

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

В. А. СОКОЛОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Допущено Государственным комитетом СССР по народному образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств»



МОСКВА ВО «АГРОПРОМИЗДАТ» 1991

ББК 36.81

С59

УДК 664.012-52(075)

Редактор А. П. Серик

Рецензенты: кафедра автоматизации технологических процессов и производств Киевского технологического института пищевой промышленности (доц. А. П. Ладанюк) и д-р техн. наук, проф. П. Н. Платонов (Одесский технологический институт пищевой промышленности)

Соколов В. А.

С59 Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности. — М.: Агропромиздат, 1991. — 445 с.: ил. — (Учебники и учеб. пособия для студентов вузов).

ISBN 5-10-000916-0

Изложены методы исследования технологических процессов пищевой промышленности как объектов управления и создания систем автоматизации разного назначения. Особое внимание обращено на способы применения вычислительной техники для сбора, обработки информации и управления объектами пищевой технологии.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

С $\frac{4001030000-197}{035(01)-91}$ КБ-13-101-91

ББК 36.81

ISBN 5-10-000916-0

© В. А. Соколов, 1991

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АМ — алгоритмический модуль
АСУ — автоматизированная система управления
АСУП — автоматизированная система управления производством
АСУ ТП — автоматизированная система управления технологическим процессом
АСВТ — агрегатные средства вычислительной техники
АТК — автоматизированный технологический комплекс
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
БПМ — библиотека программных модулей
БРУ — брагоректификационная установка
ВТ — вычислительная техника
ВЦ — вычислительный центр
ДОС РВ — дисковая операционная система реального времени
ЕС ИВО — единая система информационно-вычислительного обеспечения
ИАСУ — интегрированная автоматизированная система управления
ИУС — информационно-управляющая система
КТС — комплекс технических средств
ЛАХ — логарифмическая амплитудная характеристика
ЛТС — локальные технологические станции
ЛФХ — логарифмическая фазовая характеристика
МК — микроконтроллер
МП — микропроцессор
НЦУ — непосредственное цифровое управление
ОАСУ — отраслевая автоматизированная система управления
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ОПО — общее программное обеспечение
ОПС — операторская станция
ОС — операционная система
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство
ПО — программное обеспечение
ППМ — пакеты прикладных программ
ПТС — погочно-транспортная система

САР — система автоматического регулирования
САПР — система автоматизированного проектирования
СПО — специальное программное обеспечение
СУБД — система управления базой данных
ТОУ — технологический объект управления
ТПР — типовые проектные решения
ТС — техническая структура
ТЭП — технико-экономический показатель
УВК — управляющий вычислительный комплекс
УСО — устройство связи с объектом
ЦДП — центральный диспетчерский пункт
ЦПУ — центральный пункт управления
ЭВМ — электронная вычислительная машина

Автоматизация производства является важнейшим фактором ускорения научно-технического прогресса в народном хозяйстве. Дальнейшее развитие пищевой промышленности и сельского хозяйства требует создания как автоматизированного оборудования, автоматизированных линий и технологических процессов, так и автоматизации управления производством и всем агропромышленным комплексом.

В научно-технических программах развития пищевой промышленности предусмотрена автоматизация производства на основе широкого применения микропроцессорной техники и электронных вычислительных машин (ЭВМ). В ближайшие годы будут решены проблемы, обеспечивающие широкое внедрение автоматизации на всех уровнях: в области управления как технологическими процессами, так и производственно-хозяйственной деятельностью предприятия в целом. В результате будут созданы автоматизированные предприятия и производственные (агропромышленные) объединения, получат дальнейшее развитие вычислительные центры и образована единая сеть информационно-вычислительного обеспечения отрасли для учета, планирования и управления ею.

Для решения поставленных задач нужны высококвалифицированные специалисты в области автоматизации производства. Поэтому в настоящее время большое значение придается изучению в вузах дисциплины «Автоматизация технологических процессов отрасли» на базе управляющей вычислительной техники, завершающей профессиональное обучение будущего специалиста. Целью изучения дисциплины является подготовка студента к самостоятельному решению теоретических и практических задач автоматизации химико-технологических процессов пищевой промышленности.

В учебнике рассмотрены научно обоснованные методы автоматизации разных пищевых производств на основе современных технических средств, включая микропроцессорную технику и управляющие ЭВМ, а также принципы и особенности построения схем автоматизации технологических процессов разного назначения.

Изложение материала рассчитано на то, что студенты прошли подготовку по общей технологии пищевых производств предприятий, перерабатывающих продукцию растениеводства, и изучили теорию автоматического управления, имеют математическую подготовку в объеме программы технического вуза, умеют программировать на ЭВМ, а также овладели техническими средствами автоматизации (пневмо- и электроавтоматика, микропроцессоры и управляющие ЭВМ).

Все основные понятия и определения иллюстрируются на примерах внедренных в промышленность типовых устройств автоматизации.

В основу учебника положен опыт научно-производственного объединения «Пищепромавтоматика» — ведущей организации отрасли по разработке и освоению в промышленности средств и устройств автоматизации, а также опыт преподавания данной дисциплины в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова.

Считаю своим долгом выразить благодарность инженерам Брейтману В. М., Васильевой Е. В., Кантаровичу Л. Л., Мураховскому В. Я., Рысь Л. И., Степуло В. С., осуществлявшим отбор необходимых схем автоматизации, а также кандидатам техн. наук Казацкеру А. А., Мандельштейну М. Л., Перепечаенко В. Г., Телису П. И. за предоставление результатов научных исследований.

Особенно ценной была помощь инж. Аксельрода Л. А. в подборе практического материала.

Выражаю глубокую признательность рецензентам д-ру техн. наук Платонову П. Н. и канд. техн. наук Ладанюку А. П., чьи полезные советы способствовали улучшению содержания книги.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Пищевые производства основаны на химико-технологических процессах. Развитие пищевой технологии, создание новых непрерывных процессов и аппаратов большой единичной мощности предопределили необходимость автоматизации этих производств.

Термин «автоматизация» (от греческого *automatos*) означает «самодействующий». В энциклопедическом словаре дается следующее определение автоматизации производства: «Автоматизация производства — процесс в развитии машинного производства, при котором функции управления и контроля, ранее выполнявшиеся человеком, передаются приборам и автоматическим устройствам».

Измерительные приборы и автоматические устройства обеспечивают оптимальное протекание технологического процесса, недоступное ручному управлению. Поэтому автоматизация позволяет наиболее эффективно использовать все ресурсы пищевого производства, улучшить качество выпускаемой продукции и значительно повысить производительность труда.

Разработка систем автоматизации химико-технологических процессов пищевых производств осуществляется в трех направлениях: 1) определяются методы эффективного изучения закономерностей объектов управления при использовании физического и математического моделирования с применением ЭВМ; 2) создаются технически и экономически целесообразные методы управления с установлением наиболее рациональных зависимостей между измеряемыми и управляющими координатами технологических процессов; 3) разрабатываются инженерные методы эффективного воплощения автоматизации, технические средства контроля и управления.

Исходя из системного подхода, автоматизацию производства пищевого предприятия подразделяют на четыре уровня (рис. 1).

При разработке систем * автоматизации используют последние отечественные и зарубежные достижения в теории управле-

* Термин «система» означает совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, обладающих свойствами целостности, законченности.

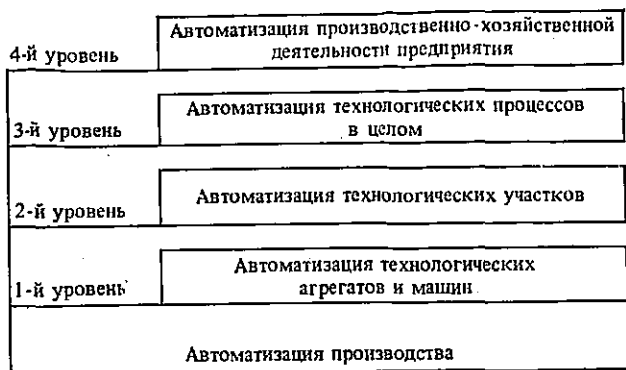


Рис. 1. Уровни автоматизации производства перерабатывающего предприятия пищевой промышленности

ния технологическими процессами с применением новейших средств автоматизации, микропроцессорной и вычислительной техники.

Автоматизация химико-технологических процессов пищевого производства в своем развитии проходит через ряд качественных ступеней, связанных с применением соответствующих автоматических устройств, которые обеспечивают полное или частичное освобождение обслуживающего персонала от выполнения функций контроля и управления.

На ранней стадии развития эти устройства представляли собой различные локальные* системы автоматизации: автоматического контроля и сигнализации, автоматического регулирования, автоматического пуска и остановки оборудования, автоматической защиты.

До недавнего времени в отрасли для управления технологическими процессами применялись в основном простейшие механические, пневматические и электрические регуляторы. Однако за последние 15—20 лет положение существенно изменилось. В настоящее время преобладают технологические процессы со сложными комплексами энергетических и материальных потоков. Эти обстоятельства, а также жесткие требования к качеству продукции привели к созданию более совершенных локальных систем автоматизации на 1-м и 2-м уровнях (см. рис. 1).

В локальных системах автоматизации для аппаратов большой единичной мощности, технологических агрегатов и линий создаются местные пункты контроля и управления, значительно улучшающие условия работы обслуживающего персонала. На них

* Локальный (от латинского *localis*) — местный, свойственный данному месту.

устанавливают пульты и щиты с контрольно-измерительными приборами, аппаратурой сигнализации, дистанционного пуска и остановки оборудования.

При автоматизации предприятий большой мощности с непрерывными технологическими процессами местные пункты управления объединяют в центральные диспетчерские пункты (3-й уровень на рис. 1).

На щитах центральных диспетчерских пунктов для улучшения условий работы оператора предусматривают мнемосхемы, представляющие собой изображение технологического оборудования с встроенными контрольно-измерительными приборами, аппаратурой сигнализации и дистанционного управления. Таким образом, применение местных щитов и щитов на центральных диспетчерских пунктах управления позволяет достаточно полно автоматизировать процесс сбора и представления информации о состоянии отдельных технологических переменных, а также дистанционного осуществления управляющих воздействий. На этой ступени автоматизации оператор для управления производством должен принимать решения, относящиеся к взаимодействию многих автоматических регуляторов. С этой целью он в зависимости от масштабов производства по показаниям десятков или сотен измерительных приборов интуитивно производит оценки ситуации для принятия решений по осуществлению управляющих воздействий. Понятно, что оператор не может в таких условиях удовлетворительно вести управление всем технологическим процессом в оптимальном режиме и обеспечить надлежащий экономический эффект производства. К тому же традиционные технические средства переработки информации, поступающей на центральный диспетчерский пункт, также не позволяют в ходе производства вести необходимые расчеты технико-экономических показателей и составлять формы отчетности о работе технологического оборудования, выработке продукции и расходе материально-энергетических ресурсов.

Поэтому для управления сложными, территориально распределенными технологическими процессами применяют новые технические средства — вычислительную технику, а также современные экономико-математические методы, обеспечивающие автоматизацию сбора и обработки информации, необходимой для принятия решений. Основой для осуществления такого автоматизированного процесса управления является применение ЭВМ. Такие системы называют человеко-машинными, и основная их роль заключается в оптимизации работы технологического оборудования по принятому критерию* управления. К р и т е р и й

* Критерий (от греческого *kriterion*) — признак, на основании которого производится оценка, определение чего-либо, мерило.

управления обычно представляет собой экономический или технический показатель производства продуктов. Например, в качестве критерия управления может быть принята производительность или себестоимость производства продукта при заданном его качестве либо характерные показатели технологического процесса (см. также § 7.1 и 12.1).

В зависимости от роли человека в управлении различают автоматические и автоматизированные системы управления (АСУ).

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) представляет собой организационно-техническую систему управления технологическим процессом в целом в соответствии с принятым критерием управления, в которой для сбора и обработки информации используется вычислительная техника. Роль человека в АСУ ТП сводится к содержательному участию в выработке решений там, где задачи принятия решений не могут быть формализованы и их выполнение не может быть полностью автоматизировано.

В соответствии с существующей терминологией автоматические системы управления принадлежат к той же области АСУ ТП, но являются высшей ступенью их развития, на которой человек полностью выведен из процесса непосредственного управления.

Комплекс технических средств АСУ ТП включает и средства локального контроля, сигнализации и регулирования, которые могут функционировать автономно. Локальные системы автоматизации, входящие в АСУ ТП, представляют собой комплекс устройств автоматики, автономно реализующих функцию управления частью технологического процесса или контроля за ним. Практически во всех применяемых схемах автоматизации реализуются функции контроля, сигнализации, регулирования, пуска и остановки технологического оборудования, автоматической защиты.

Автоматизация производства — непрерывно развивающийся процесс, причем особенностью его развития является то, что переход к более высокой ступени не означает полного исчезновения характерных черт развития на низшей ступени, так как каждая последующая ступень является продолжением и развитием низшей ступени.

На предприятиях пищевой промышленности существуют два типа систем автоматизации: локальные системы автоматизации технологических процессов и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

АСУ ТП предназначены для выработки и осуществления управляющих воздействий на технологический объект управления (ТОУ). ТОУ представляет собой совокупность технологического оборудования, на котором по установленным

регламентам осуществляется технологический процесс производства пищевых продуктов. К ТОУ относятся технологические аппараты, агрегаты и установки, а также участки, цехи и технологические комплексы по производству продуктов в целом.

Если технологический комплекс функционирует совместно с управляющей им АСУ ТП, то они образуют автоматизированный технологический комплекс (АТК).

По уровню, занимаемому АСУ ТП в организационно-производственной структуре перерабатывающего предприятия, различают три класса АСУ ТП: нижнего уровня, верхнего уровня, многоуровневые. АСУ ТП нижнего уровня управляют технологическими агрегатами, установками, участками; АСУ ТП верхнего уровня (централизованные) — группами технологических установок, участками, производствами и не включают в себя АСУ ТП нижнего уровня; многоуровневые АСУ ТП управляют теми же ТОУ, что и АСУ ТП верхнего уровня, но включают в себя и АСУ ТП нижнего уровня.

Состав задач, решаемых ЭВМ, определяет перечень подсистем АСУ ТП, которые в основном выполняют следующие функции (см. также § 7.1):

- централизованный контроль технологических параметров;
- анализ производственной ситуации, расчет и выдача рекомендаций технологу-диспетчеру;
- непосредственное управление от ЭВМ (программное и логическое) технологическими агрегатами и участками;
- расчет и выдача значений уставок регуляторам локальных систем автоматизации;
- расчет и управление технологическим потоком по отдельным участкам и производству в целом;
- расчет технико-экономических показателей (ТЭП) за час, смену, сутки или по вызову.

В пищевой промышленности первое поколение АСУ ТП имело централизованную структуру (это предопределялось техническими возможностями управляющих ЭВМ того периода). В процессе их эксплуатации выявлен ряд недостатков: трудность организации непосредственного управления технологическим объектом от центральной ЭВМ, низкая живучесть, повышенный расход дефицитной кабельной продукции. Указанные недостатки и появление новых технических средств, вызванное внедрением микропроцессорной техники и локальных вычислительных сетей, привели к пересмотру ряда принципов построения АСУ ТП.

Значительное снижение стоимости вычислительной техники позволило применять в АСУ ТП вместо одной управляющей ЭВМ несколько микропроцессорных управляющих машин путем размещения их на разных участках технологического процесса, где это выгодно, и распределения между ними функций контроля,

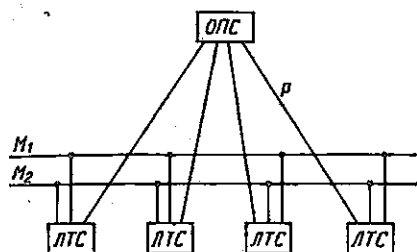


Рис. 2. Структура комплекса технических средств распределенной АСУ ТП:

ЛТС — локальные технологические станции; ОПС — операторская станция; M_1 , M_2 — локальные вычислительные сети; P — радиальные вычислительные сети

управления и передачи информации. Возникший новый класс АСУ ТП, в котором несколько управляющих ЭВМ связаны между собой в одну вычислительную сеть, называют распределенными АСУ ТП.

Новые микропроцессорные комплексы содержат устройства, из наборов которых можно строить распределенные АСУ ТП. Структура одного из вариантов такого комплекса показана на рис. 2. Основными компонентами этих комплексов являются сети передачи данных и станции (локальные технологические, операторские, связные и координирующие). Возможность создания распределенных АСУ ТП обеспечена не только успехами в области микроэлектроники, но и появлением локальных вычислительных сетей, в качестве физической линии которых чаще всего применяют коаксиальный кабель, присоединяемый к станциям через специальные Т-образные ответвления. Распределенные АСУ ТП реализуют широкий диапазон функций, имеют лучшие показатели надежности и низкую стоимость, более удобны в эксплуатации по сравнению с централизованными системами.

В последние десятилетия значительное развитие получили новые классы автоматизированных систем управления (АСУ), осуществляющие оперативное управление, текущее и долгосрочное планирование, управление административно-хозяйственной деятельностью.

К классу автоматизированных систем управления предприятием (АСУП) относят автоматизированные системы управления производственными объединениями и самостоятельными предприятиями (4-й уровень на рис. 1).

АСУП являются сложной системой, состоящей из комплекса взаимосвязанных частей (подсистем), выделяемых по функциональному, структурно-организационному и другим признакам. АСУП производственного объединения, как правило, создается на базе собственной вычислительной техники и обеспечивает следующие функции:

автоматизированный сбор и обработка информации с широким использованием методов оптимизации по основным задачам

и подсистемам управления общезаводского и внутрицехового уровней;

хранение в памяти ЭВМ и комплексное использование нормативно-справочной, промежуточной и выходной информации в процессе решения задач управления;

организация рационального внутризаводского и внутрицехового документооборота.

В АСУП автоматизируют обработку данных производственно-хозяйственной деятельности по таким подсистемам: управление технической подготовкой производства; оперативное управление основным производством; технико-экономическое планирование, включая расчеты по ценообразованию; управление материально-техническим снабжением; бухгалтерский учет; управление реализацией и сбытом продукции; управление финансами; управление качеством продукции; управление кадрами; управление транспортным, ремонтным и энергетическим обслуживанием производства. Выбор конкретных подсистем АСУП определяют производственной и экономической целесообразностью.

К классу интегрированных автоматизированных систем управления (ИАСУ) производственным объединением или самостоятельным предприятием относят многоуровневые автоматизированные системы управления, характеризующиеся расширением взаимосвязей отдельных систем, которые объединяют управление технологическими процессами, оперативное управление, текущее и долгосрочное планирование, административно-хозяйственную деятельность в одну общую систему управления производством.

В состав ИАСУ в качестве составных частей входят совместные и взаимодействующие автоматизированные системы организационного управления предприятиями, цехами, участками (АСУП), автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) и другие виды автоматизированных систем, действующих на предприятиях промышленности.

В ИАСУ, одновременно действующие на одном предприятии, АСУ ТП и АСУП рассматриваются как взаимосвязанные, но отдельные системы, между которыми установлена совместимость по вертикали, обеспечивающая информационный обмен.

Рост масштабов производства, усложнение внутриотраслевых и народнохозяйственных связей резко усложнили систему управления отраслью. Важную роль в повышении эффективности управления отраслью играет автоматизация управления на базе широкого использования вычислительной техники.

К классу отраслевых автоматизированных систем управления (ОАСУ) относят системы, представляющие собой совокупность административных и экономико-математических методов, средств вычислительной техники и связи,

позволяющих органам управления осуществлять оптимальное управление отраслью.

В ОАСУ осуществляются сбор, передача, обработка и анализ информации, а также предусматривается обязательное участие управленческого аппарата в принятии решений и доведении их до предприятий и организаций отрасли.

ОАСУ разделяют на функциональную и обеспечивающую части. Функциональная часть ОАСУ состоит из ряда подсистем, в которых решаются задачи трех видов: планирования, учета и отчетности, контроля и оперативного управления.

Обеспечивающая часть ОАСУ включает в себя информационную базу, комплекс технических средств и математическое обеспечение. Комплекс технических средств содержит следующие функциональные группы: сбора, подготовки и передачи информации; обработки информации; выдачи и отображения информации.

Основными звеньями организационной структуры ОАСУ являются органы управления отраслью, обеспечивающие взаимодействие его аппарата с ОАСУ, главный вычислительный центр (ГВЦ), кустовые вычислительные центры, информационные пункты предприятий и организаций отрасли.

Переработка информации на крупных предприятиях, оборудованных АСУП, осуществляется на их вычислительной технике. Поэтому АСУП должна быть совместима по вертикали с ОАСУ по информационному обмену, так же как АСУ ТП по отношению к АСУП. Все эти классы автоматизированных систем образуют многоуровневую иерархию* автоматизированных систем управления предприятиями, которые объединяются единой сетью информационно-вычислительного обеспечения (ЕС ИВО) отрасли.

В перспективе ОАСУ следует рассматривать как подсистемы общегосударственной автоматизированной системы сбора и обработки информации для учета, планирования и управления народным хозяйством (ОГАС), создаваемой на базе государственной сети вычислительных центров и общегосударственной системы передачи данных (ОГСПД), предназначенной для организации передачи информации между отраслевыми и ведомственными вычислительными центрами и главным вычислительным центром ОГАС.

§ 2. СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Работы по автоматизации предприятий пищевой промышленности в заметных объемах начали проводиться со второй половины 50-х годов и получили значительное развитие в 1975—1985 гг.

* Иерархия (от греческого *hierarchia*) — расположение частей или элементов целого в порядке от высшего к низшему.

Практически в 50-е годы началось внедрение автоматизации производства во все основные отрасли народного хозяйства. Пищевая промышленность стала широко оснащаться автоматами и полуавтоматами для фасования, дозирования и упаковывания продукции и автоматическими линиями производства продуктов.

Развитие работ по автоматизации в период 1975—1985 гг. предопределялось ростом уровня механизации, увеличением единичной мощности перерабатывающих предприятий, совершенствованием организационной структуры промышленности, применением новых технических средств: вычислительной техники, специальных приборов контроля качества.

Сложность и многообразие технологических процессов пищевых предприятий вызвали необходимость комплексных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, позволивших создать рациональные экономически эффективные локальные системы автоматизации для типовых технологических процессов. На эти системы автоматизации разработаны типовые проектные решения и ведутся работы по их широкомасштабному тиражированию на предприятиях промышленности.

Указанные локальные системы автоматизации разработаны для непрерывных процессов тепло- и массообмена (выпаривание, сушка, ректификация, дистилляция, диффузия, экстракция), химических (дезодорация, сатурация, нейтрализация), микробиологических (брожение, солодоращение) и механических (дробление, протираание) процессов. Применение этих систем дало существенный экономический эффект. Отдельные автоматические системы этой группы процессов разработаны с использованием средств вычислительной техники и решают задачи оптимизации процессов.

Системы автоматического программного регулирования созданы для периодических процессов варки, стерилизации, ферментации, многокомпонентного дозирования.

Задачи диспетчерского автоматизированного управления механизмами и переключателями материалопроводов сыпучих, твердых и жидких продуктов решены для большинства подразделов: хлебопекарной (склады бестарного хранения муки на хлебозаводах), мукомольно-крупяной (элеваторы зерна), сахарной и спиртовой. Унифицированные системы автоматического учета штучной продукции разработаны для большинства основных производств.

Перечисленные локальные системы автоматизации основного технологического оборудования, линий, производственных участков обеспечили возможность создания автоматизированных предприятий.

Повышение уровня автоматизации отрасли происходило в основном за счет ввода в эксплуатацию новостроящихся предприя-

тий с комплексно-механизированным и автоматизированным оборудованием отдельными (участками) цехами, а также за счет разработки и внедрения локальной автоматизации на реконструируемых и модернизируемых предприятиях.

В 1971—1975 гг. в основных подотраслях были созданы предприятия с высоким уровнем автоматизации (заводы свеклосахарный, сахарорафинадный, пивоваренный, хлебопекарный, спиртовой, маргариновый, маслоэкстракционный, крахмало-паточный комбинат, элеватор), что обусловило создание АСУ ТП.

АСУ ТП перерабатывающих предприятий создаются путем капитального строительства, так как независимо от объема поставки технических средств для ввода их в действие необходимо провести строительно-монтажные и наладочные работы на объекте.

Ввиду того что в отрасли отсутствовал опыт в разработке АСУ ТП, было принято решение создать в 1976—1980 гг. для основных подотраслей промышленности головные образцы систем на базовых предприятиях. Такой подход позволил приобрести необходимый опыт и оценить реальный экономический эффект.

На первом этапе введенные АСУ ТП были спроектированы в основном как информационно-советующие, решающие задачи централизованного контроля, расчета оперативных технико-экономических показателей, выбора оптимальных решений по управлению отдельными участками и технологическим процессом производства продуктов в целом и формирования советов оператору по управлению. Задачи непосредственного управления от ЭВМ были разработаны только для тех случаев, в которых достигалось явное улучшение технико-экономических показателей.

В период последнего десятилетия происходило дальнейшее наращивание уровня автоматизации пищевых производств, определяемое как состоянием и подготовленностью к автоматизации технологии и оборудования, так и наличием кадровых и материально-технических ресурсов, развитием производственной базы промышленности. За это время было разработано и введено на предприятиях отрасли более 40 АСУ ТП. Появление микропроцессорной техники позволило приступить к созданию АСУ ТП с распределенной структурой управления. В настоящее время в отрасли планируется создать предприятия с высоким уровнем автоматизации и механизации с широким использованием различных средств микропроцессорной техники.

Перспективное развитие автоматизации предусматривает комплексное совершенствование производства, направленное на экономию трудовых, материальных и топливно-энергетических ресурсов. Намечено существенно расширить работы по созданию и промышленному освоению автоматических манипуляторов с программным управлением и робототехнических комплексов.

Важное значение придается работам по механизации и автоматизации трудоемких процессов, пакетированию и контейнеризации на основе использования микропроцессорной техники. Расширяются работы по созданию автоматизированных производств на базе применения микропроцессорных устройств.

Дальнейшее развитие автоматизации технологических процессов в пищевой промышленности, расширение возможностей автоматического управления по основным качественным показателям производства требуют ускорения создания специальных приборов и средств автоматизации. К таким приборам относятся анализаторы качества поступающей в переработку свеклы, семян масличных культур, картофеля, томатов и другой сельскохозяйственной продукции; цветомеры, мутномеры, концентратомеры, регулирующие и отсечные клапаны для разных химико-технологических пищевых сред и т. п.

Целевой комплексной программой автоматизации производства отрасли предусмотрено обеспечить следующие технико-экономические показатели: увеличение годового объема выпуска промышленной продукции на 0,5%; снижение себестоимости продукции на 4—5% в результате сокращения расхода сырья, материалов, энергетических и трудовых затрат; увеличение выхода продукции высших сортов на 15—20%; условное* высвобождение численности производственного персонала на 15 тыс. человек.

Следует иметь в виду, что прямое (фактическое) высвобождение численности производственного персонала является незначительной составляющей экономического эффекта, достигаемого от затрат на автоматизацию. Так, в структуре затрат на производство сахара стоимость сырья и основных материалов составляет 84%, а заработная плата — всего 4—5%; в маслодобывающем производстве — соответственно 92 и 2—3% и т. д. Поэтому высвобождение численности производственного персонала не может окупить необходимые затраты на автоматизацию перерабатывающих предприятий и является социальной проблемой, требующей решения в масштабе народного хозяйства страны.

В ближайшей перспективе намечено осуществить комплексный подход при создании автоматизированных предприятий: от разработки механизации начальных, концевых операций и погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ, автоматизации технологических процессов до решения задач экономической обработки информации о ходе производства с использованием ЭВМ. Такой подход обеспечит автоматизацию не только основных технологических участков производства, но и вспомогатель-

* Численность производственного персонала, которая потребовалась бы для дополнительного выпуска продукции на неавтоматизированном производстве.

ных, складских операций и управленческого труда. При этом развитие автоматизации наряду с повышением технико-экономических показателей предприятия также создаст условия для существенного снижения численности производственного персонала.

Перспективное развитие автоматизации приобретает особое значение в период дальнейшего социально-экономического развития страны. Автоматизация технологических процессов коренным образом меняет характер труда человека, делая его более содержательным; увеличивает творческую деятельность человека с преобладанием функций анализа протекания процессов и принятия решений. Одновременно с этим упраздняются старые рабочие профессии, основанные на тяжелом монотонном физическом труде.

§ 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Возросшие требования к системам управления невозможно обеспечить с помощью традиционных средств автоматизации. Вновь возникшие задачи стало возможным решать с помощью управляющей вычислительной и микропроцессорной техники, позволяющей эффективно управлять десятками и сотнями технологических агрегатов и установок по выбранному технико-экономическому критерию.

Работы в этом направлении проводятся в отрасли с 1976 г. Первые головные образцы АСУ ТП были созданы на базе ЭВМ М-6000, СМ-1 и СМ-2 в производстве сахара, растительного масла, маргарина, консервов и спирта. В дальнейшем были внедрены АСУ ТП в винодельческом и пивоваренном производствах.

Указанные АСУ ТП решают совокупность задач, ставших традиционными для систем этого класса: централизованный контроль основных показателей технологического процесса, расчет оперативных технико-экономических показателей (за час, смену, сутки); контроль состояния оборудования; определение «узкого» места в технологическом процессе; расчет оптимального с точки зрения выбранного критерия управления режима ведения технологического процесса. Особое внимание обращается на решение задач ритмичности производства, которая обеспечивается продольной стабилизацией и корректировкой технологического процесса в целом и на его отдельных участках. По мере приобретения заводским персоналом необходимого опыта осуществляется развитие освоенных систем с использованием микропроцессорных устройств.

На ряде объектов отрасли ведутся работы по созданию распределенных систем управления на базе микропроцессорной тех-

ники. Работы в этом направлении начаты сравнительно недавно с появлением микропроцессорной техники, когда стало возможным создавать относительно дешевые и надежные системы управления. Распределенные системы управления реализуют заданную совокупность функций с помощью связанных между собой территориально и функционально распределенных подсистем (станций, постов управления). На верхнем уровне распределенных АСУ ТП используется вычислительная техника на базе ЭВМ типов СМ-4, СМ-1210, СМ-1420 и СМ-1634. При управлении технологическими процессами широкое распространение получили управляющие вычислительные комплексы (УВК), в состав которых, помимо микроЭВМ и микроконтроллеров*, дополнительно включаются устройства памяти, ввода — вывода и связи с датчиками показателей технологического процесса, ориентированные на выполнение функций контроля и управления в режиме реального времени.

В состав УВК входят также устройства для общения человека (технолога-оператора, диспетчера, программиста) с системой и совместимости АСУ ТП с АСУ более высокого уровня (АСУП и ОАСУ).

Применяемые в АСУ ТП УВК построены по агрегатно-модульному** принципу, что позволяет комплектовать и развивать систему в процессе ее эксплуатации, обеспечивая решение всех необходимых задач по управлению в автоматизированном режиме.

На нижнем уровне распределенных АСУ ТП для решения различных задач регулирования широкое распространение получили микроконтроллеры ремиконт и ломиконт. Для связи с датчиками показателей технологического процесса и решения функциональных задач используются микроЭВМ типов СМ-1800, СМ-1634, а также КТС ЛИУС-2. На указанной микропроцессорной технике решается большой перечень задач, специфичных для пищевых производств. Так, в сахарном производстве с использованием технических средств КТС ЛИУС-2 созданы АСУ ТП управления диффузионным отделением, сокоочисткой, выпарной станцией, отделением вакуум-аппаратов. Для управления этими участками использованы проблемно ориентированные комплексы технических средств типа МИКЛАС.

На базе микроЭВМ СМ-1800 разработана система управления продуктовым отделением сахарного завода, которая решает следующие задачи: оперативное планирование работы вакуум-

* Устройство логического управления, выполненное на одной или нескольких микропроцессорных больших интегральных схемах.

** Модуль (от латинского *modulus*) — унифицированный узел, оформленный как самостоятельное изделие и выполняющий определенную функцию.

аппаратов, управление процессами аффинации, варки уфелей I, II и III продуктов, подваривания и материальными потоками. В системах управления отдельными технологическими участками реализуется большой перечень задач непосредственного цифрового управления.

В масло-жировом производстве микроЭВМ СМ-1800 обеспечивают контроль и управление отдельными технологическими участками производства маргарина, а также растительного масла, осуществляя непосредственное цифровое управление приемом—передачей жиров и составление оперативных сводок о выполнении плана и движении материальных ресурсов по комбинату. В производстве растительного масла с помощью микроЭВМ СМ-1800 выдаются сводки о запасе семян в элеваторе, определяются оптимальный для данных условий вариант размещения партий семян в элеваторе и очередность их переработки.

В хлебопекарном производстве создается ряд подсистем, реализующих как традиционные функции АСУ ТП, так и специфические для данной подотрасли: обработка заказов, поступающих из торговой сети, оперативное планирование производства с учетом поступивших заказов, учет отгрузки продукции и возвратов из торговой сети, управление работой склада бестарного хранения муки.

В пивоваренном производстве с помощью СМ-1800 осуществляются контроль и управление отделениями: солодовенным, варочным, брожения — дображивания, цехами розлива, а также компрессорной станцией; реализуются функции программного управления процессом замачивания ячменя и затирания солода, формирования тракта загрузки (разгрузки) грядок проращивания ячменя, управления производительностью компрессоров и поддержания температурного режима сусла.

В настоящее время такие системы разрабатываются и осваиваются для всех основных производств отрасли.

Усложнение задач, решаемых на ЭВМ верхнего уровня, стало возможным благодаря освобождению ее от непосредственного контроля за состоянием датчиков технологического процесса и обработки этой информации, т. е. функций, передаваемых микроЭВМ нижнего уровня.

Освоение вычислительной и микропроцессорной техники в составе комплекса технических средств АСУ ТП требует сосредоточения значительных материальных и трудовых ресурсов на одном предприятии. В связи с этим работы проводятся на основании планов социально-экономического развития отрасли. Наиболее важные объекты включаются в пятилетние планы решения основных проблем, координируемые Государственным комитетом СССР по науке и технике.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой автоматизация производства? Дайте ее определение.
2. Что представляют собой локальные системы автоматизации?
3. Какой класс систем управления называют АСУ ТП? Приведите определение.
4. Какие существуют классы АСУ ТП по уровню, занимаемому в организационно-производственной структуре предприятия? Охарактеризуйте их.
5. Какие функции выполняются АСУ ТП и основными подсистемами?
6. Что такое критерий управления технологическим процессом?
7. Что представляют собой распределенные АСУ ТП, какие отличительные принципы их построения?
8. Какие системы автоматизации относятся к АСУП и каковы их характерные особенности?
9. Что представляют собой системы автоматизации предприятия, относящиеся к классу ИАСУ?
10. Какие системы автоматизации называют ОАСУ? Охарактеризуйте их функции и структуру.
11. Охарактеризуйте состояние и перспективы развития автоматизации технологических процессов пищевых предприятий.
12. Приведите примеры использования вычислительной техники в системах автоматизации технологических процессов.

ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Глава 1

ФУНКЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

§ 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

На пищевых предприятиях широко применяются локальные системы автоматизации аппаратов, агрегатов, установок, механизмов, машин, линий, реализующих для части технологического процесса функции автоматического контроля и сигнализации, автоматического регулирования, автоматического пуска и остановки технологического оборудования, автоматической защиты.

Автоматический контроль и сигнализация предназначены для выполнения непрерывного или достаточно частого измерения, записи ряда величин, характеризующих состояние и работу технологического оборудования, а также подачи предупредительных сигналов при отклонении этих величин от допустимых пределов.

Автоматическое регулирование поддерживает постоянство или закономерное изменение регулируемых величин, обеспечивающих безопасность, надежность и наивысшую эффективность эксплуатации технологического оборудования.

Автоматический пуск и остановка обеспечивают запуск в действие сложного технологического оборудования по одному сигналу из пункта управления или даже без такового, но при наличии определенной совокупности внешних условий. При этом соблюдаются последовательность операций и координация их между собой.

Автоматическая защита предохраняет действующее оборудование от аварий. Она выводит из действия все технологическое оборудование или его часть, которой непосредственно грозит авария из-за неисправности автоматизированного оборудования, порчи регуляторов или неправильных действий обслуживающего персонала. К автоматической защите относятся также устройства блокировки, допускающие выполнение операций по включению в действие или по отключению элементов оборудования только в заданной последовательности.

Структура и характер автоматизации технологического процесса определяются схемой автоматизации. На ней условными изображениями показывают технологическое оборудование и коммуникации с применяемыми органами управления, устройства контроля и сигнализации, регулирования, защиты, пуска и остановки механизмов, а также условные линии связи между оборудованием и всеми перечисленными устройствами автоматики.

На примере схемы автоматизации тракта* подачи сахарной свеклы на завод (рис. 1.1) можно наглядно показать особенности локальных систем автоматизации, применяемых на перерабатывающих предприятиях для транспортирования продуктов и реализующих все перечисленные выше функции.

Пример. Приборы и средства автоматизации на схеме показывают условными изображениями (см. приложение 1). Обозначения электроаппаратов заимствуют из соответствующих стандартов ЕСКД**. Измеряемые величины и функциональные признаки приборов обозначают прописными буквами латинского алфавита (см. приложение 2).

Схема автоматизации тракта подачи сахарной свеклы (см. рис. 1.1) построена с учетом того, что для равномерного ведения технологического процесса необходимо в первую очередь обеспечить равномерную бесперебойную подачу свеклы в количестве, соответствующем производительности последующего свеклоперерабатывающего отделения. Свекла на завод поступает по гидротранспортеру, который оснащен свеклонасосами, камне- и соломоловушками, свекломойками. Для согласования работы тракта подачи свеклы и свеклоперерабатывающего отделения предназначен бункер для свеклы XIII, располагающийся над свеклорезками.

В качестве регулирующих органов служат пульсирующие шиберы I, IV, VI, VII. Управление электроприводом выбрасывающих лап свекломоек IX осуществляется позиционно в зависимости от массы свеклы в бункере XIII. При максимальной массе свеклы в бункере электропривод выбрасывающих лап мойки отключается, а при массе меньше максимальной включается. В качестве датчиков массы свеклы используют в основном электронно-тензометрические весодозирующие устройства 8а—8г, которые позволяют не только регулировать подачу свеклы, но и осуществлять контроль и сигнализацию массы свеклы в бункере. Так как в схеме используются две параллельно работающие свекломойки IX, то с помощью распределительного шиберы VIII обеспечивается равномерная загрузка свеклой моющих частей свекломоек IX в зависимости от токовой нагрузки электродвигателей кулаковых валов свекломоек. Для контроля токовой нагрузки в одну из фаз электродвигателей включают трансформаторы 6а, 7а, сигналы от которых через преобразователи поступают на регулирующий прибор 7б, который осуществляет управление исполнительным механизмом распределительного шиберы VIII, направляющим свеклу в свекломойки пропорционально их нагрузке.

Постоянство загрузки моющей части свекломойки поддерживается путем воздействия на пульсирующие шиберы I, IV, VI, VII гидротранспортера в

* Тракт — любая параллельная ветвь части участка, которая по условиям технологии может быть включена в работу независимо от других параллельных ветвей.

** ЕСКД — единая система конструкторской документации.

зависимости от токовой нагрузки электродвигателей кулакового вала свекломойки и свеклонасоса. Здесь загрузка двух свекломоек происходит равномерно, поэтому учитывается токовая нагрузка электродвигателя одной из свекломоек. Сигнал по нагрузке поступает от датчика *бв* на регулирующий прибор *Зв*. На него же от датчиков *Зб*, *4б* поступает корректирующий сигнал по нагрузке электропривода работающего свеклонасоса *В*. Регулирующий прибор *Зв* управляет пульсирующим шибером *VII* до тех пор, пока загрузка свекломойки не будет равна заданной. Задатчиком, встроенным в регулирующий прибор, можно менять задание регулятору на заполнение мойки свеклой. Контроль уровня свекловодяной смеси осуществляется с помощью устройства *ба*, состоящего из рычага, помещенного в гидротранспортер.

При изменении уровня рычаг отклоняется и воздействует на два конечных выключателя, фиксирующих нижний и верхний уровни свекловодяной смеси в гидротранспортере.

Схемой предусматривается сигнализация темпа подачи свеклы в гидротранспортер. В автоматическом режиме при отсутствии сигналов от датчиков верхнего и нижнего уровней свекловодяной смеси перед пульсирующим шибером *IV* устройство контроля уровня *1а* обеспечивает подачу сигналов «Нормальная подача», при снижении уровня — «Увеличить подачу», при повышении уровня перед шиберами *I*, *IV* от устройств *1а*, *2а* — «Прекратить подачу». Темп подачи свеклы в гидротранспортер сигнализируется сигнальными лампами на пульте управления, а также светофорами, установленными на кагатном поле и в бурчаной.

Приборы и аппаратуру автоматического управления размещают на пульте, который находится возле свекломойки. С помощью этих приборов автоматический контролируется положение пульсирующих шиберов, сигнализируются накопление свеклы перед шибером, масса свеклы в бункере, работа механизмов. На пульте расположены ключи дистанционного управления шиберами и ключ выбора режима (автоматический или дистанционный). Электроприводы механизмов и транспортных устройств, связанных единым потоком, электрически заблокированы.

Взаимосвязь и взаимодействие между отдельными элементами систем и способы электропитания приборов и средств автоматизации отображаются на принципиальных электрических схемах.

Принципиальные электрические схемы разрабатываются на основании решений, принятых в схемах автоматизации. От качества их разработки в большой степени зависят такие факторы, как производительность автоматизируемого оборудования, соответствие систем автоматического регулирования и управления требованиям технологического процесса, надежность действия, простота эксплуатации.

Принципиальные электрические схемы составляют обычно для участков автоматизируемой системы. В качестве примера на рис. 1.2 приведена принципиальная электрическая схема узла автоматического регулирования количества свеклы, поступающей в свекломойку (см. также рис. 1.1).

Электрической схемой (см. рис. 1.2) предусмотрено автоматическое регулирование количества свеклы, поступающей в свекломойку, осуществляемое в функции суммарной токовой нагруз-

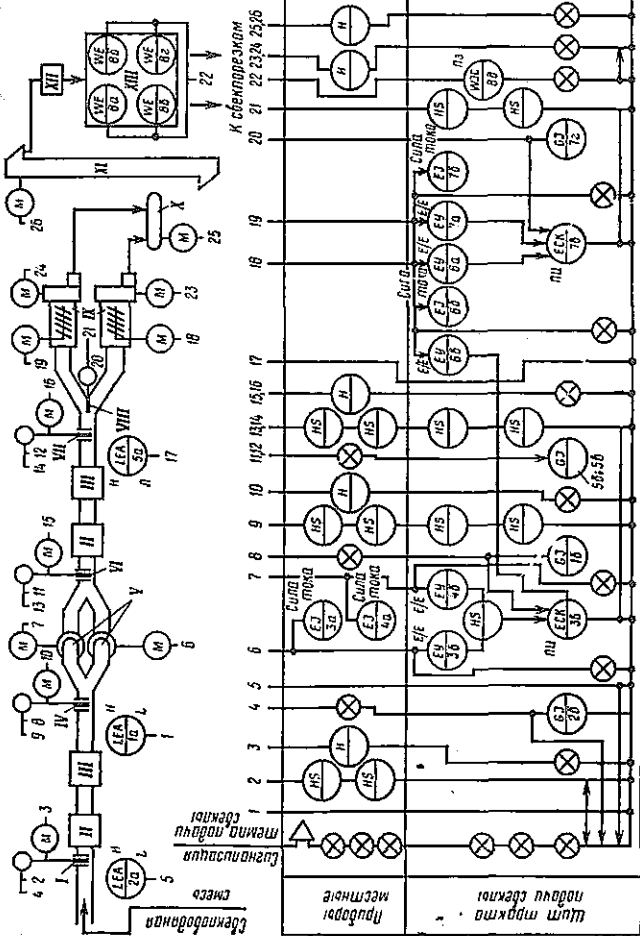


Рис. 1.1. Схема автоматизации тракта подачи сахарной свеклы на завод:

I — пульсирующий шибер № 4; II — камнеловушка; III — соломоловушка; IV — пульсирующий шибер № 3; V — свеклонасосы; VI — пульсирующий шибер № 2; VII — пульсирующий шибер № 1; VIII — шибер распределительный; IX — свекломойки; X — транспортер; XI — элеватор свеклы; XII — бункер для свеклы

ки электродвигателей моющей части с низким уровнем в свекломойке и свеклонасосе.

Для получения сигнала изменения токовой нагрузки в силовые цепи электродвигателей включены трансформаторы тока, вторичные обмотки которых подключены к датчикам трансформаторов тока 3б, 6а, преобразующим сигналы изменения токовой нагрузки в напряжение, которое подается на вход регуляторов 3в. На выход регулятора (клеммы 7, 8, 9) подключена катушка реверсивного магнитного пускателя, управляющего исполнительным механизмом пульсирующего шибера IV—М. При подаче соответствующих сигналов от регулятора происходят открывание и закрывание пульсирующего шиберы, обеспечивающие увеличение либо уменьшение подачи свеклы в свекломойку. Режим автоматического регулирования поддерживается при работе выбрасывающих и перебрасывающих лап свекломоек. При отключении электропривода выбрасывающих лап через контакты реле IX—KL1 происходит принудительное закрывание шиберы IV—М независимо от сигнала, поступающего от регулятора.

Дистанционное управление пульсирующим шибером IV—М возможно из двух мест — со щита управления и местного щита. Выбор режима работы пульсирующего шиберы IV—М производится соответственно ключами IV—SA1, IV—SA2.

Одним из требований, которым должны удовлетворять электрические схемы управления, является обеспечение заданных режимов работы. В электрических схемах возможность выбора заданных режимов управления достигается при помощи узлов выбора режима, являющихся составной частью схем управления и регулирования.

В зависимости от степени участия оператора в процессе управления различают следующие режимы:

автоматического управления — автоматический режим, при котором управление производится без участия оператора, но под его контролем и по его заданию;

полуавтоматического управления — полуавтоматический режим (его часто называют режимом автоматизированного управления), при котором в отличие от режима автоматического управления осуществление основных командных операций по управлению (пуск, остановка, изменение режима работы оборудования и т. п.) возлагается на оператора;

ручного управления — ручной режим, при котором все операции по управлению осуществляются оператором.

Автоматическое, полуавтоматическое и ручное управления, основным содержанием которых является обеспечение определенных порядка и последовательности пуска, работы и остановки механизмов, участвующих в процессе, достигаются путем введения соответствующих блокировок.

В зависимости от места расположения командной аппаратуры управление в полуавтоматическом и ручном режимах может быть местным (командные аппараты устанавливаются непосредственно у оборудования) либо дистанционным. Местное управление необходимо для ввода системы в автоматический режим для проведения ремонтных, проверочных и наладочных работ. При этом блокировочные связи и сигнализация, безусловно необходимые для защиты устройства, должны быть сохранены в местном режиме.

При выборе режимов работы автоматизированного оборудования встречаются и более сложные случаи. Так, в случае, когда при автоматическом управлении из двух аналогичных агрегатов всегда работает один, а второй является резервным, для каждого из агрегатов предусматриваются следующие режимы работы: автоматический рабочий, автоматический резервный, ручной ремонтный.

Успешное решение проблем автоматизации технологических процессов связано с применением ЭВМ и микропроцессорной техники. Требования, диктуемые применением вычислительной техники, изменяют характер подготовки описания технологического процесса и выдвигают необходимость представления его в виде алгоритма. Алгоритм* — это система правил, следуя которой можно разрешить определенную математическую задачу, производя необходимые операции в строго определенной последовательности.

Разработка алгоритмов осуществляется на основе государственных стандартов и нормативно-технических документов, регламентирующих состав, содержание и оформление документации. Основной формой представления типовых проектных решений является алгоритмический модуль, являющийся комплектом документов типового алгоритма решения частной задачи (класса задач).

Классификация алгоритмических модулей (АМ) осуществляется по признакам, основными из которых являются сложность структуры алгоритма; тип алгоритма, определяющий ориентацию АМ на разработчиков разных частей АСУ ТП; функциональное назначение.

По сложности структуры АМ делятся на простые модули и алгоритмические комплексы (АК), включающие в себя другие АМ или АК.

По типу АМ подразделяются на технологические, математические и вычислительные (табл. 1.1).

К технологическим относятся алгоритмы, описываемые в тер-

* Блок-схемы алгоритмов выполняются в соответствии с ГОСТом, а также с учетом рекомендаций, приведенных в приложении 3.

1.1. Характеристика алгоритмов

Наименование характеристики	Технологические алгоритмы	Математические алгоритмы	Вычислительные алгоритмы
Основные потребители АМ	Специалисты по автоматизации конкретного технологического процесса (системотехники)	Разработчики АСУ ТП	Разработчики (программисты)
Доминирующий тип описания	Содержательное	Математическое	Пооперационное
Рекомендуемый язык описания	Термины предметной области	Математический аппарат	Язык описания процедур обработки информации
Элементы алгоритма	Математические задачи или процедуры обработки информации	Математические формулы, соотношения и т. п.	Вычислительные процедуры, процедуры обмена информацией и т. п.
Допустимая инвариантность алгоритма	К математическим методам решения промежуточных задач; к вычислительным процедурам; к техническим средствам реализации	К вычислительным процедурам; к техническим средствам реализации	К техническим средствам реализации (типу ЭВМ, ОС, алгоритмическим языкам и т. д.)
Оформляемые основные документы (допустимость объединения документов и разделов)	Описание постановки задачи (с описанием алгоритма в виде раздела)	Описание постановки задачи; описание алгоритма	Описание алгоритма (описание постановки задачи входит в раздел «Назначение и характеристика»; математическое описание входит в раздел «Алгоритм решения»)
Обязательность примера программной реализации	Пример может не оформляться	Пример обязателен	Пример обязателен

минах, отражающих специфику конкретного процесса и задач его автоматизации, решение которых возможно с помощью математических методов или процедур обработки информации.

К математическим относятся алгоритмы, описываемые в терминах технической кибернетики, теории систем и т. п., решающие сложные математические задачи контроля, управления и моделирования, лишенные отраслевой, технологической специфики.

К вычислительным относятся алгоритмы, обеспечивающие организацию вычислительных процессов и обработку информации в АСУ ТП, позволяющие программистам использовать его в качестве основы технического задания на разработку программы.

§ 1.2. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И СИГНАЛИЗАЦИЯ

При разработке систем автоматизации технологические процессы необходимо представлять в виде объектов управления, используя известные методы теории автоматического управления. Общность этих методов позволяет создавать системы управления для технологических процессов разной природы по единым принципам, учитывая конкретные особенности этих объектов только при разработке способов получения информации с объекта (установке измерительных датчиков) и вводе управляющих воздействий в объект (установке исполнительных механизмов).

Таким образом, множество разнохарактерных типов технологических процессов и оборудования, возникшее и развивающееся в пищевой промышленности в связи с производством большого ассортимента продуктов, представляют ограниченным перечнем типовых объектов управления. В самом общем виде объект управления — это система, рассматриваемая как комплекс динамически связанных элементов. В соответствии с принятой для технологических процессов терминологией технологический объект управления — это совокупность технических средств (агрегаты, механизмы, аппараты и т. д.), которая нуждается в оказании специально организованных воздействий для достижения желаемых результатов функционирования.

Современный технологический процесс в большинстве случаев представляется как многомерный объект (рис. 1.3), на входе которого действует векторная переменная $X(t)$ с составляющими $x_1(t)$, ..., $x_n(t)$. Эти составляющие представляют собой показатели свойств сырья, поступающего на переработку, учитывающие его химический состав, механические свойства, скорость подачи, стоимость и т. д. Параметры, представляющие собой характеристики протекания технологического процесса, отражают температуру, давление, расход, производительность и т. д., являются переменными $f_1(t)$, ..., $f_n(t)$ векторной функции $F(t)$. Характеристики полученного продукта или полупродукта представляют собой выходные переменные $y_1(t)$, ..., $y_n(t)$ век-

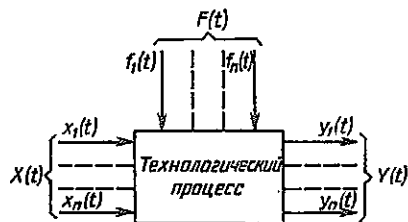


Рис. 1.3. Параметрическая схема многомерного процесса



Рис. 1.4. Упрощенная параметрическая схема многомерного процесса

торной переменной $Y(t)$. К ним относятся количество, состав, стоимость и другие выходные показатели.

Для реальных технологических процессов число составляющих векторных функций $X(t)$, $F(t)$ и $Y(t)$ велико и не все они могут быть измерены. Поэтому при контроле и управлении технологическим процессом векторные функции $X(t)$, $F(t)$ и $Y(t)$ рассматриваются как случайные.

При общем рассмотрении нет необходимости разделять переменные $X(t)$ и $F(t)$, потому что и те и другие могут рассматриваться как причины и их влияние сказывается на $Y(t)$, причем часть из них может быть управляющими величинами. Таким образом, параметрическая схема многомерного технологического процесса примет вид, показанный на рис. 1.4. При этом на входе технологического процесса действует векторная случайная функция $X(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t)\}$, включающая как измеряемые, так и неизмеряемые входные переменные. Некоторые из них являются управляющими и могут относиться как к характеристикам сырья, так и к параметрам самого технологического процесса. Выход представлен векторной случайной функцией $Y(t) = \{y_i(t), \dots, y_n(t)\}$.

Пример. Согласно принятой методике все переменные технологического участка, характеризующие состояние продуктового потока в условиях переработки свеклы, разделяются на входные и выходные, которые, в свою очередь, подразделяются на измеряемые и неизмеряемые. Параметрическая схема тракта подачи свеклы приведена на рис. 1.5. На схеме показаны переменные, наиболее существенно характеризующие процесс подачи свеклы на завод. Вектор функции входной переменной $X(t)$ определяется следующими составляющими (см. рис. 1.5):

входные неизмеряемые переменные — сахаристость поступающей свеклы $Дг_1$; загрязненность поступающей свеклы $Зг_1$; качество свеклы A_1 ; вектор состояния ножей свеклорезки W ;

входные измеряемые переменные — расход транспортно-моечной воды $Q_в$; количество поступающей свеклы G_1 ; температура транспортно-моечной воды $T_в$.

Вектор функции выходной переменной $Y(t)$ определяется следующими составляющими:

выходные неизмеряемые переменные — степень загрязненности свеклы, поступающей в бункер перед свеклорезками, $Зг_2$; содержание сахара в транспортно-моечной воде $C_в$; качество свекловичной стружки (длина 100 г стружки и процент брака) A_2 ; сахаристость свекловичной стружки $Дг_2$;

выходные измеряемые переменные — число отвесов свеклы n ; количество или уровень свеклы в бункере перед свеклорезками $G_2(H)$.



Рис. 1.5. Параметрическая схема тракта подачи свеклы на завод (пунктиром и штрихпунктиром показаны соответственно входные и выходные неизмеряемые параметры, сплошными линиями — соответственно измеряемые параметры)

Из примера следует, что технологические процессы относятся к системам с неполной априорной* информацией. Выбор переменных определяется не только их взаимосвязью, а и возможностью их измерения и преобразования информации. Здесь контролируемыми параметрами процесса подачи свеклы в завод являются расход транспортно-моечной воды, количество поступающей свеклы, температура транспортно-моечной воды, количество (уровень) свеклы в бункере перед свеклорезками.

Параметры определяются и контролируются технологическими измерениями с помощью приборов, состоящих из первичного преобразователя, канала связи и вторичного прибора. В случаях, когда локальные системы автоматизации одновременно являются составной частью комплекса технических средств АСУ ТП, особое место занимают средства систем сбора, передачи и отображения информации. Эти системы включают измерительные датчики параметров технологического процесса, вырабатывающие электрические, пневматические выходные сигналы, а также функциональные преобразователи для получения унифицированных сигналов, обеспечивающих непосредственный ввод в ЭВМ.

На вход ЭВМ может передаваться информация сигналами низкого уровня (0—100 мВ) от термопреобразователей и потенциометров и сигналами высокого уровня (0—5 В; 0—10 В; 0—5 мА; 0—20 мА; 0—100 мА) от измерительных датчиков. Унификация сигналов, поступающих на вход ЭВМ, осуществляется с помощью измерительных и нормирующих преобразователей, выпускаемых серийно отечественной промышленностью.

Выходная информация для контроля и управления технологическим процессом после обработки на ЭВМ формируется в виде цифровых кодов. Поэтому в зависимости от вида применяемых исполнительных устройств и регуляторов необходимо преобразовывать выходные сигналы ЭВМ в унифицированные электрические или пневматические сигналы. Для этого также применяют соответствующие преобразователи.

Таким образом, средства локальной автоматизации обеспечивают ввод в ЭВМ измерительной и цифровой информации в составе системы передачи, включающей коммутатор аналоговых сигналов, аналого-цифровой преобразователь, коммутатор цифровых сигналов и устройство приема цифровых сигналов. В свою очередь, система передачи информации от ЭВМ включает коммутатор цифровых сигналов контроля и управления и цифро-аналоговые преобразователи.

Наряду с указанными функциями средства локальной автоматизации обеспечивают работу системы отображения информации,

* Априори (от латинского *argiori* из предшествующего) — независимо от опыта, до опыта, заранее, наперед.

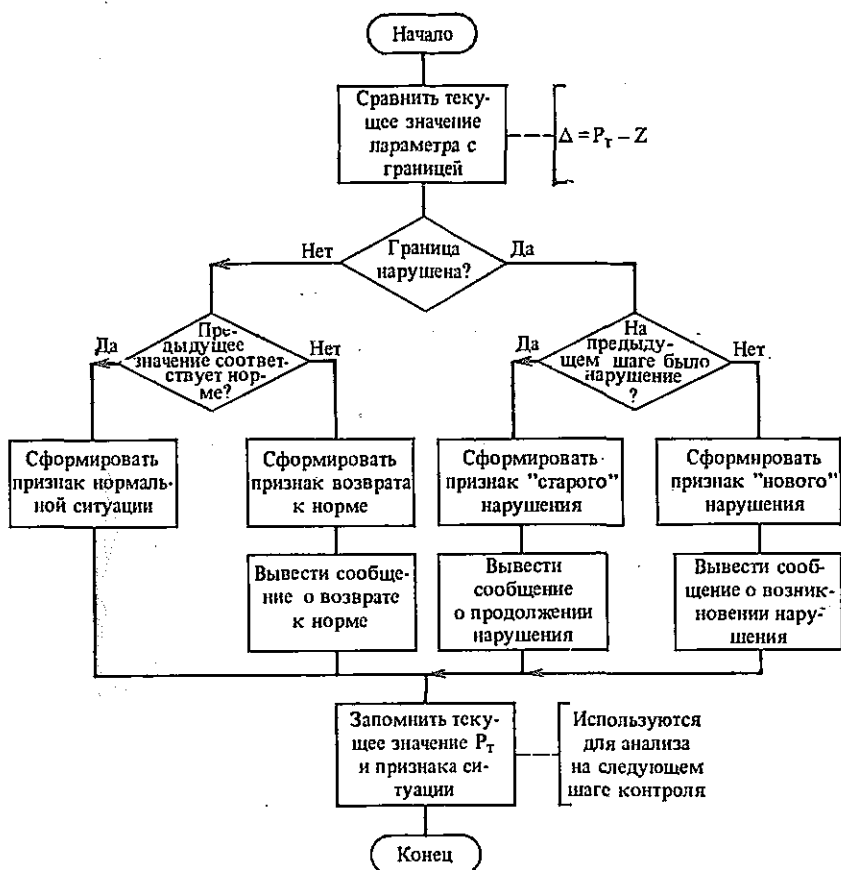


Рис. 1.6. Блок-схема алгоритма контроля технологического параметра

позволяющей оператору осуществлять контроль за ходом технологического процесса и использовать «советы» ЭВМ для выбора режима управления. Особенностью использования ЭВМ является необходимость разработки алгоритма решения задачи. На его основе составляется машинная программа, являющаяся описанием алгоритма решения задачи на языке машины.

Пример. Составим алгоритм для контроля одного аналогового технологического параметра.

Назначение алгоритма — периодический контроль соответствия значения технологического параметра заданному технологическому режиму. Контроль осуществляется в заданные моменты времени путем сравнения текущего значения параметра P_T с заданным граничным значением Z . Заданное значение может быть нижней (Z_n) или верхней (Z_v) границей.

Технологический режим считается нарушенным, если выполняются следующие условия:

для нижней границы $\Delta = P_T - Z_n < 0$;

для верхней границы $\Delta = P_T - Z_v > 0$.

В зависимости от результата, полученного на предыдущем шаге контроля, возможны следующие ситуации:

1) параметр остается в нормальном состоянии, т. е. на предыдущем и текущем шагах контроля граница не была нарушена;

2) параметр вернулся к норме, т. е. на предыдущем шаге было зафиксировано нарушение границы, на текущем шаге нарушения нет;

3) параметр в состоянии «нового» нарушения, т. е. зафиксировано нарушение границы, но на предыдущем шаге его не было;

4) параметр в состоянии «старого» нарушения, т. е. нарушение границы зафиксировано как на текущем, так и на предыдущем шагах.

На рис. 1.6 приведена блок-схема алгоритма для данного режима, составленная в соответствии с рекомендациями приложения 3.

Каждой ситуации соответствует свое значение признака ситуации.

Информирование оператора о результатах контроля осуществляется путем вывода световых и звуковых сигналов, а также текстовых сообщений на печать или дисплей.

В первом из указанных выше случаев никаких сообщений не выдается. Во втором и третьем случаях выводится сообщение об изменении ситуации (например, подаются звуковой и мигающий световой сигналы, а также выводится текстовое сообщение). В четвертом случае выводится сообщение о «старом» нарушении (например, подается непрерывный световой сигнал).

Для анализа ситуации на следующем шаге контроля должно обеспечиваться запоминание текущего значения контролируемого параметра и признака ситуации.

На автоматизируемых предприятиях отрасли, характеризующихся наличием дорогостоящего оборудования и переработкой больших количеств ценного сырья, применяется сигнализация для информирования обслуживающего персонала о ходе технологического процесса и состоянии оборудования.

По характеру информации различают сигнализацию технологическую — о состоянии параметров процесса и производственную — о состоянии оборудования. По назначению сигнализация делится на рабочую, предупреждающую и аварийную. Выбор того или иного вида сигнализации зависит от конкретных условий и характера процесса. На рис. 1.7 показана схема сигнализации темпа подачи свеклы в зависимости от уровня свекловодяной смеси перед шибером III для схемы автоматизации тракта подачи свеклы на завод (см. также рис. 1.1).

Схемой предусмотрена возможность сигнализации изменения темпа подачи свеклы в гидротранспортер автоматически либо дистанционно. Выбор режима работы сигнализации производится ключом SA1 со щита управления. В автоматическом режиме отсутствие свекловодяной смеси перед пульсирующим шибером III (замкнуты контакты P1 и P2 сигнализаторов уровня в цепи реле 2—KL) обеспечивает подачу сигнала «Нормальная подача». При снижении уровня свекловодяной смеси до срабатывания реле 3—KL его контакты подают сигнал «Увеличить подачу». При

верхнем уровне свекловодяной смеси перед пульсирующим шибром III срабатывает реле 1—KL и поступает сигнал «Прекратить подачу». Темп подачи свеклы в гидротранспортер сигнализируется сигнальными лампами на щите управления, а также по месту светодорами, установленными на кагатном поле и в бурачной. Изменение темпа подачи свеклы сопровождается кратковременным звуковым сигналом. В дистанционном режиме подачу сигналов о темпе подачи свеклы осуществляют ключом SA2 со щита управления.

