

Документацию технического обеспечения включают в состав проектной документации на строительство (реконструкцию), если АСУ ТП создается одновременно со строительством предприятия.

Правила выполнения указанной документации в основном аналогичны как в случае создания АСУ ТП, так и в случае, если осуществляется проектирование только систем локальной автоматизации.

Схемы автоматизации и структурная схема комплекса технических средств отражают уточненные проектные решения и выполняются в соответствии с изложенными ранее правилами.

В *принципиальных электрических схемах* регулирования, управления и сигнализации реализуют технические решения, предусмотренные схемами автоматизации. На принципиальных электрических схемах изображают аппаратуру, устройства и их части, предназначенные для осуществления функций управления, регулирования, защиты, измерения и сигнализации, со связями между ними. Принципиальные электрические схемы выполняют в соответствии с действующими стандартами и нормами.

На принципиальных электрических схемах систем автоматизации в общем случае должны изображаться:

цепи электропитания, управления, сигнализации, измерения, регулирования, силовые цепи;

контакты аппаратов данной схемы, занятые в других схемах, и контакты аппаратов из других схем;

диаграммы и таблицы включений контактов переключателей, программных устройств, конечных и путевых выключателей, циклограммы работы аппаратуры;

поясняющая технологическая схема, циклограмма работы оборудования, схема блокировочных зависимостей работы оборудования;

необходимые пояснения и примечания.

В зависимости от сложности проектируемого объекта указанные различные цепи могут изображаться на одном листе или на нескольких либо для каждого вида цепей разрабатываются отдельные схемы. Обычно принципиальные электрические схемы управления, сигнализации, измерения и регулирования, питания разрабатывают в виде отдельных схем.

Принципиальные электрические схемы могут выполняться совмещенным и разнесенным способами. При совмещенном способе аппаратура изображается в собранном виде. Совмещенным способом выполняют обычно схемы контроля и регулирования, а также схемы сложных систем, включающих в себя различные комплектные устройства (регулирующие и измерительные приборы, вычислительные и информационные технические средства и т. п.).

При разнесенном способе изображения устройства расчленяют на элементы, которые соединяются между собой в порядке протекания тока, образуя отдель-

ные цепи. Разнесенным способом изображают обычно электрические схемы питания, управления, сигнализации.

В некоторых случаях целесообразно выполнять на схеме ряд устройств со-вместным (например, реле времени, программные устройства), а ряд — разне-сенным способом. Элементы схем должны иметь буквенно-цифровые обозначения.

Элементы коммутирующих устройств (реле, кнопки, переключатели) изобра-жают на схеме в отключенном положении при отсутствии напряжения во всех цепях и временных механических воздействий на контакты.

Переключатели, не имеющие отключенного состояния, изображают на схеме в одном из положений, принятом за исходное. Контакты позиционных регули-рующих устройств приборов, измеряющих технологические параметры (темпера-туру, уровень), показывают в положении, соответствующем номинальному зна-чению этих параметров.

Для маркировки цепей применяют цифровую систему, состоящую из ряда последовательных чисел. Для удобства чтения схем и последующей их эксплуа-тации рекомендуется электрическим цепям различного назначения присваивать определенные группы цифр (цепи управления, регулирования, измерения — 1—399, 1001—1399, 2001—2399 и т. д., цепи сигнализации — 400—799, 1400—1799, 2400—2799 и т. д., цепи питания — 800—999, 1800—1999, 2800—2999 и т. д.).

На чертеже приводят перечень элементов, использованных в схеме, и указы-вают их техническую характеристику.

В принципиальных электрических схемах питания предусматривают обеспе-чение электроэнергией вычислительных устройств, приборов, регуляторов и дру-гой электрической аппаратуры. При разработке схем обеспечивают надежное снабжение оборудования электроэнергией и оперативное отключение отдельных приборов и участков цепи, необходимое для нормальной эксплуатации, ремонта, наладки аппаратуры. Схема питания содержит элементы защиты приборов, ап-паратуры и сети от короткого замыкания и перегрузок.

На принципиальных электрических схемах питания показывают источники питания (выпрямители, трансформаторы, стабилизаторы), аппаратуру защиты и отключения (предохранители, автоматические выключатели), аппаратуру контро-ля напряжения линии вводов от источников питания, отводы к потребителям (приборам, щитам, пультам) с указанием названия электроприемников, мощно-сти, напряжения и места установки. Все цепи снабжаются поясняющими надпи-сьями. Схемы питания разрабатывают по производственному признаку (цех, уча-сток и т. п.) и выполняют для каждого щита (сборки) питания отдельно.