На щитах или пультах световые сигналы оформляются в виде табло или специальной сигнальной аппаратуры. Табло обычно применяют для сигнализации о состоянии технологических параметров, а сигнальную аппаратуру — для разных производственных сигналов. При этом надпись о содержании сигнала в первом случае выполняют на самом табло, во втором — в рамке, установленной около аппаратуры. Часто сигнальные элементы встраивают в мнемосхему процесса.

Схемы сигнализации строят таким образом, что при нарушении режима обеспечивается подача звукового и светового сигналов. Звуковой сигнал служит для привлечения внимания обслуживающего персонала и выполняется, как правило, общим для

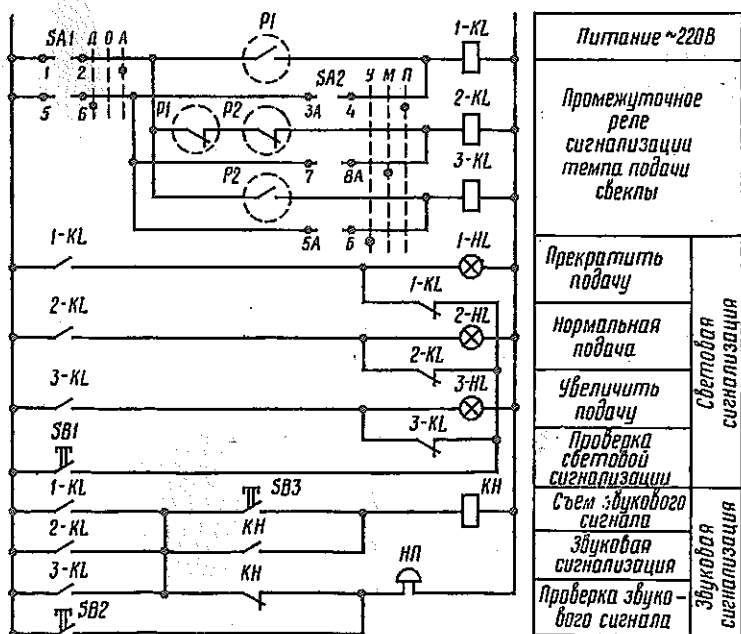


Рис. 1.7. Принципиальная электрическая схема сигнализации темпа подачи свеклы

всех световых сигналов схемы, каждый из которых указывает место нарушения режима либо возникновения неисправности.

Рекомендуется выбирать следующий цвет линз сигнальной арматуры: красный — аварийное состояние, зеленый — нормальное состояние, желтый — предупредительный сигнал, белый — разные производственные сигналы.

Звуковой сигнал снимается дежурным персоналом, а световой остается включенным до устранения причины, вызвавшей его появление. Различают схемы сигнализации без повторности действия и с повторностью действия звукового сигнала. Схемы без повторности действия звукового сигнала применяют в тех случаях, когда появление хотя бы одного из сигналов вызывает остановку всей системы (например, сблокированная поточно-транспортная система) либо необходимость в остановке всего агрегата или установки. Схемы с повторностью действия звукового сигнала применяют в тех случаях, когда возможно последовательное замыкание нескольких сигнальных контактов и при замыкании каждого из них необходимо получить звуковой сигнал, в то время когда причина, вызвавшая появление предыдущего сигнала, еще не ликвидирована.

§ 1.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

В соответствии с принятой терминологией автоматическое регулирование представляет собой разновидность автоматического управления, задачей которого является поддержание постоянной некоторой величины (параметра), характеризующей процесс, или изменение ее по заданному закону. Последнее осуществляется с помощью контроля (измерения) состояния объекта и формирования воздействий, обеспечивающих требуемый режим работы объекта управления.

В круг задач автоматического регулирования не входят, например, адаптация (или самонастройка), формирование оптимальных управляющих воздействий и автоматический выбор наилучших режимов из нескольких возможных (поскольку они относятся к задачам управления).

Совокупность объекта управления и автоматического регулятора, взаимодействующих между собой в соответствии с алгоритмом управления, называют системой автоматического регулирования.

Несмотря на то что развитие автоматизации технологических процессов в отрасли характеризуется переходом от автоматизации отдельных аппаратов и установок к созданию автоматизированных технологических комплексов и предприятий в целом, специфика пищевой технологии вызывает необходимость создания и совершенствования систем автоматического регулирования про-

цессов в аппаратах, агрегатах и установках. Это технологическое оборудование представляет собой сложные объекты управления с существенным временем запаздывания*, ярко выраженными критическими границами, вблизи которых требуется вести процесс, и переменными параметрами. Вместе с тем применение современных методов и средств для создания рациональных систем автоматического регулирования отвечает первоочередным требованиям повышения качества продукции, гарантирует высокую функциональную надежность оборудования и обеспечивает значительное повышение эффективности производства.

Многочисленные исследования типовых технологических процессов (процессы тепло- и массообмена, ферментации, стерилизации, варки, сушки, многокомпонентного дозирования, перекачивания жидких продуктов и т. п.) в разных пищевых производствах позволили создать рациональные системы автоматического регулирования и управления (табл. 1.2).

1.2. Системы автоматического регулирования технологических параметров, применяемые в пищевой промышленности

Классы систем автоматического регулирования (САР)	Удельный вес в общем объеме применяемых САР, (%)	Характерные примеры САР
Одноконтурные автоматические стабилизирующие системы	76	
В том числе:		
непрерывного действия	59	Стабилизация давления низа колонны брагоректификационной установки Стабилизация температуры томатопродуктов на выходе из подогревателя Стабилизация уровня в вакуум-выпарных установках томатного, соляного и сахарного производств
дискретного действия	1	Стабилизация плотности расстирки в спиртовом производстве
импульсные		
релейные	15	Стабилизация температуры в охладительных камерах производственных и распределительных холодильников Стабилизация уровня в бункерах хлебопекарного производства

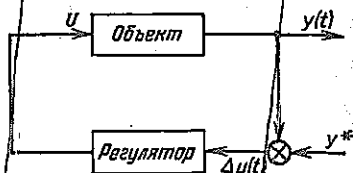
* Временной интервал между моментами появления информации на входе и соответствующей ей информации на выходе объекта.

Классы систем автоматического регулирования (САР)	Удельный вес в общем объеме применяемых САР, (%)	Характерные примеры САР
системы с переменной структурой	1	Стабилизация температурного режима в распылительных сушилках синтетических моющих средств
Одно- и многоконтурные системы программного управления	7	Управление температурой и давлением в автоклавах консервной промышленности Программное управление процессом варки утфеля сахарного, сахарорафинадного производств и кристаллизации глюкозы в крахмало-паточном производстве
Следящие системы (системы соотношения и системы соотношения с коррекцией по третьему параметру)	-7	Регулирование соотношения «сок — известковое молоко» в отделении defeкоcаурации сахарного производства Поддержание соотношения «зерно — вода» с коррекцией по плотности замеса в спиртовом производстве
Каскадные системы	6	Регулирование расхода спирта с коррекцией по температуре на контрольной тарелке ректификационной колонны Регулирование расхода мисцеллы в дистиллятор с коррекцией по уровню в сборнике
Комбинированные автоматические стабилизирующие системы	2	Регулирование отбора спирта на выходе ректификационной колонны с измерением количества алкоголя на выходе бражной колонны
Система статической и динамической оптимизации	2	Оптимальное распределение загрузки параллельно действующих экстракторов Оптимальное управление производительностью вакуум-выпарной установки томатного производства

Большая часть используемых систем относится к классу замкнутых автоматических систем регулирования по отклонению (систем с обратной связью) (рис. 1.8). При этом наиболее широкое применение (около 76%) получили системы стабилизации разных режимных параметров технологических агрегатов и установок.

Рис. 1.8. Блок-схема замкнутой автоматической системы регулирования по отклонению:

$y(t)$ — регулируемая величина; y^* — заданная величина; $\Delta y(t)$ — отклонение регулируемой величины от заданного значения; U — регулирующее воздействие



Технологические требования к системе автоматического регулирования для этих объектов сводятся к ограничениям величины допустимых отклонений параметров от их номинальных, либо заданных значений, а также продолжительности процесса регулирования, представляющего собой время, за которое регулируемая величина возвращается после возмущающих воздействий к заданному значению. Кроме того, обычно формируются требования к системе автоматического регулирования, связанные с характеристикой технологической среды.

В простейшем случае система автоматического регулирования должна обеспечить выполнение условий

$$y_i < y_i^{\text{доп}}, \quad t_{pi} < t_{pi}^{\text{доп}},$$

где y_i , t_{pi} — соответственно отклонение и время регулирования i -й регулируемой величины; индекс «доп» обозначает допустимую величину.

Для подавляющего числа объектов регулирования пищевой технологии удовлетворительным является переходный процесс с 20%-ным перерегулированием; в некоторых случаях переходный процесс должен быть аperiodическим или обладать минимальной интегральной оценкой.

Для оценки качества регулирования в переходных режимах чаще всего применяют величину среднеквадратичного отклонения

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\Delta y)^2 dt} \quad (1.1)$$

или интегральный критерий

$$I = \int_0^\infty (\Delta y)^2 dt, \quad (1.2)$$

где $\Delta y = y(t) - y^*$, а $y(t)$ рассматривается как случайный стационарный эргодический* процесс.

Практически критерии (1.1) или (1.2) отражают требование $y(t) \rightarrow y^*$ или $\Delta y(t) \rightarrow 0$. Замкнутые автоматические системы регулирования пищевых объектов могут быть реализованы по отклонению регулируемой величины и по возмущению.

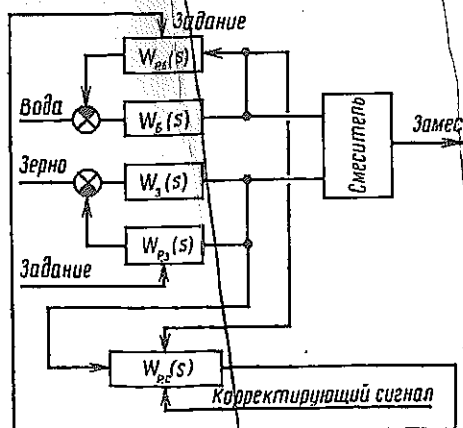
* Свойство динамической системы, состоящее в том, что в переходном режиме почти каждая точка системы с определенной правильностью проходит вблизи любой другой точки системы.

Для широкого класса технологических процессов используется принцип автоматического регулирования по разомкнутому циклу — принцип следящего и программного управления, когда априори выбранный закон регулирования обеспечивает получение заданной выходной переменной. Для сложных процессов при недостаточной априорной информации автоматическое регулирование по разомкнутому циклу не обеспечивает получение заданных выходных переменных. В этих случаях используют комбинированный принцип, когда полученный по программе закон регулирования корректируется по состоянию технологического процесса.

Пример. На рис. 1.9 показана блок-схема следящей системы автоматического регулирования соотношения расходов «зерно — вода» в целях получения в спиртовом производстве замеса (размолотого зерна) заданной крахмалистости, построенная по разомкнутому циклу. Технологическая схема содержит одну транспортную линию зерна, куда входят бункер для зерна, мельничные агрегаты (рабочий и резервный) и смеситель с мешалкой. Контроль количества поступающего в смеситель зерна осуществляется с помощью вибротолкового расходомера (комплектно с регулирующей заслонкой), установленного на трубопроводе зерна после бункера; контроль количества воды, поступающей в смеситель, — с помощью ротаметра, установленного на трубопроводе воды.

На блок-схеме системы регулирования сигнал от датчика расхода зерна поступает на регулятор соотношения $W_{p.c}(s)$ в качестве ведущей переменной. В качестве ведомой переменной служит сигнал от датчика расхода воды. Выходной сигнал регулятора соотношения $W_{p.c}(s)$ управляет величиной задания регулятора $W_{p.v}(s)$ в контуре стабилизации количества подаваемой в смеситель воды таким образом, чтобы обеспечивалось заданное соотношение расходов «зерно — вода». Поскольку основным параметром приготовления замеса является его крахмалистость, предусмотрено введение корректирующего сигнала регулятору соотношения $W_{p.c}(s)$.

Величину корректирующего сигнала в каждом конкретном случае устанавливают в зависимости от данных лабораторных анализов, поскольку нет серийно выпускаемого прибора для автоматического измерения крахмалистости замеса в технологическом потоке.



Приведенная на рис. 1.9 система регулирования соотношения «зерно — вода» является комбинированной по двум признакам. Во-первых, она является разомкнутой системой по отношению к объекту регулирования — смесителю, а получаемый сигнал управления корректируется сигналом обратной связи в зависимости от хода технологического процесса.

Рис. 1.9. Блок-схема системы автоматического регулирования крахмалистости замеса:

$W_{p.v}(s)$, $W_{p.c}(s)$ и $W_{p.c}(s)$ — соответственно регуляторы воды, зерна и соотношения «зерно — вода»

Во-вторых, регулирование основной величины (заданное значение крахмалистости замеса) осуществляется по возмущающим факторам: количествам поступающих зерна и воды. Система содержит также два самостоятельных контура, работающих по отклонению: контур стабилизации количества поступающего зерна и контур стабилизации количества поступающей воды.

Разработка блок-схемы позволяет определить принципы построения системы автоматического регулирования, произвести ее расчет, выбор регулятора и его настроек. (Решение этих задач рассмотрено в главе 3).

В настоящее время наряду с развитием работ по использованию вычислительной техники для автоматизации технологических процессов в целом совершенствуются также технические средства локальной автоматизации.

Новая элементная (микросхемы, микропроцессоры) и конструктивная (унифицированные типовые конструкции) базы позволяют разрабатывать компактные и надежные устройства автоматического регулирования, которые легко компонуются в стойки, аналогичные стойкам и шкафам вычислительных машин. Благодаря расширению функциональных возможностей приборов и устройств стало возможным создавать схемы регулирования комплексных параметров (энтальпия, КПД и др.). Внедрение логических устройств позволяет осуществлять изменение структуры и параметров настройки систем.

Для решения задач автоматического регулирования технологических процессов получил применение новый класс устройств управления, выполненных на микропроцессорной элементной базе, — регулирующие микропроцессорные контроллеры (ремиконт). Для синтеза системы непосредственно цифрового регулирования необходимо использование соответствующего алгоритма. Рассмотрим пример разработки алгоритма регулирования в одноконтурной системе.

Назначение алгоритма: реализация в автоматическом режиме одного из стандартных (ПИД, ПИ, ПД, П, И) законов регулирования в одноконтурной системе с одним контролируемым параметром, характеризующим технологический процесс. Алгоритм позволяет также осуществить безударный переход из ручного режима управления в автоматический.

На каждом (n -м) шаге регулирования осуществляется ввод через устройства связи с объектом (УСО) текущего значения $y_{тек, n}$ регулируемой величины и положения исполнительного механизма u_n^* . Вначале рассчитывается ошибка регулирования

$$\Delta y_n = y_{тек, n} - y_{зад, n},$$

где $y_{зад, n}$ — заданное значение регулируемой величины.

Затем анализируется признак режима работы — автоматический или ручной (дистанционный) режим управления. Для автоматического режима определяют необходимый закон регулирования, проводят расчет величины управляющего воздействия в соответствии с выбранным законом и осуще-

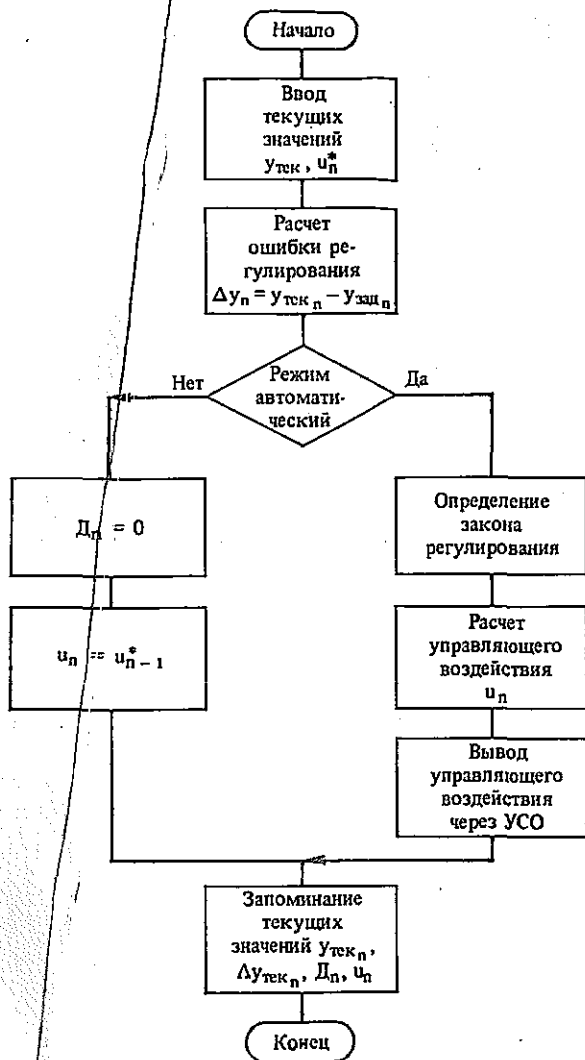


Рис. 1.10. Блок-схема алгоритма одноконтурной автоматической системы регулирования

составляют вывод управляющего воздействия через УСО на исполнительный механизм.

Расчет управляющих воздействий осуществляют по следующим формулам:

для ПИД-закона

$$D_n = D_{n-1} + 1/\alpha (\Delta u_n - \Delta u_{n-1}) + K_D (\Delta u_n - D_{n-1});$$

$$U_n = U_{n-1} + K(D_n - D_{n-1}) + K_n D_n;$$

$$K_D = \frac{\Delta T}{\alpha T_2 + \Delta T}; \quad K_I = K \frac{\Delta T}{T_1};$$

для ПИ-закона

$$U_n = U_{n-1} + K(\Delta y_n - \Delta y_{n-1}) + K_I \Delta y_n;$$

для П-закона

$$U_n = U_{n-1} + K(\Delta_n - \Delta y_{n-1});$$

для ПД-закона

$$U_n = U_{n-1} + K_D(D_n - D_{n-1});$$

для И-закона

$$U_n = U_{n-1} + K_I \Delta y_n.$$

В формулах $u_{тек}$ — текущее значение регулируемой величины; K , K_D , K_I — коэффициенты при П-, Д-, И-составляющих; $1/\alpha$ — амплитуда производной; T_1 , T_2 — постоянные времени интегрирования (время издрорма) и дифференцирования (время предварения); ΔT — период квантования (интервал времени между двумя последовательными шагами регулирования); $u_{зад}$ — заданное значение регулируемой величины; Δy — ошибка регулирования (отклонение текущего значения $u_{тек}$ от заданного $u_{зад}$); U — величина управляющего воздействия; n , $n-1$ — индексы текущего и предыдущего шагов регулирования.

Блок-схема алгоритма изображена на рис. 1.10.

В случае ручного (дистанционного) режима расчет и вывод управляющих воздействий не производятся. Для осуществления в дальнейшем безударного перехода к режиму автоматического управления переменным D_n и U_n присваиваются следующие значения: $D_n = 0$, $U_n = U_{n-1}^*$ (где U^* — положение исполнительного механизма).

Независимо от режима работы запоминаются значения следующих переменных, необходимых для выполнения алгоритма на последующем шаге регулирования: $u_{тек}$, $u_{зад}$, D_n , U_n .

§ 1.4. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПУСК И ОСТАНОВКА ОБОРУДОВАНИЯ

Непрерывное развитие технологических процессов сопровождается усложнением управления оборудованием. При этом особенно возрастает число логических операций, которые необходимо выполнить при управлении процессом. Поэтому решение задач управления приходится сочетать с целым рядом операций переключения.

Управление технологическим процессом переключательного типа называют логическим. В пищевой технологии существует три характерных класса производственных задач, решение которых требует выполнения определенной последовательности логических переключательных операций:

совместная работа однотипного оборудования (например, согласование циклов работы отдельных аппаратов, работающих

параллельно на один коллектор в разных пищевых производствах, в частности замена оборудования при выводе аппаратов на регенерацию и в резерв);

пуск и остановка оборудования, оптимальные по времени и эксплуатационным затратам (например, пуск агрегатов рушально-веечного отделения маслоэкстракционного завода);

защита оборудования при возникновении аварийных ситуаций в ходе эксплуатации (например, обеспечение противозавалов при остановке какого-либо механизма элеватора или других поточно-транспортных систем).

Основными в реализации перечисленных задач являются аппаратные способы создания соответствующих систем. Однако в некоторых случаях экономически более выгодна реализация логических алгоритмов переключательного типа программным способом с использованием ЭВМ. Рассмотрим алгоритм логического управления технологическим оборудованием.

Назначение алгоритма: управление работой (включение/выключение) и контроль состояния технологического оборудования, составляющего последовательную цепь без разветвлений (например, поточно-транспортная линия).

Каждый элемент цепи снабжен датчиком, характеризующим состояние оборудования (работает/не работает), и исполнительным механизмом для включения и выключения.

Контроль состояния выполняется периодически с заданной частотой. Управление осуществляется по инициативному сигналу «включить цепь» (режим включения), или по сигналу «останов i -го элемента цепи» (режим останова), либо при обнаружении в процессе контроля останова одного из элементов цепи.

При поступлении сигнала «включить цепь» должен быть осуществлен запуск всех неработающих элементов цепи в заданной последовательности с заданными временными сдвигами.

При поступлении сигнала «останов i -го элемента» или обнаружении такого останова в процессе контроля должна быть приостановлена работа элементов цепи, предшествующих остановившемуся элементу и следующих после него. При этом каждому элементу цепи ставятся в соответствие последовательность выключения остальных элементов и необходимые временные сдвиги. Допускается, что часть элементов цепи может продолжать работать.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.11.

Первоначально проверяется режим выполнения алгоритма (блок 2): включение, останов или контроль.

В режиме включения проверяется, есть ли в цепи неработающие элементы (блок 3); для них формируется список, определяющий последовательность и временные сдвиги включения (блок 4); в соответствии с этим списком выводятся сигналы исполнительным механизмам на включение (блок 5). Если же все элементы цепи работают, то требование «включить цепь» было ложным и никакие действия производить не надо.

В режиме останова проверяется, есть ли в цепи работающие элементы (блок 6); определяется, от какого элемента цепи поступил сигнал «останов» (блок 7); для этого элемента формируется список, задающий перечень, последовательность и временные сдвиги выключения элементов цепи (блок 8), и в соответствии с этим списком выводятся сигналы исполнительным механизмом на выключение (блок 9).

Если при поступлении сигнала «останов» в цепи не было ни одного ра-

ботающего элемента, то сигнал «останов» был ложным и никаких действий не производится.

В режиме контроля осуществляется опрос всех датчиков состояния оборудования (блок 10), анализируются результаты опроса (блок 11) и, если обнаруживается остановившийся элемент, выполняются действия для останова всей цепи (блоки 7—9).

Выполнение алгоритма завершается запоминанием состояния цепи (блок 12):

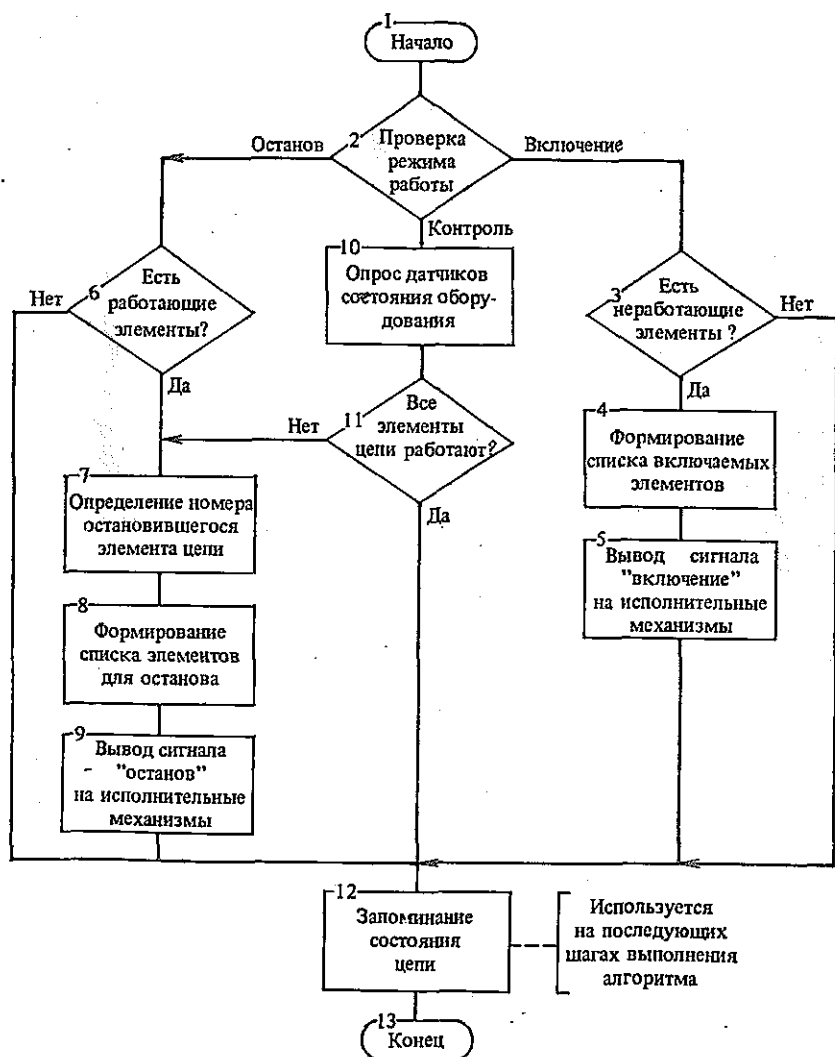


Рис. 1.11. Блок-схема алгоритма логического управления оборудованием

«работа», если работают все элементы цепи;
«полный останов», если вся цепь выключена;
«частичный останов», если часть элементов цепи работает, а часть выключена.

При разработке схем автоматического управления переключательного типа широко используют комплектные устройства управления. К ним относятся, в частности, станции управления электродвигателями разных типов и комплектные регулируемые приводы, в основу которых положены типовые схемы управления электродвигателями.

На предприятиях перерабатывающей отрасли наиболее широко применяются асинхронные короткозамкнутые электродвигатели вследствие простоты конструкции, простоты эксплуатации и дешевизны. Поэтому на практике чаще всего встречаются следующие схемы:

1. Управления нереверсивными асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором при прямом пуске от полного напряжения сети.

2. Управления реверсивными асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором при прямом пуске от полного напряжения сети.

3. Управления многоскоростными асинхронными электродвигателями с непосредственным подключением к сети.

4. Управления нереверсивными асинхронными электродвигателями с фазовым ротором.

5. Управления реверсивными асинхронными электродвигателями с фазовым ротором.

6. С комплектруемыми регулируемыми электроприводами, применяемыми для механизмов и устройств, требующих регулирования скорости. Они состоят из электродвигателя, устройства регулирования скорости и в ряде случаев устройств питания электродвигателя, электромагнитной муфты и т. п.

Применение комплектных регулируемых электроприводов приобретает особое значение при автоматизации пищевых производств, когда одной из задач является изменение производительности механизмов (насосов, вентиляторов, компрессоров и др.) при изменении параметров процесса либо по заданной программе. Особое преимущество такого регулирования проявляется в отсутствии необходимости устанавливать на трактах подачи сырья запорной арматуры (шиберов, задвижек), требующей повышенного внимания при эксплуатации из-за специфических особенностей сырья, полупродуктов и продуктов пищевых производств (засахаривание, забивание, разъедание и т. п.) и являющейся причиной возможного застоя продукта и связанного с этим микробиологического заражения.

Отечественная промышленность выпускает комплектные ре-

гулируемые электроприводы тиристорные с электродвигателями постоянного тока и приводы регулируемые с электромагнитной муфтой скольжения и электродвигателями переменного тока.

При выборе режимов различают два типа схем.

1. Схемы управления электроприводами отдельных технологических участков, установок и механизмов, работающих по индивидуальной программе.

2. Схемы управления электроприводами транспортных и других механизмов, образующих единую поточно-транспортную систему (ПТС).

Для электроприводов технологических механизмов, работающих по индивидуальной программе, наибольшее распространение получили схемы, обеспечивающие следующие режимы работы электроприводов:

работа в местном и дистанционном режимах при управлении кнопками;

длительная и кратковременная (импульсная) работа;

работа в местном (при управлении кнопками) и автоматическом режимах;

автоматическое включение резервного агрегата, перевод из режима рабочего агрегата в режим резервного агрегата и обратно.

§ 1.5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА

Автоматическая защита является одной из важнейших функций в схемах автоматизации технологических процессов.

Пример. На рис. 1.12 приведена принципиальная электрическая схема работы электропривода пресса маслоэкстракционного завода. Для привода механизма пресса применен реверсивный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и прямым пуском от напряжения сети 380 В мощностью 45 кВт. В схеме применен комплектный блок управления, в который входят выключатели *OF1*, предохранители *FU1*, магнитные пускатели *KM1*, *KM2* и тепловые реле *KK1*.

Управление электроприводами пресса осуществляется по месту кнопками *SB2* («Пуск») и *SB1* («Стоп»). Схемой предусмотрена максимальная токовая защита от перегрузки пресса. При перегрузке пресса срабатывают реле максимального тока *KA1* и реле *K1*, при этом отключается электропривод питателя пресса, включаются световой и звуковой сигналы. Если в результате отключения электропривода питателя, приводящего к прекращению подачи продукта в пресс, прекратится перегрузка пресса, то реле *KA1* отключится и сигнальная лампа погаснет. Звуковой сигнал при этом должен снять оператор нажатием на кнопку съема сигнала *SB5*.

Пресс будет продолжать работать, а питатель следует вновь включить в работу. Если же перегрузка будет продолжаться после остановки питателя, то через 30—40 с (время настройки реле *KT1* уточняется при наладке) сработает реле времени *KT1*, заблокирует реле *K1* и отключит электропривод пресса. Реле времени остается включенным до тех пор, пока со щитов станции управления кнопкой *SB4* деблокировки не будет отключено реле *K1*.

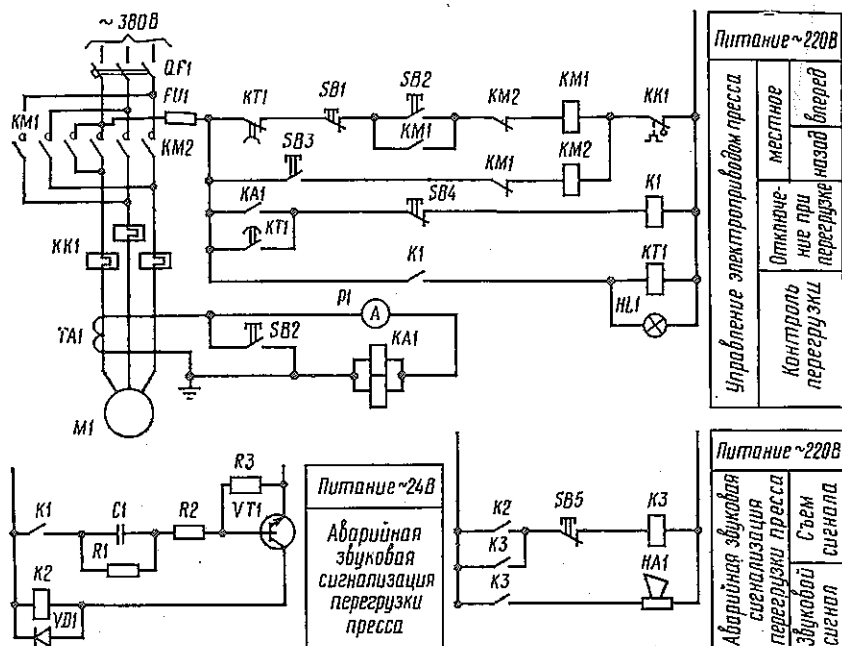


Рис. 1.12. Принципиальная электрическая схема управления электроприводом пресса маслоэкстракционного завода

Следовательно, пустить пресс «Вперед» после перегрузки более 30—40 с с пульта управления нельзя. В этом случае вначале необходимо ликвидировать запрессовку путем реверса или другими методами, а затем деблокировать защиту и пустить пресс в работу.

Включение звукового сигнала происходит в том случае, когда при перегрузке пресса контакт $K1$ создает цепь заряда конденсатора $C1$. При этом открывается транзистор $VT1$ и подается питание на реле $K2$. После окончания заряда конденсатора транзистор закрывается, реле $K2$ обесточивается. Последнее подает питание на реле $K3$, которое включается и становится на самоблокировку через контакт кнопки съема сигнала $SB5$. Контакт реле $K3$ включает звуковой сигнал. Съем звукового сигнала осуществляется нажатием на кнопку съема сигнала $SB5$.

Ток срабатывания реле максимального тока необходимо настроить на рабочий ток электродвигателя пресса. При $I_{н.дв} \sim 90$ А, трансформаторе тока 100/5 и параллельном соединении катушек реле сила тока срабатывания реле 3—6 А (сила тока в цепи электродвигателя 60—120 А) обеспечивает возможность отключения пресса при силе рабочего тока 60—90 А. Чтобы реле не срабатывало в момент пуска, катушки реле шунтируются контактом кнопки «Пуск» $SB2$.

В принципиальных электрических схемах поточно-транспортных систем (ПТС) все механизмы связаны между собой блокировочной зависимостью, которая предусматривает следующее:

последовательность пуска механизмов в направлении, обратном потоку материалов;

автоматическую остановку всех механизмов предшествующих по потоку материалов в случае остановки какого-либо из механизмов, препятствующую образованию завалов.

Для механизмов, входящих в состав ПТС, обычно применяют дистанционное заблокированное управление с автоматическим пуском приводных электродвигателей всех механизмов заблокированной цепи. При этом для каждого из механизмов предусматривают следующие режимы работы: централизованный заблокированный; местный заблокированный; местный несблокированный (для ремонтных работ).

При большом числе механизмов, особенно в тех случаях, когда они расположены в разных зданиях или на разных этажах одного здания, применяют централизованное управление. При этом из одного пункта дистанционно осуществляют операции по

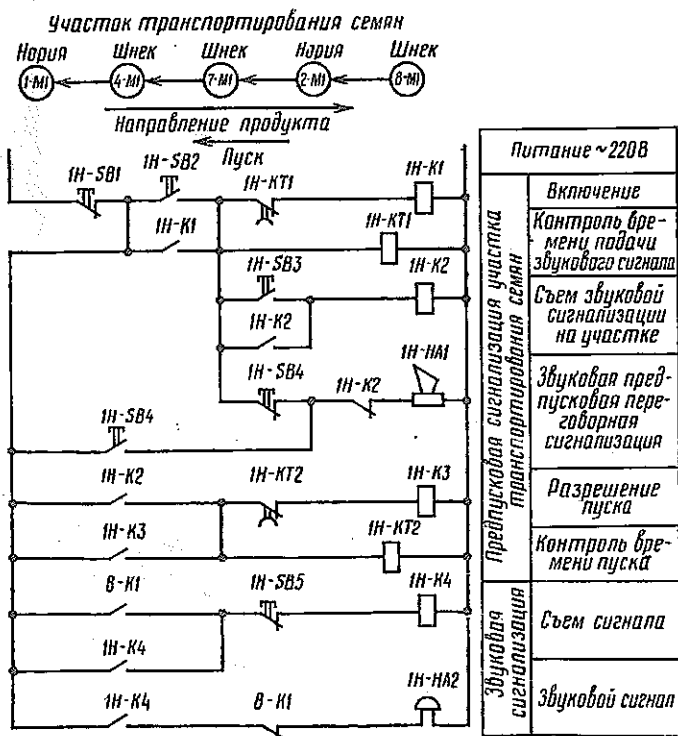


Рис. 1.13. Принципиальная электрическая схема предпусковой сигнализации участка транспортирования семян

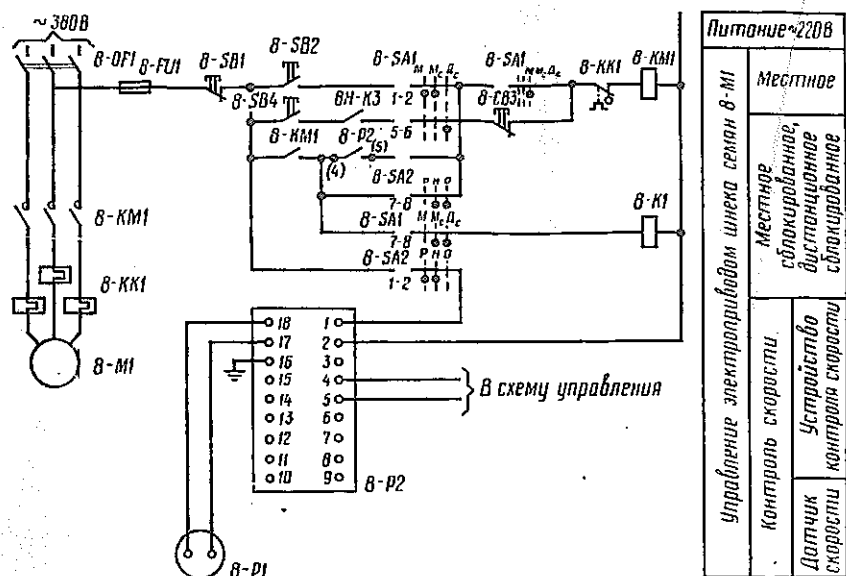


Рис. 1.14. Принципиальная электрическая схема управления электроприводом шнека семян 8-М1

пуску, остановке механизмов и контролю их работы, сочетающиеся с элементами автоматического управления.

На рис. 1.13 и 1.14 изображены принципиальные электрические схемы поточно-транспортной системы участка транспортирования семян на маслоэкстракционном заводе. При этом на рис. 1.13 приведена поясняющая технологическая схема, на которой показана последовательность включения механизмов и общие цепи пуска, сигнализации и остановки электроприводов; на рис. 1.14 — индивидуальная схема пуска и остановки электропривода шнека 8-М1, первого по пуску в поточно-транспортной системе участка.

Индивидуальные схемы пуска и остановки механизмов 1-М1, 2-М1, 4-М1 и 7-М1 (см. рис. 1.13) аналогичны с заменой нумерации аппаратуры соответственно номеру механизма. В целях упрощения в схеме общих цепей на рис. 1.13 не показаны реле 1Н-К1 — 1Н-К7 и их контакты, составляющие соответственно параллельные цепи реле 8Н-К3 и их контакты.

Для транспортных механизмов схемой предусмотрено три режима работы: местный, местный заблокированный и дистанционный заблокированный. Выбор режима работы осуществляется индивидуальными ключами 8-СА1, установленными на станциях управления.

В местном режиме пуск и остановку каждым электроприводом осуществляют кнопками *SB1—SB2*, установленными непосредственно у электродвигателя.

В местном заблокированном режиме пуск и остановка осуществляются теми же кнопками, но включение механизма возможно только в том случае, если уже работает связанный с ним по блокировке механизм.

В дистанционном режиме пуск механизмов осуществляется с пульта управления, причем он возможен только после подачи предпускового сигнала и квитирования его с рабочих мест в течение заданного времени. При квитировании предпускового сигнала снимается звуковой сигнал и на пульте загорается табло, разрешающее пуск.

Пуск механизмов осуществляется при помощи кнопок индивидуальных и на группу механизмов. При этом пуск должен быть произведен в течение заданного времени. Если оператор не уложится в отведенное время, то пуск не произойдет и все операции по пуску необходимо повторить сначала.

При аварийной остановке любого транспортного механизма участка транспортирования семян закрывается задвижка под бункером семян.

Работа отдельных механизмов контролируется с помощью устройств контроля скорости *8-P1, 8-P2* (см. рис. 1.14). В случае выхода из строя устройства контроля скорости в схеме предусмотрены возможность их отключения ключом *8-SA2* и последующая наладка.

Рассмотрим пуск и остановку транспортных механизмов участка подачи семян в дистанционно-блокированном режиме. При этом индивидуальные ключи выбора режима работы механизмов (см. рис. 1.13) необходимо установить в положение *Дс* (дистанционный заблокированный режим); ключи выбора работы устройства реле контроля скорости — в положение *Р* (работа). Нажатием на кнопку *1H-SB2* в общих цепях сигнализации включается реле *1H-K1* и подается питание на реле времени *1H-KT1*. Реле *1H-K1* своим контактом самоблокируется. Затем подается питание на сирену *1H-NA1* предпусковой сигнализации. Разрешение на пуск обеспечивается нажатием на кнопки *1H-SB3, 1H-SB4* по месту. При этом получают питание реле *1H-K2, 1H-K3*, которые самоблокируются и своими контактами отключают звуковой сигнал. Реле разрешения пуска *1H-K3—1H-K8* получают питание через контакт реле контроля времени пуска *1H-KT2*.

По истечении времени, отведенного для получения разрешения на пуск, размыкается контакт реле *1H-KT1* и обесточивается реле *1H-K1*, которое размыкает цепь питания реле *1H-K2*. Если в течение этого времени ответ хотя бы с одного рабочего

места не был получен, реле *1-K1—8-K1* не включаются и запуск механизмов необходимо повторить.

Реле *1H-K3—1H-K8*, включившись, блокируются через контакт реле *1H-K2* и контакт реле времени *1H-KT2*, контролирующее время пуска участков.

Нажатием на кнопку *8-SB2* электропривода *8-M1* шнека для семян (см. рис. 1.14) подают питание на пускатель *8-KM1*. При этом включаются электропривод *8-M1* и реле *8-K1*. После набора оборотов замыкается контакт (4, 5) устройства контроля скорости и пускатель *8-KM1* блокируется через свой контакт и контакт устройства контроля скорости.

После включения реле *8-K1* включается последующий по пуску механизм *2-M1*. Аналогично происходит запуск других механизмов маршрута.

По истечении времени, отведенного на запуск, размыкается контакт реле времени *1H-KT2*, обесточиваются реле *1H-K3—1H-K8*. Если в течение этого времени оператор не успел запустить все механизмы участков, операции по пуску необходимо повторить сначала. При аварийной остановке любого механизма участка транспортирования семян обесточивается пускатель *1-KM1* норрии *1-M1*, реле скорости *1-P1* и реле *1-K1*. Электропривод норрии останавливается, подается звуковой сигнал *1H-NA2*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите функции, выполняемые системами локальной автоматизации и обеспечиваемые при их осуществлении действия.
2. Что представляет собой схема автоматизации и как она оформляется?
3. С какой целью применяются принципиальные электрические схемы и что является основанием для их разработки?
4. Какие режимы управления применяются в принципиальных электрических схемах?
5. Что представляет собой алгоритм и на основании чего разрабатываются блок-схемы алгоритмов?
6. Какие существуют три типа алгоритмов? Приведите их характеристики.
7. Что такое алгоритмический модуль и как он оформляется?
8. Как строится блок-схема алгоритма для контроля одного аналогового технологического параметра? Приведите пример.
9. Чем отличается технологическая сигнализация от производственной?
10. Какие классы систем автоматического регулирования нашли наибольшее применение при автоматизации объектов пищевой технологии?
11. Какие характерные классы систем логического управления применяются при автоматизации химико-технологических процессов пищевой технологии?
12. Какие схемы управления электроприводами чаще всего применяются на предприятиях перерабатывающей промышленности?
13. На каком принципе строятся схемы защиты электроприводов технологических агрегатов?
14. Какие методы защиты механизмов применяются для поточно-транспортных систем? Назовите основные режимы их работы.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ

§ 2.1. СВОЙСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И ПОДГОТОВКА ИХ К АВТОМАТИЗАЦИИ

Для построения автоматической системы управления технологическим процессом необходимо знать его общие свойства как объекта управления, из которых определяются условия управления. Эти свойства выявляются на основе разработки математической модели.

Теория автоматического управления наряду с методами синтеза систем включает методы идентификации* и оценки состояния технологического процесса. Идентификация представляет собой проблему построения для определенной цели математической модели технологического процесса как объекта управления.

Объекты управления пищевой технологии имеют различную физико-химическую природу, и их обобщенные свойства могут быть получены на основе математических моделей, устанавливающих зависимости, характеризующие поведение объектов в статических и динамических режимах.

Классификация технологических процессов как объектов управления в основном определяется по их свойствам, описываемым математическими моделями, которые учитывают многомерность или одномерность, линейность, постоянство (стационарность) или переменность параметров, инерционность и т. п. Эти свойства определяются в зависимости от способа представления оператора и входных и выходных переменных. Например, многомерный технологический процесс, блок-схема которого изображена на рис. 1.4, может рассматриваться как функциональный преобразователь, каждая из независимых выходных переменных которого $y_i(t)$, $i=1, \dots, m$ определяется всеми входными переменными $x_i(t)$. В этом случае надо иметь для описания объекта m операторов A_i :

$$y_i(t) = A_i \{x_1(t), \dots, x_n(t)\}. \quad (2.1)$$

Конкретное выражение оператора A_i зависит от решаемой задачи управления технологическим процессом и выбранной модели.

Широкий диапазон решаемых задач управления технологическими процессами и создание АСУ ТП требуют более строгой классификации их как объектов управления, изучения связей

* От латинского *identificare* — отождествление, установление совпадения чего-либо с чем-либо.

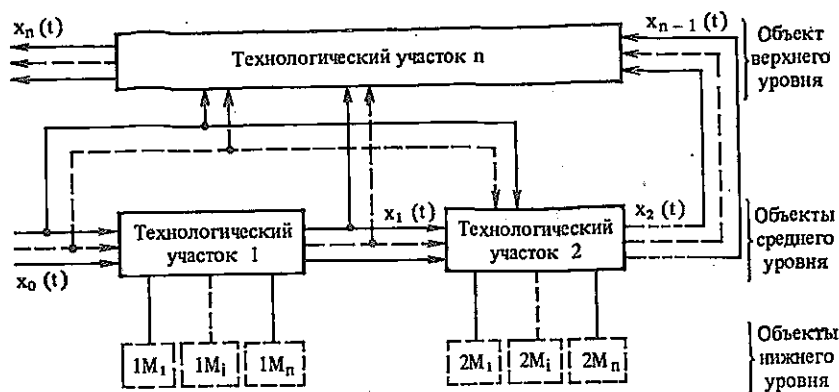


Рис. 2.1. Блок-схема процесса, когда выходные переменные $x_i(t)$ зависят от входных переменных всех предыдущих участков

между их элементами и содержащейся информации как основы для выработки управляющих воздействий. Поэтому изучение свойств современных объектов управления пищевой технологии осуществляется не только на основе классификации их по виду оператора математической модели, но и по некоторым признакам.

Для решения практических задач идентификации очень важна классификация объектов управления пищевой технологии по иерархическому уровню. Различают три иерархических уровня:

1) на нижнем уровне к самостоятельным объектам управления относятся агрегаты, машины, механизмы, аппараты (т. е. отдельные виды технологического оборудования);

2) объектами управления среднего уровня являются отдельные линии, станции, технологические участки по выработке различных пищевых продуктов или полупродуктов, в которые как элементы входят агрегаты, машины, механизмы и аппараты;

3) третий (верхний) иерархический уровень представляют наиболее сложные объекты управления пищевых предприятий — технологические комплексы и производства в целом по изготовлению одного или нескольких видов продуктов.

При решении задач управления для каждого из названных классов объектов в соответствии с целевой функцией разрабатываются алгоритмы идентификации процессов и с учетом их специфики определяются структура и модель объекта управления.

В современных технологических процессах получение заданного продукта, как правило, осуществляется на нескольких взаимосвязанных объектах, каждый из которых предназначен для выполнения конкретных технологических операций. Рас-

смотрение системы управления каждым алгоритмом требует знания характеристики всей линии или технологического участка, а также характеристики производственного процесса в целом.

Различают два вида структуры технологических процессов. Блок-схема структуры технологического процесса первого вида приведена на рис. 2.1. Производственный процесс состоит из n многомерных технологических участков (линий) на среднем иерархическом уровне. Характерным является влияние некоторых свойств входных переменных каждого из технологических участков на выходные переменные n -го участка. Следовательно, требования к выходным переменным каждого из технологических участков полностью определяются требованиями к выходным переменным процесса в целом. Критерии функционирования каждого из участков также подчинены суммарному критерию функционирования всего процесса в целом.

Структура процесса, приведенная на рис. 2.2, представляет собой частный случай структуры первого вида. Выходные переменные i -го объекта для всех $i \geq 1$ зависят от входных переменных этого же объекта и не зависят от входных переменных всех предыдущих объектов (технологических участков).

Технологические процессы пищевых производств классифицируются также в зависимости от способов механического перемещения сырья и вспомогательных материалов. Они подразделяются на три типа: непрерывные, дискретные (периодические) и непрерывно-дискретные технологические процессы. Характерным для непрерывно-дискретных процессов является то, что одни из переменных (на входе или выходе) являются непрерывными, а другие — дискретными.

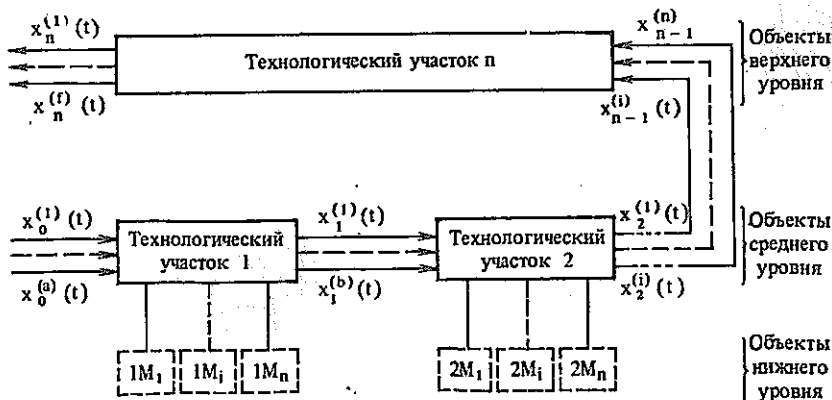


Рис. 2.2. Блок-схема процесса, когда выходные переменные $x_i(t)$ зависят от входных переменных

Объекты пищевой технологии классифицируются также по характеру протекаемых в них физико-химических процессов. Несмотря на многообразие продуктов, получаемых на различных технологических аппаратах и оборудовании, они характеризуются общностью протекающих при их производстве процессов. Современная наука о процессах и аппаратах пищевой технологии подразделяет множество технологических процессов на шесть основных групп, представляющих типовые процессы: механические, гидромеханические, тепловые, массообменные, биохимические и химические.

При разработке алгоритмов управления входные и выходные переменные технологических процессов могут рассматриваться как детерминированные и случайные. Соответственно и сами объекты также могут рассматриваться как детерминированные и случайные (стохастические).

Объект называется **детерминированным**, если оператор математической модели (2.1) объекта детерминирован, т. е. устанавливает однозначное соответствие между входными и выходными переменными.

Объект называется **стохастическим**, если оператор его модели является случайным.

Технологические процессы пищевых производств среднего и верхнего иерархических уровней относятся, как правило, к классу стохастических объектов управления. Они в большинстве своем многомерны, нестационарны, нелинейны, со многими внутренними обратными связями, с незначительной или отсутствующей априорной информацией о взаимосвязи параметров.

Стационарность многих объектов сохраняется только на каком-то отрезке времени, так как в процессе производства происходят налипание, накипь, кристаллизация, пенообразование, приводящие к изменению динамических свойств объектов.

Объекты управления различают по степени самовыравнивания, характеризующей поведение объекта без регулятора.

Объект управления обладает **положительным самовыравниванием**, если ступенчатое изменение сигнала на его входе приводит к асимптотическому процессу нарастания выходного сигнала до нового уровня, или **отрицательным**, если действие на входе единичного ступенчатого сигнала приводит к непрерывному нарастанию сигнала на выходе. Для объектов, имеющих нулевое самовыравнивание, действие единичного ступенчатого сигнала на его входе приводит к линейному нарастанию выходного сигнала.

Объекты управления с **положительным самовыравниванием** являются устойчивыми, объекты с **отрицательным самовыравниванием** неустойчивы, и для них недопустимы отказы в системах регулирования. Объекты с **нулевым самовыравниванием** требуют

применения корректирующих устройств, так как снижают устойчивость в системах регулирования.

Свойства характерных объектов пищевой технологии нижнего уровня приведены в табл. 2.1.

Автоматизация наиболее успешно осуществляется на объектах, подготовленных к применению систем автоматического управления.

В процессе производства в конкретном технологическом процессе возникают как внешние, так и внутренние возмущающие воздействия. Естественно, что чем меньше возмущающих воздействий оказывает влияние на технологический процесс, тем легче осуществить его автоматизацию и она более эффективна. При

2.1. Свойства характерных объектов управления

Объект управления	Непрерывный	Дискретный	Непрерывно-дискретный	Механический	Гидромеханический	Тепловой	Массообменный	Биохимический	Химический
Свеклорезка	+			+					
Диффузионный аппарат	+						+		
Утфельный вакуум-аппарат		+					+		
Сульфитатор	+								+
Центрифуга	+				+				
Цилиндроконический танк		+						+	
Экстрактор масла	+						+		+
Дистиллятор	+								
Форпресс	+								
Автоклав		+				+			
Тестоделительная машина			+	+					
Разливочная машина			+	+					
Хлебопекарная печь	+					+			
Дрожжегенератор		+						+	
Пластинчатый теплообменник	+			+					
Дезодоратор			+						+
Солодосушилка	+						+		
ДСХА									
Непрерывный пастеризатор	+						+		
Ресивер воздушный			+	+					
Шнековый пресс	+			+					
Фасовочная машина			+	+					

подготовке объекта к автоматизации принимают меры по сокращению числа возмущений, осуществляют, где это возможно, технологическими методами стабилизацию входных возмущений. Важными являются меры по усилению стандартизации состояния измерений от поступления сырья, его предварительной подготовки и обработки, а также по обеспечению стабильности параметров. Особенно жесткие требования предъявляются к качеству выпускаемой продукции, характеризующиеся выходными переменными величинами технологических процессов. Решаются задачи совершенствования технологических схем, обуславливающих максимальный выход основного продукта, сокращения потерь, создания безотходных технологий и гибких автоматизированных производств.

При подготовке объекта к автоматизации решаются задачи совершенствования оборудования, обеспечивающего ведение процесса без оперативного ручного обслуживания, а также задачи увеличения единичной мощности; обеспечивается переход от многостадийных процессов к одностадийным, от периодических к непрерывным.

При автоматизации объектов верхнего уровня (предприятия) проводятся работы по упорядочению складского хозяйства сырья, вспомогательных материалов и готовой продукции, где наиболее важным является системное и комплексное осуществление погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ. Автоматизации всего пищевого производства должна предшествовать комплексная механизация всех вспомогательных процессов и трудоемких операций. В ряде подотраслей пищевой промышленности комплексная автоматизация сдерживается в основном из-за медленного осуществления комплексной механизации трудоемких процессов.

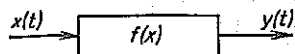
Решение приведенных задач при подготовке объектов к автоматизации положительно сказывается на самих технологических процессах и оборудовании, позволяя их еще больше усовершенствовать, повышать надежность и эффективность.

§ 2.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Применение общих методов описания объектов в теории управления приводит в простейшем случае к представлению на нижнем уровне процесса в виде одномерного объекта (рис. 2.3), на входе которого действует переменная $x(t)$, характеризующая какое-либо свойство сырья или параметр, а на выходе — переменная $y(t)$, характеризующая какое-либо свойство готового продукта, полупродукта или выходной показатель процесса.

Проблема индентификации таких объектов в целях построе-

Рис. 2.3. Блок-схема одномерного объекта управления



ния систем автоматического управления заключается в определении статических и динамических характеристик в виде адекватных* математических моделей в рабочем диапазоне.

Современные методы идентификации используют сочетание аналитического и экспериментальных методов. Это связано с тем, что чисто аналитический подход во многих случаях не обеспечивает получение математической модели, в достаточной степени соответствующей реальному объекту управления. Поэтому комбинированный подход, когда общий вид математического описания определяется аналитически, а значения коэффициентов, соответствующих конкретному объекту управления, — экспериментально, наиболее эффективен. Для сложных объектов задачи идентификации решаются с использованием ЭВМ, что значительно расширяет возможности аналитического и экспериментальных методов на стадии отработки и проверки соответствия математической модели.

Аналитический метод построения математического описания в статике и динамике не требует особых пояснений. Используя известные физические, химические, механические и другие закономерности, по которым осуществляются процессы, составляют уравнения, устанавливающие взаимосвязь выходных и входных переменных объекта в стационарных условиях (не зависящих от времени), и уравнения, устанавливающие зависимость изменения во времени выходной величины от заданного изменения входного воздействия.

Экспериментальные методы базируются на использовании специальных приемов активного и пассивного эксперимента, облегчающих получение необходимых зависимостей на реальном технологическом процессе в условиях производства. Активный эксперимент предусматривает нанесение скачкообразных изменений входной величины в пределах, допустимых технологическим регламентом. Наибольшее применение для исследования статических характеристик получили классический метод активного эксперимента и метод факторного планированного эксперимента. Для исследования динамических характеристик объекта управления применяют методы временного анализа.

Пассивные экспериментальные методы применяются при определении как статических, так и динамических характеристик на

* От латинского *adaequatus* — приравненный, равный, тождественный, вполне соответствующий.

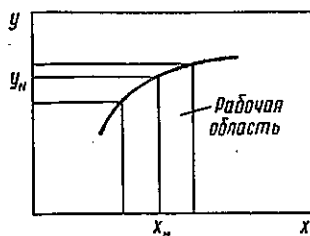


Рис. 2.4. Построение статической характеристики объекта управления (x_n — номинальный режим)

базе корреляционного и регрессионного анализа данных нормальной эксплуатации промышленного объекта.

Классический метод рассмотрим на примере исследования статической характеристики одномерного объекта управления типа $y=f(x)$, приведенной на рис. 2.4.

Пример. Значение входной переменной x изменяют через интервалы Δx в пределах допустимого по технологическому регламенту $x(n)=x(n-1)+\Delta x$. В результате эксперимента получают таблицу с соответствующими значениями выходной величины $x(i) \rightarrow y(i)$, где $i=1, 2, \dots, n$; n — число наносимых изменений уровней входной величины. Эксперимент повторяют несколько раз, поэтому выходные величины $y(i)$ получают с некоторым разбросом.

Для усреднения значений $y(i)$ для каждого из $x(i)$ ($i=1, 2, \dots, n$) используют метод наименьших квадратов вычислением суммы квадратов отклонения ординат полученных экспериментальных точек от ординат аппроксимирующей* кривой φ и минимизацией этой суммы:

$$E = \sum_{i=1}^n [y(i) - \varphi(x(i), a_0, a_1, \dots)]^2 \rightarrow \min. \quad (2.2)$$

Функция E удовлетворяет требованиям (2.2), если коэффициенты уравнения кривой φ найдены из условий:

$$\partial E / \partial a_0 = 0, \quad \partial E / \partial a_1 = 0, \quad \dots \quad (2.3)$$

Из условий (2.3) получают систему алгебраических уравнений, решаемых относительно коэффициентов $a_0, a_1, \dots$

График статической характеристики

$$y = a_0 + a_1 x \quad (2.4)$$

на практике часто аппроксимируют кусочно-линейными функциями и для определения ее коэффициентов решают систему линейных алгебраических уравнений относительно a_0 и a_1 :

$$\begin{aligned} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x(i) &= \sum_{i=1}^n y(i); \\ a_0 \sum_{i=1}^n x(i) + a_1 \sum_{i=1}^n x^2(i) &= \sum_{i=1}^n y(i) x(i). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Статические характеристики многомерных объектов исследуют аналогично, но по каждому каналу** отдельно, при этом все

* От латинского *approximate* — приближаться, приближенное выражение каких-либо величин через другие, более простые величины.

** Каналом называют связь между выходной и входной величинами объекта.

входные величины по другим каналам поддерживаются на номинальном уровне. Экспериментально получают так называемые сечения статических характеристик. Например, для двухмерного объекта управления вместо характеристик $y_1 = f_1(x_1, x_2)$, $y_2 = f_2(x_1, x_2)$ получают сечения вида

$$y_1 = f_1(x_1), y_2 = f_2(x_1) \text{ при } x_2 = \text{const}; \quad (2.6)$$

$$y_1 = f_3(x_2), y_2 = f_4(x_2) \text{ при } x_1 = \text{const}. \quad (2.7)$$

Для получения четырех-пяти точек статической характеристики необходимо на производственном объекте допустить отклонение от нормального режима на 40—50%, что не всегда допустимо. В связи с этим часто ограничиваются тремя точками статической характеристики, соответствующими трем уровням изменений входной величины. Из них одна точка соответствует номинальному значению $x_{\text{ном}}$, а две другие: $x_{\text{ном}} + \Delta x$ и $x_{\text{ном}} - \Delta x$. При этом экспериментальное определение статической характеристики совмещают с получением динамической характеристики объекта управления.

Временной метод практически сводится к экспериментальному снятию переходной характеристики или кривой разгона по каналу управления. Для пояснения метода на рис. 2.5 приведена схема оснащения исследуемого объекта измерительными приборами, позволяющими измерять вносимые изменения входной и выходных величин. При проведении эксперимента особое внимание обращают на синхронизацию регистраций входной и выходной величин. В начале эксперимента объект приводят в установившееся состояние. После этого изменяют скачкообразно входную величину на $\Delta x = 10 \div 15\%$ максимального допустимого значения входной величины. Эксперимент считается законченным, когда выходная величина достигнет нового установившегося значения для объектов с самовыравниванием либо когда устанавливается постоянная скорость изменения выходной величины в случае исследования объекта без самовыравнивания. Для каждой точки опыты повторяют не менее двух — четырех раз.

На рис. 2.6, а приведена кривая разгона, полученная экспериментально для объекта, обладающего самовыравниванием, и показана графиче-

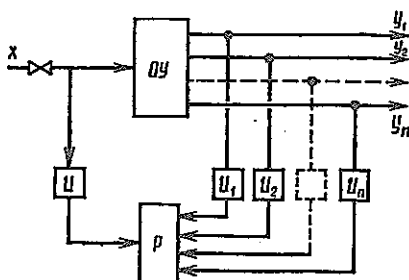


Рис. 2.5. Схема оснащения исследуемого объекта измерительными приборами ($I_1, I_2, \dots, I_n$ — измерительные приборы, P — регистратор)

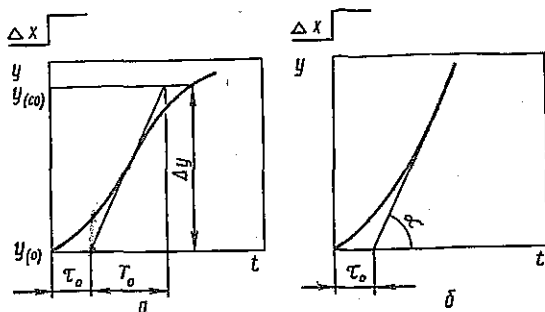


Рис. 2.6. Определение по кривым разгона динамических параметров объекта:
а — статического; б — астатического

ски «методом касательной» возможность определения параметров τ_0 и T_0 . Коэффициент передачи получают из соотношения

$$k_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta x}. \quad (2.8)$$

На рис. 2.6, б по кривой разгона для объекта без самовыравнивания показано графическое определение запаздывания τ_0 , а параметры k_0 и T_0 находят из соотношений

$$k_0 = \frac{dy(\infty)}{dx(t)} \cdot \frac{1}{\Delta x} = \frac{\tan \alpha}{\Delta x}; \quad (2.9)$$

$$T_0 = 1/k_0. \quad (2.10)$$

Для объектов пищевой технологии при определении динамических параметров наиболее широко используется временной (разгонный) метод. Для определения статических характеристик объекта управления получил развитие метод математического моделирования в связи с возможностями использования вычислительной техники. Преимуществом метода является то, что он позволяет изучить свойства объекта управления в широкой области при небольших затратах времени и труда, а также определить условия оптимизации процессов по выбранному критерию оптимальности.

Метод математического моделирования предусматривает четыре этапа: 1) разработка математического описания процесса в объекте управления; 2) разработка алгоритма расчета модели объекта на ЭВМ; 3) проверка и отработка адекватности модели реальному объекту в рабочей области; 4) расчет необходимых статических характеристик и их графическое и математическое оформление.

К недостаткам метода следует отнести то, что для исследо-

вания можно использовать только детерминированные модели, которые поддаются корректировке в целях достижения адекватности реальному объекту.

Статистический метод применяется в тех случаях, когда активное вмешательство в технологический процесс невозможно или нежелательно. Сущность метода состоит в том, что проводится пассивный эксперимент, заключающийся в получении статистической информации об объекте управления по данным его нормальной эксплуатации.

Методы построения математических моделей по статистическим данным наиболее разработаны для линейных стационарных процессов. Для описания временной внутренней структуры случайных процессов используют корреляционную функцию R_{xx} , которую часто называют автокорреляционной. В целях упрощения рассмотрим объект с одним входом и выходом (см. рис. 2.3). Мерой взаимосвязи двух случайных процессов [входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ величин] служит взаимокорреляционная функция R_{xy} .

В случае стохастического процесса для идентификации линейного объекта используется уравнение

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\theta) R_{xx}(\tau - \theta) d\theta. \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) связывает взаимокорреляционную функцию R_{xy} с автокорреляционной функцией R_{xx} через импульсную переходную функцию линейного объекта $h(\theta)$. Уравнение идентификации (2.11) имеет следующую физическую трактовку: если на вход линейного объекта с импульсной переходной функцией $h(\theta)$ подать возмущение вида автокорреляционной функции R_{xx} , то реакция выходной величины совпадает с взаимокорреляционной функцией R_{xy} . Этот факт служит отправным для решения задач на ЭВМ.

Таким образом, для определения импульсной функции $h(\theta)$ необходимо на первом этапе по реализациям * случайных процессов $x(t)$ и $y(t)$ вычислить корреляционные функции R_{xx} и R_{xy} , а на втором — решить интегральное уравнение (2.11).

Учитывая сложность и большой объем вычислений, остановимся подробнее на выполнении каждого этапа. Для выполнения первого этапа предварительно набирают реализации входных и выходных сигналов (рис. 2.7), т. е. записывают входные $x(t)$ и выходные $y(t)$ сигналы при нормальной эксплуатации объекта.

* Реализациями случайных функций называют различные конкретные значения, которые каждый раз принимает случайный процесс при многократном воспроизведении условий его протекания.

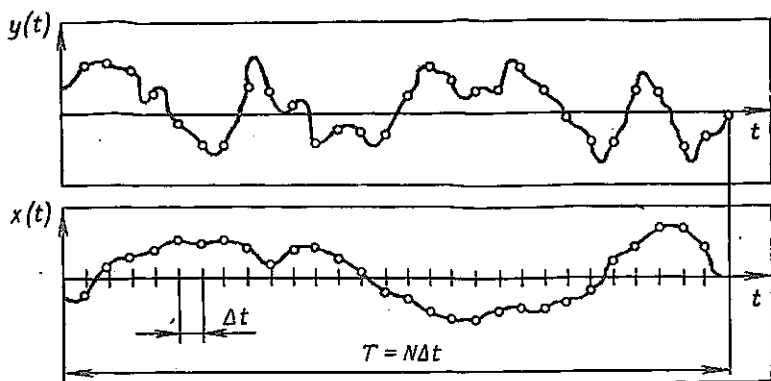


Рис. 2.7. Запись входного и выходного случайных процессов

При планировании статистического эксперимента выбирают продолжительность длины реализации $T = N\Delta t$ (см. рис. 2.7) и интервала N между замерами Δt , от которых зависит точность получаемых результатов. На практике это достигается проведением предварительного эксперимента в целях определения числа точек пересечения («нулей») сигналом оси его математического ожидания за единицу времени.

Для этого вначале подсчитывают средние значения сигналов и центрируют их (если случайный сигнал $\bar{X}(t) = X(t) - m_x(t)$ имеет нулевое среднее значение, он называется центрированным); затем строят график центрированных сигналов; после этого подсчитывают число «нулей», т. е. число точек пересечения оси, и рассчитывают оценку времени спада автокорреляционных функций:

$$\tau_{спx} = T_p / (2n_{0x}); \quad (2.12)$$

$$\tau_{спy} = T_p / (2n_{0y}), \quad (2.13)$$

где $\tau_{спx}$, $\tau_{спy}$ — оценка времени спада автокорреляционных функций соответственно входа и выхода; n_{0x} , n_{0y} — число «нулей» соответственно для входа и выхода; T_p — время реализации.

Приемлемая точность достигается при продолжительности статистического эксперимента

$$T_p \approx (50 \div 200) \tau_{спy}, \quad (2.14)$$

а Δt определяется из правила: в пределах интервала квантования случайная функция должна оставаться приблизительно постоянной. Для практических целей интервал между замерами

$$\Delta t = \tau_{спx} / 3 \div 10. \quad (2.15)$$

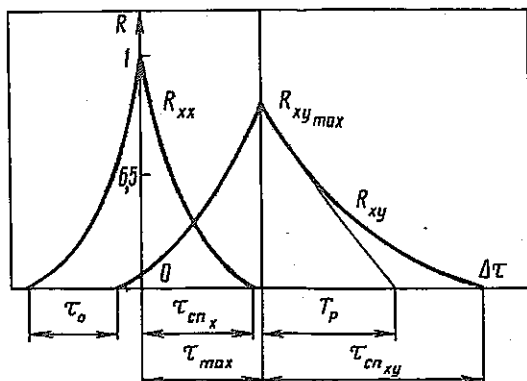


Рис. 2.8. Графики нормированных корреляционных функций

Пример. Предварительно получено 200 точек с интервалом 2 мин. Время реализации 400 мин.

Число нулей $n_{0x}=80$, $n_{0y}=20$, предварительные оценки времени спада: $\tau_{сп_x}=400/(2 \cdot 80)=2,5$ мин; $\tau_{сп_y}=400/(2 \cdot 20)=10$ мин.

Отношение $\tau_{сп_y}/\tau_{сп_x}=10/2,5=4$, т. е. спектральный состав входного сигнала достаточен (обычно приемлемая точность достигается при $\tau_{сп_y}/\tau_{сп_x} > 3$).

Время эксперимента $T_{рв}=100 \tau_{сп_y}=100 \cdot 10=1000$ мин ≈ 17 ч.

Время между замерами $\Delta t=0,2 \tau_{сп_x}=0,2 \cdot 2,5=0,5$ мин $=30$ с.

Предварительная оценка постоянной времени объекта $T_0 \approx \tau_{сп_y}/3 = 3,3$ мин ≈ 200 с.

Отношение $\Delta t/T_0=30/200=0,15$ можно считать приемлемым.

На втором этапе определения динамических характеристик статистическим методом решается интегральное уравнение (2.11). Так как мы не располагаем аналитическими выражениями для корреляционных функций, то задачу нужно проводить численными методами, что громоздко и неудобно. Однако для решения практических задач при аппроксимации звеном первого порядка с чистым запаздыванием обычно применяют один из двух упрощенных методов.

1. Строят нормированные авто- и взаимокорреляционные функции (рис. 2.8). Предполагается, что автокорреляционную функцию $R_{xx}(\tau)$ можно аппроксимировать выражением вида

$$R_{xx}(\Delta\tau) = e^{-\alpha\Delta\tau}, \quad (2.16)$$

где α — параметр функции, причем $\alpha \approx 3/\tau_{сп_x}$; $\Delta\tau$ — аргумент функции (временной сдвиг).

Тогда взаимокорреляционная функция может быть представлена в виде

$$R_{xy}(\Delta\tau) = \begin{cases} R_{xy0} e^{\alpha\Delta\tau} & \text{при } \Delta\tau > \tau_{max}; \\ R_{xy0} e^{-\beta\Delta\tau} & \text{при } \Delta\tau > \tau_{max}, \end{cases} \quad (2.17)$$

где β — параметр нисходящей ветви взаимокорреляционной функции; R_{xy_0} — максимум взаимокорреляционной функции (т. е. коэффициент корреляции); $\tau_{\max}$ — аргумент максимума взаимокорреляционной функции.

Очевидно, $\beta = 3/\tau_{\text{сп}_{xy}}$.

Оценки динамических параметров k_0 , T_0 , τ_0 по исследуемому каналу объекта управления могут быть получены из анализа (см. рис. 2.8) непосредственно экспериментальных функций $R_{xx}(\tau)$ и $R_{xy}(\tau)$.

Оценка времени запаздывания τ_0 определяется как разность между моментами времени, при которых функции $R_{xx}(\tau)$ и $R_{xy}(\tau)$ становятся отличными от нуля (см. рис. 2.8).

Для объекта без запаздывания величина β имеет смысл $\beta = 1/T_0$, где T_0 — постоянная времени объекта.

Для определения коэффициента передачи k_0 воспользуемся положением из теории вероятностей, что корреляционные функции вида (2.17) характерны для объекта с передаточной функцией (по условиям существования решения)

$$W(s) = \frac{B}{A} \cdot \frac{\alpha + \beta}{2\alpha} \cdot \frac{s + \alpha}{s + \beta}, \quad (2.18)$$

где $B = R_{xy_0}\sigma_x\sigma_y$; $A = \sigma_x^2$; σ_x — среднеквадратичное отклонение входа (σ_x^2 — дисперсия); σ_y — среднеквадратичное отклонение выхода.

Выше было показано, что $\tau_{\text{сп}_y} \approx 3T_0$, $\tau_{\text{сп}_x} = 3/\alpha$, тогда

$$W(s) = \frac{R_{xy_0}\sigma_y}{\sigma_x} \cdot \frac{3T_0 + \tau_{\text{сп}_x}}{2\tau_{\text{сп}_x}} \left(\frac{1}{T_0s + 1} + \frac{s\tau_{\text{сп}_x}/3}{T_0s + 1} \right).$$

Поскольку обычно $\tau_{\text{сп}_x} \leq \tau_{\text{сп}_y}/10$, вторым членом в скобках можно пренебречь и коэффициент передачи объекта

$$k_0 = \frac{R_{xy_0}\sigma_y}{\sigma_x} \cdot \frac{3T_0 + \tau_{\text{сп}_x}}{2\tau_{\text{сп}_x}}. \quad (2.19)$$

В выражении (2.19) соотношение $R_{xy_0}\sigma_y/\sigma_x$ имеет смысл коэффициента регрессии.

Оценку k_0 можно получить также из соотношения $k_0 = \sigma_y/\sigma_x$, поскольку величина $(R_{xy_0}/2\tau_{\text{сп}_x})(3T_0 + \tau_{\text{сп}_x})$ близка к единице.

2. Оценку динамических параметров k_0 , T_0 , τ_0 по исследуемому каналу объекта управления можно получить методом «моделирования» на ЭВМ. Суть метода заключается в том, что на ЭВМ набирают модель объекта в виде аperiodического звена первого порядка с запаздыванием. На вход модели объекта подается взаимокорреляционная функция, найденная экспериментально на реальном объекте $R_{xy_0}(\tau)$. Параметры модели объекта (k_0 , T_0 , τ_0) подбирают так, чтобы получить близкую к реальной взаимокорреляционную функцию.

Строго говоря, это — задача оптимизации. Например, три

параметра модели подбирают так, чтобы получить минимум функционала:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} [R_{xy_0}(t) - R_{xy_M}(t)]^2 dt, \quad (2.20)$$

где R_{xy_0} и R_{xy_M} — взаимокорреляционные функции соответственно реальная (полученная на объекте управления) и на выходе модели.

Сложным является выбор метода оптимизации. Недостатком метода моделирования является высокая трудоемкость вычислений, обязательное наличие ЭВМ.

§ 2.3. ВЫБОР ВХОДНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОБЪЕКТА, АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ

Технологические процессы пищевых производств, как было показано выше (см. § 1.2 и 2.1), являются сложными объектами управления. Эта сложность выражается прежде всего в многомерности и многосвязности. Независимые переменные технологических процессов подвергаются возмущающим воздействиям, причем из-за взаимосвязанности параметров изменение одной или нескольких независимых переменных приводит к изменению многих зависимых величин. Восстановление номинального режима достигается за счет соответствующего воздействия на процесс также со стороны независимых переменных.

Из основных переменных объекта управления (см., например, рис. 1.5) можно выделить две группы их. Одни могут быть использованы в автоматической системе как регулируемые (управляемые) величины, другие как управляющие воздействия.

Регулируемые величины пищевой технологии можно подразделить на три подгруппы: 1) расход сыпучих веществ, жидкостей, пара, газов и уровень сыпучих веществ и жидкостей, сырья, полупродуктов и готовой продукции в технологических аппаратах и установках; 2) температура и давление в разных зонах в соответствии с технологическим регламентом; 3) концентрация и другие показатели состава продуктов и полупродуктов.

Регулируемые величины первой подгруппы изменяются в установках в пределах определенных колебаниями материальных потоков на входе и выходе объекта в условиях выполнения материальных балансов. Регулируемые величины второй и третьей подгрупп, как следует из физико-химической сущности процессов пищевого производства, тесно взаимосвязаны.

Качество получаемых продуктов определяется по их составу. Величины, характеризующие состав, называются парамет-

рами качества. Однако использование параметров качества в автоматических системах регулирования технологических установок пока затруднительно, так как датчики для них либо еще не разработаны, либо слишком сложны, дороги и ненадежны. Поэтому вместо состава или концентрации полупродуктов и продуктов обычно используют так называемые косвенные регулируемые величины, однозначно связанные с соответствующими параметрами качества. Для разных производств перерабатывающей отрасли в целях контроля и регулирования параметров качества необходимая номенклатура специальных измерительных приборов и датчиков составляет более двухсот наименований и типоразмеров.

Управляющие воздействия делятся на две подгруппы: независимые, полностью определяющие режим работы объекта управления, которые входят в состав так называемых обобщенных координат объекта управления (к ним относятся, например, отбор основного продукта или полупродукта, подача теплоэнергоснабжателей); зависимые, к которым относятся отбор вторичных продуктов и отходов производства, расходы хладагентов и др.

Возмущающие воздействия на объект управления подразделяются на неконтролируемые и контролируемые. К неконтролируемым возмущениям следует отнести потери теплоты в окружающую среду, а также изменение эффективности оборудования, теплообменников и т. д. (вследствие загрязнения, образования накипи и т. п.). Подобные изменения заметно проявляются лишь на сравнительно длительных отрезках времени (порядка месяцев), что позволяет принять весьма важное для дальнейших расчетов допущение о стационарности свойств объектов управления.

К контролируемым относятся возмущения по количеству и составу подаваемого сырья или полуфабриката, энергетическим параметрам греющего пара и охлаждающей воды.

Значительная часть переменных, являющихся возмущениями процесса, мало изменяется в течение длительного времени и может приниматься постоянной, хотя эти переменные существенно влияют на управление процессом. К таким возмущениям можно отнести, например, термодинамические параметры пара, температуру охлаждающей воды, меняющуюся в течение года и суток.

Возмущения объектов управления, как правило, представляют собой случайные функции времени, которые достаточно строго могут быть охарактеризованы лишь вероятностными оценками. Для расчета системы автоматического регулирования выделяют типовые (рис. 2.9) либо наиболее неблагоприятные виды возмущений, в результате чего можно с достаточной ве-

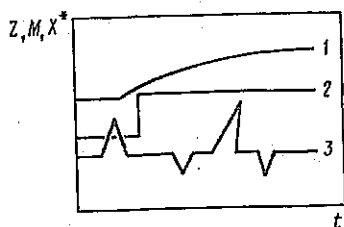


Рис. 2.9. Типовые виды возмущений параметров автоматической системы регулирования:

1 — длительное; 2 — ступенчатое; 3 — пиловое

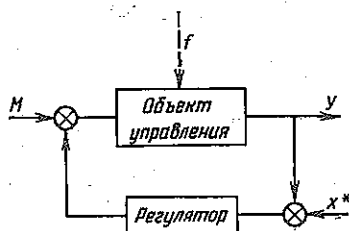


Рис. 2.10. Возмущения автоматической системы регулирования:

M — по нагрузке; x^* — по заданию; y — регулируемая величина; f — неконтролируемые

роятностью считать, что система будет обеспечивать необходимое качество регулирования и при других возмущениях.

Возмущения различают по нагрузке и по заданию. Первые возникают при изменении нагрузки M (рис. 2.10), вторые — при изменении задания регулятору.

Изменения возмущающих параметров процессов носят преимущественно характер непрерывных, стационарных, случайных функций времени. Для получения численных оценок возмущений объект исследуют статистическим методом с соответствующей обработкой полученных данных. При этом случайные процессы приближенно заменяют полученными в результате дискретных измерений соответствующими последовательностями, оценки характеристик которых можно считать оценками исследуемых процессов.

Основными характеристиками возмущений являются оценки обычных статистик полученных реализаций, т. е. оценки математического ожидания m^* и среднеквадратичного отклонения σ^* (или дисперсии). Точность полученных оценок m^* и σ^* определяется доверительными интервалами $m^* \pm \varepsilon_m$ и $\sigma^* \pm \varepsilon_\sigma$, а их надежность — вероятностью, с которой можно утверждать, что они не выходят за пределы указанных интервалов. В частности, при нормальном законе распределения величины параметров z

$$\varepsilon_{m_z} = l\sigma_z^*/\sqrt{n}, \quad \varepsilon_{\sigma_z} = l\sigma_z^*/\sqrt{2n},$$

где l — коэффициент нормального закона распределения ($l=1,65$ при $P=0,9$; $l=1,96$ при $P=0,95$); n — число точек реализации $z[n]$.

В качестве примера рассмотрим численные характеристики возмущений для процесса дистилляции маслоэкстракционного завода (рис. 2.11).

В табл. 2.2 приведены оценки математического ожидания и среднеквадратичного отклонения для возмущений $Q^0_{mc}(t)$.

2.2. Характеристики возмущений для процесса дистилляции

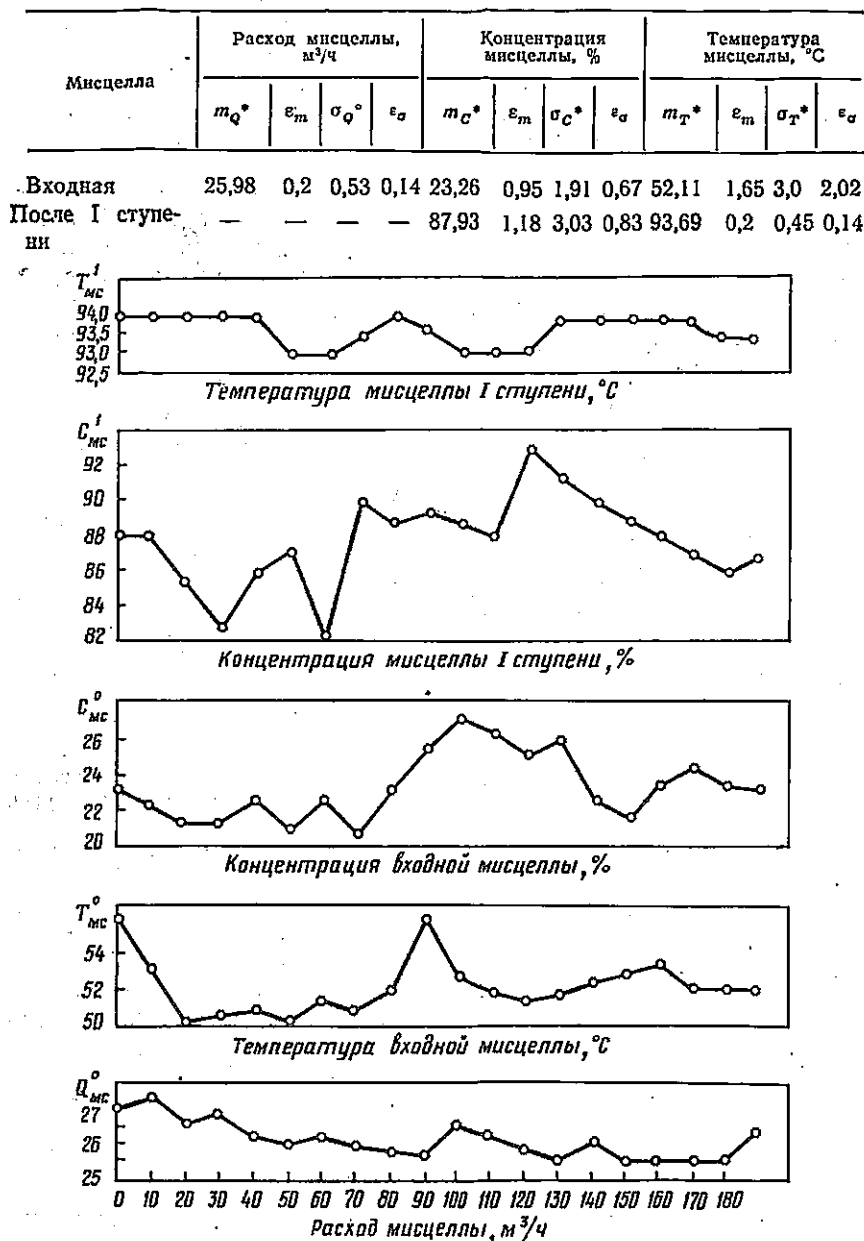


Рис. 2.11. Характеристики возмущений процессов дистилляции

$C^0_{мс}(t)$, $T^0_{мс}(t)$, $C^1_{мс}(t)$, $T^1_{мс}(t)$. Там же указаны допускаемые ошибки ε_a при доверительной вероятности $P=0,9$.

§ 2.4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ВЫБОРА И ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для построения системы автоматического управления необходимо иметь описание объекта в виде математической модели. Для решения многих практических задач многомерность и многосвязность пищевых объектов управления нижнего уровня могут быть существенно уменьшены благодаря тому, что в производственных установках можно осуществить технологическую декомпозицию (разбиение) и рассматривать каждый канал в виде одномерного объекта, что значительно упрощает выбор и обоснование систем автоматического регулирования. Например, свойство самовыравнивания может относиться только к каналу регулирования, а не к многомерному объекту в целом. Так, один канал регулирования многомерного объекта может иметь положительное самовыравнивание, а другой — отрицательное. Нельзя также говорить о динамике процесса как объекта управления, не указав канала.

Для линейного одномерного объекта с сосредоточенными параметрами (рис. 2.12) в теории управления используется модель вида

$$\bar{y}(s) = W_u(s) \bar{u}(s) + W_f(s) \bar{f}(s), \quad (2.21)$$

где $W_u(s)$ и $W_f(s)$ — передаточные функции по управлению и возмущению соответственно; $\bar{y}(s)$, $\bar{u}(s)$ и $\bar{f}(s)$ — преобразования Лапласа выхода $y(t)$, управления $u(t)$ и контролируемого возмущения $f(t)$.

Переходные процессы в реальных объектах пищевой технологии монотонны и могут быть аппроксимированы в большинстве случаев дифференциальными уравнениями первого порядка с запаздыванием. Такая аппроксимация вполне удовлетворительна для решения большого числа практических задач (см. § 1.3 и табл. 1.2) синтеза систем автоматического регулирования, так как в этих случаях в рабочей области по каждому каналу объекты являются с сосредоточенными параметрами и линейными.

Как следует из теории автоматического управления, динамиче-

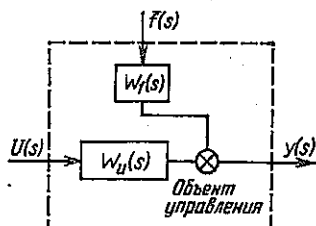


Рис. 2.12. Структурная схема одномерного объекта управления

ский канал такого объекта управления может быть аппроксимирован простой передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{k_0}{T_0 s + 1} e^{-s\tau_0}, \quad (2.22)$$

где k_0 — коэффициент передачи объекта; T_0 — постоянная времени объекта; τ_0 — запаздывание; s — независимая комплексная переменная, используемая в преобразовании Лапласа.

Величины k_0 , T_0 , τ_0 являются динамическими параметрами объекта управления. Выполнение идентификации объекта управления означает, что известны вид и численные значения коэффициентов передаточных функций.

Для получения описаний объектов управления в виде подобных математических моделей можно использовать два пути: определять динамические параметры моделей по одному из эмпирических методов, описанных в § 2.2, или применять аналитические соотношения в виде дифференциальных уравнений материального баланса, сохранения энергии и т. д. На практике чаще применяют первый путь.

Однако в пищевой технологии часто встречаются многосвязные объекты, дающие ряд альтернативных* возможностей (в зависимости от выбора каналов регулирования) для стабилизации одного и того же параметра, в связи с чем необходимо использовать значительно более сложные модели. Для этого класса задач наиболее часто используют линейные многомерные системы с сосредоточенными параметрами (в которых отсутствует зависимость переменных от пространственных координат).

Модель многомерного объекта с сосредоточенными параметрами (рис. 2.13) можно получить из обобщения модели (2.21) для случая с k возмущениями, m управляющими воздействиями и n выходными переменными объекта. Тогда модель можно представить в матричном виде для передаточных функций

$$\bar{Y}(s) = W_u(s) \bar{U}(s) + W_f(s) \bar{F}(s), \quad (2.23)$$

где $\bar{Y}(s)$, $\bar{U}(s)$, $\bar{F}(s)$ — векторы соответствующих изображений по Лапласу; W_u , W_f — матрицы, содержащие одномерные передаточные функции по соответствующим каналам объекта управления:

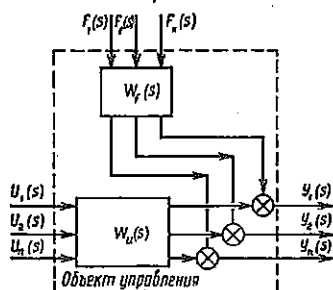


Рис. 2.13. Блок-схема многомерного объекта с k возмущающими, m управляющими и n выходными воздействиями

* Необходимость выбора между взаимоисключающими возможностями.

$$\begin{aligned} W_u(s) &= \begin{bmatrix} W_{11_u}(s) \dots W_{1k_u}(s) \\ \vdots \\ W_{n1}(s) \dots W_{nk}(s) \end{bmatrix}; \\ W_f(s) &= \begin{bmatrix} W_{11_f}(s) \dots W_{mf}(s) \\ \vdots \\ W_{n1_f}(s) \dots W_{nm_f}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Линейная модель многомерного объекта с сосредоточенными параметрами может быть представлена также в виде

$$\frac{d\bar{Y}}{dt} = A\bar{Y}(t) + B\bar{U}(t) + C\bar{F}(t), \quad (2.25)$$

где $\bar{Y}(t)$ — вектор размера n оригинала выходных переменных системы; $\bar{U}(t)$ — вектор размера m оригинала управляющих воздействий; $\bar{F}(t)$ — вектор размера k оригинала контролируемых возмущающих воздействий; A, B, C — матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений размера $n \times n, n \times m$ и $n \times k$.

Многие пищевые объекты описываются нелинейными моделями. Типичными являются три вида нелинейностей.

Зависимость параметров динамики от режима работы агрегата. Простейшим примером такого объекта служит смеситель, описываемый дифференциальным уравнением вида

$$V \frac{dy}{dt} = Q_1 x - Q_2 y, \quad (2.26)$$

где y — концентрация в смесителе; x — концентрация продукта на входе в смеситель; V — объем смесителя; Q_1 , Q_2 — расходы на входе и выходе смесителя.

Преобразуя уравнение (2.26), получим

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (2.27)$$

где $k=Q_1/Q_2$; $T=V/Q_2$.

При $Q_1 = \text{const}$ и $Q_2 = \text{const}$ объект линейный. Но изменение Q_1 и Q_2 приводит к изменению динамических параметров. Если Q_1 и Q_2 — управления (или возмущения), то, строго говоря, объект нелинеен. Однако если Q_1 и Q_2 меняются на 15—20% (что типично), то можно принять k и T по средним значениям Q_1 и Q_2 , а небольшими изменениями пренебречь. При расчете устойчивости следует принимать наихудшее сочетание параметров динамики.

Однозначные монотонные нелинейности без разрывов. Типичные примеры таких нелинейностей — характеристики клапана, зависимость расхода от перепада на сужающем устройстве и т. п. Такого рода нелинейности относятся обычно к статическим.

Как и в предыдущем случае, при относительно малых изменениях переменной простейшая линеаризация дает хорошие результаты. Например, для дифманометра с диафрагмой (расходомер) зависимость расхода от перепада давления имеет вид

$$Q = \alpha \sqrt{P} \quad (2.28)$$

где $\alpha = Q_{\max}/\sqrt{P_{\max}}$; $P_{\max}$ — максимальный перепад (верхний предел дифманометра); $Q_{\max}$ — максимальный расход, соответствующий $P_{\max}$.

Разлагая зависимость (2.28) в ряд Тейлора и ограничиваясь первыми двумя членами, получим

$$Q = \alpha \left[\sqrt{P_{\text{ср}}} + \frac{1}{2\sqrt{P_{\text{ср}}}} (P - P_{\text{ср}}) \right], \quad (2.29)$$

где $P_{\text{ср}}$ — средний перепад (расчетный).

или

$$Q = Q_{\text{ср}} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{P - P_{\text{ср}}}{P_{\text{ср}}} \right), \quad (2.30)$$

где $Q_{\text{ср}} = 2 \sqrt{P_{\text{ср}}}$.

Погрешность не более (третий член ряда)

$$\varepsilon \leq \frac{Q_{\text{ср}}}{8P_{\text{ср}}^2} (P - P_{\text{ср}})^2. \quad (2.31)$$

При P , отличающемся от $P_{\text{ср}}$ не более чем на 30%, $\varepsilon \leq (Q_{\text{ср}}/8)(0,3)^2 = 0,0112Q_{\text{ср}}$, т. е. не более 1,1% $Q_{\text{ср}}$.

Существенные нелинейности. Здесь имеются в виду в первую очередь нелинейности, описываемые разрывными функциями (либо не имеющими непрерывной производной). Например, разного рода релейные характеристики, зоны нечувствительности, люфт и т. п.

В отличие от предыдущих двух видов нелинейность этого вида, как правило, изменяет автоматическую систему в качественном смысле. Известно, например, что оптимальные по быстродействию автоматические системы, в принципе, должны быть релейными с существенно нелинейной поверхностью переключения. Известны точные методы анализа существенно нелинейных систем, в частности модели фазовой плоскости. Однако на практике этим методом можно пользоваться для контуров, описываемых дифференциальными уравнениями не выше второго порядка. Изредка применяется третий порядок. Анализ фазовых траекторий в пространствах, четырехмерном и более высокого порядка, весьма затруднителен.

Более широко применяются специальные методы линеаризации: гармоническая, статистическая, совместная гармоническая и статистическая. Суть всех методов сводится к тому, что в за-

зависимости от характеристик сигнала (амплитуды, дисперсии) и некоторых характеристик нелинейности (например, для реле — от максимального до минимального значений) в динамику системы вводится эквивалентная поправка. В простых случаях это только коэффициент передачи, в более сложных (например, при неоднозначной характеристике нелинейности) — также вводится эквивалентный сдвиг по фазе.

В пищевой промышленности встречаются объекты с распределенными непрерывно в пространстве параметрами. Примерами таких объектов могут служить процессы тепловой обработки разных продуктов в трубчатых аппаратах, различные трубчатые теплообменники и т. п. Наиболее общий подход к моделям таких объектов заключается в рассмотрении системы уравнений (в простейших случаях — одного уравнения) в частных производных.

В большинстве случаев такие уравнения линейны или приводятся к линейным упомянутыми выше методами. Тогда обычный путь — переход к изображениям по Лапласу (относительно времени) и решение уравнений относительно пространственных координат. Результат — передаточные функции часто достаточно простого вида, приводимого к уравнению (2.22), а иногда — сравнительно сложные (например, трансцендентные) функции от оператора s . В последнем случае применяют разложение в различного вида ряды (Тейлора, Лорана и т. п.), что обычно приводит к передаточной функции вида (2.22) или сумме двух-трех таких передаточных функций.

Другой путь — использование многомерного преобразования Лапласа (относительно времени и одной-двух пространственных координат). Этот путь несколько сложнее в чисто математическом смысле, но удобен тем, что допускает предварительный анализ на уровне многомерных передаточных функций. Конечный результат (в смысле описания динамики), естественно, аналогичен предыдущему.

Модель динамики объектов с распределенными параметрами часто можно получить экспериментально также обычно в виде (2.22). При наличии математических зависимостей модель может быть получена аналитически.

Пример. Рассматривается теплообменник типа труба в трубе. Охлаждаемый продукт имеет постоянную температуру Θ_k (например, это температура конденсации паров) и находится во внутренней трубе диаметром D . Охлаждающий продукт подается в наружную трубу поперечным сечением F в количестве Q и имеет начальную температуру Θ_0 , теплоемкость C и плотность ρ . Длина теплообменника L_k . Коэффициент теплопередачи α .

Из уравнения теплового баланса для элементарной длины получим

$$\begin{aligned} \partial F \Delta L \rho \frac{d\theta(L, t)}{dt} = C Q \theta(L, t) - C Q \theta[(L + \Delta L), t] + \\ + \alpha \pi D [\theta_k(t) - \theta(L, t)]. \end{aligned} \quad (2.32)$$

При выводе уравнения (2.32) предполагаются полное перемешивание поперек потока (разность диаметров труб достаточно мала) и полное вытеснение вдоль потока. Теплотери пренебрежимо малы.

Переходя в уравнении (2.32) к частным производным, получим

$$T \frac{\partial \theta(L, t)}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial \theta(L, t)}{\partial L} + \theta_k(t) - \theta(L, t), \quad (2.33)$$

$$\text{где } T = \frac{CF_p}{\alpha \pi D}; \quad \lambda = \frac{CQ}{\alpha \pi D}.$$

Выполним в выражении (2.33) преобразование Лапласа относительно времени

$$Ts \hat{\theta}(s, L) + \lambda \frac{\partial \hat{\theta}(s, L)}{\partial L} + \hat{\theta}(s, L) = \hat{\theta}_k(s), \quad (2.34)$$

где $\hat{}$ — символ изображения.

Преобразуем уравнение (2.34) и опустим аргументы

$$\frac{\lambda}{Ts + 1} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial L} + \hat{\theta} = \frac{\hat{\theta}_k}{Ts + 1}. \quad (2.35)$$

Решение (2.35)

$$\hat{\theta} = \left(\theta_0 - \frac{\theta_k}{Ts + 1} \right) e^{-(Ts+1)L/\lambda} + \frac{\theta_k}{Ts + 1}. \quad (2.36)$$

Выражение для изображения температуры теплоносителя на выходе

$$\hat{\theta}_2 = k e^{-T_1 s} \hat{\theta}_0 - \left(\frac{k}{Ts + 1} e^{-T_1 s} - \frac{1}{Ts + 1} \right) \hat{\theta}_k e \quad (2.37)$$

где $k = e^{-L_k/\lambda}$; $T_1 = TL_k/\lambda$.

Передаточная функция по каналу $\hat{\theta}_k \rightarrow \hat{\theta}_2$

$$W(s) = - \frac{k}{Ts + 1} e^{-T_1 s} + \frac{1}{Ts + 1}. \quad (2.38)$$

Если пренебречь в выражении (2.38) вторым членом, получим вид передаточной функции, аналогичный (2.22).

Для объектов с распределенными параметрами характерно большее запаздывание (обычно $\tau/T \geq 1$), причем это запаздывание имеет «емкостной», а не «транспортный» характер. Высококачественное регулирование для таких объектов затруднено и требует применения специальных видов регуляторов (импульсных, с упредителем и т. п.).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяются основные свойства технологических объектов управления?
2. Что представляет собой идентификация технологического процесса как объекта управления?
3. По каким свойствам и признакам осуществляется классификация технологических процессов как объектов управления?

4. Какие объекты пищевой технологии относятся к детерминированным и какие — к стохастическим? Приведите примеры.
5. Какие объекты управления являются устойчивыми и какие — неустойчивыми? Какие объекты управления требуют применения корректирующих устройств в схемах регулирования?
6. Какие задачи решаются при подготовке технологического объекта к автоматизации?
7. Какие методы применяются для исследования объектов управления?
8. В каких случаях для исследования объекта управления применяется классический метод и в чем его суть?
9. В чем суть временного метода и как на его основе получить параметры объекта управления?
10. В каких случаях применяется статистический метод исследования объекта управления и какие основные этапы методики определения динамических характеристик объекта?
11. Что представляют собой автокорреляционная и взаимокорреляционная функции? Охарактеризуйте методику их расчета.
12. Как подразделяются возмущающие воздействия на объект и как они оцениваются?
13. Как аппроксимируются переходные процессы в реальных объектах? Напишите передаточную функцию для одномерного объекта, для многомерного объекта.
14. Какие три вида нелинейности типичны для объектов пищевой технологии и какие приняты подходы к математическим моделям таких объектов?

Глава 3

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

§ 3.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ И РЕАЛИЗАЦИИ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Системы автоматической стабилизации параметров технологического процесса (расхода, давления, температуры, уровня, состава веществ) обычно строятся на общепромышленных регуляторах; в тех случаях, когда это технически и экономически целесообразно, такие системы реализуются на средствах вычислительной и микропроцессорной техники. В этих системах применяются следующие законы регулирования: П, ПИ, ПИД, позиционный, импульсный.

В настоящее время не менее 90% задач управления решаются с помощью указанных законов регулирования. Это объясняется, с одной стороны, простотой, хорошей отработанностью конструкции и, как следствие, высокой надежностью общепромышленных регуляторов, реализующих эти законы. С другой стороны, для пищевой промышленности характерны объекты с большими постоянными времени, подавление возмущений за счет перемешивания продуктов в промежуточных емкостях. Для таких объектов (составляющих 50—70% технологических про-

цессов) даже простейшие решения (например, одноконтурная система с ПИ-регулятором) дают хороший результат. Во многих остальных случаях, хотя и при невысоком качестве регулирования, такие законы регулирования все же дают приемлемые (с позиций технологии) результаты.

Важнейшими критериями при выборе конкретного закона регулирования являются отношение T_0/τ_0 , относительное время регулирования, а также погрешность регулирования (динамический коэффициент).

В литературе имеются довольно разнообразные по форме (но не по сути) рекомендации по выбору законов регулирования. В целом они сводятся к следующему:

- 1) при $T_0/\tau_0 > 5$ достаточно релейного регулятора;
- 2) при $0,2 < T_0/\tau_0 < 5$ можно применять импульсный регулятор;
- 3) при $T_0/\tau_0 > 1$ достаточно типового линейного регулятора (П, ПИ или ПИД);
- 4) при $T_0/\tau_0 < 1$ необходим специальный регулятор компенсации запаздывания.

Для выбора между П-, ПИ- и ПИД-регуляторами можно воспользоваться диаграммой, приведенной на рис. 3.1.

Как видно из рис. 3.1, при выборе типа регулятора важную роль играет относительное время регулирования.

Пропорциональные регуляторы могут использоваться в случае, когда допустимы либо большее время регулирования, либо большая статическая ошибка. Малое время регулирования (порядка $t_p = 5\tau$) при незначительной ошибке (порядка 10%) может быть получено только для объектов с очень низким запаздыванием ($T_0/\tau_0 \geq 20$).

Регуляторы типа ПИ могут использоваться при достаточно произвольных требованиях к установившейся ошибке, если допустимо время регулирования большее, чем $t_p = 6\tau_0$. Однако при больших τ_0 динамическая ошибка может быть значительной.

Время регулирования в пределах 4—6 с можно получить

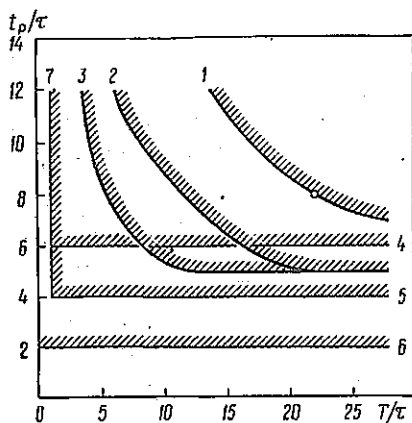


Рис. 3.1. Диаграмма для выбора законов регулирования:

1, 2, 3 — П-регулятор при статической ошибке соответственно 10, 15 и 20% от возмущения; 4 — ПИ-регулятор; 5 — ПИД-регулятор; 6 — теоретически достижимая граница; 7 — граница применимости типовых регуляторов

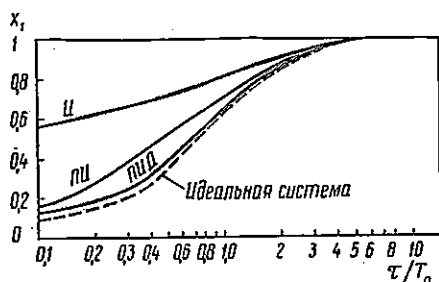


Рис. 3.2. Зависимость $x_1=f(\tau/T_0)$ для системы с 20%-ным перерегулированием

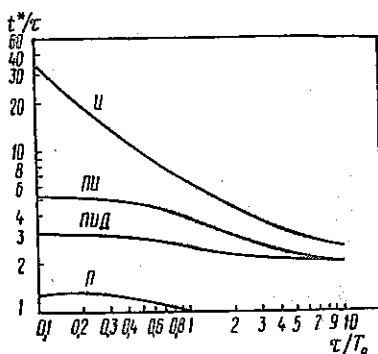


Рис. 3.3. Зависимость $t^*/\tau=\varphi(\tau/T_0)$ для системы с 20%-ным перерегулированием

при использовании ПИД-регулятора. Но при $T_0/\tau_0 < 1,5$ и $T_0/\tau_0 > 5$ качество регулирования (динамическая ошибка, колебательность и т. п.) будет мало отличаться от полученного для ПИ-регулятора.

Для выбора линейного типового закона регулирования широко используется методика института автоматики и телемеханики (ИАТ). На рис. 3.2 и 3.3 в качестве примера приведены диаграммы из этой методики. Как видно из приведенных диаграмм, выбор осуществляется, в принципе, аналогично тому, как описано для рис. 3.1. Разница заключается в том, что можно дифференцированно выбирать регулятор в зависимости от требований к качеству регулирования (в смысле вида переходного процесса). Необходимо отметить, однако, что на практике тип регулятора мало зависит от типа переходного процесса.

Пример. Задано $\tau_0/T_0=0,5$; $t_p/\tau_0=5$. Для процесса с 20%-ным перерегулированием (см. рис. 3.2) этим условиям удовлетворяет ПИ-регулятор; для процесса с минимальным временем регулирования (см. рис. 3.3) — результат аналогичный.

Указанная методика предусматривает также возможность выбора регулятора с учетом динамического коэффициента регулирования.

Ориентировочные возможности разных типов линейных регуляторов характеризует табл. 3.1, составленная на основании диаграмм методики ИАТ.

Из данных табл. 3.1 видно, что тип регулятора незначительно влияет на качество регулирования. Влияние τ_0/T_0 гораздо сильнее. При $\tau_0/T_0 \geq 1$ любой регулятор малоэффективен.

В дополнение к сказанному укажем две практически важные области применения П-регуляторов.

1. Управление астатическими объектами. Здесь свойства объекта практически исключают наличие статической ошибки, а применение ПИ-регулятора часто приводит к структурной неустойчивости системы.

2. Замена ПИ-регуляторов в тех случаях, когда уставка времени издрома ($T_{из}$) получается слишком большой. В реальных общепромышленных ПИ- и ПИД-регуляторах можно надежно установить время издрома не более 500—2000 с, причем обычно погрешность установки в этом случае возрастает. При такой уставке ПИ-регулятор работает, как П-регулятор со случайной контрольной точкой. Целесообразно заменить его более простым П-регулятором с настраиваемой контрольной точкой. В то же время, если объект статический (с самовыравниванием), применение П-регулятора, работающего непосредственно на клапан, нежелательно. Характеристики клапана, как правило, очень трудно согласовать с контрольной точкой регулятора. Правильнее применять ПИ-регулятор, который, во-первых, почти всегда обеспечит такое же или лучшее качество регулирования (см. рис. 3.1), а во-вторых, не требует согласования уставок с характеристиками клапана.

Из изложенного выше (см. рис. 3.1, табл. 3.1) следует, что ПИД-регулятор всегда дает результаты немного лучшие, чем ПИ-регулятор. Однако это улучшение можно реализовать только при наличии точной информации о динамических характеристиках объекта (k_0 , T_0 , τ_0), а также при условии, что эти параметры стабильны. Иначе говоря, ПИД-регулятор гораздо менее чувствительный (по отношению к k_0 , T_0 , τ_0), чем ПИ-регулятор. Неточное знание динамики (или ее «дрейф») и, как следствие, неправильный выбор уставок обычно сводят на нет преимущества ПИД-регулятора, особенно при $\tau_0/T_0 > 0,5$.

ПИД-регулятор дает хорошие результаты для существенно нелинейных объектов с нелинейностями типа гистерезиса и зоны нечувствительности при небольших запаздываниях ($\tau_0/T_0 \leq \leq 0,3$). Регуляторы других типов в этой ситуации заметно хуже.

3.1. Значения динамических коэффициентов (τ_0/T_0) для выбора законов регулирования

Тип регулятора	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0
ПИД	0,12	0,21	0,42	0,52	0,62
ПИ	0,16	0,28	0,52	0,61	0,70
П*	0,12	0,2	0,4	0,52	0,61

* Для П-регулятора приведена статическая ошибка.

3.2. Перечень формул для оценки настроек регуляторов

Критерий качества переходного процесса	Тип регулятора		
	П	ПИ	ПИД
Минимум времени регулирования	$k_p = \frac{0,3}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$	$k_p = \frac{0,6}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$ $T_n = 0,5 \tau_o (1,6 + \frac{T_o}{\tau_o})$	$k_p = \frac{0,95}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$ $T_n = 2,4 \tau_o$ $T_d = 0,4 \tau_o$
Минимум интеграла квадрата ошибки	$k_p = \frac{0,9}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o};$ $k_p = \frac{1,41}{k_o} \left(\frac{T_o}{\tau_o} \right)^{0,92}$	$k_p = \frac{1,3}{k_o} \left(\frac{T_o}{\tau_o} \right)^{0,96}$ $T_n = 2 \tau_o \left(\frac{T_o}{\tau_o} \right)^{0,26}$	$k_p = \frac{1,4}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$ $T_n = 1,3 \tau_o$ $T_d = 0,5 \tau_o$
Минимум интеграла модуля ошибки	$k_p = \frac{0,9}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$	$k_p = \frac{0,98}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$ $T_n = 1,64 \tau_o \times \left(\frac{T_o}{\tau_o} \right)^{0,29}$	$k_p = \frac{1,44}{k_o} \left(\frac{T_o}{\tau_o} \right)^{0,92}$ $T_n = 1,14 \tau_o \times \left(\frac{T_o}{\tau_o} \right)^{0,25}$ $T_d = 0,48 \tau_o \times \left(\frac{T_o}{\tau_o} \right)^{0,14}$
20%-ное перерегулирование	$k_p = \frac{0,7}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$	$k_p = \frac{0,7}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$ $T_n = \tau_o (1 + 0,3 \frac{T_o}{\tau_o})$	$k_p = \frac{1,2}{k_o} \cdot \frac{T_o}{\tau_o}$ $T_n = 2 \tau_o$ $T_d = 0,4 \tau_o$

Для выбора настроек типовых линейных регуляторов можно воспользоваться данными табл. 3.2, в которой в зависимости от требуемого критерия качества приведены формулы для приближенной оценки настроек регуляторов.

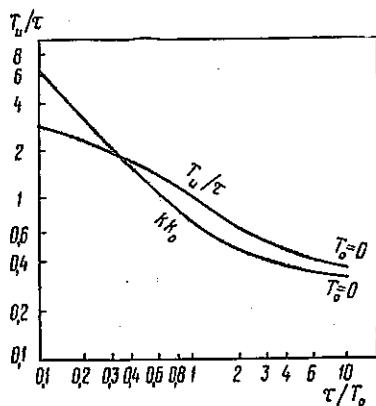


Рис. 3.4. Рекомендуемые настройки в системах с ПИ-регуляторами и объектами с самовывравниванием и 20%-ным перерегулированием

В табл. 3.2 приняты следующие обозначения настроек регуляторов: k_p — коэффициент усиления регулятора; T_n — постоянная интегрирования (время изодрома); T_d — постоянная дифференцирования. Выбор настроек может осуществляться также по диаграммам, приведенным в методике ИАТ. Пример такой диаграммы дан на рис. 3.4.

При расчете настроек регулятора по табл. 3.2 (или при определении по диаграммам) следует иметь в виду, что параметры объекта (k_0 , T_0 , τ_0) известны приблизительно (обычно с точностью порядка 10—15%). Установка расчетных настроек на общепромышленных регуляторах также производится приблизительно, поэтому расчет уставок всегда имеет приблизительный характер. Выбранные уставки уточняются в процессе наладки на объекте.

Четкие рекомендации по процессу наладки дать затруднительно (хотя и имеется обширная литература по данному вопросу). Здесь важную роль играют практический опыт и знание особенностей технологического процесса. Общие соображения сводятся к следующему:

1) для ПИ-регулятора T_n в основном влияет на колебательность процесса, k_p — на динамический коэффициент (т. е. амплитуду первого колебания);

2) для ПИД-регулятора влияние T_n и k_p в основном такое же, как для ПИ-регулятора, но ПИД-регулятор более чувствителен к настройке, а влияние T_d обычно имеет экстремальный характер; отклонение T_d от оптимального значения увеличивает колебательность системы, причем оптимальное (в смысле колебательности) значение T_d зависит от T_n и k_p ;

3) для П-регулятора с ростом k_p увеличивается колебательность системы и, пока система устойчива, уменьшается статическая ошибка.

К числу настроек П-регулятора относится также выбор положения контрольной точки. В литературе же нет указаний о методах ее выбора. Практическое правило следующее — контрольную точку выбирают так, чтобы при номинальном режиме работы объекта (номинальной нагрузке, номинальном задании)

статическая ошибка регулятора равнялась нулю. Выбор режима, который можно считать нормальным, требует хорошего знания технологии. Иногда необходима периодическая подстройка контрольной точки.

§ 3.2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСХОДА

Для систем автоматического регулирования (контуров стабилизации) расхода «объектом», как правило, является участок трубопровода от исполнительного механизма до расходомера. Естественно, такой «объект» можно считать практически безынерционным (теоретически — при регулировании расходов несжимаемых жидкостей). Однако контуры стабилизации расхода не позволяют получить высокое качество регулирования по следующим причинам:

1) главной инерционностью в таких системах обладают датчики, исполнительные механизмы и при пневматической реализации — линии. При этом такие расходомеры, как ротаметры, имеют динамическую характеристику в виде чистого запаздывания. В целом нередки случаи, когда отношение τ_0/T_0 контура получается порядка единицы;

2) в сигнале расхода присутствует высокочастотная составляющая (пульсации давления на сужающем устройстве, вибрации поплавка ротаметра, толчки в трубопроводе на выходе плунжерных насосов и т. п.), а инерционность исполнительного механизма обычно не позволяет подавить такого рода помехи;

3) отсутствие объекта в чистом виде делает заметными разного рода нелинейности. Здесь важную роль играет техническая нелинейность многих типов расходомеров (например, корневая характеристика сужающих устройств, зона нечувствительности ротаметров и т. п.). Однако нелинейности регулирующих клапанов тоже иногда нужно учитывать (например, при применении заслонок, мембранных или шланговых клапанов).

С учетом изложенного важно правильно определить требования к качеству регулирования.

Обычно для объектов пищевой технологии нет смысла точно стабилизировать расход в каждый данный момент. Достаточно обеспечить поддержание с заданной точностью среднего расхода за некоторый интервал времени. Иногда этот интервал может быть относительно большим. Например, необходимо знать производительность некоторого агрегата за час, смену. Если система достаточно точно поддерживает средний расход за 15—20 мин, то это вполне приемлемо.

Из этих же соображений обычно не важна амплитуда максимальных отклонений расхода (если это допустимо по технологическим ограничениям). Важно лишь, чтобы такие отклонения были кратковременными.

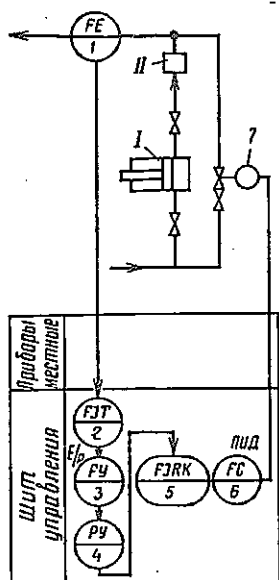


Рис. 3.5. Схема автоматизации регулирования расхода:

1 — плунжерный насос; II — демпфер; I — датчик индукционного расходомера; 2 — вторичный прибор индукционного расходомера; 3 — электропневмопреобразователь; 4 — прибор обратного преобразования; 5 — вторичный прибор; 6 — ПИД-регулятор; 7 — диафрагменный клапан

В то же время систематические отклонения, даже небольшие, нежелательны, так как это повлияет на средний расход. Поэтому применение П-регуляторов из-за статической ошибки нецелесообразно. Отдельно следует отметить особенности следящих контуров регулирования расхода (когда такой контур — нижний уровень каскадной системы). В таких случаях важно правильно выбрать совместимые уставки обоих контуров каскада.

Рассмотрим особенности системы автоматического регулирования расхода после плунжерного насоса. В пищевых

производствах достаточно типичной является ситуация, когда «неудобный» (т. е. содержащий взвеси, липкий, вязкий) продукт необходимо перекачивать плунжерными насосами. Такими продуктами являются бражка, замес, меласса, известковое молоко, томат-паста и др. При необходимости регулировать расход такого продукта используют либо регулируемый привод насоса (как правило, тиристорный), либо устанавливают клапан, байпасирующий насос. Рассмотрим второй случай — более простой в смысле технической реализации и более дешевый, но более сложный в смысле расчета. Типичная схема автоматизации приведена на рис. 3.5.

Для данного контура важен выбор клапана, так как наличие взвесей и вязкость продукта способствуют забиванию. Диафрагменный клапан не имеет «карманов», а также крутых изгибов, способствующих забиванию. Однако более простая конструкция проточной части приводит к существенной нелинейности характеристики клапана и сильному влиянию перепада давления на клапане на расход. Кроме того, незагруженная диафрагма (запорный элемент клапана) передает броски давления на шток и, как следствие, создает заметный люфт в статической характеристике клапана.

Другой важный практический момент — необходимость установки демпфера II, предназначенного для сглаживания толчков расхода, которые создает плунжерный насос.

Пример. Объем демпфера можно определить из соотношения:

$$P_{\min} V = P_{\max} (V - V_p),$$

где $P_{\min}$ и $P_{\max}$ — соответственно минимальное и максимальное давления в воздушной полости демпфера (и в силу несжимаемости продукта — в магистрале), Па; V — объем воздушной полости демпфера, м³; V_p — рабочий объем цилиндра насоса, м³.

Откуда

$$V = V_p \left(\frac{\mu}{\mu - 1} \right),$$

где $\mu = P_{\max}/P_{\min}$.

Примем $\mu = 1,05$. (При этом толчки расхода составят $(\sqrt{\mu} - 1) \cdot 100 \approx 2,2\%$.)

При диаметре поршня 150 мм и рабочем ходе 200 мм

$$V = \frac{150^2 \cdot 3,14 \cdot 200}{4 \cdot 10^9} \left(\frac{1,05}{1,05 - 1} \right) \approx 0,075 \text{ м}^3.$$

Полный объем демпфера желательно взять на 20—50% больше с учетом заполнения части объема продуктом. В итоге полный объем демпфера

$$V_{\Pi} = 0,075 \cdot 1,35 = 0,1 \text{ м}^3.$$

Важно также обеспечить избыточную подачу насоса (не менее 30% номинальной), так как контур допускает регулирование только «вниз» от максимальной подачи насоса.

В рассматриваемом примере номинальный расход 15—18 м³/ч. Двухплунжерный насос с цилиндром указанного выше размера при частоте вращения 60 мин⁻¹ обеспечит подачу

$$Q_{\max} = \frac{150^2 \cdot 3,14 \cdot 200}{4 \cdot 10^3} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60 \approx 25 \text{ м}^3/\text{ч},$$

т. е. запас

$$\Delta Q = \frac{25 - 18}{18} 100 \approx 40\%.$$

Постоянная времени демпфера

$$T_d = \frac{V}{Q_n} \cdot 3600 = \frac{0,075}{18} \cdot 3600 = 15 \text{ с}.$$

Ввиду особенностей среды выбираем в качестве датчика расхода индукционный расходомер с верхним пределом 32 м³/ч. Тогда номинальный расход (18 м³/ч) составит почти 55% шкалы. Минимальный расход около 5—6 м³/ч (при меньших расходах технологическое оборудование работает неустойчиво, целесообразно остановить процесс, отключив насос). Рабочая область от 5 до 25 м³/ч составит 16—80% шкалы.

На клапане возникает большой перепад давления (на входе максимальное давление насоса обычно достигает 400 кПа, на выходе — давление всасывания насоса, т. е. либо атмосферное давление, либо разрежение). Поэтому для уменьшения нелинейности целесообразно выбрать клапан с минимальной пропускной способностью (т. е. минимально возможного D_y).

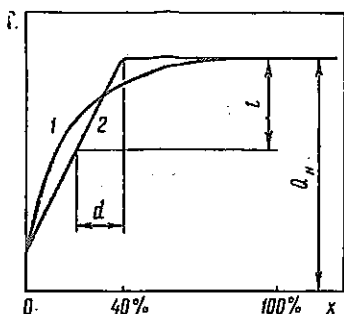


Рис. 3.6. Характеристика клапана:

1 — реальная характеристика; 2 — ее аппроксимация (Q — расход, x — положение диафрагмы)

С учетом подачи насоса ($25 \text{ м}^3/\text{ч}$) и минимального расхода ($5 \text{ м}^3/\text{ч}$) клапан должен пропускать $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ (расчет клапана не приводится, так как это предмет отдельного курса).

Ввиду большого перепада и неблагоприятной конструктивной характеристики клапана рабочая область лежит в диапазоне от 0 до 40% хода клапана. Характеристику клапана можно аппроксимировать нелинейностью вида 1, приведенной на рис. 3.6. Характеристики нелинейности: $\alpha = \pm 20\%$; $l = \pm 32,5\%$. Характеристики люфта: $\gamma = 1$; $\alpha = 10\%$. Индукционный расходомер можно считать безынерционным.

Линию от электропневмопреобразователя до вторичного прибора также примем безынерционной (считается, что электрическая линия безынерционная, а электропневмопреобразователь установлен достаточно близко от вторичного прибора). При расстоянии от щита до клапана 100 м постоянная времени равна 3,5 с, запаздывание 0,6 с, постоянная времени клапана 3 с.

На рис. 3.7 приведена схема построения суммарной статической характеристики нелинейной части системы. Соединение элементов: сначала люфт (шток-диафрагма), затем ограничение (характеристика проточной части). Построение графическое, схема его ясна из рис. 3.7. Параметры суммарной нелинейности (см. рис. 3.7): $\alpha = X_a = 10\%$; $h = X_b/X_a = 3$; $\gamma = Y/(X_b - X_a) = 1,62$.

В соответствии с рис. 3.5 регулирующая часть контура представлена в виде ПИД-регулятора 6 и фильтра 4.

Передаточная функция ПИД-регулятора (в идеализированном виде)

$$W_{\text{ПИД}} = k_p + \frac{1}{T_{\text{ис}} s} + T_d s. \quad (3.1)$$

Для удобства расчетов представим функцию (3.1) в виде

$$W_{\text{ПИД}} = \frac{k_{\text{PI}} T_{\text{ис}} s + 1}{T_{\text{ис}} s} (1 + T_d s), \quad (3.2)$$

где T_d — время предварения, с; k_p — коэффициент усиления регулятора; $T_{\text{ис}}$ — время издрорма, с.

Причем в выражении (3.2) имеют место соотношения:

$$T_d = T_{\text{дл}} k_{\text{PI}}; \quad k_p = k_{\text{PI}} + T_{\text{дл}}/T_{\text{ис}}. \quad (3.3)$$

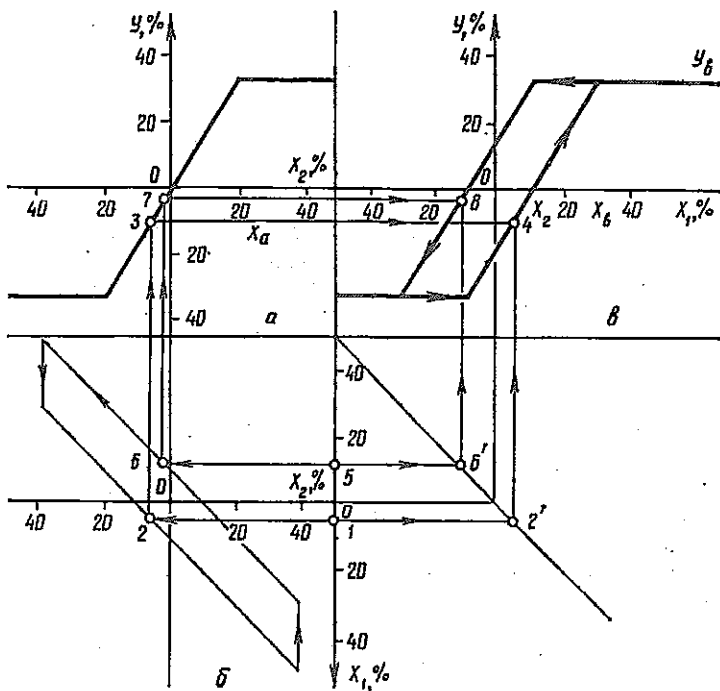


Рис. 3.7. Схема построения суммарной статической характеристики нелинейной части системы:

a — звено ограничения; b — звено люфта; v — суммарная характеристика. Схема построения: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ и $1 \rightarrow 2' \rightarrow 4$ при возрастании X_1 или $5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ и $5 \rightarrow 6' \rightarrow 8$ при убывании X_1 ; X_1 — общий вход (вход звена b); X_2 — выход звена b — вход звена a ; Y — общий выход

Поскольку типовые характеристики нелинейных звеньев рассчитаны при $\gamma = 1$, введем фактическое значение γ в регулятор. С учетом этого в выражении (3.2) T_n заменим на T_{n1} , причем

$$T_{n1} = T_n / \gamma. \quad (3.4)$$

С учетом изложенного на рис. 3.8 представлена блок-схема системы автоматического регулирования расхода по отдельным типовым звеньям.