В зависимости от требуемой надежности системы электропитания выполня-ются без резерва, с ручным включением резерва (РВР), с автоматическим вклю-чением резерва (АВР). Наиболее надежные схемы питания, например систем автоматического пожаротушения управляющих вычислительных комплексов, должны иметь не менее двух самостоятельных независимых источников питания и АВР. Для систем питания без резерва допускается иметь один источник пита-ния. В случае особых требований к надежности питания предусматривают пита-ние от аккумуляторных батарей.

Для питания управляющих вычислительных комплексов в ряде случаев при-меняют систему мотор-генератор, обеспечивающую стабильность питающего на-пряжения, отсутствие резких скачков напряжения при отключении основного питания и включении резерва. Кроме того, при полном отключении напряжения система мотор-генератор за счет механической инерции продолжает питать элект-роэнергией УВК в течение некоторого времени, достаточного для выполнения аварийной перезаписи информации на машинные носители (магнитные диски, ленты), обеспечивающие ее сохранность.

От короткого замыкания и длительных перегрузок цепи защищают в соот-ветствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ). Для защиты и от-ключения отдельных цепей применяют автоматические выключатели, пакетные выключатели и плавкие предохранители. В цепях нулевых проводов запрещается устанавливать выключатели и предохранители.

Ток уставки теплового расцепителя выбирают равным номинальному току, номинальный ток плавкой вставки в 3 раза, а номинальный ток уставки элект-ромагнитного расцепителя в 4,5 раза больше номинального тока цепи. Как пра-вило, питание осуществляется напряжением 220 В переменного тока. При необхо-

димости питания пониженным напряжением переменного тока устанавливают трансформаторы, а при необходимости питания постоянным током -- выпрямители.

Электрическую мощность, требуемую для питания систем автоматики, определяют по номинальной мощности отдельных устройств с учетом коэффициентов одновременности работы.

Для нормальной работы систем автоматики обычно предусматривают контроль наличия напряжения в цепях управления, осуществляемый с помощью реле напряжения и сигнальных ламп, подключаемых к питающим шинам.

При выполнении *принципиальных пневматических и гидравлических схем* должны учитываться требования ГОСТ 2704--77 «Правила выполнения гидравлических и пневматических схем». Принципиальные пневматические схемы составляют аналогично электрическим схемам. Как правило, схемы контроля и регулирования выполняют совмещенным способом, а схемы управления и сигнализации -- разнесенным. На схемах показывают всю пневмоаппаратуру, приборы с пневматической передачей, пневматические исполнительные механизмы. В случае применения комбинированных систем управления (электропневматических) электрические и пневматические схемы выполняют раздельно.

Принципиальные пневматические схемы питания предусматривают обеспечение пневматических приборов, регуляторов и пневмоаппаратуры очищенным и осушенным воздухом определенного давления, обычно 137 кН/м².

Воздух для подачи в приборы подготавливают следующим образом. Выходящий из компрессора воздух пропускается через конденсатор-холодильник, масляный фильтр, специальную установку осушки воздуха с силикагелевым или алюмогелевым адсорбентом, дополнительный фильтр и поступает в воздухохраник, создающий кратковременный запас сжатого воздуха и сглаживающий возможные пульсации давления. Затем воздух подается к местам потребления (щиты, пульты и пр.), групповым регулятором его давление снижается до определенной величины (обычно до 196 кН/м²), далее воздух через индивидуальные фильтры и редукторы поступает к приборам и регуляторам.

При составлении схем питания определяют требуемую производительность источника питания

$$Q = Q_p + Q_n,$$

где Q_p -- суммарный расход воздуха на все приборы и регуляторы по паспортным данным, м³/ч; Q_n -- потери сжатого воздуха в аппаратуре, трубопроводах, на продувку линий.

Потери обычно составляют около 20% полезной нагрузки.

Емкость воздухохраника должна обеспечивать запас воздуха на 15 мин работы пневматической системы или на 1 ч в случае пожаро- и взрывоопасного объекта автоматизации.

Щиты и пульты систем автоматизации технологических процессов, а также стative (стойки с объемным или плоским каркасом) и вспомогательные элементы изготавливают в соответствии с ОСТ 36.13--76.

Щиты, пульты и стative применяются в качестве устройств, на которых устанавливаются электрические, пневматические и гидравлические приборы и аппаратура контроля и управления, регулирования и питания. Щиты и пульты выполняют функции постов управления и используются в АСУ ТП на нижних уровнях управления для контроля процесса, управления объектом, наблюдения за работой систем автоматизации. На фасаде щитов устанавливают основные контрольно-измерительные и регулирующие приборы, командную аппаратуру дистанционного управления и сигнализации. На крышке пульта устанавливают аппаратуру управления и сигнализации. Щит или пульт управления может снабжаться мнемосхемой, облегчающей восприятие информации и упрощающей управление процессом.

Релейную и вспомогательную аппаратуру размещают внутри щитов или на стativeх. Щит, пульт или стative подключают к внешним цепям с помощью клеммников и переходных трубных соединений. Внутренний монтаж щитов, пультов и стativeв выполняют медными изолированными проводами, стальными, медными или пластмассовыми трубками. Концы проводов и трубок имеют маркировку, соответствующую маркировке на принципиальной схеме.

Чертежи общих видов щитов, пультов и стивов разрабатывают в качестве задания заводу-изготовителю или монтажно-заготовительной мастерской.

Чертежи общих видов щитов, стивов, пультов разрабатываются на единичные и составные щиты. Под единичным щитом понимается щит, стив или пульт по номенклатуре, предусмотренной ОСТ 36.13—76, кроме вспомогательных элементов (за исключением декоративных панелей с мнемосхемой). Составным является щит, выполненный из нескольких единичных щитов и вспомогательных элементов. Чертеж общего вида единичного щита содержит вид спереди (фронтальную плоскость), вид на внутренние плоскости, технические требования, таблицу надписей на табло и в рамках, таблицы для монтажа электрических и трубных проводок, перечень составных частей, основную надпись и дополнительные графы. В случае если щит или пульт имеет мнемосхему, ее чертеж выполняется отдельно.

Чертеж общего вида составного щита содержит вид спереди (фронтальную плоскость), перечень составных частей. На виде спереди единичного щита показывают приборы, средства автоматизации, элементы мнемосхемы, проставляют габаритные размеры щита и размеры, координирующие установку всех приборов и средств автоматизации.

На виде спереди составного щита проставляют только общие габаритные размеры этого щита. Габаритные размеры единичных щитов, входящих в составной щит, а также приборы и средства автоматизации, расположенные на фронтальной плоскости единичных щитов, на чертеже не указывают.

Из виде на внутренние плоскости указывают расположение приборов, аппаратов, блоков зажимов, реек, а также потоков электрических и трубных проводок на передних, боковых стенках и поворотных рамках.

Для монтажа электрических и трубных проводок выполняют таблицы соединений и таблицы подключений на отдельных листах формата И.

В таблице соединений для каждого соединения (провода или трубки) указывают его маркировку, какие контакты или штуцера и каких устройств оно соединяет, данные провода или трубки. В таблице подключений указывают все проводники, подключаемые к данному устройству.

Перечень составных частей выполняется на отдельных листах формата И и содержит наименование и техническую характеристику элементов, приведенных на чертеже.

В перечень составного щита включают входящие в него единичные щиты и вспомогательные элементы, в перечень единичного щита входят детали, стандартные изделия (щитовые конструкции и т. п.), прочие изделия (приборы, электроаппаратура и т. п.), материалы (трубы, провода).

Щиты и пульты могут быть установлены как в производственных помещениях, в непосредственной близости от оборудования, так и в отдельных щитовых. В производственных помещениях устанавливают шкафные щиты, в щитовых могут устанавливаться щиты открытого исполнения. Щитовые помещения изолируются от производственных и имеют приточную вентиляцию, благодаря чему в них создаются нормальные условия для работы средств автоматизации.

В производственных помещениях с неблагоприятными условиями применяют специальные способы уплотнения щитов и пультов, используют поддув воздуха внутрь щитов для предохранения аппаратуры от вредного влияния среды. При установке щитов в производственных помещениях должно обеспечиваться удобство эксплуатации. Попадание на щиты воды, пара, газов, кислот и других жидкостей должно быть исключено.

Схемы соединений внешних проводок, как правило, выполняют в виде общих комбинированных схем, на которых показывают как электрические, так и трубные проводки, прокладываемые вне щитов между отдельными приборами, средствами автоматизации и щитами автоматизируемой установки. Схемы внешних проводок выполняют не в масштабе.