На рис. 3.9 приведены логарифмические амплитудные (ЛАХ) и фазовые (ЛФХ) характеристики отдельных звеньев системы. Для линейной части системы ЛАХ и ЛФХ представлены в функции частоты ω , для нелинейной части — в функции относительной амплитуды колебаний ($\mu = A_0/d$). Кривые ЛАХ и ЛФХ для нелинейной части взяты из литературы.

Выберем желаемый вид ЛАХ и ЛФХ для линейной части контура. При этом учтем следующее: нелинейность уменьшает

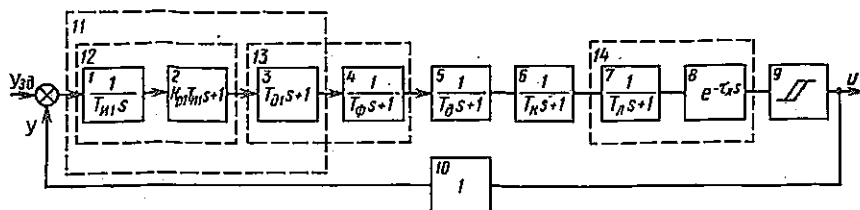


Рис. 3.8. Блок-схема системы автоматического регулирования расхода:
1 — интегрирующее звено; 2 — звено передаточной функции ПИ-регулятора; 3 — звено Д-части регулятора; 4 — фильтр; 5 — демпфер; 6 — клапан; 7, 8 — звенья линии; 9 — нелинейная часть; 10 — датчик и преобразователь; 11 — ПИД-регулятор; 12 — ПИ-часть регулятора; 13 — корректирующее звено; 14 — линия

ЛАХ (запас по амплитуде увеличивается) и увеличивает ЛФХ (запас по фазе уменьшается); в целом запас устойчивости контура несколько увеличивается; в целях получения достаточного быстрого действия частоту среза ω_c следует принять большей.

С учетом номограмм, имеющих в литературе, а также необходимости получить режим без автоколебаний (с учетом нелинейности) примем частоту среза $\omega_c = 0,08 \text{ с}^{-1}$; запас по фазе 27° (это несколько меньше рекомендованного, но с учетом не-

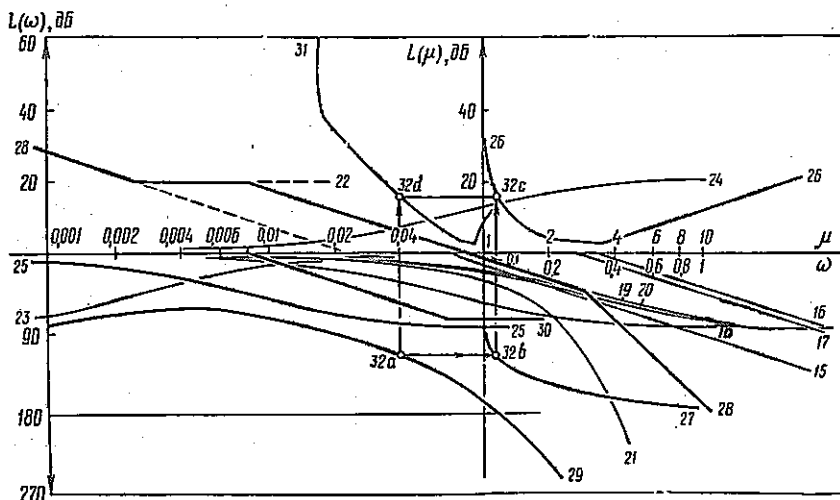


Рис. 3.9. Логарифмические амплитудные и фазовые характеристики звеньев и схема синтеза системы:

15—17 — ЛАХ звеньев 5, 6 и 7 соответственно; 18—21 — ЛФХ звеньев 5—8 соответственно; 22, 23 — ЛАХ и ЛФХ ПИ-части регулятора; 24, 25 — ЛФХ звеньев 3 и 12 соответственно; 26, 27 — ЛАХ и ЛФХ релейной части; 28, 29 — ЛАХ и ЛФХ линейной части; 30 — ЛАХ корректирующего звена; 31 — ЛАХ критического коэффициента передачи; 32 — схема построения линии 31 (32a→32b→32c→32d и 32a→32d) (звенья 1—14 см. на рис. 3.8)

линейности приемлемо); горизонтальный участок в ЛАХ на уровне 20 дБ (для устранения автоколебаний); отношение $\omega_2/\omega_c \approx 0,1$; отношение $\omega_3/\omega_c \approx 3,5$ (это приемлемо, получить большое значение затруднительно, так как потребуются дополнительные звенья); отношение $\omega_1/\omega_c \approx 0,032$ (влияет слабо).

Из указанных выше номограмм без учета нелинейной части получим апериодический процесс (без перерегулирования): $\omega_c t_n/10 = 0,2$, где t_n — время регулирования, равное 25 с, т. е. $(0,2 \cdot 10)/0,08$.

На рис. 3.9 приведены ЛАХ и ЛФХ линейной части разомкнутого контура (линии 28 и 29). По ЛФХ линейной части и ЛАХ, ЛФХ нелинейной части построена ЛАХ критического коэффициента передачи нелинейной части, т. е. зависимость коэффициента передачи от частоты и относительной амплитуды, при котором возникают автоколебания (линия 31 на рис. 3.9). Поскольку ЛАХ линейной части (линия 28) лежит везде ниже линии 31, автоколебания не возникнут.

При возмущениях меньше hd (т. е. меньше 30% хим.) система не выходит на ограничения и в силу апериодичности переходного процесса люфтом в первом приближении можно пренебречь. Тогда оценка по линейной части времени переходного процесса $t_n = 25$ с достаточно точная.

Начальная часть линии 28 (линия 22) — ПИ-часть ПИД-регулятора. Параметры ПИД-регулятора из рис. 3.9: $1/(k_p T_{ин}) = 0,0025 \text{ с}^{-1}$; $1/T_{ин} = 0,0225 \text{ с}^{-1}$. Откуда $T_n = T_{ин} \gamma = 1,62/0,0225 = 72 \text{ с}$; $k_p = 1/(T_{ин} \cdot 0,0025) = 0,0225/0,0025 = 9$.

Корректирующее звено (звено 13 на рис. 3.8) имеет ЛАХ, показанную на рис. 3.9 (линия 28), с параметрами $1/T_{д1} = 0,066 \text{ с}^{-1}$ и $1/T_{ф} = 0,008 \text{ с}^{-1}$, откуда $T_d = 15 \text{ с}$; $T_{ф} = 125 \text{ с}$.

Из выражений (3.3) имеем: $T_d = 15 \cdot 9 = 135 \text{ с}$; $k_p = 9 + 15/72 = 9,21$.

Диапазон дросселирования для ПИД-регулятора $ДД = 100/9,21 \approx 10\%$. Время изодрома 72 с, время предварения 135 с, уставка блока обратного предварения 125 с.

§ 3.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ

С точки зрения теории регулирования контуры стабилизации давления для пищевых объектов являются, как правило, достаточно простыми. Это объясняется простотой динамической характеристики, выражающейся обычно уравнением первого порядка без запаздывания (или с $\tau_0/T_0 < 0,1$) при небольших постоянных времени. Поэтому качество регулирования их почти всегда достаточно высокое. Однако важным требованием при проектировании таких систем является надежность (резкое повышение давления в аппарате может привести к серьезной аварии и даже к взрыву).

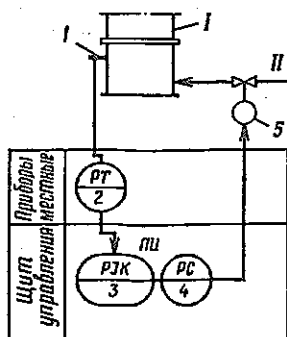


Рис. 3.10. Схема автоматизации регулирования давления в нижней части ректификационной колонны:

I — нижняя часть колонны; II — трубопровод подачи пара; 1 — устройство отбора импульса; 2 — датчик давления в нижней части; 3 — вторичный прибор; 4 — ПИ-регулятор; 5 — регулирующий клапан

С учетом требований надежности особое внимание следует обращать на выбор места отбора импульса и правильность монтажа датчика линии, связывающей датчик с объектом. Наиболее часты отказы контуров давления из-за забивания трубки отбора давления (в пищевых производствах наличие в продуктах разного рода взвесей — обычное явление). При измерении давления в паровой среде следует брать во внимание конденсацию продукта в датчике и импульсной трубке, возможность образования водяных пробок и т. п.

При расчете системы необходимо учитывать инерционность не только объекта, но и исполнительного механизма, а также пневматических линий.

Рассмотрим систему автоматического регулирования давления в нижней части ректификационной колонны (рис. 3.10). Динамические параметры системы: $k_o = 285$ Па/% хим., $T_o = 60$ с, запаздывания нет; расстояние от щита до клапана 100 м, от щита до датчика 50 м; помещение пожаровзрывоопасное. Для этой системы важен выбор клапана. Больше всего соответствует нормально закрытый клапан (воздух открывает), так как при остановке компрессора пар следует перекрыть. Ввиду особенностей помещения все приборы пневматические.

Выбор датчика осуществляется с учетом того, что в рабочем режиме давление в нижней части ректификационной колонны находится в пределах 20—30 кПа (по технологическому регламенту). С учетом этого подходит датчик с пределами 0—40 кПа, т. е. верхний предел соответствует 40 кПа. Рабочая область будет от 50 до 75% шкалы. Класс датчика — единица, т. е. погрешность составит 0,4 кПа, что приемлемо. Параметры всех звеньев системы приведены в табл. 3.3.

3.3. Динамические параметры звеньев системы

Объект	k_o	T_o , с	τ_o , с
Колонна	28,5	60	0
Датчик	1	3	0
Линия до датчика	1	2	0
Линия до клапана	1	3,5	0,6
Клапан	1	2	0

Согласно существующей методике определение суммарной передаточной функции и технология аппроксимации выполняются по следующей схеме. Для объекта четвертого порядка вида $1/(T_0s+1)^n$ при аппроксимации его принятой нами стандартной передаточной функцией $e^{-\tau_n s}/(T_0s+1)$ имеют место соотношения, определяемые по таблице, принятой в методике ИАТ:

$$T_a = 4,463T_0; \tau_n = 1,425T_0. \quad (3.5)$$

В нашем случае четыре меньшие постоянные времени (см. табл. 3.3) несколько различаются. Можно, однако, приближенно принять $T_0 \approx (2+2+3+3,5)/4 = 2,6$. Тогда из соотношений (3.5) $T_0 \approx 11,6$ с, $\tau_n = 3,7$ с.

Промежуточный вид передаточной функции

$$W_z(s) = \frac{28,5e^{-(0,6+3,7)s}}{(60s+1)(11,6s+1)} = \frac{28,5e^{-4,3s}}{(60s+1)(11,6s+1)}.$$

Отношение двух постоянных времени $60/11,6 \approx 5,1$. Из таблицы ИАТ при $n=5$ $T_a = 5,119T_0$, $\tau_0 = 2,100T_0$; при $n=6$ $T_a = 5,699T_0$; $\tau_n = 2,811T_0$. С учетом этого можно представить W_z в виде

$$W_z(s) = \frac{28,5e^{-(4,3-2,1T_0)s}}{(T_0s+1)^5} \cdot \frac{1}{T_0s+1},$$

где $T_0 = 11,6$.

Или, аппроксимируя первым порядком,

$$W_z(s) = \frac{28,5e^{-(4,3-2,1T_0+2,81T_0)s}}{5,699T_0s+1}.$$

В численном виде

$$W_z(s) = \frac{28,5e^{-12,5s}}{67s+1}. \quad (3.6)$$

Тогда из выражения (3.6) динамические параметры системы: $k_0 = 28,5$; $T_0 = 67$ с; $\tau_0 = 12,5$ с. Отношение $\tau_0/T_0 = 0,186$. Принимаем переходный процесс с 20%-ным перерегулированием. Учитывая, что технологический процесс не предъявляет особых требований к времени регулирования, примем величину t_p порядка 70 с. Отношение $t_p/\tau_0 \approx 5,5$. Из диаграммы рис. 3.3 видно, что ПИ-регулятор это отношение обеспечивает с большим запасом. При $\tau_0/T_0 = 0,186$ можно принять $t_p/\tau_0 \approx 5$, т. е. $t_p \approx 60$ с.

Из диаграммы рис. 3.4 получим выражения для вычисления уставок регулятора: $k_p k_0 = 3,5$; $T_n/\tau_0 = 2,5$ (где T_n — время излома регулятора; k_p — коэффициент усиления регулятора).

Тогда $k_p = 3,5/28,5 \approx 0,12\%$ хим./Па; $T_n = 12,5 \cdot 2,5 \approx 31,5$ Па/% хим.

По методике ИАТ в расчетах принята передаточная функ-

ция регулятора вида $W_p(s) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}}s}$, что совпадает со структурой серийно выпускаемого регулятора.

Однако необходим пересчет на шкалу датчика (выход на клапан в процентах). Шкала датчика 0—100% соответствует 0—40 кПа (т. е. 1% соответствует 0,4 кПа). С учетом этого $k_p = 0,12 \cdot 40 = 5$; $T_{\text{и}} = 31,5/40 = 0,8$.

Реально регулятор допускает $T_{\text{и}} = 5$ с. Вместо k_p в регуляторе использована обратная величина в процентах — диапазон дросселирования $ДД = (1/5) \cdot 100 = 20\%$. Таким образом, установки $ДД = 20\%$; $T_{\text{и}} = 5$ с.

§ 3.4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Поддержание заданной температуры часто является одной из самых важных задач с точки зрения технологии при управлении пищевыми объектами.

Многие процессы пищевой технологии (например, разваривание, пастеризация, брожение, солодоращение, дрожжегенерация, ректификация, дистилляция, экстракция) должны идти при строго определенной температуре. Обычно даже небольшие нарушения температурного режима приводят к потерям или браку продукта. Поэтому от систем стабилизации температуры часто требуется высокая точность регулирования.

В то же время температурные каналы обычно весьма инерционны, а иногда к тому же обладают значительным запаздыванием. Это делает разработку указанных систем достаточно сложной.

Системы автоматического регулирования температуры по соотношению τ_0/T_0 можно условно разделить на три группы: 1) $\tau_0/T_0 < 0,1$; 2) $0,1 \leq \tau_0/T_0 \leq 0,7$; 3) $\tau_0/T_0 > 0,7$.

К первой группе относятся системы, предназначенные для регулирования объектов с очень большими постоянными времени (порядка часов). Дополнительную сложность здесь создает относительная массовость таких систем на пищевых предприятиях (например, стабилизация температуры в нескольких зонах агрегата или в 5—10 однотипных агрегатах). Отсюда вытекает необходимость получить возможно более простую (дешевую и надежную) реализацию каждой системы. В частности, широкое распространение получили многоточечные позиционные системы регулирования.

Другая сложность заключается в обеспечении требуемой точности. Здесь решающую роль играет правильный выбор диапазона измерения датчика.

Системы третьей группы распространены несколько меньше. Большое отношение τ_0/T_0 при высоких требованиях к качеству регулирования часто затрудняет реализацию системы. Однако

во многих случаях при T_0 не более 1—2 мин можно получить хороший результат при использовании обычного ПИ-регулятора. При больших T_0 и отношении τ_0/T_0 , приближающемся к 1, требуются специальные решения (использование каскадных систем, различного рода упреждающих устройств, переход к П-регуляторам).

Системы второй группы занимают промежуточное положение. При больших T_0 , если требования к динамической ошибке не очень высоки, можно применять позиционную систему. В большинстве же случаев необходим ПИ- или ПД-регулятор (ПИ-регулятор при T_0 больше 2 мин обычно работает неустойчиво — это дефект большинства типов общепромышленных регуляторов). При малых T_0 ПИ- и ПИД-регуляторы дают хорошие результаты.

В ряде случаев качество работы системы может сильно зависеть от места врезки чувствительного элемента датчика. Поэтому следует обращать внимание на такие моменты.

1. При наличии в агрегате продукта в двух фазах (например, паровой и жидкой) чувствительный элемент должен находиться в жидкой фазе, что обеспечивает лучший теплообмен.

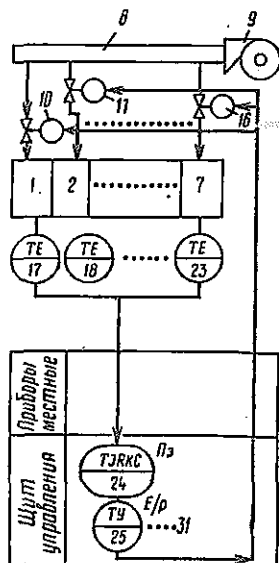
2. При выборе места врезки для чувствительного элемента нужно избегать застойных зон в агрегате. Иногда требуется исследование характера движения продукта в агрегате.

3. В ряде случаев агрегат состоит из многих зон (например, сушилки, ректификационные и дистилляционные колонны). Весьма важен правильный выбор контрольной зоны (где будет установлен чувствительный элемент). С одной стороны, режим контрольной зоны должен быть представительным для процесса в целом, а с другой — контрольную зону следует выбирать, исходя из наилучших динамических показателей по температуре (минимальное запаздывание, высокий коэффициент передачи и т. п.). Часто эти вопросы являются предметом специального исследования статических и динамических параметров процесса.

4. По соображениям ремонтпригод-

Рис. 3.11. Схема автоматизации температурного режима процесса солодоращения:

1—7 — зоны солодоращения; 8 — воздушный канал; 9 — кондиционер; 10...16 — жалюзи с пневмоприводом; 17...23 — термометры сопротивления; 24 — многоточечный мост с релейным регулирующим устройством, регистрацией параметров и задающим устройством; 25...31 — дискретные электропневмопреобразователи



ности датчика чувствительный элемент иногда целесообразно устанавливать в специальной гильзе. В этом случае важно, чтобы гильза (дополнительное тепловое сопротивление) как можно меньше ухудшала динамические параметры. Желательно, чтобы гильза была по возможности тонкостенной, медной или алюминиевой (если это допустимо по соображениям совместимости с материалом корпуса агрегата и свойствами продукта). В процессе эксплуатации необходимо следить за заполнением гильзы маслом.

Рассмотрим систему автоматической стабилизации температурного режима солодорастильного ящика, состоящего из семи зон (по числу суток ращения солода) (рис. 3.11). Ниже приведены постоянные времени и коэффициенты передачи по зонам:

Номер зоны	1	2	3	4	5	6	7
T_0	15 500	7600	5200	11 300	17 500	19 800	42 200
$k_0, ^\circ\text{C}/\%$	0,230	0,120	0,080	0,210	0,30	0,34	0,715
хим.							

Запаздывание мало зависит от номера зоны и составляет около 600 с. Солод в зонах периодически перемешивается с помощью шнекового ворошителя, движущегося по рельсам, проложенным по боковым стенкам ящика. В процессе проращивания солода выделяется тепло, которое отводится слабой струей увлажненного воздуха через слой зерна. Воздух подается снизу ящика из подситового пространства, также разделенного на изолированные зоны. В каждую зону подситового пространства воздух подается от общего кондиционера через индивидуальный дроссель-клапан жалюзийного типа с пневмоприводом.

Особенность данной системы состоит в необходимости установки датчиков температуры — термометров сопротивления типа ТСМ на подвижной конструкции. Чувствительные элементы семи датчиков температуры установлены на указанных конструкциях и входят в середину зоны («вытекают» сверху в слой солода). На подвижной конструкции установки датчика термометра имеется цилиндрический ролик. При прохождении ворошителя специальный бугель, размещенный на нем, взаимодействуя с роликом, отводит датчик термометра вверх и в сторону. После прохождения ворошителя он под действием собственной массы возвращается в слой солода.

Пример. Рассчитаем отклонение температуры. Учитывая большие постоянные времени, инерционностью линий и исполнительных механизмов можно пренебречь. По условиям технологии допустимое отклонение температуры $\pm 1^\circ\text{C}$. Задание по температуре $14-15^\circ\text{C}$. Наихудшее соотношение t_0/T_0 для зоны 3, где $t_0/T_0 = 600/5200 = 0,115$. Согласно принятым методикам при $t_0/T_0 < 0,2$ рекомендуется применять релейный регулятор.

Проверим погрешность регулирования для 3-й зоны и выберем время обегания

$$\Delta\theta_{\max} = k\Delta U_{\max} \left(1 - e^{\frac{-\Delta t + \tau_0}{T_0}}\right), \quad (3.7)$$

где $\Delta U_{\max}$ — максимальный ход исполнительного механизма ($\Delta U_{\max} = 100\%$); Δt — допустимое время между тактами обегания, с.

Из выражения (3.7) получим

$$\Delta t = T_0 \ln \left(1 - \frac{\Delta\theta_{\max}}{k_0 \Delta U_{\max}}\right) - \tau_0 \quad (3.8)$$

или

$$\Delta t = 5200 \ln \left(1 - \frac{1}{0,08 \cdot 100}\right) - 600 \sim 70 \text{ с.}$$

Выбираем двенадцатиточечный мост с временем обегания 36 с (3 с на точку). Задействовано семь точек (пять точек — резерв). По точности регулирования допустимо применение моста с временем обегания 60 с (5 с на точку). Пределы измерения моста 0—25 °С. Тогда зона регулирования ± 1 °С соответствует $(2/25) \cdot 100 = 8\%$. При зоне чувствительности 1% и времени обегания 60 с получим погрешность (приблизленно) $\Delta x = 8(60/70) + 1 = 7,9\%$, т. е. меньше 4%, считая от оси нуля.

Выход моста передается на пневматические приводы через дискретные электропневмопреобразователи. Для дистанционного управления приводами в цепи электропневмопреобразователей можно включить тумблеры (на рис. 3.11 не показаны).

Учитывая увеличение постоянной времени для остальных зон, показатели точности для них будут лучше. Например, для следующей зоны 2 по соотношению τ_0/T_0 можно получить по выражению (3.7)

$$\Delta\theta_{\max} = 0,12 \cdot 100 \left(1 - e^{\frac{-60+600}{7600}}\right) = 0,92 \text{ °С.}$$

Рассмотрим еще один характерный пример: систему автоматической стабилизации температуры охлаждающей воды после трубчатого теплообменника-конденсатора (рис. 3.12).

Продукт в паровой фазе поступает в межтрубное пространство теплообменника-конденсатора. Медные трубки конденсатора охлаждаются водой. Продукт конденсируется и отбирается в жидкой фазе из теплообменника.

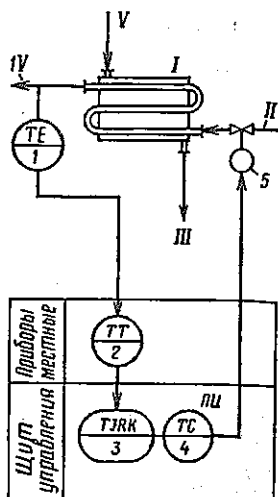


Рис. 3.12. Схема автоматизации трубчатого теплообменника:

I — теплообменник-конденсатор; II — трубопровод охлаждающей воды; III — трубопровод для отвода конденсата; IV — трубопровод горячей воды; V — трубопровод пара из основного процесса; 1, 2 — датчики температуры; 3 — вторичный прибор; 4 — ПИ-регулятор; 5 — регулирующий клапан

Цель управления — обеспечить стабильный паровой поток, отбираемый из основного процесса. Подобного рода задача достаточно распространена в системах управления процессами пищевой технологии (например, тепловые обработки, а также некоторые виды массообменных процессов). Поскольку теплота конденсации продукта обычно постоянна, задача сводится к стабилизации тепловой нагрузки на конденсатор. Одно из возможных (и часто используемых) решений — стабилизация температуры охлаждающей воды после конденсатора воздействием на ее расход.

Пример. Рассмотрим (в упрощенном виде) статику процесса. Пренебрегая теплопотерями, из уравнения теплового баланса имеем

$$Q = cG(\theta_2 - \theta_1), \quad (3.9)$$

где Q — тепловая нагрузка на конденсатор, Вт; G — расход охлаждающей воды, м³/ч; c — теплоемкость воды, Дж/(м³·К); θ_1 , θ_2 — температура воды соответственно на входе и выходе конденсатора, °С.

С другой стороны, из уравнения теплопередачи имеем

$$Q = \alpha F \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} - \theta_n \right), \quad (3.10)$$

где α — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F — площадь поверхности трубок, м²; θ_n — температура конденсации продукта, °С.

Уравнение (3.10) получено при многих упрощениях. Так, например, предполагается, что температура воды в трубках по длине распределена линейно, не учтены различия в разных видах теплового сопротивления и т. п. Но качественную картину уравнение (3.10) отражает правильно.

Из выражений (3.9) и (3.10) имеем

$$\theta_2 = 2\theta_n - \theta_0 - (2\theta/\alpha F); \quad (3.11)$$

$$G = \frac{Q}{2c[\theta_n - \theta_0 - (Q/\alpha F)]}. \quad (3.12)$$

Таким образом, при стабильных θ_n и θ_0 температура отходящей воды линейно зависит от тепловой нагрузки, а расход воды в первом приближении пропорционален тепловой нагрузке [более точно — в выражении (3.12) видна слабая нелинейность из-за θ в знаменателе].

Зависимость θ_2 от Q относительно слабая [см. (3.11)], зависимость G от Q существенно сильнее. Это очень важный момент, который следует учитывать при проектировании системы. Даже из приведенных выше элементарных соображений ясно, что относительно большие отклонения θ_2 повлияют на процесс (через Q) слабее, чем такого же порядка отклонения по G . Следовательно, цель управления в данном случае не в том, чтобы нагревать воду до нужной температуры, а в том, чтобы стабилизировать тепловую нагрузку на процесс, т. е. речь идет о типичной задаче управления по косвенному параметру (температуре θ_2).

Поэтому, учитывая большое запаздывание в канале $G \rightarrow \theta_2$ (см. ниже), высокие требования к точности поддержания θ_2 и t_p (времени регулирования) предъявлять не нужно. Важнее обеспечить плавное изменение расхода воды.

Параметры динамической характеристики канала следующие: $k_0 = 0,33^\circ\text{C}/\%$ хим., $T_0 = 300$ с, $\tau_0 = 125$ с. Диапазон возможных заданий по температуре 60—70°С. Ввиду значительных

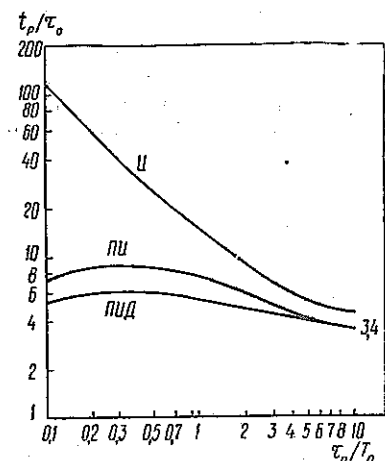


Рис. 3.13. Зависимость $t_p/\tau_0 = \psi(\tau_0/T_0)$ для систем без перерегулирования

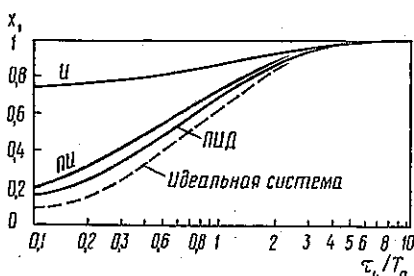


Рис. 3.14. Зависимость $x_1 = \psi(\tau_0/T_0)$ для систем без перерегулирования

величин T_0 и τ_0 инерционностью клапана и линий можно пренебречь.

Известно, что возмущения (главным образом по расходу воды, связанные с пульсацией давления в коллекторе), приведенные к выходу (температуре), составляют $\Delta\Theta_2 = \pm 10^\circ\text{C}$. В пересчете на расход получим

$$\Delta G = \Delta\Theta_2/k_0 = \pm 10/0,33 = \pm 33\% \text{ х.м.} \quad (3.13)$$

С учетом изложенного желательно получить плавную работу контура. Поэтому целесообразно принять апериодический переходный процесс (без перерегулирования).

Известно, что указанные выше возмущения по температуре относительно редки (примерно один раз в 2 ч, что связано с другими технологическими процессами). Таким образом, допустимо иметь время переходного процесса порядка $1/5$ периода возмущений:

$$t_p = \frac{2 \cdot 3600}{5} = 1400 \text{ с.}$$

По графикам из методики ИАТ (рис. 3.13) имеем для отношения $\tau_0/T_0 = 125/300 = 0,42$, значение зависимости времени переходного процесса для ПИ-регулятора $t_p \approx 8,5\tau_0$ или $t_p = 8,5 \cdot 125 = 1070 \text{ с}$, что почти на 40% лучше допустимого.

По графику из методики ИАТ (рис. 3.14) имеем амплитуду первого выброса (максимальное отклонение) $\delta\Theta_2 \approx 0,5\Delta\Theta$ или $\delta\Theta_2 = 0,5 \cdot 10 = 5^\circ\text{C}$. Оценим отклонение тепловой нагрузки Q при таком отклонении температуры. Примем в уравнении (3.9) задание $\Theta_2^{(3)} = 65^\circ\text{C}$, начальную температуру воды $\Theta_1 = 15^\circ\text{C}$,

температуру конденсации продукта $\Theta_n = 90^\circ\text{C}$. Тогда из уравнения (3.10) получим абсолютное отклонение Q

$$\delta Q = \alpha F \delta \Theta_2 / 2 \quad (3.14)$$

и относительное отклонение

$$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{\delta \Theta_2}{2\Theta_n - \Theta_2 - \Theta_1} \cdot 100 = \frac{5 \cdot 100}{2 \cdot 90 - 60 - 15} \approx 5\%. \quad (3.15)$$

Таким образом, максимальное отклонение по тепловой нагрузке составит не более 5%. Реально, учитывая инерционность как самого теплообменника, так и основного агрегата (откуда подается пар), среднее отклонение тепловой нагрузки будет существенно меньше (порядка 1%). Такое качество стабилизации вполне приемлемо.

По графику (из методики ИАТ) рис. 3.15 выражение для уставок ПИ-регулятора (для $\tau_o/T_o = 0,42$) будет следующим: $k_p = 2,2/k_o = 2,2/0,33 = 6,7$; $T_n = 2,2\tau_o = 2,2 \cdot 125 = 280 \text{ с} \approx 5 \text{ мин}$. Диапазон дросселирования $DD = (1/k_p) 100 = 15\%$.

§ 3.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ

Для большинства пищевых процессов, в которых так или иначе осуществляют регулирование уровня, задача точной стабилизации уровня, как правило, неактуальна. Обычно емкость рабочего агрегата или специальная буферная емкость используются для аккумулирования продукта и сглаживания неравномерности режима (по расходу продукта). В такой ситуации уровень используется как косвенный показатель материального баланса и, естественно, желательно изменение уровня в достаточно широких пределах (для более полного использования аккумулирующей способности емкости).

Бывают также случаи, когда особенности технологии требуют относительно точной стабилизации количества продукта в агрегате. Тогда требования к качеству регулирования уровня весьма высоки. Однако разработчики технологического оборудования в таких ситуациях стараются обеспечить стабильный уровень за счет специальной конструкции агрегата, например введением переливной («чересной»)

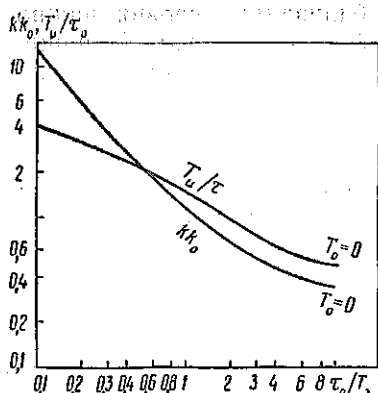


Рис. 3.15. Рекомендуемые настройки в системах с ПИ-регулятором и объектами с самовыравниванием и переходным процессом с минимальной квадратичной оценкой

трубы. Получается примитивный, но обычно точный и весьма надежный стабилизатор уровня прямого действия.

Системы автоматической стабилизации уровня можно классифицировать по нескольким признакам. Одни из признаков (по требованиям к точности) уже были приведены, причем системы первой группы (с невысокими требованиями к точности) можно, в свою очередь, разделить на непрерывные и позиционного регулирования. По виду динамических характеристик различают системы с самовыравниванием (когда расход отходящего продукта зависит от уровня) и без самовыравнивания (астатические).

Последняя группа объектов (астатических) — более многочисленная и имеет ту особенность, что применение для них ПИ-регуляторов приводит к неустойчивости контура из-за сдвига по фазе в 180° в области низких частот (сдвиг 90° дает астатизм объекта и 90° — ПИ-регулятор). Естественно, даже незначительное запаздывание делает такой контур неустойчивым.

Однако во многих случаях, даже если объект с самовыравниванием (статический), нет необходимости применять ПИ-регулятор, так как статическая ошибка регулирования уровня обычно вполне допустима.

Достаточно типичной особенностью является наличие высокочастотных пульсаций уровня. Эти пульсации возникают при измерении уровня в рабочих агрегатах и вызваны они, как правило, свойствами технологического процесса в агрегате (работой мешалок, барботажем пара через слой жидкости и т. п.). При малой чувствительности контура (П-регулятор с небольшим коэффициентом усиления) такие пульсации малосущественны. Если присутствие колебаний нежелательно, применяют фильтры (например, пневматические приборы обратного предварения).

При проектировании контура стабилизации уровня важно правильно выбрать тип (принцип действия) датчика. В пищевой технологии часто приходится иметь дело с веществами вязкими, содержащими взвеси, и т. п.

При выборе буйкового или поплавкового уровнемера надо учитывать возможность налипания продукта на поплавок. Кроме того, используя поплавковые и буйковые плотномеры, часто необходимо предусматривать выносную камеру. Наличие крупных частиц (взвесей) в измеряемом веществе может привести к забиванию камеры и неработоспособности датчика. По аналогичной причине (наличие взвесей) может оказаться невозможным применение уровнемеров на основе дифманометров (из-за забивания отборных устройств). Четкие рекомендации в этом вопросе дать затруднительно. Обычный путь — исполь-

зование прототипов удачных технических решений по измерению уровня таких же или аналогичных веществ.

Рассмотрим пример системы автоматического регулирования уровня в буферной емкости. Два технологических процесса выполняются последовательно, причем расход продукта после первого процесса характеризуется автокорреляционной функцией с параметрами: дисперсия $\sigma_1^2 = 9 \text{ (м}^3/\text{ч)}^2$; время спада $\tau_{\text{сп1}} = 100 \text{ с}$. Среднее значение расхода $20 \text{ м}^3/\text{ч}$. По условиям технологии необходимо обеспечить дисперсию расхода на входе во второй процесс $\sigma_2^2 \leq 0,8 \text{ (м}^3/\text{ч)}^2$. Время спада корреляционной функции не регламентируется.

Пример. Требуется выбрать размеры буферной емкости и обеспечить регулирование уровня в ней на стоке так, чтобы расход на входе во второй процесс имел требуемые статистические характеристики.

Среднеквадратичные отклонения расхода на входе в емкость $\sigma_1 = 3 \text{ м}^3/\text{ч}$, на выходе $\sigma_2 = 0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Примем сигналы на входе и выходе синусоидальными, т. е. расход на входе $Q_1 = A_1 \sin \omega t$; на выходе $Q_2 = A_2 \sin (\omega t + \varphi)$. Дисперсия синусоидального сигнала $\sigma^2 = A^2/2$, а круговая частота ω выражается приближенно через время спада $\tau_{\text{сп}}$ как $\omega = \pi/2\tau_{\text{сп}}$. Таким образом, $A_1 = \sqrt{2}\sigma_1 = 4,2 \text{ м}^3/\text{ч}$; $A_2 = \sqrt{2}\sigma_2 = 1,27 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\omega = 3,14/2 \cdot 100 = 0,0157 \text{ с}^{-1}$.

Задача сводится к проектированию фильтра. Аперiodическое звено первого порядка с единичным коэффициентом передачи обеспечивает следующее соотношение амплитуд входа и выхода:

$$A_1/A_2 = \sqrt{1 + T_1^2 \omega^2},$$

где T_1 — постоянная времени, с.

Таким образом, $T_1 = 1/\omega \sqrt{A_1^2/A_2^2 - 1}$, или в численном виде

$$T_1 = 1/0,0157 \sqrt{(4,2/1,27)^2 - 1} = 225 \text{ с}.$$

Рассмотрим астатическое звено первого порядка с П-регулятором. Передаточная функция объекта $W(s) = 1/Fs$ соответствует дифференциальному уравнению вида

$$F \frac{dH}{dt} = Q_1 - Q_2,$$

где Q_1, Q_2 — расход на входе и выходе, $\text{м}^3/\text{ч}$; F — поперечное сечение бака, м^2 ; H — уровень, м.

Передаточная функция П-регулятора

$$Q_2 = k_y (H - H_{\text{зд}}) + Q_{\text{к.т.}}$$

где $H_{\text{зд}}$ — задание по уровню, м; $Q_{\text{к.т.}}$ — значение расхода, соответствующее контрольной точке регулятора, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Замыкая систему, получим (в изображениях)

$$FsH = Q_1 - k_y H + k_y H_{\text{зд}} + Q_{\text{к.т.}}$$

или

$$H = \frac{Q_1 + Q_{\text{к.т.}} + k_y H_{\text{зд}}}{Fs + k_y}.$$

Полагая $Q_{к.т}=0$ и обозначая $T_1=F/k_y$, получим

$$H = \frac{Q_1/k_y + H_{зд}}{T_1 s + 1}. \quad (3.16)$$

Однако нас интересует Q_2 . Подставляя H в выражение для Q_2 , получим

$$Q_2 = \frac{Q_1}{T_1 s + 1} - \frac{T_1 s H_{зд}}{T_1 s + 1}.$$

Первый член этого соотношения как раз характеризует фильтрацию сигнала расхода Q_1 . Наличие T_1 в числителе второго члена означает независимость в статике расхода Q_2 от задания по уровню. Таким образом, простейший контур обеспечивает требуемые свойства системы. Значение T_1 определено выше.

Из выражения (3.16) в статике имеем

$$H = Q_1/k_y + H_{зд}.$$

Считая максимальное отклонение $\Delta Q_1 = \pm 3\sigma_1$, получим рабочую высоту емкости (считая $H_{зд}$ равным среднему уровню)

$$H_p = 6\sigma_1/k_y.$$

Исходя из этого, объем буферной емкости

$$V = H_p F = (6\sigma_1 F)/k_y,$$

или, учитывая, что $T_1 = F/k_y$, и переходя к размерности σ_1 [в м³/с],

$$V = \frac{6\sigma_1 T_1}{3600} = \frac{6 \cdot 3 \cdot 225}{3600} = 1,12 \text{ м}^3.$$

Примем диаметр емкости d_e равным 1 м. Соответственно высота емкости $H_p = 4V/\pi d_e^2 = 4 \cdot 1,12/3,14 \cdot 1^2 = 1,43$, или округленно 1,5 м. Площадь сечения емкости $F = (\pi/4)d_e^2 = 0,785 \text{ м}^2$.

Коэффициент усиления регулятора

$$k_y = F/T_1 = 0,785/225 = 1/287.$$

Пересчитаем k_y для размерности [% хим./м], учитывая, что 20 м³/ч (средний расход) соответствуют 50% хим.:

$$k_y = \frac{1}{287} \cdot \frac{3600 \cdot 50}{20} = 31\% \text{ хим./м}.$$

При выборе датчика со шкалой 0—1,6 м получим

$$k_y = \frac{31}{100} \cdot 1,6 = 0,5\% \text{ хим./\%}$$

или диапазон дросселирования регулятора

$$ДД = \frac{1}{0,5} \cdot 100 = 200\%.$$

Схема автоматизации процесса регулирования уровня в буферной емкости приведена на рис. 3.16.

Рассмотрим систему автоматической стабилизации уровня раздела фаз (масло—мыльно-щелочной раствор) в нейтралли-

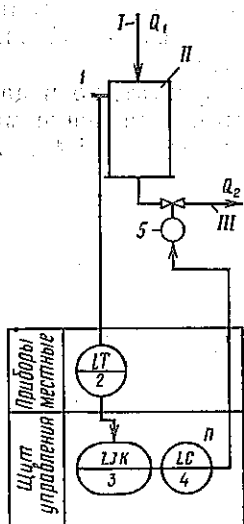


Рис. 3.16. Схема автоматизации процесса регулирования уровня в буферной емкости:

I, III — трубопроводы входного и выходного продукта; II — емкость; 1, 2 — датчики уровня-дифманометры; 3 — вторичный прибор; 4 — П-регулятор; 5 — регулирующий клапан

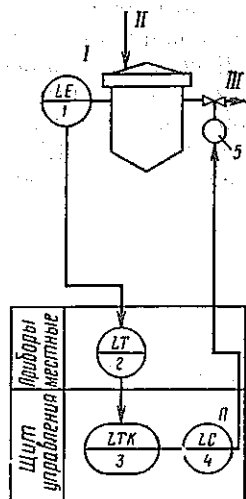


Рис. 3.17. Схема автоматизации процесса регулирования уровня в нейтрализаторе:

I — нейтрализатор; II — трубопровод щелочного раствора; III — трубопровод мыльно-щелочного раствора; 1, 2 — датчики уровня; 3 — вторичный прибор; 4 — П-регулятор; 5 — регулирующий клапан

затворе. Схема автоматизации системы приведена на рис. 3.17.

Данный контур является примером, когда по технологии требуется относительно точное регулирование уровня. Динамические характеристики канала «расход мыльно-щелочного раствора (на сливе) — уровень раздела фаз масло — мыльно-щелочной раствор в нейтрализаторе» следующие:

передаточная функция

$$W(s) = \frac{1}{T_s} e^{-\tau s}; T = 1,21 \cdot 10^2; \tau = 8 \text{ с};$$

коэффициент передачи исполнительного механизма (линеаризация в зоне регулирования) $k_m = 0,0025$;

требуемая точность регулирования — порядка 1 см.

В системе использован буйковый межфазовый уровнемер с пневмовыходом с диапазоном 0—0,2 м. Величина возмущения, рассчитанная по выходному расходу (управляющему воздействию), составляет 30% хим. Время переходного процесса не регламентируется.

По табл. 3.4, взятой из методики ИАТ, для объектов без самовыравнивания выбираем процесс с 20%-ным перерегулированием и П-регулятором, так как из двух видов процесса

(с 20%-ным перерегулированием и без перерегулирования) этот вариант наилучший с точки зрения максимальной ошибки x_1 (если сравнивать с П- и ПИ-регулятором).

ПИД-регулятор может дать лучший результат, но в данном случае нет необходимости усложнять систему. Значение максимальной относительной динамической ошибки $x_1=1,43$; время регулирования $t^*=1,5\tau$.

Абсолютная динамическая ошибка определится как

$$\Delta H = x_1 \Delta Q(\tau/T) k_n,$$

или $\Delta H = 1,43 \cdot 30(8/1,21 \cdot 10^2) 0,0025 = 0,007 \text{ м} = 0,7 \text{ см}$, что лучше требуемого. Время регулирования (первой полуволны) $t^* = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ с}$.

Уставка регулятора определяется из табл. 3.5. Тогда

$$k_y = 0,7 \frac{T}{\tau k_M} = 0,7 \frac{1,21 \cdot 10^2}{8 \cdot 0,0025} = 4250\% \text{ хим./м.}$$

С учетом шкалы датчика $k_y = 4250(0,2/100) = 8,5\% \text{ хим./\%}$. Диапазон дросселирования $ДД = 100/8,5 \approx 12\%$.

3.4. Значения показателей качества для выбора переходного процесса регулирования и типа регулятора

Тип переходного процесса	Показатель качества	Значение показателя качества	Тип регулятора
20%-ное перерегулирование	x_1	1,43	П
		1,52	ПИ
		1,12	ПИД
	t^*/τ	1,5	П
		1,52	ПИ
Без перерегулирования		1,4	ПИД
	x_1	2,7	П
		1,9	ПИ
		1,38	ПИД
	t_p/τ	—	П
С минимальным временем регулирования		13,2	ПИ
		9,8	ПИД
	x_1	1,68	ПИ
		1,12	ПИД
	t_p/τ	6,4	ПИ
С минимальной интегральной квадратичной оценкой		3,8	ПИД
	x_1	1,44	ПИ
		1,03	ПИД
	F/τ	15,9	ПИ
		5,1	ПИД

3.5. Значения параметров настройки регуляторов

Тип переходного процесса	Параметр настройки	Значение параметра настройки	Тип регулятора
20%-ное перерегулирование	$k\tau/T_0$	0,7	П
		0,7	ПИ
		1,1	ПИД
	T_n/τ	3	ПИ
		2	ПИД
Без перерегулирования	T_d/τ	0,37	ПИД
	$k\tau/T_0$	0,37	П
		0,46	ПИ
		0,65	ПИД
	T_n/τ	5,75	ПИ
С минимальным временем регулирования	T_d/τ	5	ПИД
	$k\tau/T_0$	0,23	ПИД
		—	П
		0,65	ПИ
	T_n/τ	1,1	ПИД
С минимальной интегральной квадратичной оценкой	T_d/τ	4	ПИ
		2,5	ПИД
		0,37	ПИД
	$k\tau/T_0$	1,045	ПИ
		1,365	ПИД
	T_n/τ	1,3	ПИ
	T_d/τ	1,6	ПИД
		0,51	ПИД

§ 3.6. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СОСТАВА [КОНЦЕНТРАЦИИ] ПРОДУКТОВ

При автоматизации пищевых производств системы регулирования качественных показателей до сих пор используются не часто, но там, где применяются, они обычно являются центральным узлом системы, поскольку обеспечивают стабилизацию качества продукта на входе или выходе процесса (см. § 15.1). В то же время системы автоматического регулирования качественных показателей чаще всего являются самым сложным (как с точки зрения разработки, так и реализации) узлом системы автоматизации.

В отличие от других видов контуров автоматического регулирования для контуров рассматриваемого вида большую сложность представляет выбор датчика. Далеко не всегда можно подобрать прибор общепромышленного изготовления, пригодный для измерения концентрации конкретного продукта (с учетом физических свойств продукта, его консистенции, возможности загрязнения чувствительного элемента и т. п.). В ряде случаев необходима разработка специального прибора. Часто та-

кая разработка существенно превосходит по сложности и трудоемкости разработку собственно системы автоматического регулирования.

Учитывая сложность выбора (а тем более разработки) датчика, дать конкретные рекомендации в данном вопросе затруднительно. Ограничимся лишь следующими замечаниями.

1. Измерение концентрации непосредственным методом, как известно, практически не применяется. Реальное измерение выполняется для какого-либо косвенного параметра, функционально связанного с концентрацией. Примером таких параметров могут служить плотность, вязкость, различные электрические (электропроводность, диэлектрическая проницаемость) или оптические (коэффициент преломления) показатели.

Успех разработки в целом (независимо от того, предполагается использовать общепромышленный датчик или разработать специальный) в значительной мере определяется правильным выбором принципа работы датчика (т. е. косвенного параметра для измерения) и методом измерения. Необходимо учитывать, насколько косвенный параметр отражает концентрацию (линейность этой связи, влияние других параметров, в частности примесей). В большинстве случаев это предмет специального исследования. Важно также учитывать метод измерения косвенного параметра и особенности взаимодействия чувствительного элемента с измеряемой средой (например, налипание частиц продукта, влияние взвесей и т. п.).

2. При определении требований к выбираемому датчику следует обратить особое внимание на вопросы метрологии и динамические характеристики самого датчика. Вопросы метрологии особенно важны (по сравнению с системами других видов), так как на погрешность рассматриваемых видов измерения косвенных параметров существенно влияют дополнительные погрешности (например, воздушные полости, наличие пузырей и взвесей при измерении плотности, загрязнения линз при оптических измерениях, влияние температуры среды и т. п.).

Принцип действия многих датчиков качества часто определяет наличие дополнительного запаздывания (или большой постоянной времени) самого прибора. Наиболее характерный пример — автоматические хроматографы. В них анализ длится несколько минут (до 30), и в течение этого времени выходной сигнал остается постоянным (по результатам предыдущего анализа). Другой пример — некоторые типы плотномеров. Наличие относительно большой полости для измеряемой среды и небольшой расход продукта через прибор приводят к тому, что постоянная времени достигает 100—200 с.

Помимо изложенного, при разработке контуров стабилизации качественных показателей имеют место и «обычные» труд-

ности — неблагоприятные динамические характеристики объекта, высокие требования к качеству регулирования и т. п. Все это делает такие системы весьма сложными в разработке и эксплуатации. По-видимому, это и является причиной их относительно малого применения при автоматизации предприятий.

Рассмотрим систему автоматического регулирования концентрации (плотности) рассиропки мелассы (рис. 3.18).

При управлении процессом брожения при переработке мелассы возникает необходимость в стабилизации трех показателей: температуры, концентрации и расхода рассиропки. Эти параметры в основном определяют качество процесса.

Рассиропник I представляет собой смеситель небольшой вместимости и может рассматриваться как чисто усилительное звено с коэффициентом передачи $k_0 = 0,2\%$ сахара/% хим. воды. Частота возникающих возмущений, действующих на рассиропник, порядка $\omega_1 = 0,001 \text{ с}^{-1}$.

В целях упрощения на схеме рис. 3.18 не показан контур стабилизации температуры рассиропки, что для контура стабилизации концентрации рассиропки несущественно. Будем считать заданными структуру и уставки контуров регулирования расхода воды и мелассы. Расход мелассы стабилизируется, а

подача воды регулируется по соотношению с расходом мелассы. Величина этого соотношения корректируется по концентрации рассиропки.

Раствор сахара в воде теоретически имеет плотность, однозначно определяемую концентрацией. Однако реально меласса содержит и другие вещества. К тому же

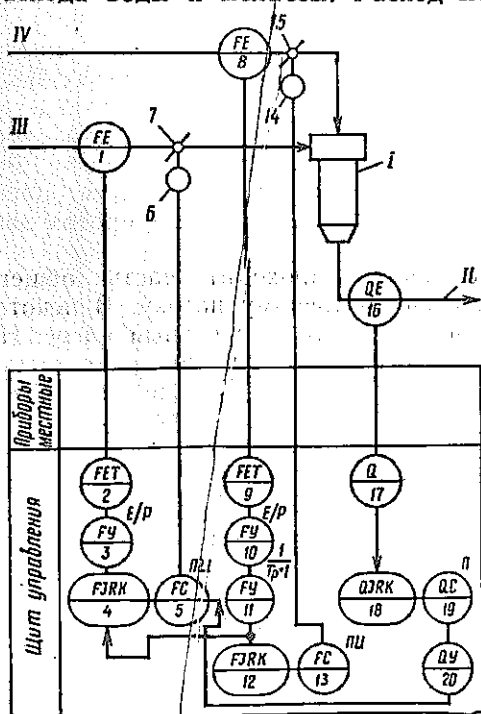
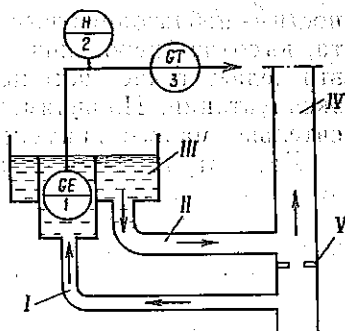


Рис. 3.18. Схема автоматизации регулирования концентрации рассиропки мелассы:

I — рассиропник; II — трубопровод рассиропки; III — трубопровод воды; IV — трубопровод мелассы; 1, 2, 8, 9 — комплексы индукционных расходомеров; 3, 10 — электропневмопреобразователи; 11 — фильтр; 4, 12, 18 — вторичные приборы; 5 — ПИ-регулятор; 6, 14 — мембранные пневмоприводы; 7, 15 — заслонки; 13 — ПИ-регулятор соотношения с коррекцией; 16 — датчик плотности; 17 — тягонапоромер; 19 — ПИ-регулятор; 20 — фиксатор нулевого порядка

Рис. 3.19. Принципиальная схема датчика концентрации рассиропки мелассы:

I — трубопровод поступления рассиропки в пробоотборное устройство; II — трубопровод вывода рассиропки; III — пробоотборное устройство; IV — основной технологический трубопровод рассиропки; V — сужающее устройство для создания перепада давления; 1 — чувствительный элемент; 2 — редуктор воздуха; 3 — тягонапоромер



плотность ее существенно зависит от температуры. Специальными исследованиями установлено относительно слабое влияние примесей мелассы на плотность.

Что касается температуры рассиропки, то она должна стабилизироваться по соображениям технологии. Как уже отмечалось, в системе для этого предусмотрен отдельный контур (на рис. 3.18 не показан). Здесь весьма важны точность работы контура температуры и его влияние на метрологию датчика.

Для измерения плотности применен специально разработанный пьезометрический датчик (рис. 3.19). Собственно плотность измеряется чувствительным элементом (поплавком), изготовленным из пластмассы во избежание налипания. Глубина погружения поплавка зависит от плотности.

Через отверстие по центру поплавка продувается сжатый воздух от специального редуктора с небольшим постоянным расходом. Давление в трубке и полости поплавка определяется глубиной его погружения, т. е. высотой столба жидкости (рассиропки), и, следовательно, пропорционально плотности. Это давление измеряется узкопределным тягонапоромером. Засорению канала в поплавке препятствует постоянный проток воздуха.

Через пробоотборное устройство проходит часть общего расхода рассиропки параллельно основному потоку. В некоторых вариантах для отбора использовался отдельный насос. На метрологические характеристики датчика сильно влияет скорость потока в пробоотборном устройстве. Она должна быть небольшой во избежание турбулентностей. Небольшая скорость потока приводит к существенному запаздыванию по плотности в пробоотборном устройстве.

Пример. Экспериментально установлено $\tau_d = 200$ с, $T_d = 20$ с. Поскольку на фоне этих динамических характеристик рассиропки можно считать безынерционным, получается $\tau/T = 10$ для контура в целом. Исходя из этого, выбрана импульсная система регулирования с фиксатором нулевого порядка.

Время импульса по соображениям устойчивости выбирают из соотношения

$$e^{T_{им}/T} > 2e^{\tau/T - 2}, \quad (3.17)$$

где $T_{им}$ — время импульса управления.

Поскольку $\tau/T=10$ и $T_{им}/T>10$, $e^{T_{им}/T}>10^3$ и $e^{\tau/T}>10^3$. Из выражения (3.17) приближенно получим $T_{им}>\tau+T\ln 2$, или в численном виде $T_{им}>200+20\cdot 0,69\approx 215$, $T_{им}>215$ с.

На основании теоремы Котельникова потери информации не будет, если круговая частота импульсов по крайней мере вдвое больше частоты возмущений, т. е.

$$\omega_{им} = 2\pi/T_{им} \geq 2\omega_f,$$

где $\omega_{им}$ — круговая частота импульсов; ω_f — круговая частота возмущений.

Таким образом, $2\pi/T_{им} \geq 2\cdot 0,001$,

$$\text{откуда } T_{им} < \frac{2\cdot 3,14}{2\cdot 0,001} = 3140 \text{ с.}$$

Выбираем время импульса $T_{им}=300$ с, что обеспечит хорошее воспроизведение сигнала при достаточном запасе устойчивости.

Передаточная функция фиксатора нулевого порядка

$$W_{фс}(s) = \frac{1 - e^{-sT_{им}}}{T_{им}s}. \quad (3.18)$$

Разложим $e^{-sT_{им}}$ выражения (3.18) в ряд Паде (ограничиваясь первым порядком). Тогда

$$e^{-sT_{им}} = \frac{2 - sT_{им}}{2 + sT_{им}}.$$

Подставив в выражение (3.18) значение e , получим

$$W_{фс}(s) = 1 / \left(\frac{T_{им}}{2} s + 1 \right). \quad (3.19)$$

Передаточная функция датчика

$$W_d(s) = 1 / (T_d s + 1).$$

Поскольку объект (расширитель) принят безынерционным, передаточную функцию разомкнутой системы без регулятора можно представить в виде

$$W_1(s) = W_d W_{фс} k_0 = \frac{k_0 e^{-\tau_d s}}{\left(\frac{T_{им}}{2} s + 1 \right) (T_d s + 1)}. \quad (3.20)$$

Величиной $T_d=20$ с по сравнению с $T_{им}/2=150$ можно пренебречь. Тогда $W_1(s)$ в численном виде примет вид

$$W_1(s) = \frac{0,2e^{-200s}}{150s + 1}. \quad (3.21)$$

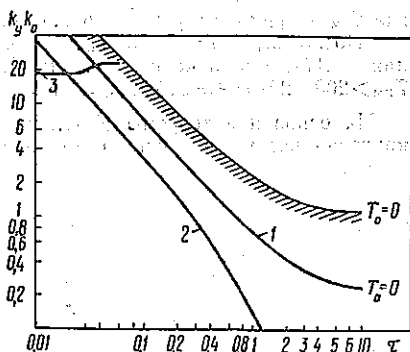
Приведенное отклонение $\tau/T=200/150=1,33$.

Из рис. 3.2 и 3.3 видно, что при 20%-ном перерегулировании и отношении $\tau/T>1$ П-регулятор обеспечивает наилучшее качество регулирования (время регулирования $t_p \approx \tau$, относительная статическая ошибка $x_{ст} \approx 0,65$). Реально можно ожидать компенсации отклонения за один-два импульса, т. е. за 300—600 с.

Уставка регулятора (рис. 3.20) определяется соотношением $k_y k_0 = 0,4$. Величина k_0 определена по каналу «концентрация

Рис. 3.20. Рекомендуемые настройки в САР с П-регуляторами и объектами с самовывравниванием:

1 — процесс с 20%-ным перерегулированием; 2 — процесс без перерегулирования; 3 — процесс с минимальным временем регулирования



сахара (в %) — % хода исполнительного механизма на входе». На рис. 3.18 П-регулятор воздействует на величину соотношения расходов мелассы и воды, т. е.

$$Q_m = k_c Q_b,$$

где Q_b , Q_m — расходы соответственно воды и мелассы, % шкалы расходомера; k_c — коэффициент соотношения.

$$k_c = k_{c0} + \alpha y, \quad (3.22)$$

где k_{c0} — минимальное соотношение (ориентировочно $k_{c0}=0,05$); α — коэффициент пропорциональности (для регулятора $\alpha=0,009$); y — выход П-регулятора, %.

Для дальнейших расчетов необходимы численные значения расходов. Можно принять номинальный расход воды $Q_b = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$, номинальный расход мелассы $Q_m = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$. Шкалы расходомеров соответственно 0—50 и 0—25 $\text{м}^3/\text{ч}$. Тогда $Q_b = (24/50) 100 = 48\%$ и $Q_m = (8/25) 100 = 32\%$. С учетом этого номинальное значение $k_c = Q_m/Q_b = 32/48 = 0,67$.

Датчик обычно градуируется в процентах концентрации сиропки, например, на шкалу 5—30% сахара (диапазон 25% концентрации соответствует 100% шкалы). Полученная выше уставка регулятора $k_y k_0 = 0,4$ дает $k_y = 0,4/k_0 = 0,4/0,2 = 2$. С учетом шкалы датчика $k_y = 2(25/100) = 0,5$.

Тогда зависимость расхода воды от рассогласования определяется как

$$Q_b = 48 + k_y (x_{зд} - x), \quad (3.23)$$

где x и $x_{зд}$ — показания датчика и задание, % шкалы; 48 — номинальный расход воды, %.

С учетом наличия в контуре регулятора соотношения

$$Q_b = \frac{Q_m}{k_{oc} + \alpha \left[\frac{100}{D.D} (x - x_{зд}) + y_{к.т} \right]} \quad (3.24)$$

или, учитывая приближенный характер выражения (3.22),

$$Q_b = Q_m \left\{ k_{1c} - \beta \left[\frac{100}{D.D} (x - x_{зд}) + y_{к.т} \right] \right\}, \quad (3.25)$$

где $ДД$ — диапазон дросселирования П-регулятора; $y_{к.т}$ — показание в контрольной точке; $k_{1с}$ и β — коэффициенты, причем

$$k_{1с} = \frac{1}{k_{ос} + \alpha y_{к.т}}; \beta = \frac{\alpha}{(k_{ос} + \alpha y_{к.т})^2}. \quad (3.26)$$

Приравнявая выражения (3.23) и (3.25) и учитывая уравнения (3.26), получим

$$48 + 0,5(x_{зд} - x) = Q_m \left\{ \frac{1}{k_{ос} + \alpha y_{к.т}} - \frac{\alpha}{(k_{ос} + \alpha y_{к.т})^2} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{100}{ДД} (x - x_{зд}) + y_{к.т} \right] \right\}.$$

Подставляя численные значения и обозначая $\Delta x = x_{зд} - x$, получим

$$48 + 0,5\Delta x = \frac{32}{(0,05 + 0,009y_{к.т})^2} (0,05 - 0,009y_{к.т} + \\ + 0,009y_{к.т} + \frac{0,9}{ДД} \Delta x)$$

или

$$96 + \Delta x = \frac{1280}{(1 + 0,18y_{к.т})^2} \left(1 + \frac{18}{ДД} \Delta x \right).$$

Приравнявая отдельно коэффициенты при Δx и свободные члены, получим

$$\frac{1280}{(1 + 0,18y_{к.т})^2} = 96 \text{ и } \frac{1280 \cdot 18}{(1 + 0,18y_{к.т})^2} = 1,$$

откуда $y_{к.т} \approx 15\%$, $ДД \approx 1800\%$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях схемы автоматической стабилизации параметров процессов строятся на средствах вычислительной и микропроцессорной техники?
2. Какие законы регулирования в большинстве случаев применяются в системах автоматической стабилизации параметров?
3. На основании каких критериев выбираются конкретные законы регулирования технологических параметров?
4. Какие методы используются для выбора регуляторов и параметров их настроек в системах автоматической стабилизации параметров процессов?
5. Охарактеризуйте объект и перечислите особенности контуров стабилизации расхода, нарисуйте схему автоматизации.
6. Какие требования предъявляются к системам автоматического регулирования давления? Нарисуйте схему автоматизации.
7. На какие группы по соотношению τ/T разделяются системы автоматического регулирования температуры?
8. Какие применяются способы установки чувствительного элемента датчика температуры для улучшения качества работы системы регулирования?
9. По каким признакам классифицируются системы автоматической стабилизации уровня?

10. Как осуществляются расчет размеров буферной емкости и регулирование уровня в ней так, чтобы расход на стоке имел требуемые статистические характеристики?
11. Какие требования предъявляются к выбору датчика концентрации (состава) продуктов? Приведите примеры косвенного регулирования показателей качества.

Глава 4

АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

§ 4.1. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Проблемы, обычно возникающие при синтезе системы управления, можно разделить на две группы. Первая группа — это проблемы технологического характера, т. е. цель регулирования; вторая группа — проблемы технических свойств системы регулирования, т. е. область действия теории автоматического регулирования и практических аспектов ее применения.