На схеме внешних электрических и трубных проводок условными обозначениями в виде монтажных символов показывают щиты, пульты, местные пункты контроля и управления, внешитовые приборы и средства автоматизации, соединительные и протяжные коробки, электрические и трубные проводки, присоединения электрических и трубных проводок к щитам, пультам, приборам и т. п.

Над или под условными обозначениями отборных устройств, датчиков и дру-

гих элементов, установленных вне щитов, в таблице указывают наименование измеряемого параметра, место отбора импульса, позицию и номер типового чертежа, по которому устанавливается отборное устройство.

Все электрические и трубные соединения маркируются. Трубным проводкам присоединяют порядковые номера с добавлением перед ним индекса 0—01, 02 и т. д. На каждом соединении указывают количество и марки кабелей, проводов, труб, их длину. Указывают также марки защитных труб, коробов, лотков.

Электрические соединения выполняют проводами, проложенными в защитных трубах (водогазопроводных, стальных бесшовных, полиэтиленовых) и коробах, контрольными кабелями, проложенными открыто по стенам на конструкциях, в лотках или каналах. Электрические соединения, как правило, выполняются алюминиевыми проводами и кабелями с алюминиевыми жилами. Применение медных проводов и кабелей с медными жилами допускается в ограниченных случаях (измерительные цепи, взрывоопасные помещения и пр.).

Трубные проводки выполняют в основном полиэтиленовыми и полихлорвиниловыми трубами и многотрубными пневмокабелями, а также в обоснованных случаях водогазопроводными, стальными бесшовными и медными трубами.

Перечень элементов (кабели, провода, трубы и пр.) к схеме внешних электрических и трубных проводок выполняют на отдельном листе.

Схема подключения внешних проводок показывает подключение внешних проводок (кабелей, проводов, труб) к вводным устройствам (сборкам зажимов, штепсельным разетам и пр.) щитов, пультов, соединительных коробок и пр. Схема подключения внешних проводок не выполняется, если эти подключения показаны на схеме соединения внешних проводок. Для выполнения соединений отдельных устройств УВК выполняют схему соединений и кроссовую ведомость, в которых указывают данные всех соединительных жгутов и их подключение к вводным устройствам.

На *плане расположения средств технического обеспечения* в общем случае показывают контуры зданий объекта, технологическое оборудование и основные технологические трубопроводы, отборные устройства, первичные приборы и регулирующие органы, расположенные на технологическом оборудовании и трубопроводах, приборы, регуляторы и другое оборудование, устанавливаемое вне щитов, щиты и пульты управления, средства вычислительной техники, соединительные и протяжные коробки, электрические и трубные проводки и конструкции, на которых они прокладываются. Внутри контуров помещений указывают класс пожаро- и взрывоопасных помещений (в которых предусматривается прокладка проводок), смежных с ними помещений, категории и группы взрывоопасных смесей и наименования взрывоопасных газов и паров. Элементы здания и технологическое оборудование показывают упрощенно, а отборные устройства, первичные приборы, проводки и другие элементы систем автоматизации — условными обозначениями. Элементы средств автоматизации и проводки обозначают в соответствии со схемой внешних проводок. Потоки электрических и трубных проводок на чертеже координируют, дают сведения о способе прокладки всех проводок (в лотках, в полу, в трубах и т. п.).

Планы расположения средств технического обеспечения в щитовых помещениях, центральных пунктах управления, вычислительных центрах и т. п. выполняются, как правило, на отдельном чертеже. Планы расположения выполняются в масштабе 1 : 100 или 1 : 50.

Документация программного обеспечения

Рабочая документация программного обеспечения предназначена для обеспечения разработки, сопровождения и эксплуатации программ (текст программы, описание программы, спецификация, описание применения, руководство программиста, руководство оператора, формуляр) и для проверки работоспособности программы (описание контрольного примера).

Перечень программ включает в себя все общие и специальные программы, их наименования, обозначения и др.

Документы *«Текст программы»* и *«Описание программы»* характеризуют результат разработки программного обеспечения и включают в себя рабочие программы в виде текстовой распечатки, функциональное назначение, схемы программ, описание логики, сведения о языке программирования, описание входных и выходных данных. Схемы программ выполняются по ГОСТ 19.002—80 с условными обозначениями по ГОСТ 19.003—80. К документации прилагают программы на машинных носителях.