Второй группе проблем посвящена обширная литература. Что касается проблем первой группы, то здесь положение сложнее. Обычно особенности конкретных процессов пищевых производств предъявляют довольно специфические требования к автоматическим системам. Небольшая часть таких особенностей описана в литературе по технологии. В большинстве же случаев требования технологии к автоматической системе остаются в документах типа технических заданий, пояснительных записках к проектам и т. п.

В данной главе рассмотрены некоторые из проблем первой группы — общие для большинства процессов пищевой промышленности, в частности вопросы, связанные с автоматическим управлением (в масштабах, например, АСУ ТП) объектами — отдельными агрегатами или группой простых агрегатов, автоматизация которых сводится к образованию двух—пяти несвязанных контуров или одной-двух каскадных систем. Такие задачи наиболее часто встречаются при автоматизации пищевых производств.

Можно выделить три типичные ситуации:

- 1) разрабатывается одна из подсистем АСУ ТП или часть системы комплексной автоматизации предприятия;
- 2) автоматизируется по заданию технологов вновь разработанный агрегат (комплекс агрегатов, технологический процесс);
- 3) разрабатывается система локальной автоматизации участка или агрегата на действующем предприятии.

Рассмотрим порядок формирования целей управления в каждом из этих случаев.

Подсистема АСУ ТП. Обычно при разработке АСУ ТП формулируется общий для системы критерий управления. Чаще всего это некоторый функционал вида

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n P_i (\bar{X}_i, \bar{U}_i, \bar{F}_i, t) \right] dt, \quad (4.1)$$

где i — номер подсистемы АСУ ТП; P_i — некоторая функция, обычно экономического характера (например, вклад в прибыль), для i -го участка (агрегата, отделения) производства; $\bar{X}_i, \bar{U}_i, \bar{F}_i$ — векторы регулируемых параметров, управляющих и возмущающих воздействий соответственно. Обычная ситуация, когда $\bar{F}_i$ — это отдельные компоненты $\bar{X}_{i-1}$ и $\bar{U}_{i-1}$.

Указанный критерий к тому же дополняется разного рода ограничениями. Декомпозиция критерия, т. е. выделение параметров, зависящих только от данной подсистемы, позволяет сформулировать самые важные требования к качеству управления. В приведенной выше форме записи E (4.1) все выглядит относительно просто. Но так бывает далеко не всегда. Необходимо рассмотреть отдельное i -е слагаемое под интегралом. Отдельные подсистемы влияют одна на другую и оптимальное управление производством в целом, а это достаточно сложная задача, не сводящаяся к оптимальному управлению отдельными участками. Тем не менее существуют методики, позволяющие решать подобные задачи и получать формализованные требования к целям управления на отдельных участках. Типичные требования такого рода сводятся к следующему:

а) согласование работы i -й подсистемы с соседними по технологическому процессу ($i-1$ -й и $i+1$ -й) подсистемами. Часто это сводится к поддержанию заданной производительности (или к слежению за переменной производительностью) и уменьшению уровня возмущений, передаваемых вперед по технологическому процессу;

б) обеспечение качества выходного полупродукта в пределах технологического регламента или (если это возможно) оптимального с точки зрения производства в целом. Особенно жестко это требование должно выполняться для последнего участка, выдающего готовый продукт;

в) обеспечение оптимизации E при выполнении требований а) и б). Диапазон конкретных требований здесь довольно широк. Иногда достаточно просто минимизировать какой-либо ресурс (потери сырья, расход пара или электроэнергии). Возможны еще более простые решения (например, изменение задания на температуру от производительности и т. п.). В сложных случаях управление формирует ЭВМ и роль локальной подсистемы сводится к передаче управляющего сигнала.

Автоматизация вновь разработанной технологии. Такие рабо-

ты, как правило, ведутся совместно с технологическими институтами, часто по их техническим заданиям.

Формальные требования технологов достаточно просты — обеспечить стабилизацию одного или нескольких технологических параметров. Требования к точности разработчик обычно формирует сам. В такой разработке важно совместно с технологами сформулировать требования к системе с точки зрения возможности управления процессом оператором (например, стабилизировать автоматически такие быстропеременные параметры, как давление, контролировать которые вручную тяжело). Иногда это требуется также, исходя из техники безопасности. Из подобных соображений необходим и ряд блокировок (например, отключение насоса по верхнему уровню и т. п.).

По сравнению с предыдущим случаем (подсистема АСУ ТП) возможности для выбора каналов регулирования у разработчика шире, так как можно использовать в качестве управления производительность агрегата (участка). Следует, однако, помнить, что новый агрегат реально будет работать в технологической цепи предприятия. Обычно синтезируют систему так, чтобы она могла в дальнейшем вписаться в АСУ ТП.

Локальная система на действующем предприятии. Спектр такого рода работ достаточно широк. Часто это результат поэтапного внедрения АСУ ТП или обновления технологического оборудования. Этот случай сводится (в плане требований) к описанному выше.

Необходимость новой разработки иногда возникает при тиражировании более или менее отработанных типовых решений на предприятиях с нестандартной технологической схемой. Здесь важно тщательно изучить фактическое состояние технологии на предприятии, так как технологическая документация зачастую отсутствует или не соответствует действительности. Дальнейший ход работы, в принципе, мало отличается от описанного выше.

Крайний вариант подобной разработки, когда заказчик предлагает для автоматизации «узкое место» предприятия. Обычно речь идет о старых предприятиях с разлаженной технологией и низкой культурой производства. Достаточно типичное требование — организовать параллельную работу агрегатов (часто разнотипных), которые нормально параллельно эксплуатировать ранее не предусматривалось. В данном случае разработчик системы должен направить свои усилия на упорядочение технологии. Хороший результат иногда дает установка буферных емкостей для полупродукта. Организация управления уровнем в зависимости от технологической ситуации может решить проблему «узкого места».

Часто разработчику приходится поступать вопреки требова-

ниям, описанным выше, т. е. управлять «узким местом», заведомо ухудшая работу соседних участков (например, используя их как своеобразные промежуточные емкости), идти в определенных ситуациях на ухудшение экономических показателей и т. п. Выбранные, как изложено выше, цели управления в значительной мере определяют как структуру системы (в смысле состава контуров регулирования), так и требования к моделям процессов, используемым при их синтезе. Рассмотрим последний вопрос более подробно.

Задача синтеза структуры системы обычно ставится в следующем виде. Пусть дана математическая модель объекта в виде (2.24) или (2.25). Требуется найти такую матрицу передаточных функций регуляторов R (размера $m \times n$) для модели (2.24) либо $\bar{U}(t)$, матрицу коэффициентов регуляторов F (размера $m+n$) для модели (2.25), чтобы удовлетворялся ряд условий по характеру конечного состояния системы, виду и характеру переходного процесса, а также ряд разнообразных ограничений.

Для пищевых производств многообразие технологических, технических и экономических требований предопределяет разнообразие указанных условий и ограничений, а они, в свою очередь, сильно влияют на выбор метода синтеза. В настоящее время существует ряд методов синтеза, изложенных в теории автоматического управления. Все эти методы можно по степени формализации разделить на две группы: методы синтеза рациональной с инженерной точки зрения структуры системы; методы синтеза оптимальных систем.

Хронологически первая группа методов более старая и имеет более «инженерный» характер. Методы второй группы появились позднее (в 50-е и начале 60-х годов), и их разработка продолжается в настоящее время. Реально трудности математического характера позволяют получить строгое решение оптимальной задачи лишь для достаточно идеализированного объекта. Поэтому вторая группа методов обычно дает только «скелет» структуры системы и алгоритмы управления (см. подробно о методах синтеза оптимальных систем во втором разделе). Для конкретизации и детальной проработки системы (в том числе и ее структуры) в большинстве случаев применяют один из методов первой группы.

Ввиду многообразия методов первой группы кратко охарактеризуем только те из них, которые получили наибольшее практическое применение. Большую группу составляют частотные методы синтеза. В принципе эти методы позволяют решить достаточно широкий класс задач синтеза (определение устойчивости, выбор уставок, определение характера переходного процесса и т. п.). Однако в основном анализ получается «обозри-

мым» для отдельных (возможно, достаточно сложных) контуров. Что касается анализа матрицы W_u в выражении (2.24) (а именно это необходимо для синтеза структуры системы автоматизации многомерного объекта), то здесь возникают значительные трудности математического характера. В общем виде такого рода задачи пока не решены. Однако если ввести некоторые дополнительные требования, можно получить относительно простое решение. Например, можно потребовать инвариантности (т. е. нечувствительности) системы к контролируемым возмущающим воздействиям. Тогда на основе относительно простых операций над передаточными функциями можно получить систему управления по возмущениям (т. е. разомкнутую инвариантную систему).

Другой (близкий по идее) путь — потребовать автономности отдельных контуров, т. е. в систему вводятся корректирующие связи так, чтобы каждый контур работал независимо от других. Методически это реализуется путем формальных операций над матрицей W_u . Изложенный подход, однако, приводит к заметному усложнению системы (помимо регуляторов, добавляются корректирующие блоки, сумматоры и т. п.).

Известны более простые методы выбора структуры системы так, чтобы обеспечить минимальное (по возможности) взаимное влияние контуров. Рассмотрим в качестве примера метод анализа матрицы Бристоля. Суть метода в какой-то мере воспроизводит алгоритм наладки системы, когда в случае объекта с $n=2$ и $m=2$ один из контуров размыкается и ведется наладка второго, а затем этот (второй) контур размыкают и налаживают первый. Тогда, если перекрестные связи в объекте слабые, можно ожидать, что система в целом (после замыкания обоих контуров) будет функционировать удовлетворительно.

Мерой связности системы в статике и является матрица Бристоля:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{n1} & \dots & \lambda_{nn} \end{bmatrix}, \quad \lambda_{ij} \equiv \frac{(\partial y_i / \partial u_j)_z}{(\partial y_i / \partial u_j)_{p1}}, \quad (4.2)$$

где

здесь $(\partial y_i / \partial u_j)_z$ — влияние в статике j -го управления на i -й выход, когда все контуры разомкнуты; $(\partial y_i / \partial u_j)_{p1}$ — то же, но при условии, что замкнуты все контуры, кроме i -го; z и p — индексы замкнутой системы и системы с одним разомкнутым контуром.

Можно сказать, что

$$\lambda_{ij} \equiv |W|_{ij} |(W^T)^{-1}|_{ij} \quad (4.3)$$

при $s \rightarrow 0$,

где $|\cdot|_{ij}$ — символ (i, j) элемента матрицы; ^{T} — символ транспонирования; $^{-1}$ — символ обратной матрицы.

Каналы выбирают так, чтобы соответствующие им λ приближались по модулю к единице. Существенным недостатком ме-

тогда является игнорирование динамических свойств объекта. Далеко не всегда можно решить вопрос о структуре только исходя из статических свойств. К сожалению, в настоящее время теория не дает строго формализованных инженерных методов (подобных описанному) для учета динамических свойств.

Рассмотрим ряд неформальных рекомендаций, позволяющих выбрать рациональную структуру системы управления. Обычно при выборе руководствуются следующим.

1. По условиям статики (если не применять матрицу Брисотля) желательно выбирать каналы с наибольшим коэффициентом передачи k_0 . При этом, однако, надо учитывать величины возмущений, ограничения на ход исполнительных органов, так как часто по условиям технологии нельзя использовать все 100% хода исполнительного механизма, влияние на другие параметры («перекрестные» каналы). Следует проверить условие реализуемости системы, составляя уравнения статики относительно возмущений, приведенных к управляемым параметрам. Решение такой алгебраической системы уравнений даст величины управляющих воздействий, необходимых для компенсации возмущений.

Если одно или несколько управляющих воздействий получаются существенно больше 100% хим., очевидно, никакая система не справится с возмущениями. Тогда следует принять меры за пределами данного агрегата (упорядочение технологии, автоматизация предыдущих участков и т. п.).

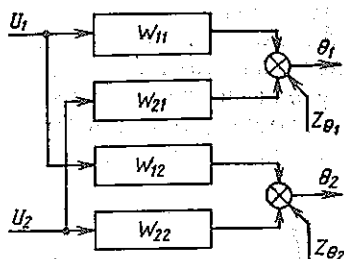
Если величины управляющих воздействий получились приемлемыми, следует выбрать те, которые имеют наименьшее значение, и использовать их для управления наиболее «трудными» (в смысле возмущений или требований к качеству регулирования) и ответственными параметрами.

2. Исходя из условий динамики по запаздыванию τ_0 и учитывая соображения по п. 1, следует выбирать каналы управления с наименьшим отношением τ_0/T_0 . Иногда, если есть альтернатива, следует предпочесть канал с наименьшим отношением τ_0/T_0 каналу с большим k_0 . Соображения здесь следующие: при $\tau_0=0$ или при $\tau_0/T_0 \leq 0,1$ можно получить очень высокое качество регулирования и это компенсирует уменьшение в 2—3 раза k_0 канала; при $\tau_0/T_0 > 0,6$ и особенно при $\tau_0/T_0 \geq 1$ получить приемлемое качество регулирования трудно, такие каналы выбирать не следует; при $\tau_0/T_0 \geq 1$ большое значение k_0 не изменит ситуации и даже может повредить.

3. Исходя из условий динамики по постоянной времени T_0 , следует учитывать, что изложенное в пп. 1 и 2 часто дает однозначный ответ, какие каналы выбрать. Однако этого бывает недостаточно. Тогда при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать каналам с меньшим T_0 . Здесь обращают вни-

Рис. 4.1. Структурная схема объекта управления:

U_1 — расход пара, % хим.; U_2 — подача воздуха, % хим.; Θ_1 — температура в предварительной секции, °C; Θ_2 — температура в зоне № 4 окончательной секции, °C



мание на «перекрестные» связи. Желательно, чтобы постоянные времени в прямом и «перекрестных» каналах существенно (в 2—3 раза) различались, причем в канале управления T_o нужно иметь наименьшим.

Пример. Требуется выбрать канал регулирования. Объект — сушилка поточной линии производства макаронных изделий типа ЛМБ. Структурная схема объекта управления приведена на рис. 4.1. Управляющие параметры U_1 и U_2 регулируемые параметры Θ_1 и Θ_2 . Все передаточные функции (W_{11} , W_{12} , W_{21} , W_{22}) имеют вид $W(s) = [k_o / (T_o s + 1)] e^{-\tau_o s}$, k_o , T_o и τ_o , полученные экспериментально путем снятия кривых разгона по методике, описанной в § 2.2, приведены в табл. 4.1.

4.1. Динамические параметры объекта управления

Номер канала	k_o	T_o , мин	τ_o , мин	τ_o / T_o
11	0,15	10,5	0,3	0,03
12	0,075	38,0	4,0	0,1
21	-0,023	16,5	0	0
22	-0,007	7	0	0

Возмущения $Z_{\Theta_1} = 2^\circ\text{C}$, $Z_{\Theta_2} = 1^\circ\text{C}$. Возмущения коррелированы (т. е. обычно имеют место возмущения одного знака). Проверка реализуемости уравнения статики проводится по зависимостям (т. е. при $s \rightarrow 0$):

$$\begin{cases} Z_{\Theta_1} = k_{11}U_1 + k_{22}U_2; \\ Z_{\Theta_2} = k_{12}U_1 + k_{22}U_2 \end{cases} \quad (4.4)$$

При максимальных возмущениях в численных значениях уравнения (4.4) принимают вид

$$\begin{cases} 2 = 0,15U_1 - 0,23U_2; \\ 1 = 0,075U_1 - 0,007U_2. \end{cases}$$

При решении получим $U_2 = 0$, $U_1 = 13\%$.

Более сложный случай, когда одно из возмущений меньше (например, $Z_{\Theta_1} = 0,5^\circ\text{C}$). Тогда второе уравнение будет выглядеть так: $0,5 = 0,075U_1 - 0,007U_2$, а решение системы (4.4) даст $U_2 \approx 100\%$, $U_1 \approx 31\%$.

Таким образом, система реализуема. Управление U_1 — «сильное», U_2 — «слабое». Поскольку $Z_{\Theta_1} > Z_{\Theta_2}$, выбираем U_1 для управления Θ_1 . Этот выбор обоснован еще и тем, что $T_{11} \leq T_{12}$ и $\tau_{11}/T_{11} < \tau_{12}/T_{12}$.

Для управления Θ_2 остается канал $\Theta_2 \rightarrow U_2$. Недостаток этого канала — малое значение k_{22} (перекрестный канал с k_{12} на порядок сильнее). Однако можно ожидать приемлемого качества регулирования, так как $T_{22} < T_{12}$

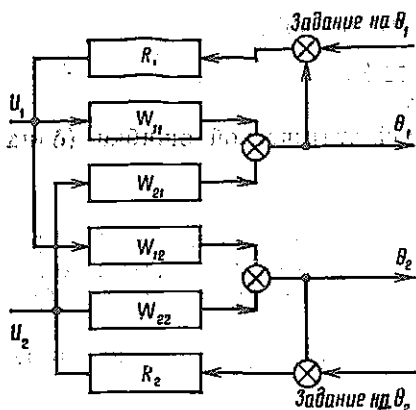


Рис. 4.2. Блок-схема системы регулирования температуры в сушилке

(почти в 5,5 раза) и $\tau_{22}=0$, т. е. можно обеспечить хорошие установки регулятора.

Учитывая, что в канале $\Theta_1 \rightarrow U_1$ $T_{11}=10,5$ мин, можно ожидать частоту возмущений порядка $\omega_{11} = 3/10,5 \approx 0,3$ мин⁻¹. Перекрестный канал ($U_1 \rightarrow \Theta_2$) с постоянной времени $T_{12}=38$ мин будет их фильтровать (ослабление k_Φ):

$$k_\Phi \approx \sqrt{T_{12}^2 \omega_1^2 + 1} =$$

$$\sqrt{(38 \cdot 0,3)^2 + 1} \approx 11,$$

т. е. амплитуда сигнала ослабится примерно в 11 раз). Малоинерционный канал $U_2 \rightarrow \Theta_2$ с этим справится. Таким образом, выбираем каналы управления $\Theta_1 \rightarrow U_1$ и $\Theta_2 \rightarrow U_2$; каналы $U_1 \rightarrow \Theta_2$ и $U_2 \rightarrow \Theta_1$ — «перекрестные».

На рис. 4.2 приведена блок-схема системы регулирования температуры в сушилке типа ЛМБ (R_1 и R_2 — регуляторы).

§ 4.2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Выбранные, как изложено в § 4.1, цели управления в значительной мере определяют как структуру системы (в смысле состава контуров), так и требования к качеству регулирования. Во многих случаях достаточно задать простейшие требования к качеству регулирования (например, по времени регулирования), особенно когда речь идет о более или менее независимых одноконтурных системах. В более сложных случаях (в частности, в подсистемах АСУ ТП), когда следует организовать взаимодействие нескольких контуров, а также при управлении многосвязными объектами, приходится пользоваться более сложными интегральными критериями.

Простейшие показатели качества переходного процесса. На рис. 4.3 и 4.4 приведены реакции автоматической системы на ступенчатое изменение задания и ступенчатое возмущение соответственно. На рисунках y — регулируемая переменная.

На рис. 4.3 y_0 — новое значение задания, y_1 — амплитуда первого отклонения, y_2 — амплитуда второго (положительного) отклонения, $y_{уст}$ — установившееся значение.

Для описания процесса используют следующие показатели качества:

- 1) перерегулирование (обычно в %)

$$\varphi = [(y_1 - y_0)/y_0 \cdot 100];$$

2) статическую ошибку (относительную)

$$\varepsilon = \frac{y_{уст} - y_0}{y_0};$$

иногда берут значение абсолютной статической ошибки (δ на рис. 4.3)

$$\delta = y_{уст} - y_0;$$

3) время регулирования (на рис. 4.3 t_p). Величину t_p определяют как время от скачка задания до вхождения $y(t)$ в коридор $y_0 \pm \Delta$, где Δ — допустимая динамическая погрешность (чаще всего $\Delta = 5\%$, иногда до 20% и более);

4) период колебаний — время между двумя максимумами $y(t)$ (или минимумами) — T_k на рис. 4.3;

5) величину колебательности

$$\mu = t_p / T_k;$$

6) степень затухания

$$\psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1 - y_0}.$$

На рис. 4.4 смысл y_1 и y_2 в основном тот же, что и на рис. 4.3, y_f — установившееся значение выхода при отсутствии регулятора (величина возмущения).

В дополнение к указанным используют следующие показатели:

динамический коэффициент (или максимальная относительная динамическая ошибка)

$$R_A = y_1 / y_f;$$

показатель колебательности (в отличие от μ)

$$d = (y_2 / y_1) \cdot 100.$$

Величина d обычно выражается в процентах. Для большинства случаев (в частности, для линейных систем) $d = \varphi$.

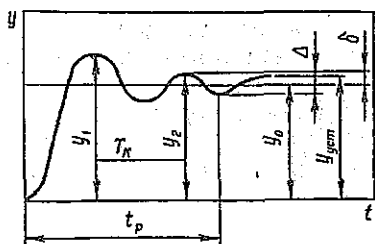


Рис. 4.3. Реакция автоматической системы на ступенчатое изменение задания

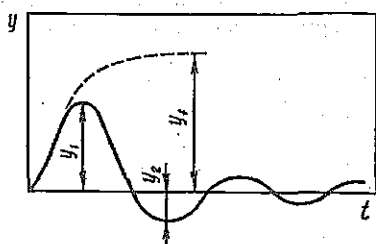


Рис. 4.4. Реакция автоматической системы на ступенчатое изменение возмущения

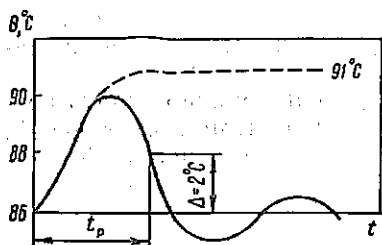


Рис. 4.5. Переходный процесс системы регулирования температуры

колебательности системы (в разных аспектах), например, характеризуют μ , ψ , d , ϕ и в меньшей степени R_d ; ход процесса во времени — t_p , T_k , а также ψ , ϕ , d , μ .

На величину t_p сильно влияет Δ . Для начала важно правильно задать эту величину, что следует сделать, исходя из диапазона изменения переменной, величин возмущений и возможных шкал датчика.

Пример. Требуется стабилизировать температуру. Диапазон в нормальном режиме 84—88°C, возмущения до 5°C, по технологии допустимы длительные отклонения до 2°C.

Середина диапазона для задания $y_0 = (84 + 88)/2 = 86^\circ\text{C}$. Выбираем датчик с диапазоном 50—100°C и классом 1 (мост с термометром сопротивления). Тогда $y_0 = \frac{86 - 50}{100 - 50} \cdot 100 = 72\%$ шкалы. Допустимое длительное отклонение $2/50 \cdot 100 = 4\%$.

Учитывая погрешность, можно принять $\Delta = 5\%$ или $\Delta = 2/5 \cdot 100 = 40\%$ от возмущения. Примерный вид переходного процесса показан на рис. 4.5.

Таким образом, время регулирования можно принять примерно равным времени первого колебания. Если следовать классическим рекомендациям ($\Delta = 5\%$ от возмущения), то формально t_p возрастет в 3 раза. Очевидно, реально такая величина Δ не требуется, да и невозможна (так как $\Delta = 5\%$ от возмущения соответствует $\Delta = 5 \cdot 5/100 = 0,25^\circ\text{C}$, т. е. за пределами класса датчика).

Уместно отметить важность правильного выбора датчика. Например, если в описанном примере принять датчик со шкалой 0—150°C и классом 1,5, получим погрешность датчика $\varepsilon = 150 \cdot 1,5/100 = 2,25^\circ\text{C}$, т. е. больше допустимого по технологии отклонения. С учетом этого даже без регулятора запись процесса на диаграмме будет почти ровной линией (возмущение в 5°C соответствует $5 \cdot 100/150 = 3\%$ шкалы, т. е. мало заметно с учетом класса датчика и самописца).

Задание величины t_p зависит от многих факторов. Чаще всего наиболее важным является обеспечение лучшего режима для последующих участков. В этом случае t_p следует выбирать из соображений $t_p < 1,5T$ (где T — постоянная времени следующего агрегата).

Известен еще ряд показателей качества. Здесь описаны только наиболее употребительные показатели.

Рассмотрим методы рационального выбора описанных показателей, исходя из изложенного в § 4.1. Прежде всего отметим, что при синтезе одноконтурной системы достаточно задать один-два показателя (редко три). Действительно, степень ко-

Другой важный фактор — частота возмущений. Если $\tau_{сп}$ — время спада автокорреляционной функции возмущения, желательно, чтобы $t_p < (0,2 \div 0,4) \tau_{сп}$.

Иногда из технологических соображений можно задать время T_m и амплитуду y_m максимально допустимых отклонений. Это требование дает $t_p < (2-3) T_m$ и динамический коэффициент $R_d \leq y_m / y_f$. Во многих случаях для выбора типа регулятора и его уставок достаточно задать t_p .

В некоторых случаях требуется определить характер переходного процесса. Чаще всего задают $\varphi = 20\%$ (20%-ное перерегулирование). Иногда требуется переходный процесс без перерегулирования (апериодический). Это увеличивает t_p и R_d .

При других критериях (минимум интеграла от квадрата ошибки, минимум времени регулирования) φ обычно возрастает. Задание величины перерегулирования φ , как правило, однозначно определяет ψ и μ . Так, например, при $\varphi = 20\%$ $\psi = 0,96$, $\mu = 0,5 \div 1,5$ в зависимости от Δ и τ объекта.

В некоторых случаях вместо φ удобнее задавать величину периода колебаний T_k . При заданном φ величины t_p и T_k однозначно связаны через μ . Для более сложных (оптимальных) систем используют интегральные критерии и вопрос улучшения качества регулирования обычно не рассматривают, так как оптимальный синтез системы дает нижнюю оценку критерия и дальнейшее ее улучшение с теоретической точки зрения принципиально невозможно. (Однако практическая реализация строго оптимального закона часто затруднительна, и некоторые возможности для улучшения могут быть за счет более точного воспроизведения закона техническими средствами.)

При использовании двух и более простейших критериев их сочетание не может быть произвольным. Во-первых, это определяется технологическими требованиями, и, во-вторых, как уже отмечалось, многие простейшие критерии взаимосвязаны. Поэтому желательно выбирать второй (улучшаемый) критерий так, чтобы он характеризовал систему с иной стороны (по отношению к первому — основному критерию).

Рассмотрим несколько типичных методов, улучшающих (в указанном выше смысле) качество регулирования.

Уменьшение действующих в канале возмущений. Этот прием часто дает большой эффект, например уменьшение динамической ошибки в 3—5 раз в нескольких контурах при простой реализации (один-два простых дополнительных контура).

Суть приема достаточно очевидна. В результате, развивая этот подход, приходим к комплексной автоматизации объекта, достоинством которой (помимо общеизвестных) является более высокое качество регулирования (по сравнению с набором разрозненных контуров).

Пример. В ряде агрегатов стабилизируется давление путем подачи острого пара из общего коллектора. Основными возмущениями для каждого агрегата являются подача сырья (скачки в случайные моменты времени) и параметры пара (в основном давление). Возмущения на входе в коллектор (работа котельной) относительно редки.

Постоянные времени агрегатов по каналу «расход сырья — давление» $T_{11}=150\div 250$ с; по каналу «расход пара — давление» $T_{12}=40\div 60$ с; постоянная времени по каналу «давление пара в коллекторе — давление в агрегате» $T_{13}=20\div 30$ с; постоянная времени коллектора (по любому каналу) $T_2=2\div 3$ с. Запоздывания всюду пренебрежимо малы. Схема системы приведена на рис. 4.6.

Таким образом, скачок по сырью, например, в первый агрегат приведет к относительно плавному (с постоянной времени $150\text{--}250$ с) изменению давления в первом агрегате. Контур 1 (с постоянной времени около 50 с) легко компенсирует это изменение. Однако увеличение расхода пара приведет к достаточно резкому (из-за малой T_2) падению давления в коллекторе и, следовательно, к резкому (с постоянной времени $T_{13}=20\div 30$ с) падению давления во всех агрегатах. Поскольку $T_{12}>T_{13}$, контуры 1—3 с этими возмущениями справляются с трудом (с большой динамической ошибкой). Кроме того, работа контуров 1—3 вызовет дальнейшее достаточно резкое падение давления в коллекторе и, следовательно, дальнейшее нарушение режима в агрегатах.

Введение контура 4 стабилизации давления в коллекторе разрывает связь контуров 1—3 через коллектор и резко улучшает качество регулирования, так как снимает все возмущения по давлению пара. Контур 4 — «легкий» (мала постоянная времени, нет запоздывания), поэтому качество регулирования будет высоким. С возмущениями по сырью контуры 1—3 легко справляются.

Последовательная коррекция. Простейший (и наиболее типичный) метод — введение в состав контура блока прямого или обратного предварения (или обоих вместе). Блок прямого пред-

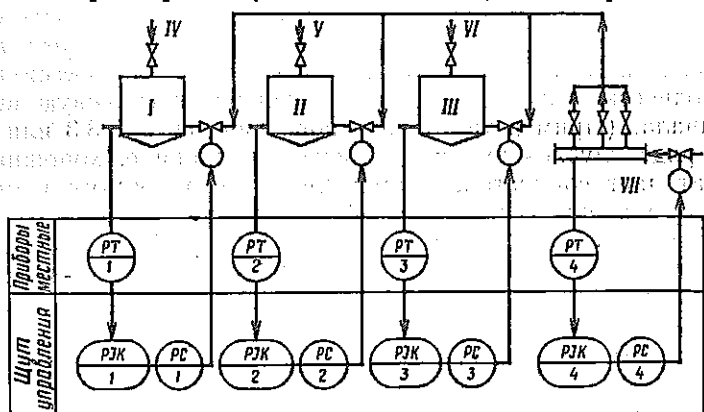


Рис. 4.6. Схема автоматизации с дополнительным контуром стабилизации возмущений:

I, II, III — рабочие агрегаты; IV, V, VI — трубопроводы подачи сырья; VII — коллектор пара; 1, 2, 3 — контуры регулирования давления в соответствующих агрегатах; 4 — дополнительный регулятор (давление в коллекторе)

варения (передаточная функция его $\frac{T_n s + 1}{(T_p/k)s + 1}$, где k порядка 8—15, T_n — время предварения), по существу, эквивалентен вводу воздействия по производной. Иначе говоря, это замена типа регулятора (например, ПИ на ПИД).

Из рис. 3.2 и 3.3 видно, что усложнение типа регулятора (ПИД вместо ПИ) дает заметный выигрыш в качестве регулирования. Так, при τ/T в диапазоне 0,2—0,4 динамическая ошибка уменьшается в 1,5—2 раза. Заметно уменьшается также время регулирования. Однако с ростом τ/T эффект от введения блока предварения снижается, и при τ/T около единицы динамическая ошибка почти не зависит от наличия его.

Таким образом, введение воздействия по производной является средством борьбы с динамическими параметрами типа постоянных времени, но не с чистым запаздыванием. Область применения последовательной коррекции — системы второго-третьего порядков с примерно одинаковыми постоянными времени, а также системы с нелинейностями. При анализе системы следует иметь в виду, что блок прямого предварения играет роль прогнозирующего устройства и дает положительный сдвиг на 90° в фазочастотной характеристике системы.

Другой, подходящий в смысле технической реализации, прием — включение блока обратного предварения (т. е. апериодического звена). Обычно такой блок играет роль фильтра, исключая из полезного сигнала высокочастотную составляющую. Применение этого блока целесообразно в малоинерционных каналах, когда запаздывания в датчике и исполнительном механизме начинают играть существенную роль (ввиду малой постоянной времени объекта). В этом случае корректирующее апериодическое звено определяет основную постоянную времени канала. (Пример таких контуров приведен в § 3.3 или 3.5).

В ряде случаев при τ/T , близком к единице, хороший результат дает совместное применение блоков прямого и обратного предварения (интегро-дифференцирующее звено).

Если позволяют частота возмущений и требуемое время регулирования, постоянную времени блока обратного предварения можно настроить на величину порядка $2T$ — $3T$. Тогда при настройке блок прямого предварения $T_n = T$ компенсирует апериодическую часть объекта. Для контура регулирования отношение τ/T достигает порядка 0,3—0,5, что, естественно, заметно уменьшает динамическую ошибку и другие подобные показатели качества регулирования.

Параллельная коррекция. Суть данного подхода заключается в охвате части объекта обратной связью (либо жесткой, т. е. это, как правило, обычный контур с П- или ПИ-регулятором, либо гибкой — связь только по производной).

В простейшем (и наиболее часто употребляемом) варианте этот подход реализуется в виде каскадной двухконтурной системы. В смысле воздействия на качество регулирования здесь имеется некоторая аналогия с введением дополнительных (не связанных) контуров. Внутренний (дополнительный) контур снимает часть возмущений, облегчая работу внешнего (главного) контура. Охват части объекта дополнительной обратной связью как бы исключает эту часть из динамических свойств главного контура, существенно улучшая качество регулирования.

Пример. Требуется стабилизировать концентрацию на выходе двухъем-костного смесителя (рис. 4.7).

Регулирование осуществляется воздействием на расход продукта в смеситель *I*. Кроме того, в смесители *I* и *II* подаются дополнительные ингредиенты (регулирование их здесь не рассматривается), играющие роль возмущений. Передаточные функции смесителей:

$$W_I = \frac{5}{300s + 1}; \quad W_{II} = \frac{1}{300s + 1}.$$

Можно показать (см. пример в § 3.3), что общая передаточная функция по каналу

$$W_z = \frac{5e^{-30s}}{800s + 1}$$

Введем внутреннюю обратную связь по каналу «промежуточная концентрация — входной расход» в регулятор *I* типа ПИ с уставками $T_n = 15$ с, $k_y = 20$ (выбор уставок для упрощения здесь не рассматриваем). Тогда передаточная функция регулятора $W_{PI} = 20 + 1/15s$, а передаточная функция замкнутого внутреннего контура

$$W_{z1} = \frac{\frac{5}{300s + 1} \left(20 + \frac{1}{15s} \right)}{1 + \frac{1}{300s + 1} \left(20 + \frac{1}{15s} \right)} = \frac{1}{3s + 1}.$$

Иначе говоря, внутренний контур эквивалентен апериодическому звену с постоянной времени 3 с. По сравнению с W_{II} (постоянная времени 300 с) этим можно пренебречь.

Расчет главного контура (регулятор 2) существенно упрощается, и хорошее качество регулирования легко получить, тем более что внутренний контур снимает возмущения по ингредиентам в смеситель *I*.

Из изложенного следует, что параллельная коррекция возможна не всегда. Структура объекта должна обеспечивать выделение такой его части, чтобы с одной стороны, получить заметный выигрыш в динамических свойствах и компенсации части возмущений, а с другой — достаточно высокое качество регулирования во внутреннем контуре (который работает в следящем режиме с переменным заданием). Последнее обстоятельство иногда становится серьезной проблемой и требует допол-

Рис. 4.7. Каскадная двухконтурная система автоматического регулирования:

1, II — смесители; 1, 2 — ПИ-регуляторы; 3 — датчики концентрации

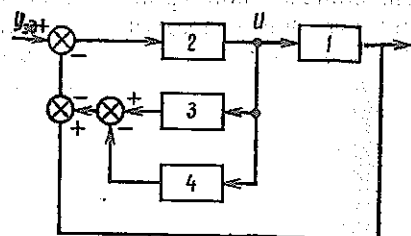


Рис. 4.8. Структурная схема системы автоматического регулирования с упредителем Смита

нительных мер (например, последовательной коррекции в одном или обоих контурах).

Введение гибкой обратной связи (по производной) дает эффект, аналогичный каскадной системе. Разница заключается только в том, что такая связь действует только в динамической системе, т. е. не снимает постоянных промежуточных возмущений. Одновременно обратная связь по производной увеличивает запас устойчивости системы и делает ее работу более «плавной». Однако необходимо учитывать, что воздействие по производной чувствительно к высокочастотным помехам.

Рассмотренные приемы повышения качества регулирования в большинстве случаев дают хороший эффект. Однако возможны ситуации, когда этих приемов недостаточно. Рассмотрим кратко эти ситуации.

Большое запаздывание. Этот случай (когда $\tau/T \geq 1$) при высоких требованиях к качеству регулирования и сильных возмущениях встречается довольно часто. Радикальным средством в этом случае является применение специальных регуляторов с упредителями. Известен ряд схем упредителей Смита (рис. 4.8), Ресвика, Цыпкина и др.

Пример. Пусть передаточные функции объекта $W_o(s)e^{-\tau s}$ регулятора $W_p(s)$, модели с запаздыванием (звено 4) $W_u(s)e^{-\tau s}$, модели без запаздывания (звено 3) $W_u(s)$.

Передаточная функция замкнутой системы без упредителя

$$W_{31}(s) = \frac{W_p(s) W_o(s) e^{-\tau s}}{1 + W_p(s) W_o(s) e^{-\tau s}}. \quad (4.5)$$

Передаточная функция замкнутой системы с упредителем

$$W_{зз}(s) = \frac{W_p(s) W_o(s) e^{-\tau s}}{1 + W_p(s)[W_m(s) - W_m(s) e^{-\tau s} + W_o(s) e^{-\tau s}]}. \quad (4.6)$$

Если принять $W_m(s) = W_o(s)$ и $\tau_1 = \tau$, то выражение (4.6) примет вид

$$W_{зз}(s) = \frac{W_p(s) W_o(s) e^{-\tau s}}{1 + W_o(s) W_p(s)}, \quad (4.7)$$

т. е. знаменатель передаточной функции, определяющий устойчивость и качество регулирования, соответствует системе без запаздывания.

В упрощенном виде применение данного упредителя состоит в том, что регулирование осуществляется искусственным объектом (звеном 3) с малым запаздыванием. Фактическая ситуация на объекте учитывается путем расчета возмущения по y (как разность выходов звеньев 1 и 4).

Упредители дают хорошие результаты, но достаточно сложны в реализации (две модели, большое число параметров настройки, необходимость точного знания динамических свойств объекта или адаптивного управления).

Значительные возмущения. В ряде объектов при значительном запаздывании действуют большие возмущения, которые, однако, можно измерять на входе объекта. Для таких случаев хорошие результаты может дать управление по возмущению (инвариантная система). Такие системы базируются на принципе Понселе в отличие от систем с обратной связью (т. е. на принципе Ползунова — Уатта).

Пример. Пусть дан объект вида

$$y = W_1(s) u + W_2(s) f,$$

где $W_1(s)$, $W_2(s)$ — передаточные функции соответственно по управлению и по возмущению.

Уравнение регулятора

$$u = R_1(s) (y_{зд} - y) + R_2(s) f,$$

где $y_{зд}$ — задание.

Тогда уравнение замкнутой системы примет вид

$$y = \frac{W_1(s) R_1(s) y_{зд} + [W_1(s) R_2(s) + W_2(s)] f}{1 + W_1(s) R_1(s)}. \quad (4.8)$$

Предусмотрим независимость y от f . Очевидно, условием этого будет

$$W_1(s) R_2(s) + W_2(s) = 0,$$

откуда

$$R_2(s) = -W_2(s)/W_1(s).$$

Точная реализация этого соотношения делает систему нечувствительной (инвариантной) к возмущению f . Если задание $y_{зд}$ постоянно и f — единственное возмущающее воздействие, то теоретически можно получить сколь угодно высокое качество регулирования — в пределе $y = y_{зд}$. В этом случае

регулятор по отклонению R_1 не нужен. На практике, естественно, такую «идеальную» систему получить невозможно, а в большинстве случаев и не нужно. Достаточно компенсировать 70—90% возмущения, чтобы резко улучшить качество регулирования.

Если передаточные функции W_1 и W_2 известны с достаточно высокой точностью, а f можно измерить с небольшой погрешностью, то ошибка регулирования y будет мала даже при $R_1=0$ (т. е. без регулятора по отклонению). Однако если какое-либо из этих условий не выполняется — динамические свойства объекта известны приблизительно, часть возмущений не контролируется, качество регулирования резко падает. К тому же существенную роль здесь играет возможность физической реализации регулятором передаточной функции $R_2(s)$, в частности из-за необходимости моделировать обратную динамическую систему объекта $1/W_1(s)$.

Более подробно вопрос о физической реализуемости инвариантных систем рассмотрен в § 4.4. В чистом виде инвариантные системы применяются крайне редко. Гораздо чаще используются комбинированные системы, в которых обычному контуру (например, R_1 соответствует ПИ-регулятору) придается дополнительная связь по возмущению. В этом случае достаточно учесть только одно, главное возмущение, а обратную модель можно реализовать приблизительно. Небольшие погрешности (измерения возмущения, неточности модели) компенсирует работа контура (обратной связи). Реализация инвариантных систем относительно сложна (отсутствие адекватных моделей, большое число параметров настройки и т. п.).

§ 4.3. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Разнообразие описанных в § 4.2 простейших показателей качества регулирования часто затрудняет однозначную оценку качества системы автоматического регулирования. Весьма заманчивой представляется возможность такой оценки с помощью единого критерия вида (4.1), особенно если ему можно придать экономический смысл. В силу этого начиная примерно с 50-х годов многими исследователями ведется интенсивная работа в области строгого синтеза автоматических систем, оптимальных в смысле различных интегральных критериев (функционалов).

Методологически оптимальный синтез строится на трех подходах: классическом вариационном исчислении; динамическом программировании; принципе максимума. Исторически эти подходы развивались следующим образом. Первые задачи вариационного исчисления ставились в XVII—XVIII вв. такими известными учеными, как И. Бернулли, Г. Лейбниц, И. Ньютон, Г. Лопиталь. Значительный шаг в решении данных задач сделан в работах Л. Эйлера. Гораздо позднее — в 50-е годы текущего столетия — на базе классического вариационного исчисления

развилось, в частности, в работах советских исследователей А. М. Летова, Н. Н. Красовского и др. так называемое аналитическое конструирование регуляторов.

Примерно тогда же американским математиком Р. Беллманом и его школой разработан метод динамического программирования. В первоначальном виде этот метод предназначался для оптимизации (как правило, в статике) многостадийных процессов. Однако стадию (шаг) процесса можно трактовать гораздо шире, в частности как состояние объекта управления в определенные моменты времени. На этой основе динамическое программирование нашло применение для оптимального синтеза динамических систем.

Ряд особенностей вариационного исчисления накладывает ограничения на вид критерия оптимальности и вообще на вид решения задачи (речь идет о линейных системах управления). Однако потребности практики тогда же (т. е. в 50-е годы) привели к необходимости решения «неклассических» задач оптимального управления, в частности задач максимального быстрого действия, задач с ограничениями на управление и т. п.

Общее решение неклассических задач оптимального управления дает метод, названный принципом максимума, разработанный Л. С. Понтрягиным, В. Г. Болтянским, Р. В. Гамире-лидзе, Е. Д. Мищенко.

В процессе развития всех трех подходов рядом исследователей была показана их тесная взаимосвязь. Установлено, что принцип максимума является, с одной стороны, обобщением задач классического вариационного исчисления, а с другой — тесно связан с динамическим программированием.

Поскольку принцип максимума к тому же наиболее строго математически обоснован, рассмотрим его несколько подробнее. Пусть дана динамическая система, описываемая дифференциальными уравнениями вида

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= f_1(y_1, y_2, \dots, y_n, u_1, u_2, \dots, u_m); \\ \frac{dy_2}{dt} &= f_2(y_1, y_2, \dots, y_n, u_1, u_2, \dots, u_m); \\ \frac{dy_n}{dt} &= f_n(y_1, y_2, \dots, y_n, u_1, u_2, \dots, u_m). \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Требуется найти такие управления $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$, чтобы перевести систему (4.9) из начального состояния $y_{10}, y_{20}, \dots, y_{n0}$ в некоторое конечное состояние $y_{1k}, y_{2k}, \dots, y_{nk}$ так, чтобы минимизировать критерий

$$E = \int_0^{t_k} f_0(y_1, y_2, \dots, y_n, u_1, u_2, \dots, u_m) dt, \quad (4.10)$$

где t_k — время процесса, как правило, неизвестное.

При этом могут быть заданы ограничения на управления

$$|u_i| \leq u_{i\max} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4.11)$$

и, возможно, на все или некоторые координаты

$$|y_j| \leq y_{j\max} \quad (1 \leq j \leq n).$$

Обоснование решения данной задачи в несколько упрощенном виде заключается в следующем. Введем новую координату y_0 такую, что

$$dy_0/dt = f_0(y_1, y_2, \dots, y_n, u_1, u_2, \dots, u_m), \quad (4.13)$$

и рассмотрим $(n+1)$ -мерную систему (4.9), (4.13)

$$d\bar{Y}/dt = f(\bar{Y}, \bar{U}), \quad (4.13a)$$

где $\bar{Y}$ — $(n+1)$ -мерный вектор ($y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$); $\bar{U}$ — m -мерный вектор управлений ($u_1, u_2, \dots, u_m$).

Пусть известны (найлены каким-либо методом) оптимальные управления $u_*(t)$ и соответствующая им траектория $\bar{y}_*(t)$. Тогда, очевидно, в момент времени t_k $E = E_{\min} = \bar{y}_{0*}(t_k)$.

Для дальнейшего нам понадобится рассмотреть предложенную Л. С. Понтрягиным с сотрудниками так называемую игольчатую вариацию. Суть ее состоит в следующем. Пусть оптимальное управление $\bar{U}_*$ в какой-либо произвольный момент времени $t = t_1$ ($0 \leq t_1 < t_k$) получит на очень короткое время δt приращение $\Delta \bar{U}$. Это $\Delta \bar{U}$ может быть очень большим, но из-за малости δt приращение (вариация) функционала δE будет малым. В результате изменения $U(t)$ дальнейшая траектория будет отличаться от оптимальной.

Вариация траектории

$$\delta \bar{Y}(t) = \bar{Y}(t) - \bar{Y}_*(t) \quad (4.14)$$

или, поскольку δt мало, можно считать

$$\bar{Y}(t) = \delta t \frac{d\bar{Y}(t)}{dt},$$

то

$$\begin{aligned} \delta \bar{Y}(t) &= \delta t \left[\frac{d\bar{Y}(t)}{dt} - \frac{d\bar{Y}_*(t)}{dt} \right]_{t=t_1} = \\ &= \delta t \{ f[\bar{Y}(t_1), \bar{U}(t)] - f[\bar{Y}_*(t_1), \bar{U}_*(t)] \}. \end{aligned} \quad (4.14a)$$

С учетом (4.14)

$$\frac{d[\bar{Y}_*(t) + \delta \bar{Y}(t)]}{dt} = f[\bar{U}(t), \bar{U}(t)]. \quad (4.15)$$

Перейдем в выражении (4.15) от векторной формы к координатам и разложим правую часть в ряд Тейлора, ограничившись линейными членами. После очевидных преобразований получим

$$\frac{d[\delta y_i(t)]}{dt} = \sum_{j=0}^n \frac{\partial f_j(y_0, y_1, \dots, y_n, u_1, u_2, \dots, u_m)}{\partial y_i} \delta y_j, \quad j=0, 1, 2, \dots, n, \quad (4.16)$$

т. е. линейную часть приращения аргумента.

Рассмотрим теперь конечный момент времени при $t=t_k$. Вариация критерия (функционала E) в этот момент

$$\delta E(t_k) = E(t_k) - E_*(t_k) > 0$$

или

$$-\delta E(t_k) = -\delta y_0(t_k) \leq 0.$$

Дальнейшее рассмотрение базируется на так называемом направляющем векторе $\bar{\Psi}(t)$ — таком, чтобы скалярное произведение $\delta \bar{y}(t)$ на отрезке $\bar{\Psi}(t)$ было равно $\delta y_0(t_k)$, т. е.

$$-\delta y_0(t_k) = \langle \delta \bar{Y}(t_k), \bar{\Psi}(t_k) \rangle \leq 0, \quad (4.17)$$

где $\langle \bar{a}, \bar{b} \rangle$ — знак скалярного произведения векторов $\bar{a}$ и $\bar{b}$.

Поскольку $\delta y_0(t_k) > 0$, то для выполнения выражения (4.17) при $t=t_k$ должно выполняться $\Psi_0(t_k) = -1$ и $\Psi_i(t_k) = 0$, $i=1, 2, \dots, n$. Кроме того, очевидно, что для неоптимальных управлений $-\delta E < 0$ и только в оптимальном варианте управлений $\delta E = 0$.

Для нахождения связи $\bar{\Psi}(t)$ с $\bar{Y}(t)$ и $\bar{U}(t)$ зададим дополнительно, чтобы

$$\langle \delta \bar{Y}'(t), \bar{\Psi}(t) \rangle = \langle \delta \bar{Y}(t_k), \bar{\Psi}(t_k) \rangle = \text{const.}$$

Тогда

$$\frac{d}{dt} \langle \delta \bar{Y}(t), \bar{\Psi}(t) \rangle = \langle \frac{d[\delta \bar{Y}(t)]}{dt}, \bar{\Psi}(t) \rangle + \langle \frac{d\bar{\Psi}(t)}{dt}, \delta \bar{Y}(t) \rangle = 0$$

или аналогично (4.16) в координатах

$$\sum_{i=0}^n \frac{d[\delta y_i(t)]}{dt} \Psi_i(t) + \sum_{j=0}^n \delta y_j(t) \frac{d\Psi_j(t)}{dt} = 0. \quad (4.18)$$

С учетом (4.16) получим

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n \Psi_i(t) \sum_{j=0}^n \frac{\partial f_j(y_0, y_1, y_2, \dots, y_n, u_1, u_2, \dots, u_m)}{\partial y_i} \delta y_j(t) + \\ + \sum_{j=0}^n \delta y_j(t) \frac{d\Psi_j(t)}{dt} = 0. \end{aligned} \quad (4.18a)$$

Поменяем порядок суммирования в выражении (4.18а). Тогда

$$\sum_{j=0}^n \delta y_j \left[\sum_{l=0}^n \Psi_l(t) \frac{\partial f_l}{\partial y_j} + \frac{d\Psi_l(t)}{dt} \right] = 0. \quad (4.19)$$

Поскольку вариации δy_j могут быть произвольными, равенство (4.19) соблюдается при равенстве нулю выражения в квадратных скобках. Исходя из этого, имеем

$$\frac{d\Psi_j(t)}{dt} = - \sum_{l=0}^n \frac{\partial f_l}{\partial y_j} \Psi_l(t), \quad (4.20)$$

что дает возможность найти вектор $\bar{\Psi}(t)$.

Рассмотрим вариацию функционала

$$-\delta E = \langle \delta \bar{y}(t), \bar{\Psi}(t) \rangle.$$

С учетом (4.14а) после сокращения на δt получим

$$\langle f[\bar{Y}(t), \bar{U}(t)], \bar{\Psi}(t) \rangle - \langle f[\bar{Y}_*(t), \bar{U}_*(t)], \bar{\Psi}(t) \rangle = -\delta E. \quad (4.21)$$

Введем обозначение

$$\bar{H} = \langle f[\bar{Y}(t), \bar{U}(t)], \bar{\Psi}(t) \rangle. \quad (4.22)$$

Тогда выражение (4.21) примет вид

$$H(\bar{U}) - H(\bar{U}_*) = -\delta E. \quad (4.23)$$

Соотношение (4.23) собственно и определяет суть принципа максимума. При $U = U_*$, т. е. в оптимальном режиме, $H(\bar{U})$ максимально и вариация функционала $\delta E = 0$, т. е. E минимально. Во всех других случаях, поскольку $\delta E \geq 0$, $H(\bar{U}) < H(\bar{U}_*)$.

Описанное выше доказано Л. С. Понтрягиным в виде теоремы в более строгой (и сложной) математической форме.

Функция H носит название функции Гамильтона (или гамильтониан), имеющей вполне определенный физический смысл. Например, для консервативных технических систем H — это полная энергия системы, которая должна при оптимальном управлении оставаться постоянной и максимальной. Функции Ψ_i являются для такой системы импульсами, задающими направление движения. Действительно, H можно представить в виде

$$H = \langle \partial \bar{Y} / \partial t, \bar{\Psi} \rangle. \quad (4.23a)$$

Очевидно, H будет максимальным, когда направления векторов $\bar{\Psi}$ и $d\bar{Y}/dt$ (т. е. скорости изменения координат) будут совпадать. Иначе говоря, $\bar{\Psi}$ задает направление скорости системы. Описанная выше постановка, когда заданы $\bar{Y}(0)$ и $\bar{Y}(t_k)$, называется задачей с закрепленными концами. Однако принцип максимума справедлив и для других постановок, напри-

мер, если заданы $\bar{Y}(0)$ и t_k , а $\bar{Y}(t_k)$ — свободно либо заданы только отдельные координаты $\bar{Y}(0)$ и $\bar{Y}(t_k)$. Такие задачи называются задачами со свободным концом (или концами).

Пример. Рассмотрим систему, описываемую уравнениями

$$dy_1/dt = u; \quad dy_2/dt = y_1$$

при ограничении $|u| \leq 1$.

Требуется перевести систему из состояния $y_1(0) = y_{10}$ и $y_2(0) = y_{20}$ в состояние $y_1(t_k) = 0$ и $y_2(t_k) = 0$ за минимальное время.

Такая постановка характерна при управлении перемещениями разных механизмов (например, тележек в элеваторах, штабелеров и т. п.), когда имеется электропривод с постоянным моментом, а перемещения относительно небольшие — электропривод не успевает разогнать механизм до максимальной скорости.

В соответствии с постановкой о максимальном быстродействии критерий оптимальности задается следующим функционалом

$$E = - \int_0^{t_k} dt = -t_k.$$

Соответственно $dy_0/dt = -1$.

Гамильтониан системы

$$H = -\Psi_0 + \Psi_1 u + \Psi_2 y_1.$$

Уравнения для вектора Ψ

$$d\Psi_1/dt = -\Psi_2; \quad d\Psi_2/dt = 0,$$

откуда $\Psi_2 = C_1$; $\Psi_1 = C_2 - C_1 t$ (где C_1, C_2 — некоторые константы).

Из уравнения (4.236) видно, что максимум H достигается при следующих условиях:

$$u = +1 \text{ при } \Psi_1 > 0;$$

$$u = -1 \text{ при } \Psi_1 < 0,$$

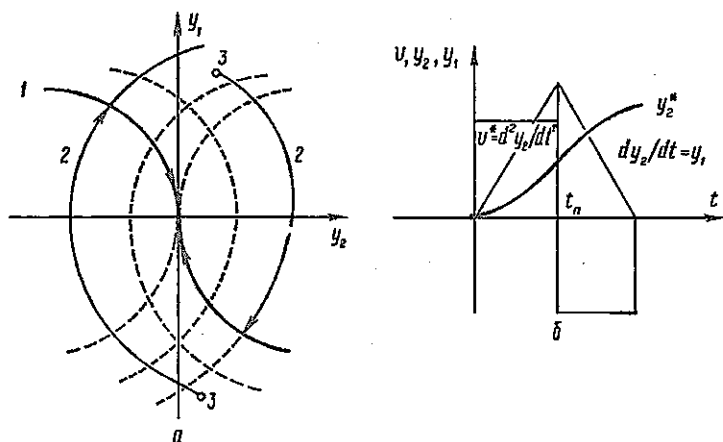


Рис. 4.9. Траектории системы автоматического управления приводом перемещения механизма:

а — фазовые (1 — линия перемещения; 2 — траектория движения до переключения; 3 — начальная точка); б — движение системы во времени (t_n — точка переключения)

т. е. $u = \text{sign}(C_2 - C_1 t)$,
где sign — функция знака.

Таким образом, u меняет знак на интервале от 0 до t_k не более одного раза в момент, когда $t = C_2/C_1$.

При $u = 1$ найдем из исходной системы

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_{10} + t; \\ y_2 &= y_{20} + y_{10}t + t^2/2. \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Комбинируя эти уравнения и исключая t , получим

$$y_2 = y_1^2/2 + (y_{20} - y_{10}^2/2). \quad (4.24a)$$

Аналогично при $u = -1$

$$y_2 = -y_1^2/2 + (y_{20} + y_{10}^2/2). \quad (4.24b)$$

Эти уравнения задают фазовые траектории системы — параболы в координатах y_1 — y_2 . Вид этих траекторий приведен на рис. 4.9, а.

Очевидно, конечные участки траектории должны проходить через начало координат. Переключение управления (т. е. изменение знака) должно произойти, когда система выйдет на эту конечную траекторию.

Рис. 4.9, б иллюстрирует достаточно очевидное положение — чтобы попасть быстрее в конечную точку и там остановиться (затормозить), нужно двигаться с максимально возможной средней скоростью. Поскольку ускорение (в данном случае u) ограничено, необходимо первую половину пути разгоняться, а вторую — тормозить. Поэтому зависимость скорости от времени имеет вид треугольника.

§ 4.4. ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ

Выше (см. § 2.4) были рассмотрены модели (2.24), (2.25) многомерных объектов, т. е. объектов с m входами — вектор $\bar{U} = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ и n выходами — вектор $\bar{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$. Такие объекты описываются дифференциальными уравнениями в матричной форме вида

$$\bar{Y}'(t) = \bar{A}\bar{Y}(t) + \bar{B}\bar{U}(t), \quad (4.25)$$

где $\bar{Y}'$ — вектор производных от $\bar{Y}$; $\bar{A}$, $\bar{B}$ — матрицы коэффициентов размера соответственно $n \times n$ и $n \times m$.

Соотношение (4.25) можно представить в изображениях по Лапласу

$$\bar{Y}(s) = \bar{W}\bar{U}(s), \quad (4.26)$$

где $\bar{Y}(s)$ и $\bar{U}(s)$ — изображения векторов $\bar{Y}(t)$ и $\bar{U}(t)$ соответственно; $\bar{W}$ — матрица передаточных функций размера $n \times m$.

В общем виде задача синтеза сводится к нахождению такой матрицы (см. 2.24) регуляторов $\bar{R}$ (размера $m \times n$), чтобы удов-

летворялись требования критерия системы управления. Тогда вектор управления определится как

$$\bar{U}(s) = \bar{R}(\bar{Y}_{\text{эл}} - \bar{Y}(s)), \quad (4.27)$$

где $\bar{Y}_{\text{эл}}$ — вектор заданий.

Из выражений (4.26) и (4.27) имеем для замкнутой системы

$$\bar{Y}(s) = (1 + \bar{W}\bar{R})^{-1} \bar{W}\bar{R}\bar{Y}_{\text{эл}}, \quad (4.28)$$

где 1 — единичная матрица размера $n \times n$; $()^{-1}$ — знак обращения матрицы.

Таким образом, дело сводится к обоснованному выбору матрицы.

Теория оптимального управления (например, принцип максимума Понтрягина) дает строгий путь для синтеза системы, если можно четко определить критерий оптимальности в виде некоторого функционала типа (4.1). Отметим, что чаще всего оптимальный синтез ведется в области оригиналов (т. е. для переменных в функции времени). Хотя известны методы оптимального синтеза в изображениях, применяются они редко из-за существенной сложности.

Составим гамильтониан системы

$$H = \bar{Y}^* \bar{P} \bar{Y} + \bar{U}^* \bar{Q} \bar{U} + \bar{\Phi}^* \bar{A} \bar{Y} + \bar{\Phi}^* \bar{B} \bar{U}, \quad (4.29)$$

где $\bar{\Psi}$ — вектор вспомогательных переменных.

$$\bar{\Psi}^* = -\bar{A}^* \bar{\Psi} - 2\bar{P} \bar{Y}, \quad (4.30)$$

причем в выражениях (4.29), (4.30) и далее для краткости зависимость от t для $\bar{Y}$, $\bar{U}$ и $\bar{\Psi}$ опускаем.

Оптимальное управление определится из соотношения

$$\partial H / \partial u_i = 0$$

или

$$2\bar{Q}\bar{U}^* + \bar{B}^* \bar{\Psi} = 0, \quad (4.31)$$

где $*$ — знак оптимальности.

Решая выражение (4.30) совместно с (4.26), можно найти $\bar{\Psi}$ в виде

$$\bar{\Phi} = 2\bar{K}\bar{Y},$$

где $\bar{K}$ — матрица размера $n \times n$.

Тогда из уравнения (4.31)

$$\bar{U}^* = \bar{Q}^{-1} \bar{B}^* \bar{K} \bar{Y}. \quad (4.32)$$

Реальный синтез по изложенной методике значительно сложнее. В частности, для сравнительно простого объекта с тремя входами (т. е. $m=3$) и тремя выходами, если описывать каждый канал первым порядком с запаздыванием, имеем сле-

дующее. При аппроксимации запаздывания первым членом ряда Паде, т. е.

$$e^{-\tau s} \approx \frac{2 - \tau s}{2 + \tau s},$$

получается девять (3×3) передаточных функций второго порядка. Таким образом, общий порядок системы дифференциальных уравнений равен 18, т. е. $n=18$ и размер матриц $\bar{A}$ равен 18×18 , матрицы $\bar{B} - 18 \times 3$, матрицы $Q - 3 \times 3$. Иначе говоря, нужно иметь дело с 711 элементами, т. е. $2 \times 18 \times 18 + 18 \times 3 + 3 \times 3$. Такая размерность задачи требует применения ЭВМ.

Кроме того, матрица коэффициентов регулятора [см. (4.32)]

$$\bar{R} = \bar{Q}^{-1} \bar{B}^* \bar{K}$$

имеет в приведенном примере размер 3×18 (т. е. 54 элемента). В общем, случае ее интерпретация и техническая реализация весьма затруднительны. Однако во многих случаях на основе описанной методики достаточно получить лишь основные свойства системы (каналы регулирования, качество переходных процессов), т. е. оценить приближенное значение элементов матрицы $\bar{R}$ и пренебречь теми элементами, которые существенно (например, в 5—10 раз) меньше наибольших элементов. Во многих случаях это позволяет однозначно определить каналы регулирования. Если же из анализа матрицы $\bar{R}$ получается, что управление существенно зависит от двух или более входов, это означает необходимость многоканального управления (т. е. применения дополнительных связей в канале регулирования).

Выше (см. § 4.2) рассматривался вопрос об устранении взаимного влияния контуров. В более общем виде это сводится к вопросу автономности контуров или формально к требованию диагональности матрицы* передаточных функций замкнутой системы [см. (4.28)]:

$$\bar{W}_{зм} = (1 + \bar{W}_{рм})^{-1} \bar{W}_{рм}, \quad (4.33)$$

где $\bar{W}_{рм}$ — матрица разомкнутой системы.

$$\bar{W}_{рм} = \bar{W} \bar{R}. \quad (4.34)$$

Поскольку 1 — единичная матрица, можно показать, что при диагональности $\bar{W}_{рм}$ матрица $\bar{W}_{зм}$ получается также диагональной.

Пример. Рассмотрим рассиропник (пример, аналогичный приведенному в § 3.6, рис. 3.18), но в несколько упрощенном виде (рис. 4.10). Тем-

* Более точно, эта матрица должна иметь ненулевые элементы, содержащие главные регуляторы и нулевые элементы для дополнительных (корректирующих) каналов. Однако путем перенумерации элементов $\bar{Y}$ и $\bar{U}$ такую матрицу всегда можно привести к диагональной форме.

Матрица регуляторов

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}$$

Каким-либо методом [например, с помощью матрицы Бристоля (см. § 4.1)] выбираем основные регуляторы. Это — регуляторы R_{11} и R_{22} (лучшие динамические свойства, выше коэффициенты передачи). На основе методики, описанной в § 3.1, выбираем типы регуляторов и их уставки. Требуется синтезировать корректирующие устройства R_{12} и R_{21} , чтобы обеспечить автономность контуров системы.

Матрица разомкнутой системы

$$\bar{W}_{\text{рм}} = \bar{W} \bar{R} = \begin{bmatrix} W_{11}R_{11} + W_{12}R_{21} & W_{11}R_{12} + W_{12}R_{22} \\ W_{21}R_{11} + W_{22}R_{21} & W_{21}R_{12} + W_{22}R_{22} \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

Приравнивая нулю диагональные элементы, получим

$$R_{12} = -\frac{W_{12}}{W_{11}} R_{22}; \quad R_{21} = -\frac{W_{21}}{W_{22}} R_{11} \quad (4.37)$$

или с учетом матрицы (4.35)

$$R_{12} = 0,33 \frac{200s + 1}{250s + 1}; \quad R_{21} = 0,67 \frac{50s + 1}{100s + 1}. \quad (4.38)$$

Представим выражения (4.38) в виде

$$R_{12} = K_2 R_{22}; \quad R_{21} = K_1 R_{11}, \quad (4.39)$$

где K_1 , K_2 — передаточные функции, вид которых ясен из выражения (4.36). Тогда

$$\begin{aligned} u_1 &= R_{11}(y_1 - y_{1\text{зад}}) + K_2 R_{22} y_2; \\ u_2 &= R_{22}(y_2 - y_{2\text{зад}}) + K_1 R_{11} y_1. \end{aligned} \quad (4.40)$$

Нетрудно заметить, что вторые члены в (4.40) (т. е. $K_2 R_{22} y_2$ и $K_1 R_{11} y_1$) — это переменные части выхода регуляторов, пропущенные через звенья K_1 и K_2 . Полученная с учетом этого схема автоматизации приведена на рис. 4.10, а ее блок-схема — на рис. 4.11.

При расчете схемы принимаем следующие допущения.

1. Контур стабилизации расходов малонерционны по сравнению с объектом. Их динамические характеристики учтены при расчете основных регуляторов и в виде поправок к передаточным функциям в матрице (4.35).

2. Регулятор R_{22} импульсный, однако предполагается, что его динамическую характеристику можно аппроксимировать так, чтобы существовало преобразование Лапласа в виде передаточной функции $R_{22}(s)$.

3. Запоздывание в датчике плотности включено в динамические характеристики объекта.

С учетом допущений рассчитаем параметры корректирующих устройств. Из выражений (4.38) и (4.39)

$$K_1(s) = 0,67 \frac{50s + 1}{100s + 1}. \quad (4.41)$$

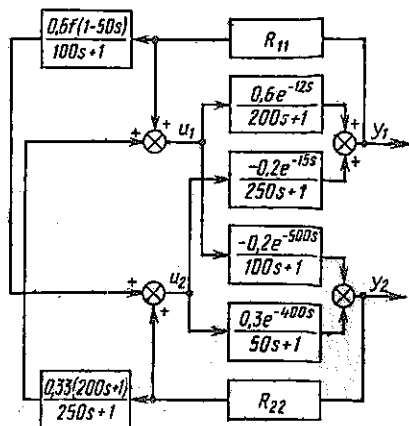


Рис. 4.11. Блок-схема системы автоматического регулирования много-связного объекта

Разложим экспоненту в ряд Паде и ограничимся первым членом. Тогда

$$K_1(s) = 0,67 \frac{50s + 1}{100s + 1} \frac{1 - 50s}{1 + 50s}$$

или

$$K_1(s) = \frac{0,67}{100s + 1} \left(\frac{2}{50s + 1} - 1 \right). \quad (4.42)$$

Аналогично

$$K_2(s) = 0,33 \frac{200s + 1}{250s + 1}. \quad (4.43)$$

Здесь запаздыванием можно пренебречь (3 с по сравнению с постоянной времени 250 с). Тогда

$$K_2(s) = 0,33 \frac{200s + 1}{250s + 1}. \quad (4.44)$$

Устройство 16, например, на пневматической аппаратуре реализуется с помощью двух блоков обратного предварения, сумматора и умножителя на постоянный коэффициент (для реализации можно использовать П-регулятор). Устройство, описываемое уравнением (4.43), реализуется еще проще — блок прямого предварения, блок обратного предварения и умножитель-регулятор (см. рис. 4.10). Выходы устройств, описываемых уравнениями (4.42), (4.43), и регуляторов собираются вместе с помощью сумматоров.

Рассмотрим некоторые вопросы физической реализации систем многосвязного регулирования. Из требования диагональности матрицы $\bar{W}_{pm}$ [см. (4.34)] вытекает, что в передаточные функции корректирующих устройств должны входить отношения передаточных функций по разным каналам объекта [по типу, например, (4.37)]. Во многих случаях (в частности, в рассмотренном примере) реализация таких устройств, в принципе, возможна. Однако встречается и другая ситуация.

Пусть, например, в матрице передаточных функций (4.34) элемент

$$W_{22}(s) = \frac{-0,3e^{-400s}}{(50s + 1)(200s + 1)}. \quad (4.45)$$

Тогда из выражений (4.41) и (4.42) получим

$$K_1(s) 0,67 \frac{50s + 1}{100s + 1} (200s + 1)e^{-100s}, \quad (4.46)$$

т. е. порядок числителя передаточной функции больше порядка знаменателя. Как известно, звенья чистого дифференцирования физически нереализуемы. Однако в данном случае можно ограничиться приближенной реализацией. Наиболее простой путь — пренебречь меньшей постоянной времени в числителе, увеличив большую постоянную времени. В итоге получим

$$K_1(s) \approx 0,67 \frac{250s + 1}{100s + 1} e^{-100s}. \quad (4.47)$$

Другой путь — увеличить порядок знаменателя. Если принять вторую постоянную времени порядка 10% от первой, это внесет незначительную погрешность в динамическую характеристику устройства. Тогда

$$K_1(s) \approx 0,67 \frac{50s + 1}{10s + 1} \frac{200s + 1}{100s + 1} e^{-100s}. \quad (4.48)$$

Такое устройство несколько сложнее, но точнее реализует динамические свойства. К сожалению, встречается и другая ситуация. Пусть та же передаточная функция имеет вид

$$W_{22}(s) = \frac{0,3e^{-600s}}{50s + 1}. \quad (4.49)$$

Тогда передаточная функция

$$K_1(s) = 0,67 \frac{50s + 1}{100s + 1} e^{100s}, \quad (4.50)$$

т. е. имеет место отрицательное запаздывание.

Естественно, такое устройство, в принципе, нереализуемо, так как сигнал на выходе должен измениться раньше, чем сигнал на входе. В данной ситуации никакие приближенные решения не помогут. Обычно если порядок объекта относительно невысок, то причину следует искать в неверном выборе основных каналов. Из приведенного примера видно, что в канале регулирования запаздывание больше ($\tau=600$ с), чем в перекрестном канале ($\tau=500$ с) [см. (4.35) и (4.50)]. Однако если порядок объекта достаточно высок (4×4 и более), причину найти гораздо сложнее.

В любом случае, если предполагается использовать корректирующие развязки по перекрестным каналам, необходимо вести выбор основных каналов регулирования с учетом физической реализуемости корректирующих устройств.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите порядок формулирования требований к автоматической системе.
2. Перечислите инженерные методы рационального синтеза структуры системы.
3. Что такое матрица Бристоля?
4. В каких ситуациях при выборе каналов регулирования следует ориентироваться на коэффициент передачи k_0 , а в каких — на отношение τ_0/T_0 ; на постоянную времени T_0 ?
5. Перечислите простейшие показатели качества регулирования.
6. Что такое степень затухания Ψ ?
7. Какие бывают виды коррекций автоматических систем?
8. Что такое инвариантность?
9. Сформулируйте суть принципа максимума.
10. Что такое гамильтониан?

11. Как достигается автономность контуров многосвязной системы?
12. Какие условия физической реализуемости устройств для инвариантных и автономных систем?

Глава 5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ (ДИСКРЕТНЫХ) ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

§ 5.1. СПЕЦИФИКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Для пищевых производств характерны как непрерывные технологические процессы, так и дискретные (в широком смысле любые не непрерывные). С точки зрения модели процесса важно точно определить, о какой дискретности идет речь и как это учитывать при управлении. Существуют дискретные в пространстве технологии, технологии обработки дискретного продукта и дискретные системы управления.

Дискретные в пространстве технологии. Примером является ситуация, когда технологические агрегаты (иногда однотипные, чаще разные) соединены в цепочку и последовательно обрабатывают каждую порцию продукта. Если продукт входит и выходит из каждого агрегата непрерывно (хотя каждая отдельная частица продукта может находиться в агрегате некоторое время), речь идет о классических непрерывных технологиях. Если же поток продукта время от времени прерывается, технология периодическая.

Дискретная в пространстве модель описывает практически любое пищевое предприятие в целом, подавляющее большинство участков и цехов пищевых производств, а также многие агрегаты (например, экстракторы в масло-жировом производстве, различные тарельчатые дистилляционные и ректификационные колонны). Для разработки систем регулирования данный подход малоинтересен, однако при разработке АСУ ТП он представляется весьма перспективным, так как дает модель, пригодную для оценки технологической ситуации в целом (для цеха, предприятия). Здесь могут найти широкое применение преобразование (по номеру участка), динамическое программирование Беллмана.

Отметим, что прямо противоположным этому подходу является рассмотрение технологического процесса как распределенного непрерывно в пространстве.

Технологии обработки дискретного продукта. Типичный пример — выпуск штучной продукции (консервы, напитки и т. п.). Такого рода дискретные технологии можно рассматривать в не-

скольких аспектах. Как и в предыдущем случае, целесообразно их рассмотреть с позиций задач АСУ ТП для участка, цеха и т. п. В этом аспекте дискретный характер продукта, очевидно, несуществен и более важна пространственная дискретность. Потоки продукта с достаточной точностью можно принимать непрерывными.

В другом аспекте эти технологии следует рассматривать для учетных задач АСУ ТП. Здесь наиболее важен дискретный характер продукта. Такие задачи — предмет отдельного рассмотрения.

Наконец, речь может идти об управлении дискретными процессами и потоками штучных изделий. В относительно простых случаях управление реализуется с помощью жестких автоматов (типа линий розлива или упаковки), когда оборудование выполняет ряд наперед заданных операций. Традиционно такого рода автоматы в пищевой промышленности относятся к составу технологического оборудования.

Можно представить более сложный класс задач, например автоматическая отбраковка изделий. Методологически подобные задачи могут решаться с помощью теории конечных автоматов, сетей Петри, таблиц принятия решений. Техническая реализация таких задач рациональна с помощью микропроцессорной техники.

Другой класс задач — управление дискретной технологией. Например, управление производительностью линии розлива, когда вместимость бутыломоечной машины по бутылкам может использоваться для согласования производительности линии розлива с предыдущим участком. При постановке такие задачи мало отличаются от аналогичных задач непрерывных (в смысле продукта) технологий. Однако дискретный характер продукта часто требует методологически другого подхода к математической модели объекта.

Вместо непрерывного преобразования Лапласа здесь, вероятно, следует пользоваться дискретным преобразованием. Отсчет времени часто требуется не абсолютный, а в тактах прохождения единицы продукта, т. е. в привязке к номеру экземпляра продукта.

Эти два класса задач до настоящего времени для пищевой промышленности практически не решались, хотя и представляются перспективными.

Дискретные системы управления. В этом случае в результате анализа процесса и задач управления разработчик выбирает из каких-либо соображений дискретную (импульсную) систему управления. В настоящее время получает распространение весьма перспективная разновидность дискретных систем — цифровые системы для непосредственного управления от ЭВМ.

Общим для дискретных систем управления является дискретность по времени, т. е. выдача управляющих воздействий через определенные (обычно равные) промежутки времени.

Модели дискретных объектов управления — нелинейные, но в большинстве случаев систему можно описать линейными конечно-разностными уравнениями. Для расчета таких систем широко применяют дискретное преобразование и z -преобразование. При дискретном преобразовании формально комплексный непрерывный оператор s заменяют дискретным оператором q , причем

$$s = q/T_{\tau}, \quad (5.1)$$

где T_{τ} — время квантования (между тактами управления), с.

При z -преобразовании вместо q вводят оператор сдвига на такт z . Формально

$$z = e^q. \quad (5.2)$$

С другой стороны, конечно-разностное уравнение, например, вида

$$y_{i+1} - y_i = -ay_i + bu,$$

где i — номер такта; y_{i+1} , y_i — значения переменной y на двух соседних тактах,

можно представить (в изображении для z -преобразования) в виде

$$z\hat{y} + \hat{y} = -a\hat{y} + bu,$$

где $\wedge$ — признак изображения.

Тогда

$$\hat{y} = \frac{b}{z + 1 + a} \hat{u}.$$

Рассмотрим передаточную функцию объекта первого порядка с запаздыванием [см. (2.22)] с учетом (5.1) и получим

$$W(q) = \frac{k_0}{k_{\tau}q + 1} e^{-k_{\tau}q}, \quad (5.3)$$

где $k_{\tau} = T_0/T_{\kappa}$, $k_{\tau} = \tau_0/T_{\kappa}$.

Выражение (5.2) можно представить в виде

$$q \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{z + 1}{z - 1}. \quad (5.4)$$

Тогда из выражений (5.3) и (5.4), учитывая уравнение (5.2), получим

$$W(z) = \frac{2k_0(z-1)z^{-k_{\tau}}}{k_{\tau}(z+1) + 2(z-1)}$$

или

$$W(z) = \frac{2k_0(z^{-k_{\tau}-1} - z^{-k_{\tau}})}{(k_{\tau} + 2)z + k_{\tau} - 2}. \quad (5.5)$$

Иногда удобнее представить модель объекта в конечно-разностной форме. Тогда, учитывая, что $\hat{y}(z) = W(z)\hat{u}(z)$, получим, переходя к оригиналам:

$$y_{i+1} = \frac{2-k_\tau}{2+k_\tau} y_i + \frac{2k_0}{2+k_\tau} u_{i+1-k_\tau} - \frac{2k_0}{2+k_\tau} u_{i-k_\tau}. \quad (5.6)$$

При цифровой реализации (с помощью ЭВМ) нужно резервировать одну ячейку для y_i и k_τ ячеек (предполагается, что k_τ — целое) для предыстории u_i . На каждом такте по выражению (5.6) вычисляют очередное значение выхода объекта, и предыстория по y и u обновляется.

Анализ передаточных функций вида (5.3) или (5.5) в последние годы хорошо разработан. В принципе, он мало отличается от аналогичного для непрерывного преобразования Лапласа.

Пример. Рассмотрим цепочку из n последовательно работающих агрегатов (экстракторов). Продукт концентрации y_0 попадает в первый агрегат, очищается до концентрации y_1 и поступает во второй агрегат. Аналогичным образом через агрегаты проходит дополнительный ингредиент u_{i0} (u_{11} и т. д.), расход которого является управляющим воздействием. Второе управляющее воздействие — подача теплоты (пара) u_2 — общее для всех агрегатов (реально это не совсем так, но мы принимаем такое допущение).

Таким образом, мы имеем дискретную в пространстве технологию. Рассматриваемый процесс во времени непрерывный, но для наших целей это несущественно. Упрощенная структурная схема управления приведена на рис. 5.1).

Передаточные функции всех агрегатов примем для простоты идентичными. Каждый агрегат описывается (в изображениях) следующими уравнениями:

$$y_i = W_1 y_{i-1} + W_2 u_{i-1} + W_3 u_2; \quad (5.7)$$

$$u_{i,1} = W_4 u_{i-1} + W_5 u_2. \quad (5.8)$$

Представим выражения (5.7) и (5.8) в виде z -преобразования относительно номера агрегата

$$z\hat{y} = W_1 \hat{y} + z y_0 + W_2 \hat{u}_1 + W_3 \hat{u}_2; \quad (5.9)$$

$$z\hat{u}_1 = W_1 \hat{u}_1 + z u_{10} + W_5, \quad (5.10)$$

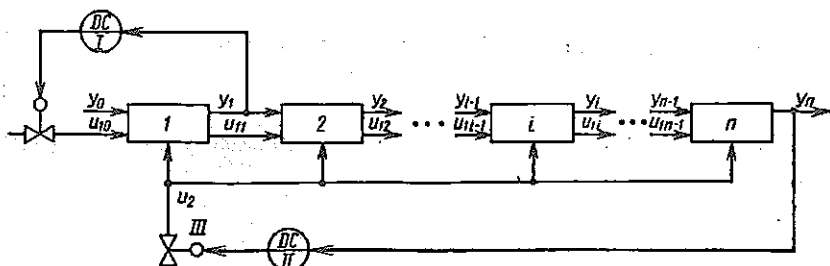


Рис. 5.1. Упрощенная структурная схема управления дискретной в пространстве технологией:

1, 2, ..., i, n — агрегаты; I — регулятор исходной концентрации; II — регулятор выходной концентрации; III — исполнительный механизм

где $\wedge$ — знак дискретного преобразования; y_0, u_{10} — входы в первый агрегат (с точки зрения z -преобразования — это константы, так как не зависят от номера агрегата).

Из выражений (5.9) и (5.10) имеем

$$\hat{y} = \frac{y_0(z - W_4)z + W_2zu_{10} + (W_5W_2 - W_3W_4 + zW_3)\hat{u}_2}{(z - W_1)(z - W_4)}; \quad (5.11)$$

$$\hat{u} = \frac{zu_{10} + W_5\hat{u}_2}{z - W_4}. \quad (5.12)$$

Соотношение (5.11) можно представить в виде

$$\hat{y} = \frac{z}{z - W_1} \left(y_0 - W_3\hat{u}_2 + \frac{W_2W_1}{W_1 - W_4} u_{10} \right) - \frac{W_4W_2}{W_1 - W_4} \frac{z}{z - W_4} u_{10} + \left(\frac{W_5W_2}{W_1 - W_4} \cdot \frac{1}{z - W_1} - \frac{W_5W_2}{W_1 - W_4} \cdot \frac{1}{z - W_4} \right) \hat{u}_2.$$

Тогда, переходя к оригиналам (в смысле z), получим

$$y_n = W_1^n \left(y_0 + \frac{W_2W_1}{W_1 - W_4} u_{10} \right) - \frac{W_4^{n+1}W_2}{W_1 - W_4} u_{10} - \left[\frac{W_1^n - 1}{W_1 - 1} - \frac{W_4^n - 1}{W_4 - 1} \right] \frac{W_5W_2}{W_1 - W_4} u_2 + \frac{W_1^{n+1} - 1}{W_1 - 1} W_3u_2; \quad (5.13)$$

$$u_{n-1} = W_4^{n-1}u_{10} + \frac{1 - W_4^{n-1}}{1 - W_4} W_5u_2. \quad (5.13a)$$

Для удобства анализа перепишем выражение (5.13), выделяя члены с W_1^n и W_4^n :

$$y_n = W_1^n \left[y_0 + \frac{W_2W_1}{W_1 - W_4} u_{10} - \left(\frac{W_5W_2}{W_1 - W_4} - W_3W_1 \right) \frac{u_2}{W_1 - 1} \right] + W_4^n \left[\frac{W_5W_2}{W_4 - 1} u_2 - W_1W_2u_{10} \right] \frac{1}{W_1 - W_4} + \left[\frac{W_5W_2}{(W_1 - 1)(W_1 - W_4)} - \frac{W_5W_2}{(W_4 - 1)(W_1 - W_4)} - \frac{W_3}{W_1 - 1} \right] u_2. \quad (5.14)$$

Таким образом, управляющее воздействие u_1 проходит через достаточно мощные фильтры (W_1^n или W_4^n). Даже если W_1 и W_4 — аperiodические звенья первого порядка, уже при n порядка 4–5 с помощью u_1 , очевидно, практически невозможно скомпенсировать сколько-нибудь высокочастотные возмущения. В отличие от этого u_2 влияет на процесс гораздо быстрее [см. третий член в выражении (5.14)]. В случае, если W_5 и W_3 содержат небольшие запаздывания, в целом динамика для u_2 будет более благоприятной, чем для u_1 . Следовательно, управлять y_n целесообразно с помощью u_2 .

Выясним теперь роль u_1 . Здесь важно отметить характер возмущений по y_0 . Высокочастотные возмущения будут фильтроваться (из-за наличия множителя W_1^n), но постоянные длительные возмущения «пройдут» на y_n .

Если коэффициент передачи для u_2 невелик [так как в третьем члене уравнения (5.14) слагаемые передаточной функции имеют разные знаки], необходимо «дорабатывать» рассогласование с помощью u_1 , в простейшем случае связав u_1 с y_1 . Действительно, положив в уравнении (5.14) $n=1$,

можно видеть, что влияние u_1 на y_1 вполне приемлемо (примерно того же порядка, что и по u_2). В этом случае низкочастотные возмущения по y_0 будут гаситься уже в первом агрегате, а высокочастотные составляющие y_1 отфильтруются процессом.

Отметим, что нами существенно использован только факт дискретности процесса в пространстве. Никакая информация о виде передаточных функций W_1 — W_5 не использована. Важны только порядок и структура объекта в целом.

§ 5.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Существующие два весьма перспективных класса систем управления — адаптивные* и с переменной структурой — первоначально в пищевых производствах применялись преимущественно при управлении периодическими процессами (как более сложными). Однако с развитием техники, особенно вычислительной, они все больше используются и при управлении непрерывными процессами.

Адаптивные системы находят применение в ситуациях, когда динамические характеристики объекта изменяются в 1,5 и более раза. Такого рода изменения могут быть вызваны «дрейфом» свойств объекта во времени (например, загрязнение поверхностей теплообменников), существенной нелинейностью объекта (тогда свойства объекта резко меняются при изменении, например, нагрузки), а также изменением самого характера процесса в объекте (что присуще объектам дискретного или периодического действия).

В последнем случае динамические параметры могут измениться весьма существенно (иногда на порядок и более), что исключает возможность регулирования с помощью простых линейных алгоритмов.

Адаптивные системы традиционно подразделяют на самонастраивающиеся системы и системы с эталонной моделью. Данная классификация, несмотря на некоторую нечеткость, широко применяется в литературе и в данном параграфе. В последние годы появились другие классификации адаптивных систем. Наиболее обоснованная из них предложена в 1984 г. Я. З. Цыпкиным. По этой классификации (рис. 5.2) адаптивные системы подразделяются на следующие виды.

1. Применение алгоритмов идентификации динамических характеристик объекта и расчет на этой основе параметров регулятора. В составе такой системы присутствуют идентификатор и вычислитель. Эти системы называют непрямыми адаптивными.

* Приспосабливающиеся к изменениям характеристик управляемого объекта.

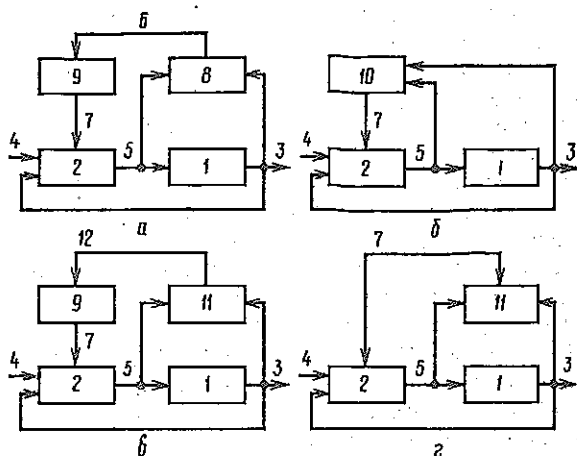


Рис. 5.2. К классификации адаптивных систем:

а — непрямая; *б* — прямая; *в* — непрямая с предсказателем, *г* — прямая с предсказателем; 1 — объект; 2 — регулятор; 3 — регулируемый параметр; 4 — задание; 5 — управление; 6 — параметры объекта; 7 — параметры регулятора; 8 — идентификатор; 9 — вычислитель; 10 — адаптатор; 11 — предсказатель; 12 — параметры объекта

2. Применение алгоритмов адаптации, непосредственно изменяющих параметры регулятора по наблюдениям. Это — прямая адаптивная система.

3. Применение алгоритмов предсказания и порождаемых ими оценок для определения параметров объекта и последующего изменения параметров регулятора. В зависимости от выбора структуры предсказателя получается система с предсказателем либо непрямая, либо прямая.

Все известные адаптивные системы охватываются этой классификацией. Так, большинство систем с самонастройкой относятся к прямым адаптивным системам.

Обычно в прямых адаптивных (самонастраивающихся) системах самонастройка достигается за счет введения в структуру системы какой-либо особенности (элемента, связи), делающей процесс регулирования нечувствительным к изменению одного или нескольких динамических параметров объекта. Наиболее простой пример такого подхода — система с бесконечно большим коэффициентом усиления в прямом контуре (часто за счет введения релейного элемента). В более сложных случаях вводят специальные формирующие фильтры, параметры которых подстраиваются под требуемое качество регулирования. Иногда вместо реле применяют нелинейный элемент с насыщением.

Описанный класс систем является «грубым» обычно только к изменению коэффициента передачи объекта, а также к нелинейностям объекта. Такие системы постоянно должны находиться в автоколебательном режиме.

Примером самонастройки за счет структурных особенностей являются системы с переменной структурой. Самонастройка таких систем в основном достигается за счет организации скользящего режима. Вид переходного процесса полностью или частично определяется линией переключения. Параметры линии переключения обычно нечувствительны к изменению динамических параметров объекта.

Важным классом адаптивных систем являются системы с эталонной моделью. В них подстройка параметров регулятора обеспечивает переходный процесс, близкий к эталонному, который формируется специальной (эталонной) моделью. Эти системы без подстройки параметров эталонной модели относятся к прямым адаптивным. Такой подход целесообразно применять при синтезе следящих систем. Для систем стабилизации (по крайней мере в классическом их виде) эталонный переходный процесс вырождается в постоянную величину (задание) и эталонная модель не нужна (см. пример в § 11.3).

Для непрямых адаптивных систем важную роль играют алгоритмы подстройки модели, т. е. алгоритмы адаптации динамических характеристик. В настоящее время некоторое распространение получили алгоритмы определения динамических характеристик объекта по его частотным характеристикам. Последние определяют путем подачи на вход объекта наряду с основным управляющим воздействием пробного сигнала. Этот метод относительно точен и легко реализуется в цифровых системах.

Недостаток такой системы — наличие в регулируемом параметре дополнительных составляющих из-за воздействия пробного сигнала (обычно эти составляющие синусоидальные) с амплитудой, заметно превосходящей помехи, что, естественно, ухудшает качество регулирования и может свести на нет все преимущества адаптивной системы.

Известен также алгоритм идентификации динамических свойств на основе полиномов Лагера. Модель определяется в виде

$$W_M(s) = \sum_{i=1}^N a_i \frac{\sqrt{2} \alpha (s - \alpha)^i}{(s + \alpha)^{i+1}}, \quad (5.15)$$

где a_i — параметры, подбираемые в процессе настройки.

Достоинство такого подхода — возможность работать с независимыми (ортогональными) составляющими входа, что обеспечивает хорошую сходимость алгоритма. Недостаток — специ-

альный вид модели. Действительно, при $N=2$ получим модель в виде

$$W_m(s) = \frac{k}{(Ts+1)^2} (1-T\beta s) \frac{Ts-1}{Ts+1}, \quad (5.16)$$

где $T=1/\alpha$; $\beta = \frac{a_2 + a_1}{a_2 - a_1}$.

Таким образом, можно представить аппроксимацию запаздывания разложением в ряды Паде и первым порядком модели, т. е.

$$W_m(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau s}, \quad (5.17)$$

где

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1-T\beta s}{Ts+1} \cdot \frac{Ts-1}{Ts+1}. \quad (5.18)$$

Но отношение τ/T при этом не произвольно.

Предполагается также, что алгоритм может обеспечить только хорошее совпадение выходов модели и объекта, но ничего не «говорит» о структуре и параметрах модели в смысле более широкой адекватности.

Довольно широко применяется одношаговый алгоритм адаптации линейной модели статических свойств объекта. Указанный алгоритм исследован Райбманом и Чадеевым, которые показали его оптимальность в смысле сходимости. Суть алгоритма в следующем.

Пример. Пусть модель объекта (N -мерного) описывается уравнением вида

$$y_k = a_{1,k} x_{1,k} + a_{2,k} x_{2,k} + \dots + a_{N,k} x_{N,k}, \quad (5.19)$$

где k — номер шага адаптации (или, что то же, дискретное время); $a_{i,k}$ — коэффициенты модели на k -м шаге ($i=1, 2, \dots, N$); y, x_i — выход и вход объекта соответственно ($i=1, 2, \dots, N$).

Параметры a_k на каждом шаге уточняются следующим образом:

$$a_{i,k+1} = a_{i,k} + R_k x_{i,k}, \quad (5.20)$$

где

$$R_k = \frac{\sum_{j=1}^N a_{j,k} x_{j,k+1}}{\alpha + \sum_{j=1}^N x_{j,k+1}^2},$$

здесь α — параметр настройки при наличии помех.

Достоинствами алгоритма являются его простота вычислений и, как следствие, легкая реализуемость средствами вычис-

лительной техники (при малых затратах памяти и хорошем быстродействии).

Естественным развитием одношагового алгоритма является класс многошаговых алгоритмов. Чаще всего это использование в том или ином виде метода наименьших квадратов. В вычислительном плане эти алгоритмы сложнее одношаговых и обычно чувствительнее к помехам.

Другая ветвь многошаговых алгоритмов — это статистические методы идентификации (см. § 2.2). Достоинством этих методов (в плане применения к адаптивным моделям) является хорошо разработанный математический аппарат, гарантирующий сходимость. Однако в вычислительном плане эти методы слишком громоздки для систем реального времени. К тому же точность оценок остается весьма серьезной проблемой. Оценки корреляционных функций являются достаточно точными только при учете большой предыстории процесса, что, в свою очередь, увеличивает вычислительные трудности.

К статистическим методам следует отнести алгоритмы, базирующиеся на учете спектральных плотностей. Здесь следует выделить направление, когда спектральные плотности определяются по корреляционным функциям, и направление, когда расчет спектральных плотностей ведется непосредственно по реализации процесса. Оба этих направления также малоприменимы для систем реального времени (вычислительные трудности, зависимость точности от длины предыстории).

Регуляторы с переменной структурой обладают адаптивными свойствами. Поскольку этот вид регулирования имеет ряд других полезных особенностей, рассмотрим его более подробно.

Прежде всего, что считать изменением структуры. Во многих случаях речь идет об изменении (как правило, дискретном, часто двухпозиционном) одной из уставок (например, времени изодрома) обычного ПИ-регулятора. В большинстве случаев (в частности, в выпущенных небольшой серией общепромышленных ПИД-регуляторах с переменной структурой) предусмотрено изменение всех трех уставок. Крайний случай такого подхода — когда одно из двух фиксированных значений уставки ноль или бесконечность, т. е. происходит изменение закона регулирования (например, П- и ПИ-).

Дальнейшее развитие этой идеи — переход с линейного закона на позиционный (например, переход с ПИ-закона на релейный). Отметим, однако, что это тоже, по существу, изменение уставок (переход от конечных значений коэффициента передачи и времени изодрома к бесконечно большим).

Наконец, известны многоканальные (в частности, двухканальные) регуляторы с переменной структурой, в которых в

зависимости от ситуации переключается канал регулирования. Именно это и есть регулирование с переменной структурой.

Однако с точки зрения динамических свойств замкнутой системы изменение, вызванное переключением одной из уставок, и переключение канала регулирования приводят качественно (но не количественно) к одним и тем же результатам — динамические характеристики системы описываются двумя разными дифференциальными уравнениями (хотя во многих случаях различие только в одном или нескольких коэффициентах). В пределах интервала между переключениями описываемые системы чаще всего рассматриваются как линейные (с той или иной степенью приближения). Но переключение делает систему в целом существенно нелинейной. Поэтому часто анализируют (и синтезируют) системы с переменной структурой так называемым методом фазовых траекторий (или фазовых портретов) со «сшиванием» фазовых портретов линейных частей по линии переключения.

Во многих случаях (когда фазовые траектории направлены к линии переключения) при этом возникает так называемый скользящий режим. В этом режиме с относительно высокой частотой происходят переключения состояний регулятора, причем движение системы в фазовых координатах уже почти не зависит от параметров линейных частей, а определяется линией переключения. Более того, в ряде случаев специально организуется скользящий режим вдоль выбранной линии переключения, реализующий желаемую траекторию движения системы в фазовых координатах.

Поскольку параметры линии переключения зависят только от настройки переключающего устройства и в широком диапазоне инвариантны к «дрейфу» параметров объекта, получается самонастраивающаяся система регулирования.

Относительная независимость свойств скользящего режима от параметров объекта позволяет реализовать с помощью систем с переменной структурой управления структурно неустойчивыми объектами (например, объектами с астатизмом высокого порядка), обеспечивая при этом заданное достаточно высокое качество регулирования.

Пример. Проиллюстрируем методику синтеза регулятора с переменной структурой методом фазовых траекторий.

Пусть дан объект с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts + 1}. \quad (5.21)$$

Аппроксимируя $e^{-\tau s}$ первым членом ряда Паде, получим

$$W_0(s) = \frac{k(2 - \tau s)}{T\tau s^2 + (2T + T)s + 2} \quad (5.22)$$

или в оригиналах

$$T\tau \ddot{y} + (2T + \tau)\dot{y} + 2y = 2ku - 2k\tau \dot{u}, \quad (5.23)$$

где y — регулируемая переменная; u — переменная управления.

Примем линейную часть в виде П-регулятора с коэффициентом передачи k_y . Изменение структуры заключается в переключении значений k_y (соответственно k_{y1} и k_{y2}).

При y , центрированном относительно задания выхода регулятора u ,

$$u = -k_y y. \quad (5.24)$$

С учетом выражения (5.24) уравнение (5.23) примет вид

$$\ddot{y} + Ay + By = 0, \quad (5.25)$$

где

$$A = \frac{2T + \tau - 2kk_y\tau}{T\tau}; \quad (5.26)$$

$$B = \frac{2 + 2kk_y}{T\tau}. \quad (5.27)$$

Введем фазовые переменные: $x_1 = y$; $x_2 = \dot{y}$. Тогда уравнение (5.25) можно представить в виде системы:

$$\frac{dx_2}{dt} = -Ax_2 - Bx_1; \quad (5.28)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2. \quad (5.29)$$

Дифференциальное уравнение фазовых траекторий системы можно получить делением выражений (5.28) и (5.29):

$$\frac{dx_2}{dx_1} = -A - B \frac{x_1}{x_2}. \quad (5.30)$$

Из теории дифференциальных уравнений известно, что семейство фазовых траекторий содержит две вырожденные (линейные) траектории с уравнениями $x_2 = \alpha_{1.1}x_1$ и $x_2 = \alpha_{2.2}x_1$, причем

$$\alpha_{1,2} = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{A^2/4 - B}. \quad (5.31)$$

Воспользуемся этим фактом для построения фазовых траекторий. Выберем k_{y1} так, чтобы обеспечить приемлемое качество регулирования линейной системы с П-регулятором. Второе значение k_{y2} следует выбрать так, чтобы система была неустойчивой (один положительный корень характеристического уравнения). Конкретно для k_{y1} должно быть $\alpha_{1.1} < 0$ и $\alpha_{1.2} < 0$, а для k_{y2} — $\alpha_{2.1} > 0$ и $\alpha_{2.2} < 0$. Соответствующие фазовые портреты систем приведены на рис. 5.3.

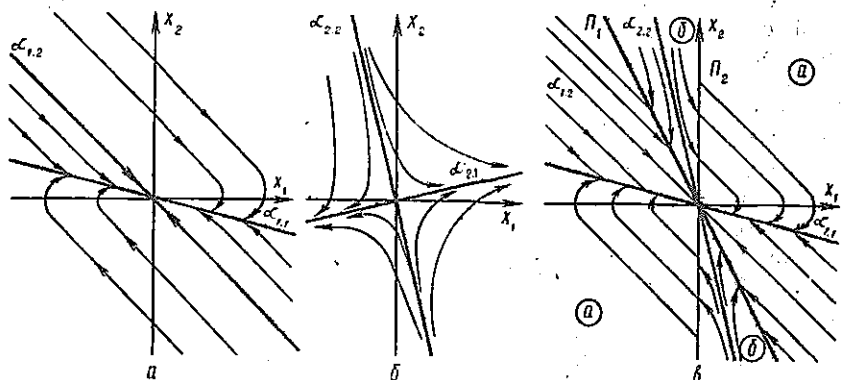


Рис. 5.3. Фазовые портреты системы с регулятором переменной структуры: а — линейной устойчивой; б — линейной неустойчивой; в — с переключением («сшиванием» из а и б; P_1 и P_2 — линии переключения)

Зададим условия переключения в виде

$$\left. \begin{aligned} k_y &= k_{y1} \text{ при } x_1 > 0 \text{ и } x_2 > 0, \\ &\text{или при } x_1 < 0 \text{ и } x_2 < 0, \\ &\text{или при } x_1 + \mu x_2 > 0 \text{ и } x_1 > 0, \\ &\text{или при } x_1 + \mu x_2 < 0 \text{ и } x_1 < 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

В противном случае $k_y = k_{y2}$.

Величина μ задает угловой коэффициент линии переключения (линия P_1 на рис. 5.3, в); вторая линия переключения (P_2 на рис. 5.3, в) совпадает с осью x_2 .

Выражение (5.32) имеет, скорее, логическую или алгоритмическую форму. В таком виде его удобно реализовать программно. Для аппаратной реализации более удобна следующая форма:

$$k_j = \begin{cases} k_{y1} & \text{при } \varepsilon_1 > 0 \text{ или } \varepsilon_2 > 0, \\ k_{y2} & \text{при } \varepsilon_1 < 0 \text{ или } \varepsilon_2 < 0, \end{cases} \quad (5.33)$$

где $\varepsilon_1 = \text{sign}(x_1) \text{sign}(x_2)$;

$\varepsilon_2 = \text{sign}(x_1) + \text{sign}(x_1 + \mu x_2)$;

sign — функция знака,

$\text{sign}(x) = 1 \quad \text{при } x > 0$;

$\text{sign}(x) = 0 \quad \text{при } x = 0$;

$\text{sign}(x) = -1 \quad \text{при } x < 0$.

Приведенный пример иллюстрирует два важных свойства систем с переменной структурой:

1) это возможность получить качественно новые свойства регулирования, принципиально недостижимые в обеих линейных частях. Из рис. 5.3, в видно, что линия переключения P_1 не сов-

падает ни с одной из фазовых траекторий. Организованный на ней скользящий режим обеспечивает монотонный, достаточно быстрый переходный процесс. Меняя параметр настройки μ , можно выбрать желаемые характеристики переходного процесса. Несмотря на то, что в одном из состояний (см. рис. 5.3, б) линейная часть неустойчива, система в целом устойчива;

2) скользящий режим обеспечивает самонастройку системы (что уже отмечалось).

Описанная система пригодна как для управления периодическим, так и непрерывным процессами. Однако непрерывные процессы относительно реже бывают нестационарными (в смысле «дрейфа» параметров) и почти всегда устойчивы. В отличие от этого нестационарность, а часто и структурная неустойчивость характерны для большинства объектов периодического действия. Это и предопределяет преимущественную область применения регулирования с переменной структурой.

§ 5.3. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Исходя из изложенного в главе 4, § 5.1 и 5.2, сравним управление объектом непрерывного действия с управлением периодически работающего объекта (дискретного во времени) и управлением группой непрерывных взаимодействующих объектов (т. е. дискретных в пространстве).

Для непрерывного объекта (пусть достаточно сложного, многосвязного) в большинстве случаев достаточно относительно простых алгоритмов: ПИД- и ПИ-законы управления, простейшие корректирующие устройства типа описанных в § 4.4. При этом действия системы управления достаточно однообразны и, главное, не требуют принятия решений.

Совершенно иначе обстоит дело с дискретными (обоих видов) объектами. Для объекта (агрегата) периодического действия даже в очень простых случаях от системы требуется более «интеллектуальная» деятельность. Например, в точно заданные моменты времени необходимо открыть клапан, проверить, действительно ли он открылся, выдержать заданное время, закрыть этот клапан, открыть другой и т. п. Отметим, что пока речь идет только о жестком автомате, работающем по времени, без регулирования. Однако уже в этом случае от системы требуется предпринять нестандартные действия в случае несрабатывания исполнительного механизма. Часто возможен более сложный случай, когда технология требует обратной связи по ходу процесса.

Если процесс не развивается, как этого требует программа

(пусть даже жесткая), нужно продлить, например, данный этап процесса.

Нестационарность процесса порождает серьезные трудности при регулировании (необходимость адаптации, переменной структуры и т. п.). Для процесса, дискретного в пространстве, — сложности другого рода. Наряду со стабилизацией отдельных параметров необходимо организовать взаимодействие агрегатов, согласовать режимы последовательно работающих агрегатов, распределить нагрузку между параллельно работающими агрегатами и т. п. Иначе говоря, тоже нужно принимать решения.

Таким образом, средства локальной автоматизации могут обеспечить только самый нижний уровень подобных систем. Для принятия более или менее сложных решений нужна вычислительная техника. Приведенные особенности управления дискретными объектами определяют характер задач, решаемых управляющей ЭВМ. Естественно, что роль задач, в том или ином виде формирующих логику поведения системы, существенно возрастает. В относительно простых задачах управления можно ограничиться только принятием решения на основе логических операций.

Очень часто, особенно при управлении периодическими процессами, необходим учет времени, в течение которого длится тот или иной процесс. Поскольку обычно требуется слежение за ходом нескольких асинхронно проходящих процессов, структура комплекса программ, реализующих эту управляющую функцию в ЭВМ, усложняется.

Важной особенностью является относительно более высокий удельный вес (по сравнению с управлением непрерывным процессом) разного рода моделей. Модели (иногда относительно простые, иногда сложные) нужны для принятия решений. Большинство алгоритмов самонастройки и адаптивного управления также пользуется моделями (иногда несколькими). Таким образом, возрастает удельный вес чисто вычислительных функций ЭВМ.

Указанные особенности имеют важное практическое значение при выборе средств вычислительной техники. Так, чисто логическое (хотя, возможно, и с достаточно сложной логикой) управление легко реализуется сравнительно простыми (и дешевыми) микроЭВМ или контроллерами. При этом число управляемых агрегатов ограничивается только возможностями подключения к устройству связи с объектом. Производительность процессора (быстродействие, архитектура, память) не очень существенна.

Необходимость управления во времени (в изложенном выше смысле) выдвигает ряд дополнительных требований к программному обеспечению, но на выбор техники влияет незначительно. К сожалению, самые лучшие операционные системы реаль-

ного времени представляют пользователю очень ограниченный набор средств для управления по времени многими асинхронными процессами. Даже для относительно несложного алгоритма требуется программирование специального диспетчера, обеспечивающего несколько независимых отсчетов времени, синхронизацию программ, реализующих разные этапы управления, и т. п. Структура такого программного обеспечения — отдельный достаточно сложный вопрос.

Наконец, более или менее широкое применение динамических моделей выдвигает существенное требование к выбору техники: необходимость хранения предыстории процесса (в том числе и на время остановок ЭВМ по причине сбоя). Хотя объем памяти для этого относительно невелик, с ним следует считаться. К тому же необходимо предусмотреть для этого долговременную память (энергонезависимое оперативное запоминающее устройство, диски и т. п.).

Рост удельного веса вычислений требует другого подхода к выбору архитектуры процесса.

Во многих случаях производительность микроЭВМ для данной цели недостаточна (из-за низкого быстродействия по вычисленным операциям) и необходим выбор более мощной модели мини-ЭВМ. Усложнение моделей требует также дополнительного объема памяти.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие бывают разновидности дискретных систем?
2. Как классифицируются адаптивные системы?
3. Что такое прямая адаптивная система?
4. За счет чего достигается самонастройка? Приведите один-два примера.
5. Опишите идею регулирования систем с переменной структурой.
6. Что такое линия переключения?
7. За счет чего достигается самонастройка систем с переменной структурой?
8. Каковы особенности применения средств вычислительной техники для управления периодическими процессами?

Глава 6

СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

§ 6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В пищевой промышленности производятся разнообразные продукты питания, но получение их связано с проведением однотипных технологических процессов. Как было показано в § 2.1, существует шесть типовых технологических процессов: ме-

ханические, гидромеханические, тепловые, массообменные, химические и биохимические.

Системам автоматизации типовых технологических процессов присущи особенности, рассматриваемые в соответствующих параграфах настоящей главы. Однако разработка схем автоматизации осуществляется исходя из единых требований и на общих принципах.

Схема автоматизации является техническим документом, отражающим объем автоматизации, функции контроля и управления технологическим процессом и оснащения его средствами измерения, автоматизации и вычислительной техники.

Схема автоматизации позволяет реализовать функции управления технологическим объектом. Для каждого технологического объекта автоматизации или линии должно быть обеспечено получение с заданными свойствами полуфабриката или готового продукта. Так, в процессе перемешивания, когда на входы установки подается ряд компонентов с заданными свойствами (сырье), на выходе после выполнения процесса получают заданный готовый продукт или полуфабрикат. Таким образом, каждый из ТОУ характеризуется необходимостью выполнения определенных режимов обработки, в результате которых и будут получены заданные выходные продукты.

Любая схема автоматизации включает реализацию следующих элементов управления:

- 1) получение информации о состоянии объекта путем измерения выходной переменной и определения (задания) требований, предъявляемых к ее значениям;
- 2) обработка информации о состоянии выходной переменной и сравнение полученного результата с заданием;
- 3) принятие решений об изменении состояния объекта и выработка законов управления;
- 4) отработка исполнительными органами воздействия на объект в соответствии с выработанными законами управления.

В пищевой промышленности происходит непрерывное совершенствование ТОУ, применяются все более совершенные технологии и оборудование, многие процессы переводятся на непрерывные схемы работы, механизмируются отдельные операции, конструируются новые машины и агрегаты, создаются поточные производственные линии. Все это способствует созданию более совершенных схем автоматизации.

В настоящее время многие процессы в пищевой промышленности еще не автоматизируются из-за отсутствия некоторых датчиков и приборов контроля качества, которые в потоке определяли бы количественные и качественные изменения, происходящие в сырье в процессе его переработки. Отечественная промышленность выпускает разнообразные датчики и приборы

автоматического контроля, однако одни из них непригодны для объектов пищевой промышленности, а другие требуют проведения исследований применимости, в результате которых может быть решен вопрос об использовании их в условиях пищевых производств. Вместе с тем в схемах автоматизации применяются многие приборы, выпускаемые промышленностью для регулирования температуры, давления, уровня, расхода и других режимных параметров технологических процессов.

Для получения первичной информации и определения постоянно меняющегося агрегатного состояния контролируемых веществ в отрасли применяются специально разработанные аналитические измерительные приборы и датчики. Проведенные исследования и результаты анализа состояния измерений на предприятиях отрасли показали, что необходимо разработать и освоить в производстве свыше 200 типов специальных приборов, приборно-аналитических комплексов и различных датчиков.

В настоящее время широкое распространение находят экспресс-анализаторы с аналоговыми или цифровыми стандартными выходными устройствами, которые могут передавать информацию в нужной форме в управляющие вычислительные устройства.

Многочисленные исследования типовых процессов в пищевых подотраслях позволили создать рациональные системы локальной автоматизации, являющиеся основой при построении схем автоматизации. Так, для пищевой промышленности характерно применение одноконтурных автоматических стабилизирующих систем, автоматических систем каскадного регулирования, систем статической оптимизации и т. д.

Многообразие применяемых схем автоматизации определяется свойствами ТОО и применяемыми техническими средствами автоматизации. В настоящее время широко применяются регулирующие микропроцессорные контроллеры (ремиконт), логические микропроцессорные контроллеры (ломиконт) и другая управляющая вычислительная и микропроцессорная техника.

На схеме автоматизации все средства измерения и автоматизации изображаются условными обозначениями по ГОСТ 21.404—85 (см. приложение 1). При разработке схем автоматизации в соответствии с ГОСТом принята система буквенных обозначений контролируемых величин и функциональных признаков средств контроля и управления, как было показано на рис. 1.1.

Приборы и средства автоматизации и их элементы, встраиваемые в оборудование и коммуникации или механически связанные с ними, изображают на схеме в непосредственной близости от оборудования. Приборы и средства, расположенные на щитах и пультах, показывают в прямоугольниках, изображаю-

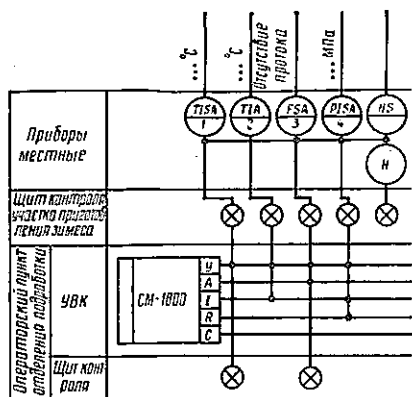


Рис. 6.1. Фрагмент оформления схемы автоматизации, определяющей оснащение объекта местными приборами и ЭВМ

щих щиты и пульты. В каждом прямоугольнике с левой стороны приводят его наименование: «Приборы местные», «Щит управления». Располагают их в нижней части поля чертежа в одном или нескольких горизонтальных рядах в соответствии с иерархией управления.

Приборы и средства автоматизации, которые расположены вне щитов и конструктивно не связаны непосредственно с оборудованием, показывают в прямоугольнике «Приборы местные».

Всем приборам и средствам автоматизации, изображенным на схеме, присваиваются позиционные обозначения. Они однозначно определяют тип устройства и место его установки. Позиционные обозначения приборов и средств автоматизации состоят из двух частей: цифрового обозначения, присваиваемого комплекту, и буквенного обозначения, присваиваемого отдельным элементам, входящим в комплект. Пример изображения на схеме автоматизации щитов и пультов контроля и пунктов управления, оборудованных управляющей вычислительной техникой, приведен на рис. 6.1.

Слева от изображения технических средств, расположенных в специальных операторских помещениях и пунктах управления, в специально отведенных графах помещают поясняющие надписи, отражающие территориальное размещение комплекса технических средств и их обобщенное функциональное назначение. Например: «Операторский пункт отделения подработки». Графическое изображение управляющего вычислительного комплекса (УВК) дополняют буквенными обозначениями укрупненных функций, выполняемых комплексом. Для обозначения функций используют прописные буквы латинского алфавита, принятые по ГОСТу: *У* — вычислительные функции, *I* — показание, *R* — регистрация, *A* — сигнализация, *C* — регулирование, управление. Для обозначения функций оптимального управления и расчета параметров рекомендуется использовать резервные буквы *O* и *Z* соответственно.

§ 6.2. СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На перерабатывающих предприятиях продукция растениеводства в начальных стадиях процесса подвергается различным видам обработки на основе механических воздействий: измельчение путем дробления, резки, протирание, сортирование, прессование, отжим жидкостей из твердых материалов и т. д. Эти процессы осуществляются на энергоёмком оборудовании: дробилках, терочных, прессовых и сортировочных машинах, транспортирующих механизмах и др. Автоматизация этих процессов в основном сводится к управлению электроприводами соответствующих механизмов.

На участках механической и гидромеханической обработки широко применяются поточно-транспортные системы (ПТС) с конвейерами, нориями и другими механизмами. Наряду с ПТС находят применение системы пневмо- и гидротранспорта (см., например, схему автоматизации тракта подачи сахарной свеклы, приведенную на рис. 1.1).

Автоматизация обрушивания и прессования маслосемян. Приведенная на рис. 6.2 схема автоматизации обеспечивает автоматическую стабилизацию загрузки оборудования рушально-веечного и прессового отделений.

Схема автоматизации включает автоматическую систему регулирования загрузки прессового отделения; автоматическую систему регулирования загрузки измельчителей.

Задачей системы автоматического регулирования загрузки прессового отделения является согласование нагрузки рушально-веечного и прессового отделений, которое реализуется путем стабилизации уровня в бункере для мятки IV перераспределением нагрузок, путем вращения задвижек между конечной и предыдущей жаровнями V-1, V-2.

Автоматическая система регулирования загрузки пятивалцовых измельчителей I-1B—I-11B решает задачу равномерного распределения поступления ядра после семенорешеток на параллельно работающие измельчители в зависимости от их нагрузки (определяемой измерением силы тока в обмотках электродвигателей), предотвращает завалы и облегчает работу транспортных механизмов, что в итоге резко повышает производительность оборудования и снижает потери сырья.

Система автоматизации построена на базе регулирующего микропроцессорного контроллера (ремиконта), трансформаторов силы тока и напряжения с преобразователями аналоговых сигналов соответственно тока и напряжения (унифицированный токовый сигнал 0—5 мА, сигналы напряжения 0,5 В), а также

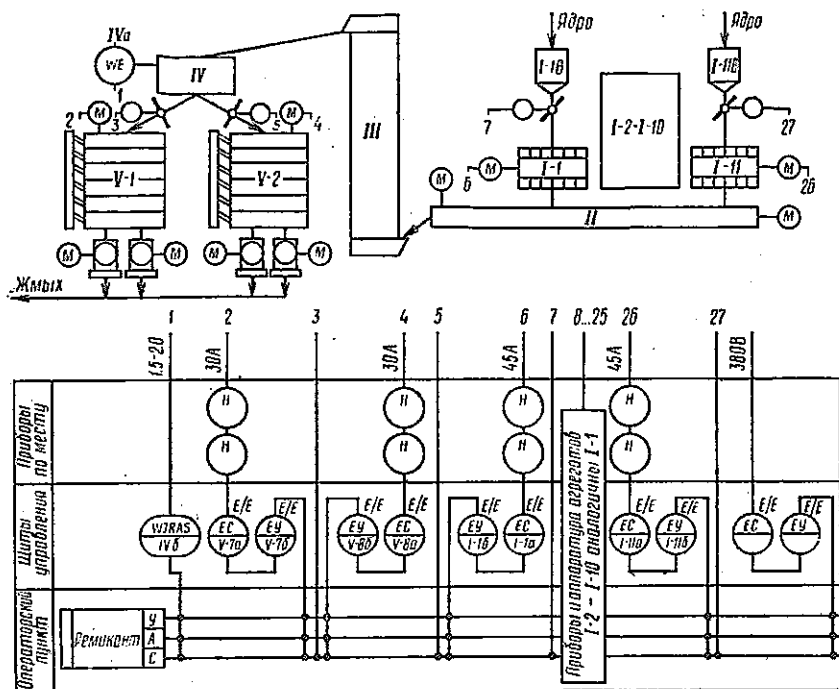


Рис. 6.2. Схема автоматизации рушально-веечного и прессового отделений: I-1B, I-1IB — бункеры для ядра с задвижками и исполнительными механизмами; I-1— I-11 — питаельные измельчители; II — шнек мятки; III — нория; IV — бункер для мятки; V-1—V-2 — шестичастные жаровни

комплекта тензодатчиков с аналого-цифровым преобразователем (0—5 мА).

Микропроцессорный регулирующий микроконтроллер осуществляет формирование закона регулирования по сигналу, поступающему от комплекта трех тензодатчиков IVa, которые установлены под бункером с мяткой, и характеризующему скорость прохождения мятки в бункере ($dH/d\tau$) от верхнего до нижнего рабочего уровней. В зависимости от активной мощности, потребляемой приводом жаровен V-1 и V-2 (преобразованные сигналы тока и напряжения), микроконтроллер производит перераспределение мятки между задвижками, установленными на желобах мятки.

Поступление мятки в бункер через норию III также регулируется с помощью ремиконта, формирующего закон регулирования в зависимости от нагрузок одиннадцати пятизальцовых измельчителей (I-1—I-11).

Управление пятивальцовыми измельчителями осуществляется с учетом значений транспортных запаздываний путем ввода в ремиконт сигнала предупреждения по уровню мятки в бункере IV на основании работы логического устройства ремиконта, изменяющего нагрузку вальцовых измельчителей.

При повышении скорости нарастания уровня в бункере с

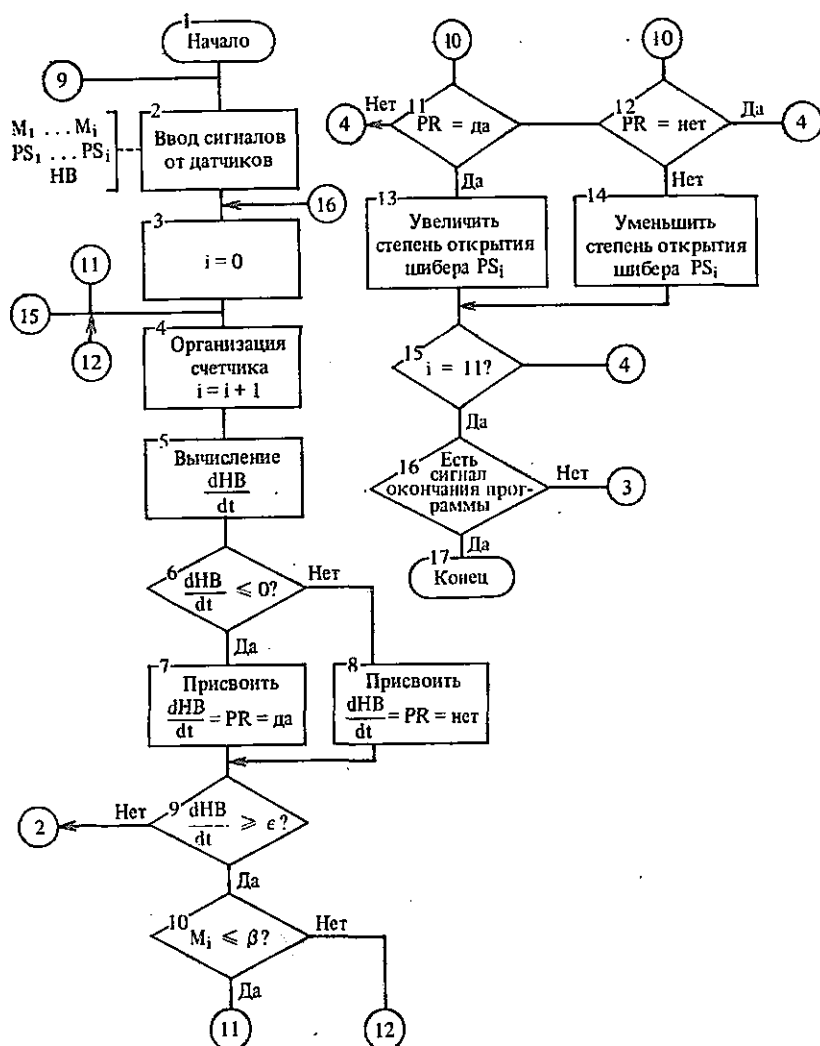


Рис. 6.3. Блок-схема алгоритма управления производительностью рушально-веечного и прессового отделений

мяткой IV свыше заранее заданного значения сигнал предварения поступает на вход логического устройства, которое путем анализа нагрузок измельчителей определяет измельчитель с наименьшей нагрузкой и увеличивает подачу ядра в этот измельчитель (измельчители). В случае уменьшения скорости нарастания уровня в бункере с мяткой логическое устройство выбирает вальцовый измельчитель с максимальной нагрузкой, закрывая на нем заслонку. В аварийном случае при недопустимом изменении уровня в бункере происходит полное отключение измельчителей.

На рис. 6.3 приведена блок-схема алгоритма управления производительностью рушально-веечного и прессового отделений, реализуемого комплексом технических средств, примененных в схеме автоматизации (см. рис. 6.2).

В алгоритме приняты следующие условные обозначения: M_i — значение нагрузки i -го вальцового измельчителя ($i=1, \dots, 11$); PS_i — степень открытия шиберов подачи сырья на i -й вальцовый измельчитель; $HВ$ — уровень мятки в бункере, из которого она подается в две последние жаровни (по ходу сырья); ε — заданное значение скорости изменения уровня сырья в бункере мятки; β — заданное значение нагрузки вальцового измельчителя.

Ниже приведено описание блок-схемы алгоритма.

Номер блока	Выполняемая операция
1	Начало работы
2	Ввод сигналов от датчиков (после опроса и первичной обработки)
3	Начальные условия $i=0$
4	Организация счетчика числа вальцовых измельчителей
5	Вычисление скорости изменения уровня сырья в бункере для мятки
6	Определение знака изменения скорости. Если уровень уменьшается, то переход на блок 7, если увеличивается, переход на блок 8
7	Если производная $\frac{dHB}{dt} \leq 0$, присвоить ей значение $PR=$ да
8	Если производная $\frac{dHB}{dt} > 0$, присвоить ей значение $PR=$ нет
9	Сравнение абсолютного значения скорости изменения уровня с заданным значением ε . Если скорость больше либо равна заданному значению, то переход на блок 10. Если скорость меньше ε , то ввод информации продолжают (переход на блок 2)

Номер блока	Выполняемая операция
10	Проверка нагрузки i -го вальцового измельчителя. Если нагрузка меньше заданного значения β и проверяется ветвь $PR=$ да, то через блок 11 переходят на блок 13. Если нагрузка больше β , то через блок 12 переходят на блок 14
11, 12	Определение, по какой ветви осуществляется проверка (отрицательного либо положительного значения скорости изменения уровня сырья в бункере для мятки)
13	Увеличение степени открытия шибер подачи сырья на i -й вальцовый измельчитель, если $\frac{dHB}{dt} \geq \varepsilon$ и $M_i \leq \beta$. Если $M > \beta$, то переходят на операцию проверки $(i+1)$ -го вальцового измельчителя
14	Уменьшение степени открытия шибер подачи сырья на i -й вальцовый измельчитель, если $\frac{dHB}{dt} > 0$ и $M_i > \beta$. Если $M_i \leq \beta$, то переходят на операцию проверки $(i+1)$ -го вальцового измельчителя (на блок 4)
15	Определение условий, все ли вальцовые измельчители проверены по нагрузке. Если нет, то переходят на блок 4. Если да — на блок 16
16	Если есть сигнал окончания программы, то конец программы, если нет, то сброс счетчика i и продолжение работы программы по следующему циклу
17	Конец работы программы

Автоматизация бестарного хранения муки. Склад бестарного хранения муки (рис. 6.4) оснащен силосами I для приема и хранения муки (как правило, не менее двух групп), просеивательными линиями $VI-XII$ (не менее двух) и бункерами XV , из которых мука затем подается непосредственно в производство.

Транспортирование муки из силосов к просеивательным линиям и от последних в бункеры осуществляется аэрозольтранспортом. Набор маршрута транспортирования выполняется с помощью переключателей V .

На схеме условно в прямоугольниках представлены вторая группа силосов II и вторая просеивательная линия, приборы и средства автоматизации для которых аналогичны первым. В схеме предусмотрено автоматическое, дистанционное автоматизированное либо ручное управление процессом заполнения бункеров.

В режиме автоматического управления заполнение бункеров осуществляется автоматически из выбранного заранее оператором силоса в порядке поступления сигналов об опорожнении бункеров. Алгоритм заполнения бункеров может быть и иным, например с приоритетом того или иного бункера.