В *«Спецификацию»*, составляемую на каждую программу, включают перечень документации на данную программу и перечень входящих программ (например, пакетов прикладных программ, используемых в данной программе).

В документе *«Описание контрольного примера»* приводятся назначение, т. е. краткая характеристика функций из числа реализуемых программой, проверяемых данным контрольным примером, исходные данные для проверки программы и результаты расчета. Кроме этого, дают указания по проверке программы, т. е. описывают состав необходимых технических средств, процедуры формирования исходных данных и проведения расчета с помощью программы, описывают действия оператора при проверке программы на контрольном примере. Исходные данные для контрольного примера на машинном носителе обычно прилагают к документу.

Документы *«Общее описание»*, *«Руководство программиста»* и *«Руководство оператора»* являются эксплуатационной документацией и используются при функционировании системы.

Документ *«Общее описание»* содержит наименование, назначение, область применения, состав и функциональную характеристику комплекса программ, класс решаемых задач и методы их решения, состав входной и выходной информации, минимальную конфигурацию необходимых технических средств, данные о системе математического обеспечения, на базе которой функционирует данный комплекс программ. Кроме этого, в данный документ обычно входят *«Руководство системного программиста»*, *«Руководство программиста»* (характеристика программ, особенности их эксплуатации, специальные сведения).

Документ *«Руководство оператора»* содержит инструкцию по эксплуатации программ, в том числе правила распределения внешних устройств и вариантов их применения, перечень действий оператора, перечень сообщений оператору в процессе работы программы с указанием текстов сообщений, их расшифровки и необходимой реакции оператора на сообщения.

«Формуляр» является сопроводительным документом, составляется на каждую программу и содержит ее краткую техническую характеристику, комплектность, сведения об эксплуатации (результаты периодического контроля основных характеристик, учет рекламаций и отказов) и о проведенных изменениях.

Программные документы разрабатываются в соответствии с ГОСТ 19.101—77 и другими Единой системы программной документации (ЕСПД).

Документация организационного обеспечения

Рабочая документация организационного обеспечения является эксплуатационной документацией и предназначена для описания действий персонала по обеспечению функционирования АСУ ТП (технологическая инструкция, инструкция по эксплуатации) и для установления функций, прав и обязанностей должностных лиц по обеспечению функционирования АСУ (должностная инструкция).

«*Технологические инструкции*» содержат сведения о порядке и последовательности выполнения операций технологического процесса обработки данных. Состав технологических инструкций зависит от технологии обработки данных, принятой в АСУ ТП. Технологические инструкции могут, например, составляться на передачу информации по каналам связи, по переносу информации на машинные носители, на порядок передачи выходной информации и т. д.

«*Инструкции по эксплуатации*» содержат сведения, необходимые для выполнения работ персоналом АСУ ТП, и могут составляться на систему в целом, подсистемы, комплексы задач и задачи, отдельные виды оборудования для каждого исполнителя или группы исполнителей. Так, инструкция по эксплуатации АСУ ТП содержит сведения о системе (назначение, функции, регламент работы и пр.), указания о мерах по технике безопасности, о порядке работы персонала, о порядке проверки правильности функционирования технических средств с указанием основных видов неисправностей и мер по их устранению. Особое внимание уделяется правилам технической эксплуатации и действиям персонала при предаварийном и аварийном состоянии объекта управления.

В инструкции приводится описание работ и последовательность их выполнения с указанием приборов, инструмента, специального оборудования и приемов пользования им. Кроме того, приводятся сведения о составе и квалификации эксплуатационного персонала и его функциях. Указывается порядок и правила передачи системы при сменном обслуживании.

«*Должностные инструкции*» содержат сведения о правах и обязанностях должностных лиц по обеспечению функционирования АСУ ТП и описание действий должностных лиц в процессе функционирования АСУ ТП и при различных нарушениях этого процесса. Должностные инструкции составляются для всех категорий работников, предусмотренных организационной структурой АСУ ТП.

§ 13.5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Повышение эффективности АСУ ТП и систем локальной автоматизации, сокращение сроков разработки, повышение производительности труда проектировщиков и качества документации достигается внедрением систем автоматизированного проектирования АСУ ТП — САПР АСУ ТП.