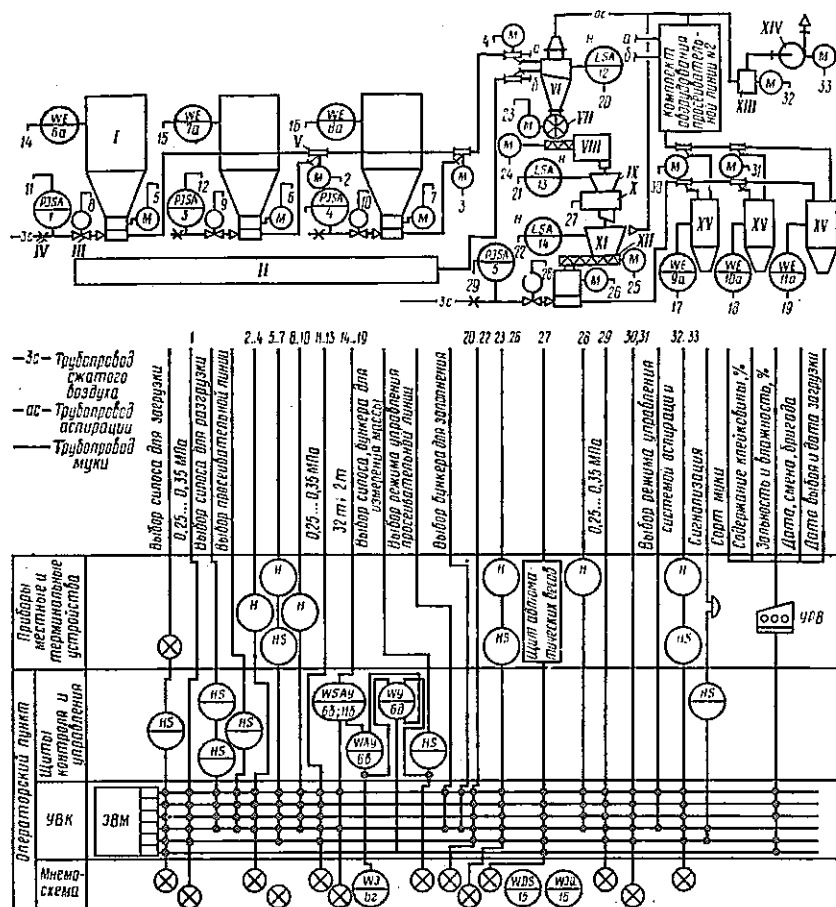


Рис. 6.4. Схема автоматизации склада безтарного хранения муки:
 1—II — две группы силосов; III — электромагнитные вентили; IV — звуковые сопла; V — переключатели; VI—XII — просеивательные линии; XIII—XIV — аспирационная система; XV — производственные бункеры

В режиме дистанционного автоматизированного управления оператор выбирает бункер для заполнения и подает команду на включение механизмов транспортной линии.

Измерение массы муки в силосах и бункерах и выдача дискретных сигналов о достижении заданных минимальных и максимальных значений массы муки в них осуществляются цифровой электронной тензOMETрической системой (66—116, 6а, 6д) в комплекте с тензOMETрическими датчиками (6а—11а).

Информация от этой системы, поступающая в ЭВМ, позволяет осуществить учет хранящейся и расходуемой муки.

Для транспортирования муки с помощью электромагнитных вентилей *III* к питателям подается сжатый воздух. Перед вентилями устанавливаются звуковые сопла *IV*, стабилизирующие расход воздуха в пределах расчетного значения независимо от того, транспортируется мука или производится продувка материалопроводов.

После сопел электроконтактными манометрами (2—5) измеряется давление воздуха перед вентилями. При открытом вентиле и чистом материалопроводе давление минимальное, что разрешает включение питателя и транспортирование муки. При повышении давления воздуха, забитом материалопроводе и закрытом вентиле — давление максимальное. При этом работа питателя запрещается. Таким образом, осуществляется защита от завала материалопроводов.

Защита от переполнения циклона-отделителя *VI*, надвесовой *IX* и подвесовой *XI* емкостей осуществляется по команде от сигнализаторов уровня муки (12—14), контролирующих их переполнение. При аварийном состоянии любого из механизмов все предыдущие механизмы останавливаются, материалопроводы продуваются.

При заполнении бункера до заданного значения отключается работавший подсилосный питатель, продукт из материалопроводов и механизмов дорабатывается, затем осуществляется обязательная продувка материалопроводов с последующим отключением подачи сжатого воздуха, аспирационной системы *XIII*, *XIV* и возвратом переключателей материалопроводов в исходное положение.

С помощью устройства ручного ввода (УРВ) в память ЭВМ вводятся необходимые качественные показатели муки, загружаемой в тот или иной силос, что позволяет своевременно и быстро получать информацию о качестве поступающей муки, вносить необходимые коррективы при ведении технологического процесса и выдавать задания на суточное производство.

Указанные задачи решаются ЭВМ с помощью двух алгоритмов — алгоритма выбора загруженного силоса при приемке муки и алгоритма подсортировки, позволяющих осуществлять целенаправленное управление качеством поступающей муки.

Автоматизация хранения зерна. В своем развитии автоматизация элеваторов прошла ряд этапов от дистанционного управления отдельными машинами и механизмами до систем автоматизации, в которых используют ЭВМ. Несмотря на существенные изменения как в уровне автоматизации, так и в объеме охваченных ею процессов, неизменным остался основной прин-

цип: централизация оперативного управления, при которой управление осуществляется диспетчером.

Технологические процессы на элеваторах в достаточной степени разнообразны и характеризуются как периодичностью протекания (приемно-отпускные транспортные операции), так и непрерывностью его (внутренние перемещения зерна*, очистка, сушка). Для элеваторов характерно сочетание процессов механических, тепловых и микробиологических, интеграции и разделения смеси, учетных операций.

Элеваторы в зависимости от назначения могут быть либо самостоятельными предприятиями (хлебоприемные, базисные, перевалочные, фондовые, портовые), либо входить в состав комбинатов и объединений (мельничных и масло-жировых комбинатов, пивоваренных и комбикормовых заводов); зачастую функции элеваторов совмещаются. Внешняя и внутренняя работа элеватора как многофазной многоканальной системы массового обслуживания направлена на удовлетворение поступающих требований на обслуживание и обеспечение сохранности зерна.

Задачей автоматизированного управления является возможное сокращение времени обслуживания требований. Это находит отражение в стремлении обеспечить оптимальное время обработки 1 т зерна при условии совмещения технологических операций и соблюдении требований сохранности, т. е.

$$\sum_{i=1}^k \Delta t_i \rightarrow \min \text{ при } t_i \in (0, T), \quad (6.1)$$

где $(0, T)$ — рассматриваемый интервал времени (например, сутки, смена); i — порядковый номер операции в интервале $(0, T)$; k — порядковый номер последней в интервале $(0, T)$ технологической операции; Δt_i — разность между фактическим (t_i) и нормированным (t_i^*) значениями времени обработки 1 т зерна ($\Delta t_i = t_i - t_i^*$).

В соответствии с местом, занимаемым элеватором в производственной структуре, система автоматизации элеватора может быть самостоятельной или входить в систему автоматизации более высокого уровня, но функциональная структура системы автоматизации элеватора остается практически неизменной.

Система автоматизации элеватора является многоуровневой иерархической системой, в которой каждый следующий более высокий уровень состоит из систем, характеризующихся более сложными алгоритмами функционирования. Принятие решений по оперативному управлению осуществляет диспетчер, несущий всю полноту ответственности за качество ведения технологических процессов. Вследствие специфичности и территориальной

* Здесь и далее под «зерном» понимаются собственно зерно, семена, солод и т. п.

разобщенности погрузочно-разгрузочных операций ими руководит оператор, подчиняющийся диспетчеру. Существенную роль в управлении играет лаборатория технoхимического контроля, которая из-за отсутствия ряда датчиков и анализаторов обеспечивает диспетчера и систему автоматизации элеватора информацией о качественных показателях зерна.

На рис. 6.5 представлена схема автоматизации элеватора с использованием ЭВМ, предусматривающая диспетчерское автоматизированное управление всеми производственными операциями (для простоты показан маршрут одной нории IV).

Транспортные механизмы (нория IV, ленточные конвейеры I) оснащаются реле скорости с датчиками скорости (1а—4а), контролирующими работу механизмов, проскальзывание и обрыв ленты. Разгрузочная тележка III надсилосного конвейера оснащена конечными выключателями, контролирующими места остановки тележки, а также крайние положения тележки при движении вперед и назад (8—10). В рукавах тележки размещены электроприводные задвижки (23-1, 24-1), управляемые электроприводами. Подсилосные задвижки оснащены электроприводами с реостатом обратной связи (33-2—35-2), который позволяет диспетчеру контролировать степень открытия задвижки по указателю положения, размещенному на пульте (36).

Уровень зерна в емкостях контролируют с помощью датчиков (11—22). В башмаках и головках норий контролируют подпор зерна (5а, 6а).

Управление всеми операциями с зерном осуществляется диспетчером с пульта управления и сигнализации, на котором расположены следующие аппараты: переключатель выбора направления высыпания зерна из нории; переключатель выбора заполняемого силоса (места остановки тележки); переключатель выбора заполняемого бункера; переключатель выбора подсилосных задвижек и задвижек на бункерах, предназначенных для приема зерна с железной дороги; кнопки управления; приборы контроля нагрузки нории и степени открытия задвижек. Здесь же расположена мнемоническая схема технологического процесса со встроенными лампами сигнализации. Основные информационные сигналы передаются на вычислительную машину предприятия (см. также § 11.2).

Схема автоматизации позволяет осуществить выбор и пуск транспортных и аспирационных механизмов, участвующих в маршруте, а также заблокированное включение механизмов в направлении, противоположном движению продукта; останов любого автоматически работающего маршрута с пульта диспетчера; останов механизмов аспирационных сетей с выдержкой времени после останова транспортных маршрутов; останов любого транспортного механизма при возникновении аварийной

Рис. 6.5. Схема автоматизации поточно-транспортной системы элеватора:
 I — ленточные конвейеры; II — вентилятор аспирации; III — разгрузочная тележка;
 IV — порция; V — цепной конвейер; VI — циклон; VII — силосы; VIII, IX — производ-
 ственные бункеры

ситуации; дистанционное управление запорными механизмами; автоматический контроль заполнения и опорожнения емкостей элеватора, загрузки транспортных механизмов, проскальзыва- ния и обрыва лент; включение звуковой предупредительной сигнализации; сигнализацию работы либо аварии всех транс- портных механизмов.

Работа транспортных механизмов, положение запорных и направляющих механизмов сигнализируется только при участии

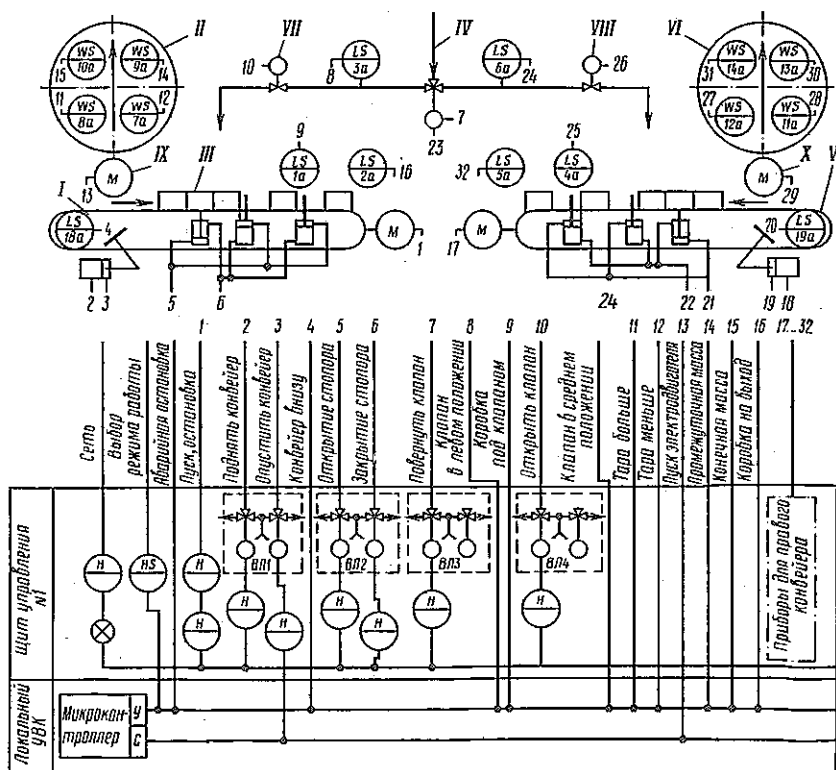


Рис. 6.6. Схема автоматизации фасования наливного маргарина:

I, V — пластинчато-ленточные конвейеры; II, VI — весоизмерительные устройства; III — коробка; IV — трехходовой регулирующий клапан; VII, VIII — наполняющие клапаны; IX, X — электродвигатели

их в работающих маршрутах. Аварийное отключение названных механизмов сопровождается переходом работы ламп на мигающую сигнализацию.

Автоматизация фасования наливного маргарина в короба. Фасование наливного маргарина производится автоматом по принципу гравиметрического заполнения картонных коробов вместимостью 20 кг (рис. 6.6).

Цикл рабочих операций автомата включает подачу пустых коробов *III* на весоизмерительные устройства *II*, *VI* с последующим взвешиванием их; заполнение короба до 95% заданной массы; точное заполнение до значения конечной массы и вывод короба с продуктом из-под наполняющего клапана *VII*.

Короба подаются на заполнение двумя пластинчато-ленточными конвейерами *I*, *V* (левым и правым), каждый из которых оборудован механизмом для выпуска короба. Оба конвейера опираются на пневматически управляемые подъемные механизмы. Два наполняющих клапана *VII*, *VIII*, находящиеся выше платформы взвешивающего устройства, присоединяются к трехходовому регулирующему клапану *IV*, общему для обеих сторон.

Работа системы управления в автоматическом режиме осуществляется следующим образом. Левый конвейер опускается, оставляя пустой короб на левосторонней платформе взвешивания. При этом срабатывает узел автоматической тарировки нуля массы тары (рис. 6.7).

Положение конвейера определяется датчиками *18a* (*19a*), сигналы которых поступают на микроконтроллер (см. рис. 6.6). В результате происходит взвешивание пустого короба, что вызывает отклонение стрелки указателя массы (передаваемое датчиками *7a*, *8a*) в положительную сторону, если масса пустого короба больше установленной, или в отрицательную, если — меньше. Электродвигатель *IX* (*X*) включается и вращается в соответствующую сторону до достижения нуля тары, после чего он выключается и включается тормоз. Аналогичные действия выполняются на правом конвейере.

При наличии пустых коробов и готовности линии наполняющий клапан *VII* открывается, и продукт поступает в короб с максимальным расходом. Стрелка указателя массы правого индикатора (*9a*) поворачивается вокруг шкалы, пока не достигнет 95% конечной массы. В этот момент клапан, регулирующий поток, поворачивается к центральной позиции, тем самым направляя приблизительно 50% потока продукта к левому клапану. Продукт поступает в правый и левый короба одновременно. При достижении стрелкой указателя массы на правом индикаторе конечного значения (*10a*) левый наполняющий клапан закроется, а регулирующий клапан потока *IV* завершит

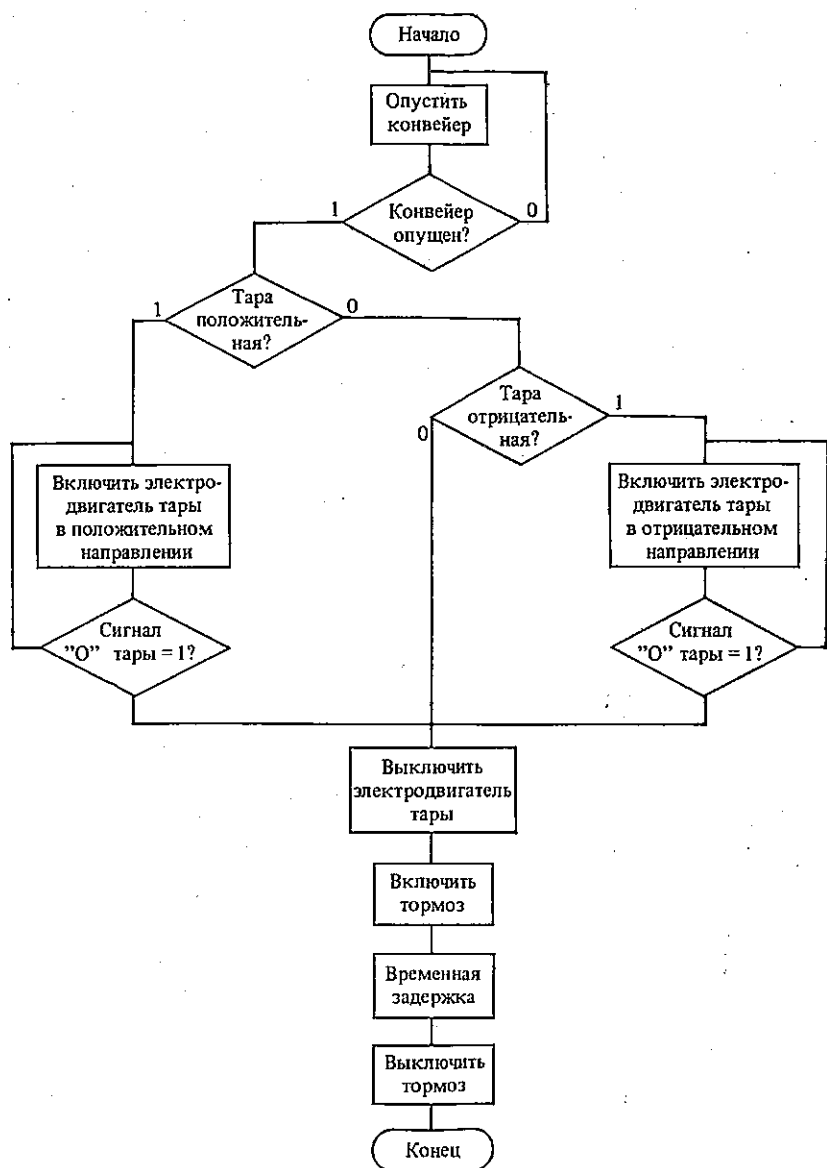


Рис. 6.7. Блок-схема алгоритма узла автоматической тарировки нуля массы тары

свое вращение к правой стороне, направляя полный поток продукта к правому наполняющему клапану. Одновременно левый конвейер поднимается, и наполненный короб продвигается вперед. Во время выполнения описанных операций на правой стороне происходит наполнение короба до максимальной массы. Когда стрелка указателя массы на правом индикаторе достигнет конечного значения, правый наполняющий клапан *VIII* закроется, а регулирующий клапан потока достигнет левого крайнего положения, направляя полный поток продукта к левому *VII* наполняющему клапану. Далее автоматический цикл повторяется в непрерывном режиме при условии подачи продукта и наличии пустых коробов.

§ 6.3. СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Нагревание, охлаждение, пастеризация и стерилизация пищевых продуктов осуществляются в разного вида теплообменных аппаратах. В зависимости от их конструктивного исполнения различают следующие виды поверхностных теплообменников: трубчатые, пластинчатые, спиральные, аппараты с рубашкой и оребренной поверхностью, пароконтактные подогреватели. Выбор того или иного типа теплообменного аппарата обуславливается определенным тепловым процессом, а также эффективностью протекания процесса в аппарате. В качестве теплоносителей в них используются горячая вода, водяной пар, горячий воздух и др., а также отработанный пар паровых турбин и вторичный пар выпарных установок.

Благодаря надежности и компактности широкое распространение получили трубчатые подогреватели. В них одна из сред движется по трубам, а теплоноситель — в межтрубном пространстве. Для автоматизации трубчатых подогревателей применяют термопреобразователи сопротивления. Для предотвращения перегрева среды датчик устанавливают непосредственно в теплообменнике перед выходом продукта. В качестве регуляторов используют электронные мосты либо микроконтроллеры в комплекте с панелью дистанционного управления. Управляющий сигнал поступает на регулирующий клапан, установленный на трубопроводе подачи теплоносителя в подогреватель, изменяя расход теплоносителя.

В ряде случаев нагревание продукта производится открытым паром. Пар вводится через барботер непосредственно в нагреваемую среду. В качестве датчика температуры в этих случаях применяют dilatометрический датчик со вторичным прибором и станцией управления. Регулирование осуществляется пропорционально-интегральным регулятором, выходной сигнал которого поступает на клапан, изменяющий расход пара. Для

предотвращения перегрева продукта в схеме предусмотрена блокировка подачи пара в барботер при низком уровне продукта в емкости. По достижении минимального уровня срабатывает сигнальное устройство и командный сигнал поступает на реле переключения, прекращая подачу управляющего сигнала от регулятора температуры; через реле переключения проходит командный сигнал на закрытие клапана, установленного на подаче пара в барботер.

В целях обеззараживания жидкости в пищевом производстве применяют пароконтактные подогреватели. Жидкость под давлением распыляется в нагревателе и мгновенно обрабатывается паром. Такие подогреватели нашли широкое применение в свеклосахарном производстве при обработке жомопрессовой воды.

Автоматизация пастеризации и стерилизации. Многие пищевые продукты (овощные и плодовоовощные консервы, овощные и фруктовые соки и др.) являются богатой питательной средой для микроорганизмов. В целях замедления или полного подавления жизнедеятельности микроорганизмов такие продукты подвергают тепловой обработке. Тепловая обработка продуктов, происходящая при температуре до 100°C , называется пастеризацией. Такой обработке подвергают продукты, которые при нагревании свыше 100°C значительно снижают свое качество.

Нагревание продуктов свыше 100°C называют стерилизацией. В промышленности наряду с термической стерилизацией применяют стерилизацию продуктов облучением токами высокой частоты. Облучением стерилизуют питательную воду и воздух, который используется в бродильном производстве. Стерилизация токами высокой частоты в основном используется для обработки сыпучих материалов. Наиболее широкое распространение в промышленности получила термическая стерилизация, которую проводят в аппаратах непрерывного или периодического действия.

В консервном производстве для стерилизации консервов применяют автоклавы периодического действия, поставляемые комплектно с системами автоматизации. Схемой автоматизации обеспечиваются программное регулирование температуры в автоклаве в соответствии с установленным режимом (формулой) стерилизации и регулирование давления в зависимости от температуры.

При производстве пюреобразных консервов должный стерилизационный эффект достигается за счет стерилизации продукта в потоке до фасования и стерилизации в банках. Для этого применяют автоматизированные установки непрерывной стерилизации. Схемой автоматизации обеспечиваются стабилизация

температуры на выходе теплообменного аппарата и контроль давления в теплообменном аппарате, предусматриваются дистанционное управление электроприводами насоса и стерилизатора, сигнализация работы их электроприводов, а также сигнализация отсутствия протока продукта через стерилизатор, нижнего уровня в емкости для резервирования и низкой температуры продукта после стерилизатора.

Продукт после стерилизации фасуется в банки, которые затем автоматически накрываются крышками и поступают в эксгаустер, где происходит удаление воздуха из банок. Из эксгаустера банки попадают в закаточную машину, где происходит

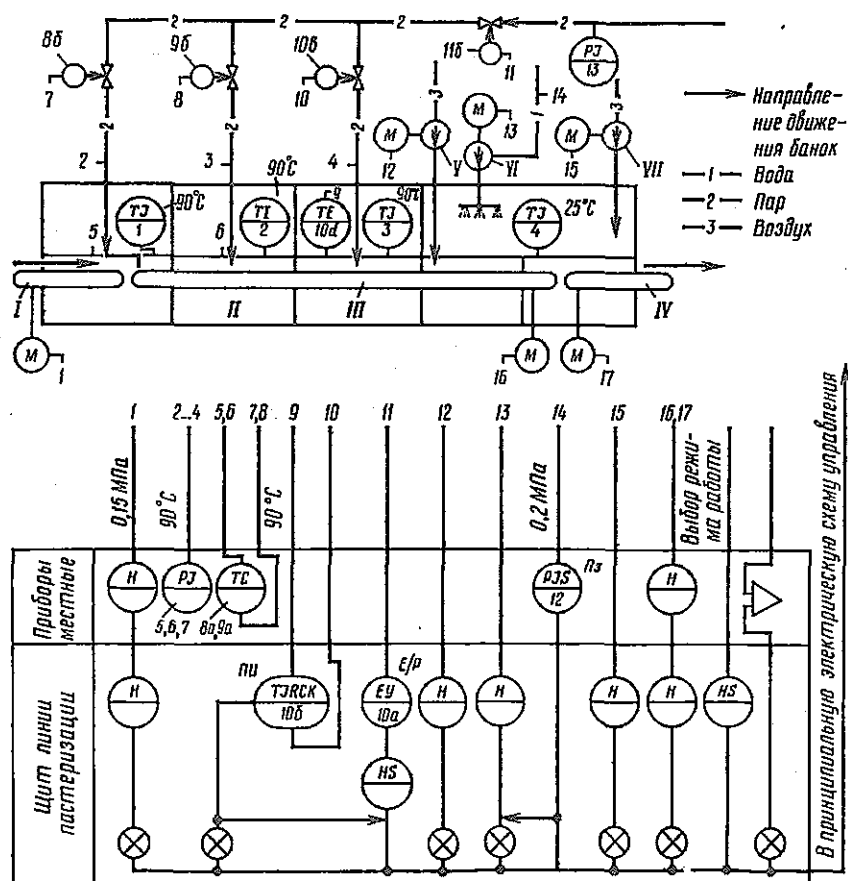


Рис. 6.8. Схема автоматизации пастеризатора непрерывного действия:
I, IV — конвейеры; II — пастеризатор; III — транспортирующее полотно; V — вентилятор охлаждения; VI — насос охлаждения; VII — вентилятор обдува

их укупоривание. Укупоренные банки поступают в пастеризатор.

Пастеризатор непрерывного действия включает три зоны пастеризации, зону охлаждения воздухом, зону охлаждения водой и зоны загрузки и выгрузки. В зонах пастеризации банки погружаются в ванну с подогретой водой. Подогревание воды в ванне осуществляется паром путем барботирования. Уровень воды над банками при их погружении в ванну составляет 30 мм.

На рис. 6.8 представлена схема автоматизации пастеризатора. В ней предусмотрены блокированный и деблокированный режимы работы конвейеров загрузки и пастеризатора. Выбор режима осуществляется ключом, установленным на щите. Со щита кнопками дистанционно управляют электроприводами пастеризатора.

В блокированном режиме пуск конвейера пастеризатора происходит при достижении температуры воды в ванне 90°C . После запуска конвейера пастеризатора возможен пуск загрузочного конвейера.

Система автоматизации предусматривает автоматический контроль давления пара, поступающего в пастеризатор, показывающими манометрами 5, 6, 7. Стабилизация температуры в первых двух зонах пастеризации осуществляется одноконтурными системами регулирования с помощью манометрических регуляторов температуры 8а, 9а, регулирующее воздействие которых поступает на регулирующие клапаны 8б, 9б, изменяющие расход пара в пастеризатор. Стабилизация температуры в третьей зоне пастеризации осуществляется с помощью термопреобразователя сопротивления 10а и электронного моста 10б с пропорционально-интегральным регулирующим устройством в комплекте с панелью дистанционного управления.

При отклонении температуры воды в ванне от заданной (90°C) выходной сигнал от моста 10б поступает на регулирующий клапан 10в, который изменяет расход пара в третью зону пастеризации. При повышении температуры в ванне до 95°C срабатывает контактное устройство моста 10б и через электрическую схему обесточивается электромагнит клапана 11а. Регулирующее устройство 11б прекращает подачу пара в пастеризатор. Давление пара, поступающего в пастеризатор, автоматически контролируется манометром 13.

В схеме предусмотрены аварийный останов насоса охлаждения при повышении давления воды более 0,2 МПа (при этом срабатывают контакты сигнального устройства показывающего манометра 12), световая сигнализация работы приводов, а также световая и звуковая сигнализация аварийного останова насоса охлаждения и отклонения температуры в ванне.

исполнительных механизмах, а также комплексе средств автоматического управления холодильной машиной с винтовым компрессором на базе микропроцессорной техники. Схемой автоматизации одноступенчатой холодильной машины обеспечивается управление в режимах: автоматическом, полуавтоматическом и дистанционном (с центрального диспетчерского пункта).

В автоматическом режиме предусматривается возможность управления от группового программируемого микропроцессорного устройства. При этом осуществляется регулирование производительности компрессора по ПИ-закону с коррекцией по силе тока приводного электродвигателя и обеспечиваются защиты компрессора в следующих ситуациях:

при превышении допустимого значения — температуры нагнетания (9а), температуры масла (4а), температуры обмоток электродвигателя (7а), давления нагнетания (1), аварийного уровня жидкости хладагента в испарителе (9а);

при уменьшении ниже допустимого значения — температуры масла (5а), давления всасывания (1), разности давлений масла в системе смазки компрессора (2).

В схеме предусмотрена цифровая индикация (контроль) температуры (10а—15а), а также выдача информации о работе и останове машины, положении золотника устройства регулирования производительности компрессора (3).

Пуск винтового компрессора I холодильной машины осуществляется путем подачи управляющих сигналов на включение электродвигателя масляного насоса III и установки компрессора на минимальную производительность. При наличии разности давлений масла в системе смазки запускается электродвигатель компрессора. Регулирование холодопроизводительности компрессора осуществляется автоматически с помощью микроконтроллера, воздействующего на устройство регулирования производительности компрессора. Одновременно осуществляется открытие электромагнитных клапанов питания испарителя и маслоохладителя, включается счетчик часов работы машины.

При срабатывании любой из перечисленных защит происходит автоматическое отключение электродвигателя компрессора с одновременным включением аварийной сигнализации, указывающей причину, вызвавшую аварийное отключение компрессора. Система противоаварийной защиты функционирует независимо от режима работы.

§ 6.4. СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА

Для пищевой технологии весьма характерны многие процессы массообмена: экстракция, дистилляция и др.

Автоматизация экстракции. Массообменный процесс, при ко-

тором жидкий растворитель извлекает из твердых или жидких веществ составляющие их компоненты, представляет собой экстракцию. Непременным условием проведения ее является тесный контакт между жидким растворителем и твердым или жидким веществом.

Процесс экстракции достаточно широко распространен: при производстве растительного масла, при получении морсов и соков, при извлечении сахара из свекловичной стружки и т. п. Процесс экстракции является диффузионным. По характеру работы различают диффузионные аппараты непрерывного и периодического действия.

Наклонный диффузионный аппарат, в котором с помощью воды диффузионным методом извлекается сахар из свеклы, состоит из наклонного желоба с вращающимися в нем шнеками, транспортирующими стружку, и жомовыгружающего устройства. Основным параметром, определяющим экономическую эффективность процесса экстракции сахара и свекловичной стружки, является содержание сахара в диффузионном соке и удаляемом из аппарата жоме (обессахаренной стружке).

Автоматизация процесса диффузии представляет собой одну из наиболее сложных задач в автоматизации технологических процессов свеклосахарного производства. Это объясняется наличием большого числа источников возмущений: расходы свекловичной стружки, экстрагирующей жидкости, греющего пара, качество поступающих продуктов, уровень и температура соко-стружечной смеси, частота вращения транспортирующих шнеков, удельная нагрузка аппарата, а также неконтролируемых факторов.

Главные требования, которые предъявляются к системе автоматического управления процессом диффузии, сводятся к наиболее полному извлечению сахара из свекловичной стружки, получению диффузионного сока заданной концентрации, обеспечению заданной производительности по переработке стружки и максимальной экономичности процесса.

Свекловичная стружка (рис. 6.10) после свеклорезок *II* и ленточных весов *III* поступает в диффузионный аппарат *I*. Одновременно в диффузионный аппарат подаются сульфитированная вода, жомпрессовая вода и пар. Из диффузионного аппарата выводятся жом и диффузионный сок, концентрация которого измеряется датчиком *12a* и рН-датчиком *11a*.

Регулирование параметров и управление процессом диффузии осуществляются с помощью ремиконта. Схемой предусматривается автоматическая стабилизация следующих параметров: температуры соко-стружечной смеси по зонам диффузионного аппарата термопреобразователями сопротивления *7a—10a*;

регулирования параметров процесса рассмотрим функциональную схему контура стабилизации уровня в головной части диффузионного аппарата (рис. 6.11). Ниже приведены условные обозначения, принятые на функциональной схеме.

Входные данные

H_i — уровень в головной части диффузионного аппарата

$H_{зд}$ — заданное значение уровня в головной части диффузионного аппарата

Параметры настройки в ремиконте

ΔH_i — зона нечувствительности по регулируемому уровню в головной части диффузионного аппарата

$K_{пнi}$ — коэффициент пропорциональности П-регулятора

Выходные данные

R_{ni} — регулирующее воздействие на исполнительный механизм откачки диффузионного сока из диффузионного аппарата

D_{ni}^{max} — дискретный сигнал, характеризующий максимальный уровень в головной части диффузионного аппарата

Стабилизация уровня может осуществляться в дистанционном и автоматическом режимах.

Автоматический режим обеспечивается при установке пере-

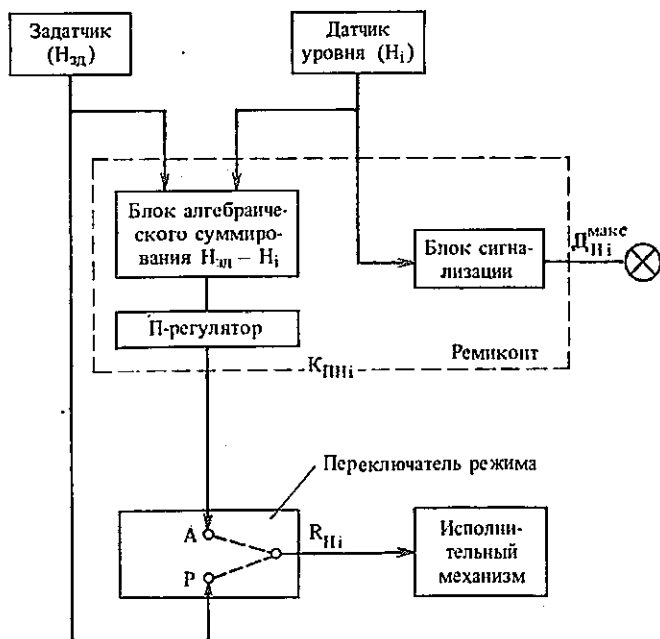


Рис. 6.11. Функциональная схема контура стабилизации уровня в головной части диффузионного аппарата

фильтрованная мисцелла поступает в трубчатый пленочный дистиллятор II. Из него частично упаренная мисцелла подается на вторую ступень дистилляции в пленочный дистиллятор III, откуда высококонцентрированная мисцелла откачивается на третью ступень в окончательный дистиллятор IV, работающий под вакуумом.

Схема автоматизации линии трехступенчатой дистилляции обеспечивает выполнение следующих функций: сбор, обработку и представление информации о ходе процесса оператору линии и диспетчеру производства; оперативный расчет технико-экономических показателей линии (производительности линии по маслу, удельных затрат пара); стабилизацию режимных параметров процесса (температуры мисцеллы по ступеням дистилляции); расчет оптимальных значений режимных параметров процесса и корректировку заданий в контуры стабилизации.

Система централизованного контроля включает контроль плотности входной мисцеллы (1а, 1б); контроль расхода мисцеллы на дистилляцию (2-2а, 2-2б); контроль температуры входной мисцеллы (2-1а, 2-1б); контроль давления пара по ступеням дистилляции; контроль давления пара в окончательном дистилляторе (4-2а, 4-2б); контроль расхода пара по ступеням дистилляции; контроль температуры мисцеллы по ступеням дистилляции (2-5а, 2-5б, 3-3а, 3-3б); контроль температуры масла (4-3а, 4-3б); контроль разрежения в окончательном дистилляторе (4-3а, 4-3б).

Контроль плотности мисцеллы осуществляется с помощью радиоизотопного плотномера; контроль расхода мисцеллы, пара — камерных диафрагм, дифманометров и вторичных пневматических приборов; контроль давления пара, разрежения в дистилляторах — преобразователей избыточного давления и вторичных приборов; контроль уровня фильтрованной мисцеллы в сборнике — дифманометра.

Стабилизация температуры мисцеллы по ступеням обеспечивается микропроцессорным контроллером путем воздействия на расход пара соответствующей ступени.

Ввод всех контролируемых и регулируемых параметров в УВК и в ремиконт и вывод командных сигналов на исполнительные регулирующие клапаны осуществляются преобразователями: пневматическими, электрическими, измерительными и электропневматическими. Контроль и управление процессом в местном режиме производятся со щита, расположенного в непосредственной близости от линии.

Схемой автоматизации реализуется алгоритм управления, обеспечивающий выполнение следующих операций. Фильтрованная мисцелла из сборника поступает в дистиллятор II. При этом измеряют расход (2-3а), температуру (2-5а) и кон-

центрацию (1а, 1б) мисцеллы. Измеренные значения поступают в ремиконт и УВК. В УВК по математической модели процесса рассчитываются значения концентрации и температуры мисцеллы на выходе из каждой ступени. В соответствии с рассчитанными значениями определяются оптимальные значения давления пара по ступеням. Оптимальные значения давления пара поступают в виде заданий в ремиконт, реализующий их регулирование по ПИД-закону путем воздействия на соответствующие клапаны подачи пара.

Регулирование осуществляется путем сравнения измеренной и рассчитанной температуры мисцеллы. При наличии рассогласования между ними ремиконт вырабатывает сигнал на управление регулирующими клапанами подачи пара.

§ 6.5. СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В пищевой промышленности значительное место занимают химические процессы. Они обычно проводятся в реакторах и автоклавах и как объекты управления являются особенно сложными с точки зрения кинетики и динамики. Химические процессы требуют выполнения ряда особых условий, которые предъявляются к оборудованию, трубопроводам, арматуре, а следовательно, и к средствам и системам автоматизации.

В связи с агрессивностью и взрывоопасностью сред, поступающих в химические реакторы для получения полупродуктов и готовой продукции (жирные кислоты, щелочные и известковые растворы, различные катализаторы, сернистые соединения, высокоактивные, а также горючие и взрывоопасные газы), химические процессы требуют применения особых схемных решений по автоматизации, обеспечения техники безопасности, а также контроля качественных показателей сред.

Автоматизация гидрогенизации. Жиры, содержащие преимущественно непредельные кислоты, способны при определенных условиях в присутствии катализатора присоединять водород. Этот процесс называется гидрогенизацией. В пищевой технологии процессы гидрогенизации проводят в целях превращения жидких жиров в твердые, используемые при производстве маргарина, мыла, стеарина и др.

Непрерывная гидрогенизация жиров (рис. 6.13) осуществляется в батарее из четырех автоклавов IV—VII, соединенных последовательно переливными трубами. Масло из бака II насосом III через масляный счетчик подается в первый автоклав IV батареи, туда же непрерывно подается суспензия катализатора. Одновременно в автоклавы подается водород.

Саломас из автоклава IV последовательно по переливным

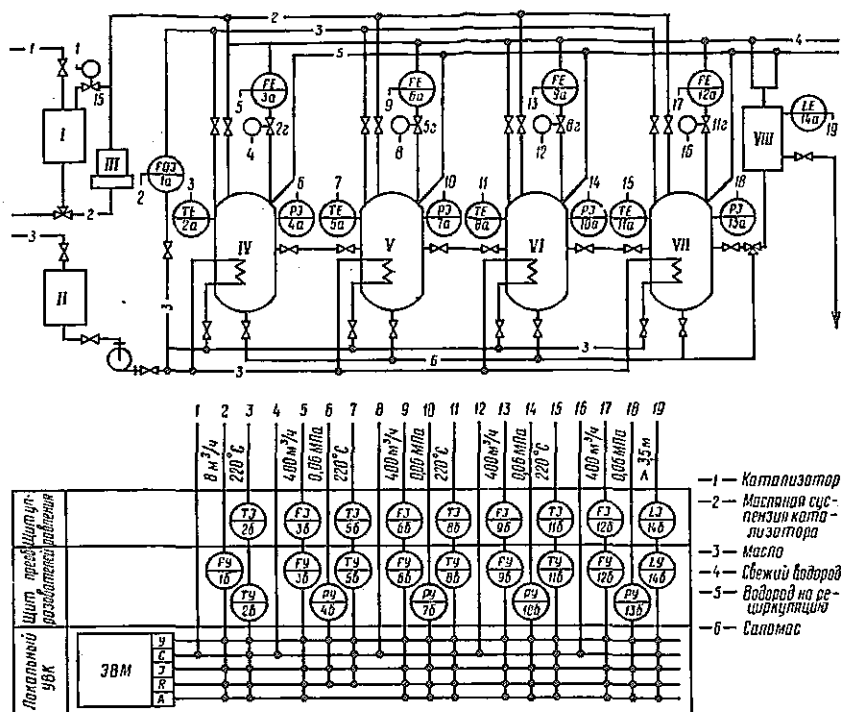


Рис. 6.13. Схема автоматизации линии производства пищевого саломаса:
I — сборник катализатора; II — бак; III — насос; IV—VII — автоклавы; VIII — сборник саломаса

трубам проходит в другие автоклавы батареи и далее в газоотделитель—сборник саломаса VIII, откуда насосом перекачивается в фильтр-пресс. Отфильтрованный саломас самотеком поступает в емкость.

Свежий водород из газгольдера смешивается с отработанным и очищенным водородом, охлаждается до 25°C, освобождается от влаги и поступает в автоклавы.

Схема автоматизации линии производства пищевого саломаса обеспечивает выполнение следующих функций: централизованный контроль режимных параметров процесса; учет расхода масла, водорода и суспензии катализатора в линию; регулирование режимных параметров процесса (температура саломаса в автоклаве, расход водорода в автоклавы); дистанционное управление расходом суспензии катализатора.

Система централизованного контроля включает контроль верхнего и нижнего уровней в баках масла и саломаса (14а);

контроль давления свежего водорода (4а, 7а, 10а, 13а); контроль расхода свежего водорода (3а, 6а, 9а, 12а); контроль температуры саломаса (2а, 5а, 8а, 11а).

Контроль уровня осуществляется с помощью первичного преобразователя сигнализатора уровня, контроль давления свежего водорода — манометром, контроль расхода свежего водорода — камерной диафрагмой, контроль температуры саломаса — термопреобразователем.

Контроль и управление в местном режиме производится со щитов, расположенных в автоклавном цехе и диспетчерском пункте. Управление в автоматическом режиме реализуется путем преобразования сигналов режимных параметров для ввода их по каналам связи в ЭВМ для обработки и заключается в поддержании соотношения расхода и кислотного числа гидрируемого масла, концентрации суспензии катализатора, концентрации водорода в автоклавах.

Изотермичность процесса гидрогенизации обеспечивается системой автоматического управления подачей масла в теплообменники автоклавов.

Автоматизация дрожжеращения. Процесс дрожжеращения является биохимическим процессом, осуществляемым в несколько стадий. Как правило, предусматриваются три стадии чистой культуры и две товарные стадии. Каждая проходит в закрепленных за ней аппаратах, при этом готовые дрожжи с предыдущей стадии подаются в один или несколько аппаратов последующей стадии, имеющих большую рабочую вместимость.

Аппарат первой стадии чистой культуры работает по бесприточному способу, а все остальные аппараты — по воздушно-приточному. При бесприточном способе выращивания все питательные компоненты загружаются в аппарат сразу перед введением дрожжей. В процессе выращивания, по мере накопления биомассы дрожжей, изменяется только расход воздуха.

При воздушно-приточном способе дрожжеращения выделяют следующие этапы: загрузка воды и части питательных веществ в аппарат (складка); введение дрожжей; непрерывная или периодическая подача основной массы мелассы, азот- и фосфорсодержащих компонентов при активной аэрации (приточный этап); дозирование, т. е. выдержка дрожжей без подачи питания при сохранении аэрации (только для последних стадий чистой культуры и товарной); отборы по мере накопления биомассы в аппарате (только для последней товарной стадии); разгрузка аппарата; мойка и стерилизация аппарата.

На рис. 6.14 представлена схема автоматизации для одного аппарата, работающего по воздушно-приточному способу. Схема обеспечивает выполнение следующих функций: дозирование компонентов на складку; контроль и регулирование расхо-

щий выполнение графика работы отделения, при необходимости пуска аппарата выдает запрос о готовности аппарата к работе. Получив от оператора подтверждение о готовности аппарата к работе (аппарат исправен, промыт и простерилизован), ломиконт включает программу загрузки аппарата. При этом открываются клапаны *II-4б*, *II-5б*, *II-1е*, *II-7г* на дрожжерастильном аппарате и клапан *I-1б* на дозирочной станции и в аппарат начинают поступать вода, меласса и кукурузный экстракт. Число поданных в аппарат компонентов контролируется путем интегрирования их расходов (*I-1а*, *I-2а*, *II-1а*, *II-3а*). При выдаче заданной дозы кукурузного экстракта клапан *I-1а* закрывается и далее аналогичным образом последовательно закрываются клапаны *I-1н*, *I-1м*, *I-1л*, подающие диаммонийфосфат, хлорид калия и сульфат магния. При выдаче соответствующих доз воды и мелассы также закрываются соответствующие клапаны *II-5б*, *II-1е*.

По окончании дозирования всех компонентов питания температура среды в аппарате путем подачи пара в барботажную систему (*II-8д*) доводится до 30°C. После этого разрешается введение дрожжей через клапан *I-1н* на дозирочной станции. По окончании введения дрожжей линия промывается водой через клапан *I-1к* и начинается приточный этап дрожжерашения. На этом этапе подача мелассы и воздуха может осуществляться либо по жесткой программе, рассчитанной технологом и задаваемой ломиконтом, либо по программе, рассчитываемой в реальном времени УВК по математическим моделям процесса с учетом информации о фактическом состоянии объекта.

Расход питательных солей (диаммонийфосфата и сульфата магния) осуществляется по жесткой программе. При понижении рН культуральной среды от заданного значения сульфат аммония заменяется аммиачной водой, имеющей щелочную реакцию.

В процессе дрожжерашения поддерживается заданная температура среды путем подачи охлаждающей воды в змеевик, а также осуществляется пеногашение путем подачи порций химического пеногасителя в аппарат при повышении уровня пены над заданным (открывается клапан *II-10г*).

Непосредственное управление процессом осуществляется ломиконтом с использованием стандартных законов регулирования. Управление мойкой и стерилизацией аппаратов проходит в ручном режиме.

Информация о ходе загрузки, дрожжерашения и выгрузки аппаратов выводится на мнемосхемы. Существует два вида мнемосхем. Общая мнемосхема отделения отражает обобщенные состояния аппаратов (складка, рашение, разгрузка и т. п.), а также их взаимодействие (например, передача дрожжей из

одного аппарата в другой). По мнемосхеме одного аппарата можно определить состояние каждого исполнительного механизма и значения основных переменных процесса (расходы и набор отдельных компонентов, а также набор аппарата в целом, концентрации и скорости роста биомассы, текущего времени процесса, режимных параметров). Через алфавитно-цифровые устройства осуществляется оперативный обмен информацией между УВК и технологом-оператором, УВК и лабораторией технoхимического контроля. На печать выводятся почасовые, сменные и суточные сводки, необходимые для анализа производственного процесса.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие технологические процессы относятся к типовым?
2. Что представляет собой схема автоматизации и на основании каких требований она разрабатывается?
3. Как получают первичную информацию агрегатного состояния (качество) перерабатываемых веществ?
4. Охарактеризуйте особенности схем автоматизации механических и гидромеханических процессов.
5. Какими основными отличиями обладают алгоритмы управления операциями механических процессов обработки и транспортирования продукции?
6. Какие теплообменные аппараты применяются в пищевой промышленности и как в них осуществляется автоматизация тепловых процессов?
7. Как осуществляется автоматизация тепловых процессов в стерилизаторах непрерывного действия?
8. Как осуществляется автоматизация пастеризаторов непрерывного действия?
9. Какие основные технические требования должны быть удовлетворены в схемах автоматизации холодильно-компрессорных станций?
10. Какие основные параметры технологического процесса регулируются в схеме автоматизации диффузионного аппарата?
11. Какие функции выполняются схемой автоматизации процесса дистилляции?
12. Каким дополнительным требованиям должны отвечать технические средства и системы управления в схемах автоматизации химических и биохимических процессов?
13. Какие функции контроля и управления осуществляются схемой автоматизации процесса производства саломаса?
14. Какие функции управления предусматриваются схемой автоматизации процесса дрожжевания и какими техническими средствами осуществляется их реализация?

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Глава 7

ФУНКЦИИ И СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

§ 7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФУНКЦИЯХ И КРИТЕРИЯХ УПРАВЛЕНИЯ АСУ ТП

Основным отличием АСУ ТП от локальных систем автоматизации является автоматизация сбора, обработки и представления более полной информации о функционировании ТОО на основе использования вычислительной и микропроцессорной техники. В АСУ ТП осуществляется более высокая степень автоматизации функций управления в соответствии с принятым критерием, обеспечивается режим диалога оперативного персонала с УВК для выработки оптимальных решений по управлению. Поэтому современный этап автоматизации технологических процессов характеризуется широким использованием микропроцессорной техники и мини-ЭВМ для управления отдельными участками, агрегатами и технологическими комплексами.

Микропроцессоры (МП) представляют собой универсальные программно-перестраиваемые большие интегральные микросхемы (БИС), получаемые на основе принципиально новой полупроводниковой технологии. Благодаря высоким технико-экономическим показателям МП заменили устройства, содержащие несколько десятков интегральных микросхем малой степени интеграции. На базе МП созданы микроЭВМ широкого назначения и специализированные микроконтроллеры (МК).

Микропроцессорной техникой называют микроЭВМ и МК, в состав которых входят МП. Основные тенденции развития микропроцессорной техники направлены на расширение ее функциональных возможностей.

При управлении технологическими процессами широкое распространение получили управляющие вычислительные комплексы (УВК), в состав которых, помимо микроЭВМ и МК, входят дополнительные устройства памяти, ввода-вывода, связи с объектом, выполняющие функции контроля и управления в режиме реального времени.

В АСУ ТП пищевых производств, создаваемых на базе мик-

ропроцессорной техники, нашла применение трехуровневая структурная схема, в которой используются различные типовые комплексы микроЭВМ. На низовом уровне осуществляется управление отдельными агрегатами (технологическими линиями) с помощью МК либо базовой микроЭВМ. На втором уровне УВК базируется обычно на типовом комплексе микроЭВМ. На третьем (верхнем) уровне используются мини-ЭВМ, которые координируют работу микроЭВМ и МК нижних уровней и решают задачи оперативного управления производством в целом.

УВК на базе мини-ЭВМ верхнего уровня размещается, как правило, в ЦДП управления предприятием и имеет развитую сеть дисплеев, обеспечивающих оперативный обмен информацией персонала предприятия с АСУ ТП.

Возложенные на АСУ ТП функции выполняются при взаимодействии следующих составных частей ее: информационного, технического, математического, программного и организационного обеспечения и оперативного персонала.

Информационное обеспечение. Представляет собой совокупность системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, аналоговых и дискретных сигналов, характеризующих состояние автоматизированного технологического процесса и выходных сигналов и форм, необходимых для выполнения всех функций АСУ ТП.

Основу информационного обеспечения составляет информационная база данных, представляющая собой набор логически упорядоченных и организованных по определенным правилам сведений об объекте управления и хранимых в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) и на внешних носителях.

Источниками информации являются датчики аналоговых и дискретных сигналов, установленные на технологическом оборудовании и трубопроводах отделений, и видеотерминалы* ввода результатов лабораторных анализов и другой информации ручного ввода.

Структура базы данных формируется таким образом, что оперативная часть ее размещается в ОЗУ (из-за необходимости быстрого доступа к данным для задач с повышенными требованиями к частоте и времени выборки), а остальная часть — на магнитных дисках. Основу базы данных на магнитных дисках составляют файлы** разного типа, имеющие фиксированный размер записей, что обеспечивает быстрый доступ к ним и их ввод-вывод по запросам соответствующих задач (подробнее см. § 8.2).

* Концевые устройства на входе и выходе ЭВМ, осуществляющие ввод и вывод информации.

** Совокупность записей, объединенных по определенному признаку (аналогия — картотеки).

Техническое обеспечение. Представляет собой комплекс технических средств, предназначенных для обеспечения работы автоматизированной системы управления.

Связь УВК по контролируемым (регулируемым) параметрам и управляющим воздействиям с локальными автоматическими системами осуществляется преобразователями, установленными около пультов управления соответствующих участков производства.

Синтез технической структуры УВК производится путем выделения в ней функциональных подсистем и определения способа соединения и состава комплектующих элементов этих подсистем. Выбранный УВК обеспечивает реализацию основных функций АСУ ТП с необходимыми для системы быстродействием и надежностью. Система укомплектовывается необходимыми приборами и сервисным оборудованием для диагностики и ремонта устройств УВК.

Математическое обеспечение. Представляет собой совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач и обработки информации с применением ВТ. Математическое (алгоритмическое) обеспечение АСУ ТП строится по модульному принципу, что соответствует методике, принятой во многих отраслях промышленности. Алгоритмические модули (АМ) объединяются в сборники, накапливаемые в отраслевом фонде алгоритмов и программ. Сборники АМ позволяют решать задачи контроля, моделирования и управления. В них представлены алгоритмы сбора и первичной обработки информации, расчета оперативных технико-экономических показателей, моделирования элементов автоматических систем регулирования и реализации задач оптимального управления с помощью микропроцессорной техники.

Программное обеспечение. Представляет собой совокупность машинных программ для реализации целей и задач автоматизированной системы управления, обеспечивающих функционирование УВК.

В соответствии с выполняемыми функциями программное обеспечение (ПО) разбивается на два класса: системное, обеспечивающее организацию и управление вычислительным процессом в реальном времени, и специальное, реализующее информационные, вычислительные и управляющие функции АСУ ТП.

Программное обеспечение базируется на дисковых операционных системах реального времени ДОС РВ и ДОС АСПО. Основные информационно-вычислительные функции систем реализуются пакетами программных модулей, настраиваемыми на условия конкретного применения с помощью управляющих файлов без корректировки программ.

Программное обеспечение представляет информацию оператору на дисплее в виде таблиц, либо участков мнемосхемы технологического процесса по вызову, либо в функции событий, возникающих в процессе.

Пакеты модулей и отдельные модули объединены в библиотеку (БПМ), имеющую в своем составе информационно-поисковую систему, позволяющую выбрать необходимые для применения средства по различным классификационным признакам (отраслевая принадлежность, выполняемая функция, операционная система и др.).

Организационное обеспечение. Представляет собой совокупность описаний функциональной, технической и организационной структур, инструкций и регламентов для оперативного персонала системы, обеспечивающую заданное функционирование оперативного персонала в составе АТК.

Организационное обеспечение АСУ ТП включает следующее: определение всех операторских пунктов и других звеньев управления, на которые возлагаются задачи по эксплуатации АСУ ТП, определение функций всех звеньев управления и решение вопросов их взаимодействия;

определение информационных потоков между всеми звеньями управления и технологическим объектом, разработку требований к техническим средствам контроля, управления и связи, которыми должны оснащаться все пункты управления;

определение штатного расписания и разработку должностных инструкций работников службы АСУ ТП, пересмотр инструкций работников других служб предприятия, связанных с АСУ ТП.

Оперативный персонал. В эту часть АСУ ТП входят диспетчер центрального пункта управления (ЦПУ), начальник смены, оператор ЦПУ, операторы операторских пунктов, аппаратчики технологических цехов и участков (местных щитов контроля и управления), эксплуатационный персонал, обеспечивающий правильность функционирования комплекса технических средств и технологического оборудования, в том числе группа обслуживания УВК, старший сменный инженер-электронщик, дежурный лаборант.

В связи с созданием АСУ ТП существенно меняются порядок и содержание работы оперативного персонала, значительно сокращается время, затрачиваемое на получение информации о процессе (в каждом отделении), изменяются также время и характер взаимодействия оперативного персонала между собой и сменным технологом.

Как указывалось, к АСУ ТП относятся системы управления, обеспечивающие автоматизированный сбор и обработку инфор-

мации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием.

Критерий управления АСУ ТП. Представляет собой соотношение, характеризующее качество функционирования технологического объекта управления (ТОУ) в целом и принимающее определенные числовые значения в зависимости от используемых управляющих воздействий.

При создании АСУ ТП определяют конкретные цели функционирования системы и ее назначение в общей структуре управления предприятием (см. также § 4.1). Обычно целью создания АСУ ТП перерабатывающего предприятия является повышение технико-экономических показателей, поэтому критерий управления определяется в классе технико-экономических критериев. При этом критерий не должен противоречить народнохозяйственным целям, свойственным данной отрасли производства, и целям коллектива конкретного предприятия и обладать «свойством включаемости» по отношению к некоторому классу целевых функций старшего уровня управления, т. е.

$$E \supset I,$$

где E — целевая функция (критерий управления) старшего уровня управления; I — целевая функция рассматриваемого производства.

Критерий управления рассматриваемого производства I должен «входить» в критерий E , что позволит и разработанную на его основе систему управления перерабатывающего предприятия «включить» в более общую систему управления. Кроме того, критерий должен быть достаточно гибким, давать возможность учитывать изменение внешней конъюнктуры и оценивать работу технологического комплекса как за оперативный интервал времени (час, смена, сутки), так и за более длительные интервалы (неделя, декада, месяц, квартал, год).

Таким образом, функционирование АСУ ТП осуществляется в соответствии с единым критерием, в качестве которого обычно выступает один из экономических показателей предприятия: прибыль, производственные затраты на осуществление технологического процесса, производственные потери.

1. Целевая функция (критерий) управления — прибыль от реализации товарной продукции с учетом ограничений — записывается в виде

$$I = \sum_{i=1}^n (C_i - C_i) A_i, \quad (7.1)$$

где C_i — оптовая цена i -го вида продукции; C_i — себестоимость i -го вида продукции; A_i — количество выпускаемого i -го вида продукции.

Выпуск и качество пищевой продукции имеют следующие ограничения:

$$A_i \geq A_i^n,$$

где A_i^n — планируемый показатель по выпуску готового продукта i -го вида;
 $\{m_{hi}\} \in \{M_{hi}\},$

где $\{M_{hi}\}$ — вектор множества показателей качества готового продукта i -го вида, соответствующих ГОСТу (например, к показателям качества в сахарорафинадном производстве в соответствии с технологической инструкцией относятся цветность, влажность, плотность, содержание сухих веществ и др.).

2. Целевая функция, имеющая смысл переменной составляющей производственных затрат на осуществление технологического процесса, имеет вид

$$I(0, T) = \sum_{i=1}^n \int_0^T I_i(t) dt; \quad (7.2)$$

$$I_i = a_{ii} u(t) + a_{pi} p_i(t), \quad (7.3)$$

где $(0, T)$ — оцениваемый интервал времени (смена, сутки и т. п.); I_i — целевая функция технологического участка; p — производственные потери; u — управляющее воздействие; a_{ii}, a_{pi} — стоимость соответствующих продуктов; i — индекс технологического участка.

В соответствии с уравнением (7.2) общая задача управления формируется следующим образом: достичь

$$I^*(0, T) = \min_{u \in U} I(0, T) \quad (7.4)$$

при ограничениях

$$D(0, T) - D_{(пл)}(0, T) \geq 0; \quad \Gamma(0, T) \leq \Gamma_{(пл)}(0, T), \\ x \in X_D \quad u \in U$$

где Γ — вектор ресурсов производства; D — количество продукта, выработанного за соответствующий интервал времени; X_D — вектор качества продукта; (U, X_D) — допустимые области соответствующих величин; $(пл)$ — индекс, обозначающий плановую величину.

В целом рассматриваемая задача интерпретируется как задача оптимального управления (в статике) технологическими процессами пищевого производства.

3. Производственные потери используются как частный технико-экономический критерий, учитывающий использование информации для оперативного управления соответствующими цехами или участками производства.

К указанному частному критерию предъявляются следующие требования: критерий не должен противоречить плановым заданиям, установленным для каждого цеха или участка производства; критерий должен согласовываться с основным критерием более высокого уровня; критерий должен позволять оценивать

работу цехов и участков производства на оперативном интервале времени (час, смена, сутки). Этим требованиям удовлетворяет критерий потерь на производство вида

$$I(0, T) = \int_0^T [P_i(t) + C_i(t)] dt \rightarrow \min; \quad (7.5)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i > A_n; \quad \sum_{i=1}^n C_{nTi} \leq C_{nл},$$

где P_i — средние потери; C_i — затраты на переработку; 0, T — оцениваемый интервал времени; A — выпуск продукта за оцениваемый интервал времени (от i до n); C_{nTi} — стоимость потерь на i -м участке; $C_{nл}$ — плановая стоимость потерь на i -м участке.

Выбор критериев управления и их декомпозиция являются основой системного подхода к автоматизации. В этой области имеется ряд научных результатов и практических работ, использующих методы оценки производственных ситуаций и принятия решений при влиянии многих факторов: методы имитационного моделирования, оценки результатов при «нечетких» (качественных) критериях и др. Освоение и применение этих методов является одной из задач развития работ по созданию АСУ ТП.

Из общей постановки задач вытекает, что в процессе функционирования АСУ ТП должны быть обеспечены упорядочение и ускорение обработки оперативной информации в ходе технологического процесса; ускорение выявления и устранения аварийных и предаварийных ситуаций; расчет технико-экономических показателей (ТЭП) производства; определение оптимальных в смысле формул (7.1), (7.2), (7.5) режимов функционирования производства; функционирование производства в целом в режиме, близком к оптимальному; согласование режимов отдельных участков.

В соответствии с изложенным АСУ ТП должна осуществлять информационную, информационно-вычислительную и управляющую функции. Каждая из этих функций включает ряд задач. В их число входит и комплекс задач обеспечения общесистемных функций*.

С учетом изложенного можно построить функциональную структуру взаимодействия задач АСУ ТП и их разделения по уровням. Схема функциональной структуры является техническим документом, определяющим состав функций, выполняе-

* Назначениями комплекса задач общесистемных функций являются организация взаимодействия задач между собой и организация вызовов задач в заданных последовательности и времени; обслуживание базы данных и обеспечение ее сохранности, в том числе при сбоях; организация обмена информацией между задачами.

мых АСУ ТП, и связи между ними. В зависимости от сложности выполняемых функций, степени участия в реализации их вычислительной техники (ВТ), оперативного персонала, средств локальной автоматизации (что в определенной степени отражает режимы функционирования АСУ ТП) можно выделить наиболее характерные функциональные структуры АСУ ТП пищевых производств.

Набор информационных функций, как правило, меняется мало. В частности, для систем с централизованной структурой в набор информационных функций включаются функции централизованного и локального контроля технологических параметров и показателей состояния оборудования, представления информации оперативному персоналу АСУ ТП, косвенного измерения (вычисления) параметров и др.

Различия в построении схем функциональной структуры АСУ ТП пищевых производств определяются в основном набором управляющих функций. Могут быть выделены четыре типа наиболее характерных схем функциональной структуры АСУ ТП (рис. 7.1 и 7.2).