САПР — это организационно-техническая система, состоящая из комплекса технических средств автоматизации проектирования,

взаимосвязанного с подразделениями проектной организации, и выполняющая автоматизированное проектирование.

САПР АСУ ТП включает в себя систему исследования, моделирования и оптимизации (СИМО), автоматизированную систему программирования (АСП) и систему автоматизированной разработки проектно-сметной документации (САРПД). СИМО используется при проведении предпроектных исследований и исследований на последующих стадиях создания АСУ ТП. АСП предназначена для автоматизации создания математического и программного обеспечения при техническом и рабочем проектировании. САРПД является в настоящее время наиболее развитой и используется как при разработке АСУ ТП, так и при проектировании систем локальной автоматизации.

В составе САРПД выделены следующие основные подсистемы: информационно-поисковая (ИПС), генерации заказной и сметной документации (ГЗСД), инженерно-экономических расчетов (ИЭР), синтеза схем соединений (ССС), синтеза и анализа типовых проектных решений (СТПР). Информационное обеспечение САРПД предусматривает использование единой базы данных, которая содержит библиотеки технических средств АСУ ТП, паспортов типовых проектных решений, прейскурантов и ценников, проектов, а также инструкции и другую нормативно-справочную информацию.

Подсистема ИПС является ядром системы. Подсистема обеспечивает выдачу по запросу требуемой информации по техническим средствам, типовым проектными решениями, выполненным проектам АСУ ТП. Предусмотрена корректировка и пополнение базы данных и передача информации в другие подсистемы. Система классификации и кодирования выполнена таким образом, что выдача информации может производиться с отбором по одному или нескольким классификационным признакам, которые охватывают практически все используемые при проектировании характеристики. Так, например, разработчик может получить информацию обо всех датчиках температуры, только о манометрических датчиках температуры, только о манометрических взрывобезопасных датчиках температуры, только о взрывобезопасных датчиках температуры различных типов и т. д. Для получения требуемой информации делается запрос, в котором указываются значения определенных классификационных признаков, например, вид измеряемого параметра (температура, давление и пр.), диапазон измерения и т. д.

Подсистема ГЗСД обеспечивает автоматизированное выполнение спецификаций оборудования, а также сметной документации. Для получения документации необходимо указать количество и либо классификационные коды, либо характеристики технических средств, однозначно их определяющие. Указанные данные могут передаваться из других подсистем, в частности из ИПС.

Подсистема ИЭР включает в себя комплексы программ расчетов, используемых при проектировании АСУ ТП. Выполняются, например, расчеты: стандартных сужающих устройств, надежности выполнения функций АСУ ТП, метрологических характеристик ин-

формационно-измерительных каналов и др. Подсистема функционирует совместно с другими подсистемами. Например, после выбора в ИПС измерительных устройств в ИЭР может быть проведен расчет метрологических характеристик канала измерения. По результатам расчета выносится суждение о пригодности выбранных устройств.

Подсистема ССС осуществляет разработку принципиальных схем, схем соединений и подключений щитового монтажа, схем внешних проводок и агрегирования жил кабелей. При разработке принципиальных схем дискретного действия (релейных схем) существенную роль играют алгоритмы логического типа, при разработке схем соединений и внешних проводок — оптимизационные процедуры, позволяющие выполнить соединения наилучшим образом.

Подсистема СТПР предназначена для разработки и накопления типовых фрагментов проектов АСУ ТП с целью их повторного использования и унификации проектных решений. Таким фрагментом может быть, например, автоматическая водосмесительная установка, автоматический мерник, оснащенный соответствующими приборами и исполнительными устройствами и т. п. При обращении к такому фрагменту можно сразу получить его характеристики, графическое изображение на схеме автоматизации и на других чертежах, принципиальную схему, перечень использованных технических средств, стоимость и другие необходимые данные. Возможность компоновки в проекте ТПР и индивидуальных решений существенно облегчает процесс автоматизированного проектирования АСУ ТП.

В качестве технических средств автоматизации проектирования в САРПД используются ЭВМ ЕС 1022, 1033, 1035 и 1045, доукомплектованные графическими дисплеями, графоэлектронными координатографами, а также автоматизированные рабочие места (АРМ) на базе мини- и микро-ЭВМ. Автоматизированное проектирование должно осуществляться, как правило, в диалоговом режиме, когда проектировщик, работая на АРМе, активно участвует в процессе проектирования, оперативно оценивая промежуточные результаты и многократно повторяя процесс с целью получения наилучшего решения.

Рассмотрим, например, разработку схемы автоматизации водосмесительной установки в САРПД в диалоговом режиме. Проектировщик, получив задание на проектирование и проанализировав его, обращается в ИПС к библиотеке ТПР, просматривает на дисплее ее соответствующий раздел и выбирает наиболее подходящий вариант схемы автоматизации, который индицируется на дисплее. С помощью ИПС уточняются типы датчиков (манометрический, электрический, пределы измерения и пр.) и типы исполнительных устройств. С пульта вносятся необходимые для схемы данные (температура смешанной воды, температура и давление холодной и горячей воды и др.). Затем в ИЭР проводится расчет системы регулирования температуры, которая в конкретных условиях должна

отвечать установленным требованиям (точность регулирования и пр.). На основе расчета определяются нужные характеристики регулятора (закон регулирования, параметры настройки и др.), с помощью ИПС выбирается тип регулятора (пневматический, электрический, щитового или настенного монтажа и т. п.). Выбранный перечень оборудования фиксируется и отпечатывается для использования при дальнейшем проектировании и в ГЗСД. Схема автоматизации вычерчивается графопостроителем.

Использование указанных средств автоматизированного проектирования обеспечивает весь цикл разработки документации на АСУ ТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. СН 202—81. Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектов и смет на строительство зданий и сооружений.
2. ВСН 281—75. Временные указания по проектированию систем автоматизации технологических процессов.
3. Техника проектирования систем автоматизации технологических процессов/ Под ред. Л. И. Шилетина. М., 1976.
4. Монтаж приборов и средств автоматизации: Справочник/ Под ред. А. С. Ключева. М., 1979.
5. Справочник проектировщика АСУ ТП. /Под ред. Г. Л. Смилянского. М., 1983.
6. Комплекс общепромышленных методических материалов по созданию АСУ и САПР. М., 1980.

Предисловие	3
Раздел I. Общие вопросы автоматизации технологических процессов легкой промышленности	5
Глава 1. Особенности производств легкой промышленности и перспективы их автоматизации	7
§ 1.1. Характеристика технологических процессов производств легкой промышленности	7
§ 1.2. Техничко-экономические предпосылки автоматизации	15
§ 1.3. Разработка систем управления технологическими процессами	16
§ 1.4. Направления развития автоматизации отрасли	25
Литература	29
Глава 2. Идентификация модели объекту	29
§ 2.1. Основные определения. Постановка задачи идентификации	30
§ 2.2. Выбор существенных сигналов объекта для разработки модели	41
§ 2.3. Выбор интервала наблюдения объекта и шага дискретности регистрации сигналов	47
§ 2.4. Разработка статической модели объекта методом регрессионного анализа	50
§ 2.5. Разработка динамической модели объекта	62
Литература	67
Раздел II. Локальные системы регулирования	68
Глава 3. Автоматические системы релейного регулирования	69
§ 3.1. Автоматические системы двухпозиционного регулирования с безынерционным исполнительным элементом	70
§ 3.2. Автоматические системы двухпозиционного регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости	79
§ 3.3. Устройства коррекции двухпозиционного регулирования	84
§ 3.4. Автоматические системы трехпозиционного регулирования	87
§ 3.5. Использование ЦВМ при расчетах систем релейного регулирования	90
Литература	94
Глава 4. Линейные автоматические системы регулирования	94
§ 4.1. Выбор закона регулирования и параметров настройки	95
§ 4.2. Применение ЦВМ при расчете одноконтурной автоматической системы регулирования	103
§ 4.3. Способы коррекции автоматических систем регулирования	106
§ 4.4. Импульсные линейные системы регулирования	113
Литература	117
Раздел III. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП)	118
Глава 5. Общие вопросы создания автоматизированных систем управления технологическими процессами	120
§ 5.1. Основные определения, цель создания автоматизированной системы управления технологическим процессом, ее функции	120
§ 5.2. Структура и классификация автоматизированных систем	123
§ 5.3. Техничко-экономические предпосылки разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами	128
§ 5.4. Автоматизированные системы управления технологическими процессами подготовительно-раскройного производства	133
Литература	142

Глава 6. Информационные аспекты автоматизированных систем управления технологическими процессами	142
§ 6.1. Основные характеристики информационных каналов связи	142
§ 6.2. Помехоустойчивое кодирование информации	148
§ 6.3. Условие точного описания непрерывного сигнала последовательностью дискретных значений	154
§ 6.4. Выбор периода опроса датчиков в зависимости от погрешности измерений и общей заданной погрешности	157
§ 6.5. Зависимость периода опроса датчиков от алгоритмов использования информации	161
§ 6.6. Выбор числа разрядов при кодировании информации	168
Литература	176
Глава 7. Математическое обеспечение автоматизированных систем управления технологическими процессами	177
§ 7.1. Методы описания алгоритмов управления технологическими процессами	177
§ 7.2. Методы поиска оптимальных управляющих воздействий	189
§ 7.3. Организация работы управляющей ЭВМ в автоматизированных системах управления технологическими процессами	204
§ 7.4. Программное обеспечение	208
Литература	213
Глава 8. Технические средства построения автоматизированных систем управления технологическими процессами	213
§ 8.1. Основные технические средства и принципы их построения	214
§ 8.2. Агрегатированные комплексы средств вычислительной техники	222
§ 8.3. Микропроцессоры и микро-ЭВМ	233
§ 8.4. Роботы и искусственный интеллект	242
Литература	253
Раздел IV. Автоматизация типовых технологических процессов отрасли	254
Глава 9. Динамические характеристики прессов и автоматизация тепловых процессов при прессовании	255
§ 9.1. Прессы легкой промышленности как объекты автоматического управления	256
§ 9.2. Регулирование температуры в этажных прессах производства искусственной кожи и резиновых изделий	259
§ 9.3. Пресс для влажно-тепловой обработки швейных изделий как объект автоматического регулирования	265
Литература	269
Глава 10. Автоматизация технологических процессов жидкостной обработки материалов	270
§ 10.1. Автоматизация жидкостных операций в производстве кожи	270
§ 10.2. Автоматизация химических станций кожевенных заводов	282
§ 10.3. Автоматизация процесса нанесения полимерного покрытия на основу в производстве искусственных кож	289
Литература	293
Глава 11. Автоматический контроль и регулирование процесса сушки	293
§ 11.1. Анализ сушильной камеры как объекта автоматизации	294
§ 11.2. Статические и динамические характеристики камеры конвективной сушки	300
§ 11.3. Выбор схемы автоматизации сушильной камеры	306
Литература	310
Глава 12. Автоматизация очистки промышленных сточных вод	311
§ 12.1. Гидромеханические процессы	312
§ 12.2. Химические процессы	317

§ 12.3. Процессы биологической очистки	320
Литература	322
Глава 13. Введение в проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами	322
§ 13.1. Стадии создания АСУ ТП и состав технической документации	323
Стадии создания	323
Предпроектная стадия создания АСУ ТП	325
Проектные стадии создания АСУ ТП	326
Ввод в эксплуатацию	329
Анализ функционирования	330
Проектирование систем локальной автоматки	331
§ 13.2. Предпроектная техническая документация	331
Технико-экономическое обоснование	331
Техническое задание	333
§ 13.3. Документация технического проекта	336
Общесистемная документация	336
Документация функциональной части	339
Документация информационного обеспечения	340
Документация технического обеспечения	343
Документация математического обеспечения	350
Документация организационного обеспечения	351
§ 13.4. Документация рабочего проекта	354
Общесистемная документация	354
Документация информационного обеспечения	356
Документация технического обеспечения	356
Документация программного обеспечения	360
Документация организационного обеспечения	362
§ 13.5. Автоматизация проектирования	362
Литература	365

*Лев Николаевич Плужников,
Альберт Васильевич Елин,
Анатолий Васильевич Кочеров,
Александр Борисович Кипнис,
Лев Иванович Пятов,
Владимир Натанович Наумов*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Заведующий редакцией Н. И. Хрусталева. Редактор В. И. Милешин. Младший редактор Л. Н. Шатунова. Художник В. В. Гарбузов. Художественный редактор В. И. Мешалкин. Технический редактор Т. Д. Гарина. Корректор Р. К. Косинова.

ИБ № 3988

Изд. № Стд—370. Сдано в набор 08.09.83. Подп. в печать 02.02.84. Т-03281. Формат 60×90/16.
Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 23 усл. печ. л. 23, 25 усл.
кр.-отг. 25,65 уч.-изд. л. Тираж 8000 экз. Заказ № 1861. Цена 1 р. 20 к.
Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14.
Московский типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли,
101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.