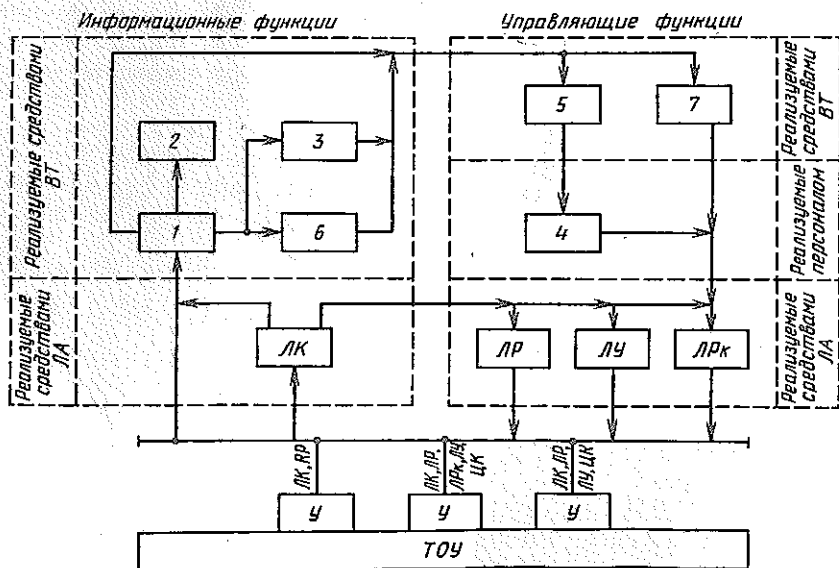


Рис. 7.1. Схема функциональной структуры АСУ ТП с частичным выполнением управляющих функций:

ЛА — локальная автоматика; ТОУ — технологический объект управления; У — участок производства; ЛК — локальный контроль; ЛР — локальное регулирование; ЛУ — локальное управление; ЛРК — локальное регулирование с коррекцией параметров; ЦК — централизованный контроль

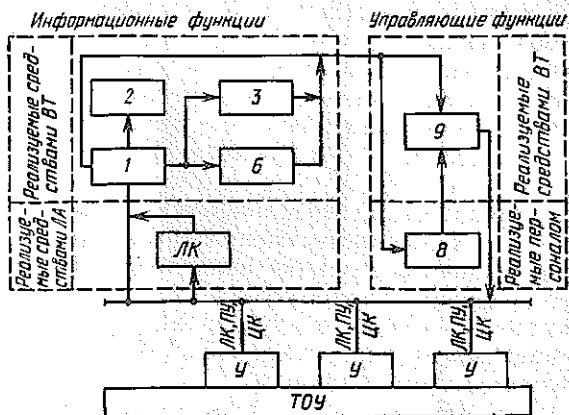


Рис. 7.2. Схема функциональной структуры АСУ ТП с непосредственным цифровым управлением

АСУ ТП первого типа выполняют только информационные функции. Управляющие функции реализуются средствами локальной автоматизации. При этом блок 1 осуществляет функции централизованного контроля технологических параметров и показателей состояния технологического оборудования. Блок 2 осуществляет представление информации оперативному персоналу. Блок 3 выполняет косвенные измерения (вычисление параметров). Оперативный персонал корректирует задания по отдельным параметрам, пользуясь представленной информацией (на рис. 7.1 блок 4 осуществляет коррекцию задания по n -му параметру).

Для АСУ ТП второго типа средства ВТ выполняют также информационные функции и выдают оперативному персоналу советы по ведению процесса (частично). Для этого в схему рис. 7.1 дополнительно введен блок 5, осуществляющий выдачу советов оперативному персоналу АСУ ТП по ведению процесса.

Управляющие функции реализуются средствами локальной автоматизации.

Для АСУ ТП третьего типа в схеме функциональной структуры предусмотрено, что средства ВТ выполняют информационные функции, по ряду технологических параметров автоматически изменяют настройки локальных регуляторов, выдают советы оперативному персоналу по ведению технологического процесса. С этой целью дополнительно введены блок 6, осуществляющий функции оценки и прогнозирования состояния ТОУ и его оборудования, и блок 7, выполняющий функции расчета и

выдачи управляющих воздействий по ведению процесса. Отдельные управляющие функции реализуются средствами логической автоматизации.

Четвертый тип схемы функциональной структуры (рис. 7.2) предусматривает, что средства ВТ выполняют информационные и полностью управляющие функции (в режиме прямого цифрового управления). Блок 8 осуществляет функции формирования управляющих воздействий, блок 9 — функции непосредственно цифрового управления. Оперативный персонал в соответствии с производственной ситуацией может влиять на ход процесса.

§ 7.2. МНОГОУРОВНЕВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

В процессе принятия решения при управлении производством возникает проблема, связанная, с одной стороны, с необходимостью оперативного вмешательства в процесс в реальном масштабе времени, а с другой — сложностью ситуации и наличием различных неопределенностей, требующих значительного времени для анализа и выработки стратегии поведения автоматизированной системы управления. Решение этой проблемы состоит в использовании многоуровневой иерархии системы принятия решения.

При таком подходе сложная проблема принятия решения разбивается на семейство последовательно расположенных более простых задач. Использование этого принципа приводит к построению многоуровневых систем управления, имеющих иерархическую структуру.

В § 2.1 изложен подход, позволяющий подвергать объект управления (его технологическую структуру) декомпозиции по трем уровням в целях выделения элементарных структурных элементов объекта, оценки их вклада в достижение поставленной цели и включения в структуру управляемой системы технологического объекта управления. С использованием этого подхода рассчитывают для пищевых предприятий число функциональных сфер E_i^s и уровней принятия решения E_m^L , а также алгоритмы определения структурных элементов объекта на каждом уровне управления.

Предполагается, что сложность задачи управления обуславливается сложностью объекта управления, тогда для функциональной сферы производства определяются следующие уровни принятия решений:

1) функции регулирования, контроля и управления отдельными технологическими агрегатами (первый — нижний уровень в иерархии управления), под которыми понимаются сбор, пер-

вичная обработка, формирование массивов информации о состоянии объекта управления, преобразование этих массивов информации по определенным алгоритмам в совокупность управляющих воздействий на объект для достижения некоторой локальной цели управления (E_1^L);

2) координация второго уровня (E_2^L), под которой понимается целенаправленное действие вышестоящей подсистемы для согласования локальных целей на уровне E_1^L в пределах одной технологической линии (комплекса);

3) координация третьего уровня (E_3^L), под которой понимается целенаправленное действие вышестоящей подсистемы для согласования локальных целей управления несколькими технологическими подсистемами (линиями, комплексами) в пределах одного организационного подразделения (цеха, отделения, участка);

4) координация четвертого уровня (E_4^L), предназначенная для согласования целей управления различными производственными подразделениями (цехами, отделениями, участками) в пределах одного производства;

5) координация пятого уровня (E_5^L), предназначенная для согласования целей управления несколькими производствами в пределах предприятия (если такие имеются).

Рассмотренное число уровней принятия решений при управлении пищевым производством является максимально возможным.

Для дальнейшей декомпозиции функциональной сферы производства элементы организационной и технологических схем производства распределяются по уровням принятия решения (декомпозиция на эшелоны). Выделение в составе функциональной сферы производства технологических элементов (аппаратов, установок, агрегатов и др.), организационных подразделений (цехов, участков, отделений) и производств не вызывает особых трудностей, так как они достаточно четко регламентированы на каждом предприятии.

Более сложным является выделение в составе цеха (участка, отделения) технологических подсистем (комплексов, линий), границы которых не столь очевидны. Эта задача решается путем декомпозиции и анализа подсистем разной степени связности — технологической схемы цеха (участка, отделения). На основе декомпозиции функциональной сферы производства формируется многоэшелонная иерархическая структурная схема распределения структурных элементов предприятия по уровням управления.

Математически эти операции могут быть описаны, исходя из

булевой алгебры событий и представления вероятностных моделей:

$$E_{i, m, jk}^s = E_i^s \cap E_m^L \cap E_{jk}^L, \quad (7.6)$$

где E_{jk} — совокупность элементов организационной структуры k -го подразделения i -го уровня управления (эшелон).

Выполнение условия (7.6) позволяет выделить структурные элементы процесса, участвующие в реализации критерия управления, и определить функции (задачи), выполняемые каждым элементом, и связи между ними (функциональная структура объекта управления). При этом проверяется выполнение следующего условия:

$$E_{i, m, jk}^{sL, l} = \begin{cases} 1 & \text{— если существует для элемента задача управления, реализующая частную цель;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Полагая, что каждая функция реализуется своей функциональной подсистемой (совокупностью аппаратных средств и каналов связи между ними), систему управления представляют пересекающимся множеством функциональных подсистем, объединенных определенным образом. Использование микропроцессорной техники позволяет реализовать несколько вариантов структуры АСУ ТП:

1) структура системы управления является иерархической и полностью отображает функциональную структуру объекта управления, т. е. на каждом уровне управления используются соответствующие технические средства, состоящие из требуемого для каждого уровня числа функциональных подсистем;

2) структура системы управления является также иерархической, однако некоторые уровни управления объединены из-за избыточных возможностей технических средств и необходимости их доиспользования;

3) структура системы управления является магистральной, когда все функциональные подсистемы подключаются к единой (коаксиальной или оптоволоконной) магистрали, охватывающей объект, и функционируют под управлением определенного программного диспетчера;

4) структура системы управления представляет собой комбинацию иерархических и магистральных структур, и все функциональные подсистемы в ней распределены между элементами иерархических и магистральных структур и т. д.

Во втором случае число уровней в структуре управления меньше числа уровней принятия решения. В третьем случае уровни управления скрыты в структуре системы, однако их всегда можно определить, зная назначение устройств.

Территориальное размещение АСУ ТП также бывает раз-

ным. По этому признаку различают следующие типы структур АСУ ТП (рис. 7.3):

1) централизованные системы, когда все функциональные подсистемы сосредоточены в одном месте предприятия и на одном управляющем вычислительном комплексе и связаны с технологическим процессом соответствующими каналами передачи информации;

2) функционально распределенные системы, когда все функциональные подсистемы распределены между несколькими уп-

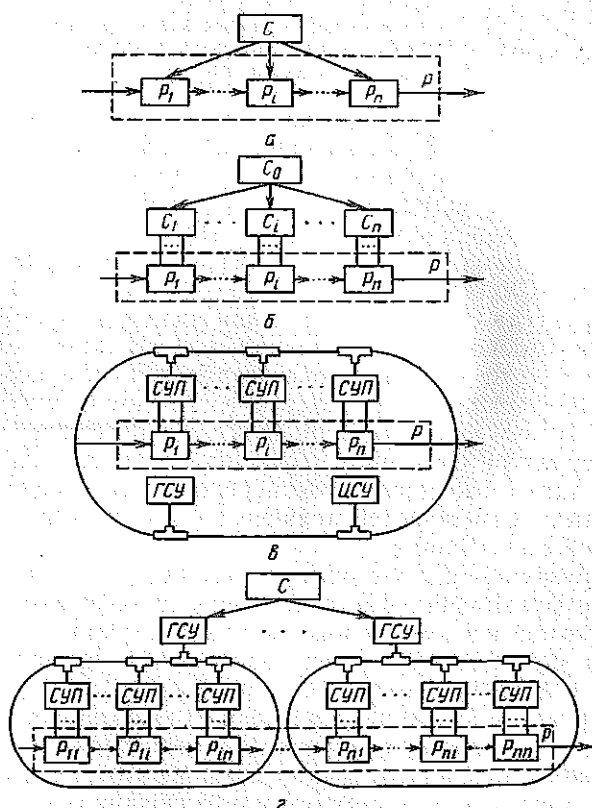


Рис. 7.3. Структурные схемы АСУ ТП:

a — централизованная; $б$ — территориально распределенные; $в$ — территориально и функционально распределенные; $г$ — комбинированная; $C_1, \dots, C_n$ — соответственно централизованная система управления и ее подсистемы; $P_1, \dots, P_n$ — соответственно технологический процесс и его участки; $СУП$ — станции управления процессом; $ГСУ$ — групповые станции управления; $ЦСУ$ — центральные станции управления

равляющими вычислительными комплексами, размещенными в одном месте предприятия;

3) территориально распределенные АСУ ТП, когда система управления разбивается на несколько взаимосвязанных территориально разнесенных подсистем (узлов, станций управления);

4) территориально и функционально распределенные системы управления, когда система представляет собой совокупность функциональных устройств, управляемых своими микроконтроллерами, центрального процессора, управляющего всей системой в целом, и магистрали (коаксиальной, оптоволоконной), связывающей между собой разнесенные по производственным помещениям устройства системы управления;

5) комбинированные системы управления, содержащие элементы территориально и функционально распределенных систем.

Централизованные системы. По своей структуре системы считаются самыми несовершенными (низкая живучесть, большой расход кабельной продукции, малая производительность, недостаточный объем памяти и т. п.). Системы такого типа находят применение для небольших объектов управления при условии, если предусматриваются меры по повышению их живучести, например нагруженное резервирование ряда модулей (процессора, памяти, периферийных устройств).

Функционально распределенные системы. Показатели по живучести (способности сохранять работоспособность), производительности и объему памяти у них значительно лучше, чем у централизованных систем. Они более удобны для внедрения, модернизации и ремонта. Однако стоимость этих систем выше стоимости централизованных при одних и тех же функциональных возможностях.

Территориально распределенные системы. Наряду с преимуществами, присущими функционально распределенным системам, эти системы имеют следующие достоинства: приближение системы управления к объекту управления; сокращение расхода кабельной продукции; повышение помехоустойчивости системы и т. п.

Территориально и функционально распределенные системы. Обладают многими преимуществами территориально распределенных систем и, кроме того, с их помощью возможно создание систем управления с еще большей живучестью за счет сравнительно простой взаимозаменяемости устройств и подсистем; достижение более высокой производительности за счет высокой скорости обмена между устройствами по магистральному каналу.

На практике широко распространены территориально рас-

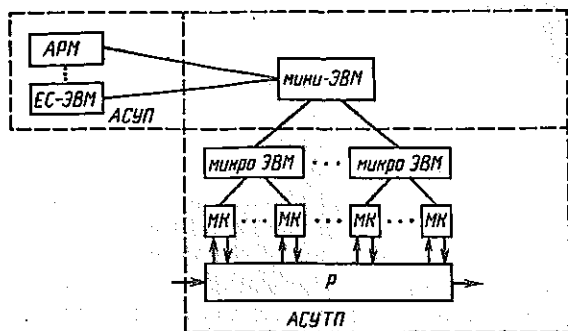


Рис. 7.4. Структурная схема комплекса технических средств многоуровневой системы управления:
 P — технологический процесс; МК — микроконтроллер;
 АРМ — автоматизированное рабочее место

пределенные многоуровневые системы управления (рис. 7.4). Они позволяют реализовать широкий набор функций от управления отдельными линиями до управления предприятием. Основное преимущество этих систем состоит в возможности обмена информацией между всеми элементами системы, что позволяет максимальным образом автоматизировать процесс управления и свести к минимуму ручной ввод информации в систему.

На нижнем уровне управления реализуются задачи двух уровней принятия решения E_1^L и E_2^L из-за отсутствия микропроцессорных средств управления, ориентированных на управление отдельными агрегатами, на среднем — задачи третьего уровня принятия решения E_3^L , на верхнем — задачи двух уровней принятия решения E_4^L и E_5^L . При подключении организационно-экономических задач по управлению предприятием в систему вводятся персональные ЭВМ, на базе которых создаются автоматизированные рабочие места (АРМ) отдельных специалистов заводоуправления (экономиста, бухгалтера, кадровика, снабженца и т. д.).

Верхний уровень управления обычно располагает значительными ресурсами по памяти, и поэтому здесь создается база данных для всей системы. Абонентами этой системы являются ЭВМ всех остальных уровней управления.

§ 7.3. МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

При решении задач непосредственного цифрового управления технологическими процессами важными являются воп-

росы производительности и живучести таких систем при заданных ограничениях по стоимости.

Проблема производительности определяет способность системы реагировать на различные возмущения в темпе с технологическим процессом. Проблема живучести определяет способность системы сохранять работоспособность при выходе из строя отдельных элементов. Обе эти проблемы успешно решаются при использовании многопроцессорных вычислительных систем управления. Переход к системам такого типа является дальнейшим развитием систем цифрового управления и становится возможным в результате значительного совершенствования аппаратной и программной частей этих систем.

Магистрально-модульные многопроцессорные измерительно-управляющие системы. Размещение процессоров на одной плате вследствие повышения степени интеграции микросхем (более 10^5 элементов на кристалл) обусловило принципиальную возможность создания многопроцессорных систем в одном крейте*. Алгоритмы совместной работы нескольких процессоров при обеспечении связи любого процессора с любым модулем одной вычислительной системы и соответствующие аппаратные средства были разработаны и стандартизированы. Это явилось толчком для создания магистрально-модульных многопроцессорных измерительно-управляющих систем (МИУС) и стандартов на них. Для этих систем определены алгоритмы параллельной связи между магистральями крейтов, стандартизированы устройства связи; наборы и функции регистров в интерфейсах связи модулей с магистралью; тонкая конструкция модулей, которая обеспечивает единство компоновки цифровых и аналоговых устройств как в одном модуле, так и в разных модулях в одном крейте; средства ввода-вывода цифровой и аналоговой информации; схемы питания как для цифровых, так и для аналоговых схем; параметры источников питания, допуски на эти параметры и нагрузки; средства для программной интеграции систем, прежде всего географическая адресация.

Модульные системы с универсальной магистралью, обеспечивающей совместную работу множества процессоров и функциональных блоков связи с объектом, представляют собой новое поколение управляющей вычислительной техники.

В отечественных управляющих вычислительных комплексах используются интерфейсы, для которых в крейте допускается не более семи модулей с процессорами, которые работают под контролем арбитра, хранящего приоритеты процессоров. Система является одной из первых в мире многопроцессорных си-

* Конструктив, объединяющий группу модулей определенного назначения одной вычислительной системы.

ством, предназначенных для управления технологическими процессами. Организация структур многопроцессорных вычислительных управляющих систем является сложной задачей.

Однопроцессорная ЭВМ в принципе не может обладать необходимой живучестью из-за возможности ее отказа по разным причинам. Для достижения высокой живучести необходимо по меньшей мере дублирование средств, выполняющих функции управления.

Большинство известных методов повышения живучести многопроцессорных комплексов сводится к выявлению отказа модуля и автоматическому подключению какого-либо избыточного ресурса. Естественно, что необходимые программные и аппаратные средства, обнаружившие отказ и вводящие избыточный (резервный) ресурс, должны быть заложены в систему при ее проектировании. В настоящее время находят применение три формы избыточности: временная, аппаратная и функциональная.

Временная избыточность означает возможность повторной попытки выполнения операций, реализующих функцию. Обычно предусматривается некоторое заранее ограниченное число попыток повторения. Если они не приводят к успешному выполнению функции, то это означает наличие несамоустраняющегося отказа в аппаратуре (при уверенности в качестве программ).

Аппаратная избыточность не обязательно означает, что резервирующее устройство простаивает в ожидании, пока оно потребуется в случае отказа резервируемого устройства.

Функциональная избыточность системы позволяет по мере выхода из строя ее компонентов продолжать ведение процесса, хотя и с меньшей эффективностью. Система постепенно переходит в резервные рабочие режимы.

Параллельные системы с реконфигурацией. На практике часто оказывается, что резервирование модулей ЭВМ малоэффективно в том смысле, что увеличение объема оборудования не приводит к возрастанию производительности всей системы. Более эффективным подходом является построение параллельных систем с реконфигурацией.

В таких системах идентичные процессоры выполняют различные программы до тех пор, пока не произойдет сбой или отказ одного из устройств. В этом случае производительность системы соответственно снижается, но выполнение задачи управления продолжается. Если же задача управления выполнялась лишь на одном процессоре, в котором наступил отказ, эта задача передается другому работоспособному процессору с прерыванием выполняемой им программы. Это позволяет выполнять наиболее важные программы путем реконфигурации системы, правда, с потерей производительности системы.

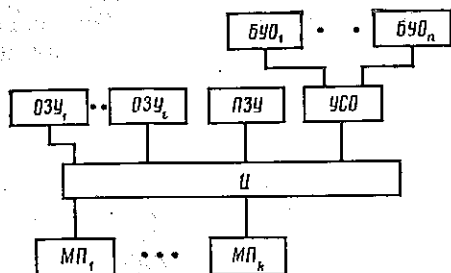


Рис. 7.5. Структурная схема простейшей микропроцессорной системы управления:

$МП_1, \dots, МП_k$ — микропроцессорные модули; $ОЗУ$ — оперативное запоминающее устройство; $ПЗУ$ — постоянное запоминающее устройство; $УСО$ — устройство связи с объектом; $БУО$ — блоки управления объектом

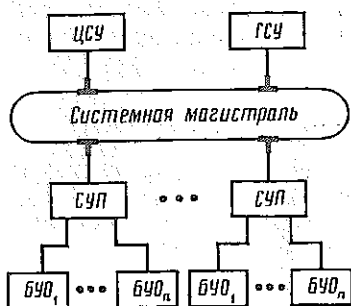


Рис. 7.6. Структурная схема многопроцессорной функционально и территориально распределенной системы управления:

$ЦСУ$ — центральная станция управления; $ГСУ$ — групповая станция управления; $СУП$ — станция управления процессом

Сравнение между собой многомашинных и многопроцессорных систем свидетельствует о значительном преимуществе последних (снижается стоимость аппаратной части систем, упрощается перемещение программ и данных при реконструкции системы и т. п.). Однако у многопроцессорных систем имеется существенный недостаток: требуются особые операционные системы, организующие работу этих систем по довольно сложному алгоритму.

Структурная схема простейшей многопроцессорной системы управления показана на рис. 7.5. Недостатком схемы является ограниченная длина интерфейса U (до 15 м), которая делает невозможным создание территориально распределенных систем управления. Однако эта схема позволяет существенно повысить живучесть системы за счет резервирования наиболее ненадежных блоков $МП_k$ и $ОЗУ_i$ и производительность системы за счет параллельной обработки информации во всех k процессорах.

Для построения многопроцессорных функционально и территориально распределенных систем управления применяется структурная схема. Изображенная на рис. 7.6 система представляет совокупность станций ($ЦСУ$, $ГСУ$, $СУП$) и системной магистрали длиной до 4,5 км, передающей информацию со скоростью 1 Мбод. Каждая станция содержит микропроцессорный модуль и набор других блоков, позволяющих выполнять определенные функции.

Системы управления такого типа позволяют параллельно решать комплекс многоуровневых задач управления, максимально приблизить станции управления к объектам управления

и при необходимости организовать их резервирование. Это значительно повышает производительность системы управления и ее живучесть.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем основное отличие АСУ ТП от локальных систем автоматизации?
2. Что представляют собой обеспечения АСУ ТП: информационное, техническое, математическое, программное и организационное?
3. Какие экономические показатели выбираются в качестве критерия управления АСУ ТП?
4. Какие применяются типы функциональных структур АСУ ТП?
5. Как строятся многоуровневые АСУ ТП?
6. Какие применяются типы структур территориального размещения АСУ ТП?
7. Что представляют собой магистрально-модульные многопроцессорные системы управления?
8. Какими преимуществами обладают многопроцессорные системы по сравнению с многомашинными системами управления?

Глава 8

ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСУ ТП

§ 8.1. ФУНКЦИИ И АЛГОРИТМЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСУ ТП

Информационная функция является важнейшим элементом любой АСУ ТП. Комплекс задач, реализующих информационные функции, обеспечивает исходные данные для всех остальных подсистем центральной части АСУ ТП. В укрупненном виде структура и взаимодействие информационных функций АСУ ТП представлены на рис. 8.1.

Основной объем информации в АСУ ТП формируется опросом датчиков и ручным вводом информации (блоки 1 и 2), на базе которой решаются задачи представления информации персоналу и задачи цифрового управления (блоки 5 и 6). В процессе работы АСУ ТП информация к тому же подвергается разного рода обработкам (как правило, вычислительного характера — блоки 3 и 4). Взаимодействие всех информационных функций осуществляется через базу данных и систему управления ею (блок 7). Обычно задачи цифрового управления решаются с достаточно высокой частотой. Выбор этой частоты определяется многими факторами. Главная проблема здесь состоит в обеспечении достаточно высокого качества регулирования. (Более подробно этот вопрос рассмотрен в главе 9.)

Важно, что информацию для задач нужно поставлять в темпе их решения (более частая информация не будет использо-

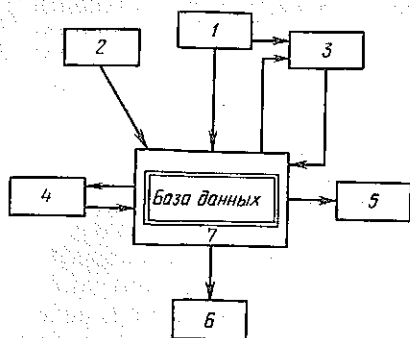


Рис. 8.1. Структура и взаимодействие информационных функций АСУ ТП:

1 — прием информации от датчиков; 2 — ручной ввод информации; 3 — первичные обработки информации; 4 — решение информационно-вычислительных задач; 5 — представление информации персоналу; 6 — управление объектом; 7 — управление базой данных

логовых) фильтров должны быть тщательно согласованы с динамическими характеристиками контура управления. В некоторых случаях может потребоваться увеличить частоту опроса датчика.

В итоге выбор частоты опроса базируется на теореме Котельникова. Эта теорема устанавливает связь максимальной угловой частоты пропускания $\omega_{\max}$ с периодом квантования T_0 в виде $\omega_{\max} \leq \pi/T_0$. (Вопрос о выборе $\omega_{\max}$ для разных случаев рассмотрен в § 8.3 и главе 9.)

Выбор тактовой частоты как для задач управления, так и для задач сбора информации существенно ограничивается производительностью процессора и объемом решаемых задач (в данном случае числом каналов управления и их вычислительной сложностью, прежде всего алгоритмов управления и в меньшей степени алгоритмов сбора и обработки полученной информации).

Представление информации персоналу АСУ ТП в удобном виде (т. е. выходные формы, видеограммы) является одним из самых важных условий, во многом определяющих эффективность системы. А в тех АСУ ТП, где задачи управления решаются средствами локальной автоматизации, выходные формы, видеограммы и т. п. являются единственным результатом работы подсистем верхнего уровня. Поэтому на проектирование выходных форм, видеограмм и иных средств отображения информации обращается особое внимание.

Здесь важно, кто является получателем информации (сменный технолог, диспетчер, оператор и т. п.) и что он должен с ней делать, т. е. должны быть четкие постановки задач управления, решаемых в информационно-советующем режиме, и разработка на их основе алгоритмов действия персонала в тех или иных ситуациях. Эти алгоритмы должны быть отражены в должностных инструкциях персонала АСУ ТП, входящих в состав документов организационного обеспечения АСУ ТП.

Другим важным условием является проверка возможности человека оперативно и эффективно (т. е. с пользой) воспринимать предоставляемую ему информацию. Современные ЭВМ способны в течение нескольких минут предоставить большие массивы информации, содержащие сотни данных, детально и весьма подробно характеризующие процесс. Однако человеку понадобится много времени (порядка нескольких часов), чтобы во всем этом разобраться и принять решение.

Гораздо удобна выданная своевременно форма, содержащая 5—10 тщательно отобранных и рассчитанных по моделям данных, в комплексе отражающих общую картину ситуации. Еще лучше, если эти данные сопровождаются конкретной рекомендацией, что предпринять. Для этого нужны достаточно сложные, но поддающиеся формализации алгоритмы принятия решений.

Зачастую технологический персонал (сменный технолог, оператор агрегата и т. п.) по роду своей основной деятельности не может постоянно находиться у внешних устройств ЭВМ — дисплея, устройства печати. Для таких пользователей предусматривается возможность выдачи информации по предыстории процесса. Например, полезно в форме по итогам работы за час предусмотреть данные по производительности и ТЭП не только за текущий, но и за предыдущий час.

Рассмотрим некоторые вопросы реализации в составе АСУ ТП задач представления информации. Обычно задачи решаются относительно редко: периодически в конце часа, в конце смены либо по вызову оператора. Характер информации, необходимой для таких задач, определяется содержанием форм и видеogramм. Объем информации в ряде случаев может быть весьма значительным; например, во многих АСУ ТП в конце смены выдается несколько итоговых форм, содержащих в общей сложности около сотни показателей. Естественно, что сбор и подготовка такого объема информации в базе данных являются достаточно серьезной проблемой.

Несколько проще обстоит дело с короткими формами, чаще всего имеющими характер справок, выдаваемых по запросу оператора. Тем не менее и они содержат до 10—20 данных (обычно разнородных), которые следует оперативно найти в базе данных.

Относительно нечастая выдача форм и видеogramм предопределяет характер предоставляемой информации. Очевидно, мгновенные значения расхода либо температуры в форме, выдаваемой достаточно редко (например, в конце часа), мало полезны. Интерес представляет информация о нарушениях хода технологического процесса: когда и насколько отклонился важный технологический параметр от нормы. Для расходов важны

средние и интегрально-накопительные значения. Типичным является также представление в формах (особенно в итоговых) разного рода ТЭП.

Таким образом, данный класс задач базируется на существенно обработанной информации. Разработка алгоритмов таких обработок — важная проблема в любом АСУ ТП. Причем сложность заключается не в алгоритмах собственно вычислений, а в их организации.

Необходимые данные должны быть получены от датчиков и обработаны так, чтобы к моменту выдачи формы все было готово. Обычно простые обработки (типа усреднения, интегрирования) выполняют в темпе опроса датчиков. Выбор этого темпа (т. е. частоты опроса) зависит от многих факторов. Если речь идет о расходе, то обычно исходят из необходимой точности интегральной оценки за интересующий интервал, например за час. Для параметров, отклонение которых от нормы необходимо фиксировать, исходят из времени спада автокорреляционной функции и допустимого времени реакции системы на ситуацию.

Пример. Время спада автокорреляционной функции по температуре, важной для процесса, 10 мин. Допустимое время реакции — 1–2 мин. Допустимое отклонение от нормы 2 °С. Среднеквадратичное отклонение реального процесса 1 °С, т. е. нарушения достаточно редки.

Исходя из времени реакции, можно принять частоту опроса 1 мин (60 с). Примем в первом приближении аппроксимацию автокорреляционной функции экспонентой. Тогда коэффициент корреляции между точками опроса составит $R = e^{-3/10} \cdot 1 \approx 0,74$, а ошибка (среднеквадратичная) линейного прогноза процесса

$$\delta = 1^\circ\text{C} / \sqrt{1 - R^2} \approx 0,7^\circ\text{C}.$$

Выберем первую контрольную границу в $2 - 0,7 = 1,3^\circ\text{C}$, тогда с достаточной вероятностью можно считать, что, если зафиксировано предаварийное нарушение (т. е. отклонение более $1,3^\circ\text{C}$), на следующем такте (через 60 с) аварийное отклонение (в 2°C) еще не будет достигнуто и есть время (60–90 с) для принятия мер.

Ряд обработок, требующих относительно громоздких вычислений, целесообразно проводить не в темпе опроса, а гораздо реже (в идеальном случае — непосредственно при подготовке формы или видеограммы). Типичный пример этого — расчет ТЭП, которые часто необходимо знать только за контрольный интервал (например, за смену).

Однако здесь нужно учитывать следующее: обычно в конце отчетного периода (часа, смены, суток) нагрузка на процессор существенно возрастает, так как выполняются итоговые расчеты (в частности, по интегральным оценкам за период), вычисляются ТЭП и, наконец, готовятся и выдаются на внешние устройства соответствующие формы. При этом многие расчеты заранее выполнить нельзя, так как до конца периода не будет

еще части исходных данных, например интегралов по расходам продуктов. Поэтому в некоторых неудачно спроектированных АСУ ТП итоговые формы за смену выдаются в течение 1—1,5 ч в начале следующей смены. Во избежание этого целесообразно все, что можно, готовить для выдачи форм заранее, делая нагрузку на процессор более равномерной.

Аналогичная ситуация возникает с видеодиаграммами и формами, выдаваемыми по запросу, т. е. с точки зрения ЭВМ в случайные моменты времени. Здесь оперативность выдачи формы особенно важна. Опыт показывает, что ожидание ответа (т. е. формы, видеодиаграммы) более 5—10 с раздражает оператора. Если же форма выдается через несколько минут, то персонал обычно ее игнорирует, т. е. не использует возможность вызова данной формы. Таким образом, рациональная организация данных и распределение вычислительных операций с учетом общего графика загрузки процессора является важнейшей задачей эффективной работы таких подсистем АСУ ТП.

Теперь рассмотрим реакции системы на предаварийные ситуации и технологические нарушения. Обычно в АСУ ТП для этого предусмотрен особый вид сообщений, выдаваемых на дисплей оператора. Если позволяют технические средства, такое сообщение сопровождается звуковым сигналом, миганием текста на экране, включением световой сигнализации и т. п. Обычно предаварийные сообщения содержат минимальное количество переменной информации. Чаще всего это заранее подготовленный текст, иногда одно-два значения параметров. Сложность такого рода сообщений заключается в обработке информации, как правило, логического типа: «величина больше нормы», «механизм включен» и т. п. Причем даже для относительно простых агрегатов приходится сопоставлять значения двух-трех параметров, чтобы осмысленно идентифицировать ситуацию. Такого рода обработки выделяют в отдельные задачи, инициирующие выдачу необходимых сообщений.

Особый вид составляет оперативное представление информации в темпе хода процесса. Обычно такая информация выдается на управляемую от ЭВМ мнемосхему, разного рода табло, иногда на самописцы. В последние годы получают распространение графические (в том числе цветные) видеотерминалы для представления фрагментов мнемосхемы. Подготовка информации для задач управления такого рода устройствами (табло, мнемосхемами и т. п.) имеет много общего с подготовкой информации для задач управления технологическим процессом.

Особенность заключается в выборе темпа обновления информации. Помимо динамических характеристик параметров процесса, здесь следует учитывать особенности восприятия челове-

масштабирование данных. Информация от задачи 4, а также непосредственно из базы данных 1 подается задачам 3.

Ряд подготовительных вычислений, например расчет ТЭП, выполняется заранее задачей 5 или несколькими задачами такого типа. Поскольку их информация нужна непосредственно для форм, запуск таких задач тоже осуществляет диспетчер 2 по времени. Аналогичным образом работают задачи выдачи форм по запросу 9. Эти задачи также запускаются задачей-диспетчером 2, но по запросам оператора.

В отдельную цепочку выделен комплекс задач выдачи аварийных сообщений. Здесь «инициатива» принадлежит задаче анализа предаварийной ситуации 7, которая может работать в темпе опроса датчиков. Эта задача инициирует задачу подготовки информации 8, а затем задачу выдачи сообщения 6.

В отдельную подсистему выделены также задачи управления различными устройствами представления информации 10 (табло, мнемосхема, графический дисплей и т. п.). Для этих задач готовит информацию задача 11, которая также осуществляет и диспетчерские функции.

Изложенное выше отражает функциональную структуру и взаимосвязи задач; у программной реализации структура, как правило, будет иной. Например, задачи 3, 4 и 9 целесообразно выделить в одну универсальную программу подготовки и выдачи форм. Диспетчер 2 часто является частью программы опроса датчиков и т. п.

Кроме того, запросы по времени (12 на рис. 8.2) и от оператора 13 при программной реализации являются выходами комплексов других программ: для 13 — это часто программа диалога, для 12 — это диспетчер более высокого уровня или запуск от операционной системы реального времени.

§ 8.2. ПЕРВИЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ В АСУ ТП, ПОНЯТИЕ О БАЗАХ ДАННЫХ

Главным источником информации в АСУ ТП является сам объект управления, т. е. датчики, опрашиваемые ЭВМ в определенном темпе. С учетом требований к частоте использования информации и ее обработке структура комплекса задач, получающих и обрабатывающих информацию от объекта, достаточно сложна. Разработка такого комплекса ведется в следующем порядке.

1. Определяют, сколько следует иметь периодов опроса датчиков. Как правило, исходя из требований задач управления и задач контроля за отклонениями, получается большое разнообразие периодов опроса. Обычно без особого ухудшения системы их можно свести к трем—пяти стандартным периодам.

Увеличивать число периодов опроса нежелательно, так как это заметно усложняет настройку опроса и связанных с ним обработок. В то же время не следует впадать и в другую крайность — ограничиваться одним-двумя периодами, поскольку это приводит к увеличению без необходимости частоты опроса некоторых датчиков и нагрузки на ЭВМ.

2. Находят, какие нужны обработки для каждого датчика. Ответ на этот вопрос отчасти получен при разработке прикладных задач управления, выдачи форм и т. п. Однако один и тот же параметр часто используется для многих целей (т. е. в разных задачах) и, следовательно, требует более разнообразных обработок (например, нескольких видов фильтрации, интегрирования за несколько периодов и т. п.). Сведя это в единый цикл обработки, можно упростить вычисления, объединив часть обработок.

3. Разрабатывают организацию обработок. Часть обработок целесообразно выполнять в темпе опроса, другие следует делать гораздо реже, по мере необходимости. Здесь многие вопросы должны решаться с учетом архитектуры ЭВМ, в частности быстродействия по разным видам команд, особенностей операционной системы и программного обеспечения, так как чаще всего используются стандартные пакеты сбора и обработки.

Существенную роль в разработке комплекса задач играет также специфика аппаратуры устройств связи с объектом (УСО). Например, если аналого-цифровой преобразователь (АЦП) работает относительно медленно, целесообразно обработки проводить в темпе опроса датчиков, но асинхронно с ним. Пока идет преобразование очередного сигнала в АЦП, центральный процессор обрабатывает информацию от опрошенных ранее датчиков. По завершении преобразования поступает прерывание от АЦП, процессор запускает опрос очередного датчика и продолжает обработки.

Не менее важным источником информации является ручной ввод. Вручную вводят результаты лабораторных анализов, разного рода плановые показатели, задания и уставки для задач управления и т. п.

С точки зрения оператора все задачи ввода можно разделить на две группы: 1) диалоговые, когда на дисплей последовательно выводится вопрос, иногда подсказка и оператор должен ответить небольшой группой данных (обычно от одного до пяти); 2) ввод форм, т. е. заполнение определенных полей в выведенной на экран форме. На практике применяют сочетание обеих групп. Диалог ориентирован на человека, редко используемого ЭВМ, а также на ввод небольшого объема строго контролируемой информации, как правило, достаточно ответственной для системы.

Ввод форм рассчитан на достаточно опытного оператора, у которого меньше вероятность случайной ошибки и который хорошо знает, что вводить. Этим способом целесообразно вводить относительно большие массивы данных (типа лабораторных анализов), контроль которых на корректность достаточно прост (например, сахаристость мелассы не может быть отрицательной и больше 50%).

Стандартные пакеты программ для ввода ориентированы почти всегда на второй подход (ввод форм). В современных пакетах недостатки данного подхода во многом скомпенсированы дополнительным сервисом: выдача подсказки в любой момент по запросу оператора с перечнем возможностей и т. п. При диалоговом подходе стандартизировать программные решения достаточно сложно, так как диалог по своей сути сильно привязан к конкретной содержательной задаче.

Из изложенного следует, что, выбирая структуру ручного ввода, необходимо учесть многие факторы: какие формы следует вводить, как часто, кто это будет делать и т. п. Один из важнейших вопросов — объем (т. е. количество и частота) вводимой информации.

В итоге на завершающем этапе разработок алгоритмического обеспечения возникает необходимость в организации ввода в течение смены в общей сложности нескольких сотен параметров. В этой ситуации необходимо правильно оценить, какая информация действительно нужна, какими данными реально располагает персонал производства, что можно вычислить косвенно по другим параметрам и т. п. В ряде случаев целесообразно даже отказаться от решения некоторых задач. Опыт многих АСУ ТП показывает, что для ввода 260—300 данных в смену следует выделять человека, большая часть рабочего времени которого уйдет не на ввод, а на сбор необходимых данных.

Разработка этой части информационного обеспечения тесно увязывается с разработкой организационного обеспечения АСУ ТП. Вопрос, кто отвечает за ввод каждой группы параметров и в какое время, отражается в соответствующих документах, в частности в должностных инструкциях персонала.

Центральным вопросом при разработке информационного обеспечения автоматизированной системы любого вида является выбор идеологии построения базы данных. В частности, наиболее известны три возможные логические структуры баз данных: иерархическая, сетевая и реляционная.

Первых два вида довольно широко применяются в чисто информационных системах, в частности в АСУП. В АСУ ТП пищевых производств некоторое применение получила сетевая база данных «СЕТОР».

Для манипулирования * данными в стандартных пакетах ** предусмотрено программное обеспечение управления данными (поиска, выборки, обновления, добавления новых данных и т. п.), т. е. так называемые СУБД (система управления базой данных). В последние годы все большее распространение получают реляционные базы данных, в частности, из-за существенно более широких возможностей их СУБД. Построение таких СУБД базируется на так называемой реляционной алгебре. Теория этого вопроса в последние годы хорошо разработана.

Все сказанное относится также и к базам данных АСУ ТП. Однако здесь имеется определенная специфика: 1) сложность структуры и логические связи между данными в АСУ ТП меньше, чем в средних чисто информационных системах (например, чем в АСУП); 2) в АСУ ТП гораздо жестче временные ограничения на доступ к информации, что затрудняет применение сложных СУБД. В этой связи во многих АСУ ТП пищевых производств используются относительно простые базы данных, например в виде нескольких файлов прямого доступа, либо с доступом по символьному ключу, либо еще проще — по номеру записи.

Необходимость быстрого обмена информацией, например, между задачей опроса датчиков и задачами управления приводит к тому, что в ряде АСУ ТП применяют ОЗУ-резидентные *** базы данных, в простейших случаях — в виде массива данных в памяти, за каждой ячейкой которого строго закреплено определенное данное. В таких АСУ ТП СУБД в реальном времени не работает, а используется только настройка задач на конкретные адреса в ОЗУ-резидентной базе данных. Настройка осуществляется либо только при запуске АСУ ТП, либо еще ранее — при проектировании системы, т. е. здесь СУБД выступает как элемент САПР.

Известны и АСУ ТП с компромиссным решением вопроса идеологии базы данных. В них «быстрые» задачи (опрос, задачи управления и т. п.) работают с физически относительно простой ОЗУ-резидентной базой данных. А задачи, которые работают с большими объемами информации, но относительно редко (например, задачи вывода сложных форм, некоторые расчетные задачи), используют сложную дисковую базу данных и работа-

* Под манипулированием данными обычно понимают выбор из базы данных информации по определенному признаку независимо от физического расположения информации.

** Согласно отраслевому стандарту пакет — это комплекс взаимосвязанных прикладных программ, а также вспомогательных программ, обеспечивающих правильное совместное функционирование прикладных программ.

*** Т. е. постоянно расположенные в памяти в виде набора дисковых файлов.

ют с ней либо непосредственно по предварительной настройке, либо через СУБД. Обычно предусматривают также задачи, периодически переписывающие информацию из ОЗУ-резидентной базы данных на диск. Таким образом, имеется как бы две базы данных либо одна, но физически разделенная на две части.

Дальнейшее развитие идеи нескольких баз данных (так называемые распределенные базы данных) получили в связи с распространением многопроцессорных и многомашинных вычислительных комплексов (см. § 7.4). На структуру таких баз данных существенно влияют архитектура (топология) вычислительной сети, протокол и скорость межмашинного обмена, а также ряд других факторов. Существенную проблему представляет также необходимость значительного дублирования данных. Например, если опрос ведет одна ЭВМ, обработку другая, а формы выдает третья, то значительная часть информации должна присутствовать во всех трех локальных базах данных ЭВМ.

§ 8.3. АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА КОСВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ВИДЫ ОБРАБОТОК СИГНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 8.3 приведена логическая структура канала измерения. Информация от объекта принимается техническими средствами АСУ ТП и вводится в ЭВМ. Далее обработка ведется программными средствами. Конечный результат помещается в базу данных АСУ ТП. Таким образом, в процессе прохождения через канал информация меняет свою форму от физического параметра объекта (температуры, давления и т. п.) через стандартный аналоговый сигнал, иногда несколько видов сигнала (пневматический, токовый и т. д.), до цифровой формы, с которой работает ЭВМ.

Рассмотрим прохождение информации более подробно (рис. 8.4). Состояние объекта воспринимается датчиком и преобразуется в стандартный сигнал ГСП. Иногда комплект датчика состоит из двух частей — чувствительного элемента и первичного преобразователя (например, индукционные расходомеры, термометры сопротивления с мостом и т. п.). В простейшем случае выходной электрический сигнал датчика может подаваться в УСО ЭВМ. Однако так бывает редко. Обычно датчик достаточно удален от ЭВМ и требуется обеспечить достаточную помехозащищенность линии передачи. Наиболее рациональное решение — стандартный токовый сигнал 0—5 или 0—20 мА. Эти сигналы воспринимает большинство типов стандартного УСО и не требуется дополнительного преобразования. Помехозащищенность здесь достигается большим внутренним сопротивле-



Рис. 8.3. Логическая структура канала измерения:

1 — объект; 2 — технические средства; 3 — программное обеспечение; 4 — база данных

Рис. 8.4. Структурная схема технических средств каналов измерения:

1 — объект; 2, 3 — датчик и первичный преобразователь; 4 — преобразователь сигнала; 5 — устройство связи с объектом ЭВМ

нием источника (датчика либо преобразователя). Так, при внутреннем сопротивлении источника * 1 МОм изменение сопротивления линии порядка сотен ом вызывает погрешность менее сотых процента. Чаводки от посторонних источников на такую линию, выпол...ную экранированным кабелем, также будут незначительными.

Поскольку далеко не все датчики имеют токовый выход, устанавливаются промежуточные преобразователи. Часто один и тот же датчик используется и для информации в ЭВМ, и для управления в локальной системе, и для представления информации на мнемосхеме, поэтому возникает потребность в установке дополнительных приборов для размножения и усиления сигнала.

Во многих случаях часть обработок сигнала решается на аппаратном уровне. Чаще всего это относится к фильтрации. Наличие высокочастотной составляющей в сигнале заставляет увеличивать частоту опроса датчика и усложнять программные обработки, дополнительно загружая ЭВМ.

Гораздо проще и дешевле установить фильтры (апериодические звенья с постоянной времени 5—60 с). Для пневматического сигнала — это приборы обратного предварения, для электрического — RC-цепочки. Условно такие фильтры тоже можно считать преобразователями сигнала. У некоторых типов ЭВМ фильтры входят также в стандартный состав УСО.

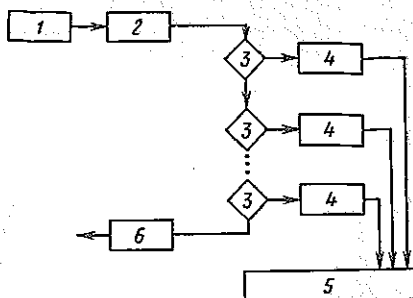
Наконец, последним этапом аппаратного преобразования является УСО ЭВМ. Для аналоговых сигналов — это разного рода АЦП **. При проектировании подсистемы аналогового ввода учитывают следующее. Поскольку в основном к УСО подводят токовые сигналы, следует правильно выбрать схему (одно- или

* Большинство приборов с токовым выходом имеет в качестве источника тока операционный усилитель с теоретически бесконечно большим внутренним сопротивлением. Это отражает ограниченную мощность выходного сигнала.

** Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — устройство для преобразования аналогового сигнала (напряжения или силы тока) в цифровую форму — обычно длиной 10—12 бит.

Рис. 8.5. Блок-схема программного обеспечения канала измерения:

1 — драйвер УСО; 2 — обращение к драйверу; 3 — выбор необходимых обработок; 4 — обработки сигнала; 5 — интерфейс к базе данных; 6 — переход к следующему каналу



двухпроводная). Однопроводная схема позволяет существенно сэкономить кабель и упростить монтажные работы. Однако для большинства типов УСО в этом случае требуется применять вариант включения с двухполосной коммутацией сигналов во избежание появления ложных цепей через общий провод. Это уменьшает емкость УСО вдвое. Здесь также важно учитывать способ заземления как УСО, так и источников сигнала, предусмотреть защиту УСО от перенапряжения. В ряде случаев аналоговые УСО имеют гальваническую развязку первичной аналоговой цепи от измерительной цифровой. В некоторых других типах устройств связи с объектом на входе устанавливают стабилитроны.

Работа с аналоговым УСО обычно осуществляется через специальный драйвер*, входящий в состав операционной системы (рис. 8.5). При обращении к драйверу указывается адрес подключения датчика к УСО, иногда уточняются некоторые детали его опроса.

Все операции по управлению АЦП, а при необходимости и по управлению коммутацией сигналов выполняются драйвером, причем асинхронно с другими задачами (программами), обрабатываемыми ЭВМ. По завершении преобразования задача пользователя и опроса датчиков получает двоичный код, пропорциональный принятому сигналу. После этого вступает в действие алгоритм обработки. На рис. 8.5 этот момент представлен в упрощенном виде. В некоторых пакетах опроса и первичной обработки принятый от УСО код передается в промежуточный буфер или базу данных и выполняется опрос следующего датчика. В других пакетах сначала выполняются некоторые обработки и только затем опрашивается следующий датчик. Для каждого датчика выбирается в блоках 3 (см. рис. 8.5) необхо-

* Драйвер — программа управления внешним устройством ЭВМ, например дисплеем, печатью и т. п. В драйвере детально учитываются технические особенности устройства — время реакции, кодировка символов и т. п. Это избавляет прикладные программы от необходимости учета всех этих особенностей.

димый набор обработок (блоки 4) и результаты заносятся в базу данных.

Для подавляющего большинства датчиков применяются следующие стандартные виды первичных обработок: фильтрация, усреднение, интегрирование, масштабирование, контроль на допустимые границы.

Фильтрация. Назначение фильтрации состоит в подавлении относительно высокочастотных помех. Здесь важно уяснить, что для данного сигнала является помехой, а что — полезной информацией. Например, давление пара в коллекторе — быстропеременный параметр, оно зависит от работы котельной; при пяти-шести потребителях от этого коллектора — от работы соответствующих агрегатов и их контуров регулирования и т. п. Если сигнал о значении давления используется в системе НЦУ для его стабилизации, то важна как раз высокочастотная составляющая. В этом случае выбирают высокую частоту опроса и передают задаче управления принятый от АЦП код. Для сокращения загрузки процессора от обработок вообще можно отказаться. В случае, если давление используется для вычисления энтальпии пара при расчетах ТЭП, высокочастотная составляющая — это помеха и требуется «глубокая» фильтрация. Наконец, этот же сигнал может анализироваться на максимальное предаварийное значение. Здесь требуется компромиссный подход. Очевидно, короткий выброс (порядка 1 с) не опасен, но если высокое давление удерживается относительно долго, это может означать неисправность (например, заклинивание регулирующего клапана) и требуется аварийный сигнал. Разумеется, усложнением алгоритма задачи контроля можно выявлять такие ситуации, но рациональнее и надежнее просто отфильтровать короткие выбросы во избежание ложных аварийных сигналов. Составляющая сигнала с периодом порядка времени регулирования подсистемы стабилизации давления должна алгоритмом фильтрации пропускаться и анализироваться на максимальное отклонение.

Известно довольно большое число алгоритмов фильтрации. Широкое применение получил так называемый алгоритм экспоненциального сглаживания, задаваемый в виде

$$y_i = \alpha(x_i - y_{i-1}) + y_{i-1}, \quad (8.1)$$

где y_i , y_{i-1} — текущее и предыдущее значения отфильтрованного сигнала, т. е. значения на тактах i и $i-1$; α — коэффициент фильтрации ($0 < \alpha < 1$); x_i — текущее значение входа.

Этот алгоритм часто представляют в форме

$$y_i = \alpha x_i + (1 - \alpha) y_{i-1}. \quad (8.2)$$

Хотя математически эти выражения, естественно, совершенно эквивалентны, при программной реализации применяют

именно формулу (8.1) (одно умножение вместо двух дает заметный выигрыш, так как на большинстве ЭВМ умножение на порядок медленнее сложения и вычитания).

Достоинство алгоритма — его простота, отсутствие учета предыстории. Значение y_{i-1} просто берется из базы данных, а новое значение y_i записывается на его место. Недостаток — относительно низкая точность. Можно показать, что данный алгоритм получается при дискретной аппроксимации апериодического непрерывного звена в предположении, что x_i между тактами постоянно. Иначе говоря, используется интегрирование методом прямоугольников (см. также пример в § 5.1 о z-преобразовании).

Более точен алгоритм, использующий метод трапеции, имеющий вид

$$\left. \begin{aligned} y_i &= \alpha/2(x_i + z_{i-1} - y_{i-1}) + y_{i-1}; \\ z_i &= x_i - y_i. \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

Для пояснения сути алгоритма представим выражения (8.3) в виде

$$y_i = \alpha \left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2} - y_{i-1} \right) + y_{i-1}. \quad (8.3a)$$

Очевидно, вместо x_i используется среднее значение сигнала между тактами $(x_i + x_{i-1})/2$. Полученный алгоритм мало отличается от выражения (8.1) в вычислительном плане, однако он требует дополнительной ячейки для предыстории по x_{i-1} или для запоминания z_i . Дополнительные затраты памяти в общем незначительны, но несколько усложняется интерфейс * к подпрограмме.

Указанные два алгоритма в целом покрывают до 90% потребностей АСУ ТП. В небольшом числе случаев требуется специальный вид спектральной плотности сигнала с крутым спадом (порядка 40 дБ на декаду) в области высоких частот. Обычно это необходимо, когда частота полезного сигнала приближается к частоте помех. В этом случае алгоритм (8.3) применяют дважды (последовательно), что, очевидно, эквивалентно апериодическому звену второго порядка. Программно это реализуется сравнительно просто, например как еще одна обработка.

Во многих случаях реальной потребности в фильтрации программными средствами нет. Помехи на выходе датчиков с пе-

* Интерфейс — совокупность правил, алгоритмов и средств сопряжения сложных систем. В данном контексте — описание параметров, передаваемых программе, с указанием их места в памяти ЭВМ.

риодом порядка 2 с и менее лучше фильтровать аппаратно, а токовая линия имеет хорошую помехозащищенность. Вопрос выбора типа фильтрации решается в несколько этапов: на стадии исследования, при проектировании и окончательно уточняется при наладке АСУ ТП. Тогда же окончательно подбирается величина настройки.

Можно показать, что коэффициент фильтрации

$$\alpha = T_0/T_\Phi,$$

где T_0 — время между тактами обработки; T_Φ — постоянная времени эквивалентного аperiodического звена (фильтра).

Согласно теореме Котельникова дискретная система пропускает сигнал с частотой не более $\omega_c = \pi/T$. Помеха с частотой выше ω_c системой фильтруется за счет квантования сигнала по времени. Поэтому алгоритмы фильтрации могут быть настроены на помеху с частотой $\omega_1 \leq (0,5 \div 0,8) \omega_c$. В то же время фильтр, как известно, эффективно подавляет сигнал с частотой ω_1 , когда $T_\Phi \omega_1 \geq 2,5 \div 3$.

Величину α следует выбирать с учетом этих соображений. Реально $\alpha > 0,8$ не имеет смысла — эффекта практически нет, а $\alpha < 0,1$ также нежелательно. Алгоритмы фильтрации реализованы, как правило, на целочисленной арифметике*, и при малых α начинает заметно сказываться погрешность округления.

Усреднение. В ряде случаев, когда представляют интерес только очень низкие частоты, вместо фильтрации применяют усреднение. В пределе среднее значение параметра является оценкой его математического ожидания. Однако если процесс на значительных интервалах (порядка нескольких суток) стационарный, то математическое ожидание постоянно. Естественно, что для оперативного управления постоянная величина не информативна. Интерес представляют ее локальные колебания.

Выбор интервала усреднения зависит от потребностей управления. Иногда целесообразно принять за интервал усреднения время пребывания продукта в агрегате либо время прохода возмущения через объект (т. е. порядка трех постоянных времени). Если оценивают работу группы агрегатов, то учитывают подобные оценки для наиболее инерционных либо выбирают достаточно большой удобный интервал времени (например, час, смену и т. п.). Оценка за смену применяется во многих случаях также для оценки параметров, входящих в ТЭП.

* В мини- и микроЭВМ часто применяют двухбайтовую целочисленную арифметику. Для нее диапазон чисел —32768...+32767 (т. е. 2—1). Чаще всего такая арифметика реализуется отдельными командами ЭВМ, т. е. поддерживается аппаратно.

Во избежание хранения предыстории для расчета средних используют следующий рекуррентный алгоритм:

$$y_1 = x_1 \text{ при } i = 1; \quad (8.4)$$

$$y_i = y_{i-1} + \frac{x_i - y_{i-1}}{i} \text{ при } i > 1,$$

где i — номер шага, как и в выражении (8.1).

При достижении конца интервала сбрасывают i , т. е. $i=1$, и алгоритм повторяется. Очевидно, в вычислительном плане алгоритм очень близок к алгоритму (8.1). По результатам они тоже сравнимы, иначе говоря — это алгоритм (8.1) с параметром α , убывающим от 1 до малой величины. В связи с последним в конце интервала усреднения y_i практически не меняется.

Известна модификация алгоритма, подобная выражению (8.3), однако она практически не применяется из-за малой разницы в результатах уже при $i > 10$.

Алгоритм (8.4) применяют обычно в темпе опроса и реализуют целочисленной арифметикой, т. е. в кодах АЦП. В связи с этим имеется ряд ограничений. Если под величину выделен 1 байт (8 бит), то $i \leq 127$ для случая байтовой арифметики со знаком или $i \leq 255$ для беззнаковой арифметики. При периоде опроса 30 с и $i \leq 127$ можно получить период усреднения в 1 ч, чего в большинстве случаев вполне достаточно. Увеличение допустимого интервала для i нежелательно, так как алгоритм теряет чувствительность. Так, при 12-битовом коде от АЦП (т. е. в диапазоне $0 \div 4095$) и $i \leq 120$ алгоритм будет нечувствителен

при разнице между y_{i-1} и x_i в 1,5% (так как $\frac{120}{4095 \cdot 2} \cdot 100 \approx 1,5$), если программно реализовать деление с округлением. Учитывая погрешности датчиков, это вполне допустимо. При большем i погрешность будет пропорционально возрастать. Во избежание этого можно использовать арифметику более высокой точности (3—4 байта для переменных, 2 байта для i), но, во-первых, это потребует дополнительного масштабирования кода АЦП, а во-вторых (и это главное), такая арифметика в большинстве случаев аппаратно не поддерживается, а ее программная реализация существенно (в 3—4 раза) замедляет работу алгоритма.

Для данного алгоритма важен еще один момент: когда записывать y_i в базу данных — на каждом такте расчета или в конце усреднения. В первом случае другие задачи могут получить более или менее актуальное значение в любой момент, но степень его «усредненности» разная, в начале цикла — это вообще мгновенное значение. Во втором случае всегда есть среднее за заданный интервал, но только за предыдущий, т. е. информация запаздывает в среднем на половину интервала усред-

нения. На практике применяют оба решения в зависимости от того, что реально требуется.

Интегрирование. Этот вид обработки очень близок по идее к усреднению. Фактически результат усреднения просто надо умножить на время усреднения, т. е. выполнить масштабирование.

Обе обработки (и усреднение, и интегрирование), если требуются большие интервалы, выполняют с использованием плавающей арифметики* (т. е. с достаточно высокой точностью), но с большими периодами между тактами (например, 15 мин и более). Во многих случаях целесообразно применять усреднение за интервал, например 15 мин, в темпе опроса, а его результат использовать для более точного усреднения (или интегрирования) за интервал, например в смену или за несколько часов, при частоте работы один раз в 15 мин. Таким образом, мы имеем как бы двухуровневую обработку.

Масштабирование. Это — еще одна обработка, которую не всегда следует применять в темпе опроса. Ее алгоритм чрезвычайно прост

$$y = \frac{A - B}{K} x + B, \quad (8.5)$$

где y — переменная в физических единицах; x — переменная в коде АЦП; A, B — верхняя и нижняя границы шкалы датчика; K — диапазон кода АЦП.

Во многих случаях датчик работает от нуля, тогда $B=0$ и уравнение (8.5) упрощается:

$$y = (A/K) x. \quad (8.6)$$

Представление параметра в физических единицах предполагает использование плавающей арифметики. Поэтому на тех ЭВМ, где эта арифметика не реализована аппаратно, масштабирование — сравнительно медленная обработка. Ее целесообразно выполнять по мере необходимости, например перед выдачей формы либо перед записью в дисковую базу данных, так как обращение к диску тоже относительно медленная операция и ее выполняют достаточно редко, например один раз в 15 мин.

* Плавающая арифметика (синонимы — арифметика с плавающей точкой, арифметика с плавающей запятой) в отличие от целочисленной арифметики обеспечивает большую точность и больший диапазон представления чисел. Например, при 4-байтовом представлении чисел точность составляет 6—7 десятичных цифр (т. е. погрешность порядка 10^{-7}), а диапазон — от $\pm 10^{-37}$ до $\pm 10^{+37}$. Однако эта арифметика не на всех моделях ЭВМ реализована в виде команд (т. е. аппаратно). Часто для ее выполнения нужно вызывать специальные подпрограммы. Естественно, что в этом случае операция выполняется в 100—1000 раз медленнее, чем аналогичная операция целочисленной арифметики.

Контроль на допустимые границы. В отличие от других применение этой обработки предусматривает помещение в базу данных не параметра, а указания о нарушении допустимой границы и иногда времени начала и конца нарушения. В большинстве случаев устанавливают несколько двухсторонних границ. Например, самая узкая — диапазон, при котором ухудшаются ТЭП качества продукта; более широкая — диапазон предаварийного состояния, когда требуются немедленные действия; еще шире — диапазон недоверности датчика. Иногда для контроля достоверности используют также скорость изменения параметра. Резкое изменение параметра может свидетельствовать, например, об обрыве линии связи. Степень тяжести нарушения режима можно контролировать также по продолжительности нарушения.

Таким образом, данный вид обработки алгоритмически весьма сложен. Поскольку контроль нужно осуществлять достаточно часто, при программной реализации этот алгоритм разбивают на две части — относительно простую, работающую в темпе опроса, и алгоритмически более сложную, выполняющую основной анализ ситуации, которая запускается при необходимости. Иногда базу данных дополняют еще несколькими задачами — задачей аварийной сигнализации, задачей подготовки сообщений и т. п. Все эти задачи запускаются либо по времени, но относительно редко (например, один раз в час), либо при возникновении определенной ситуации.

В целом рассматриваемая обработка весьма специфична и должна в гораздо большей степени (по сравнению с описанными выше видами обработок) учитывать особенности технологии. Поэтому в стандартных пакетах ее либо вообще не предусматривают, либо предусматривают наиболее простую ее часть — только контроль отклонений параметра и скорости его изменения при работе в темпе опроса.

К данному виду обработки по идее близко примыкает обработка, предназначенная для контроля достоверности показаний датчиков. Известен ряд алгоритмов такого контроля. В блок-схеме алгоритма контроля достоверности аналогового параметра по кворумной схеме (рис. 8.6) на вход алгоритма подают три величины A_1 , A_2 и A_3 — данные одновременного замера одного параметра тремя разными датчиками. Если все три входа отличаются один от другого на величину меньшую, чем заданная погрешность ϵ , то выдается выходная величина y — среднее из трех. Если выход одного из датчиков существенно (больше чем на ϵ) отличается от двух других, то y — среднее из двух. В противном случае сигналы от всех трех датчиков считаются недоверными и устанавливают $y=0$, но можно задать y равным некоторому заранее заданному среднему зна-

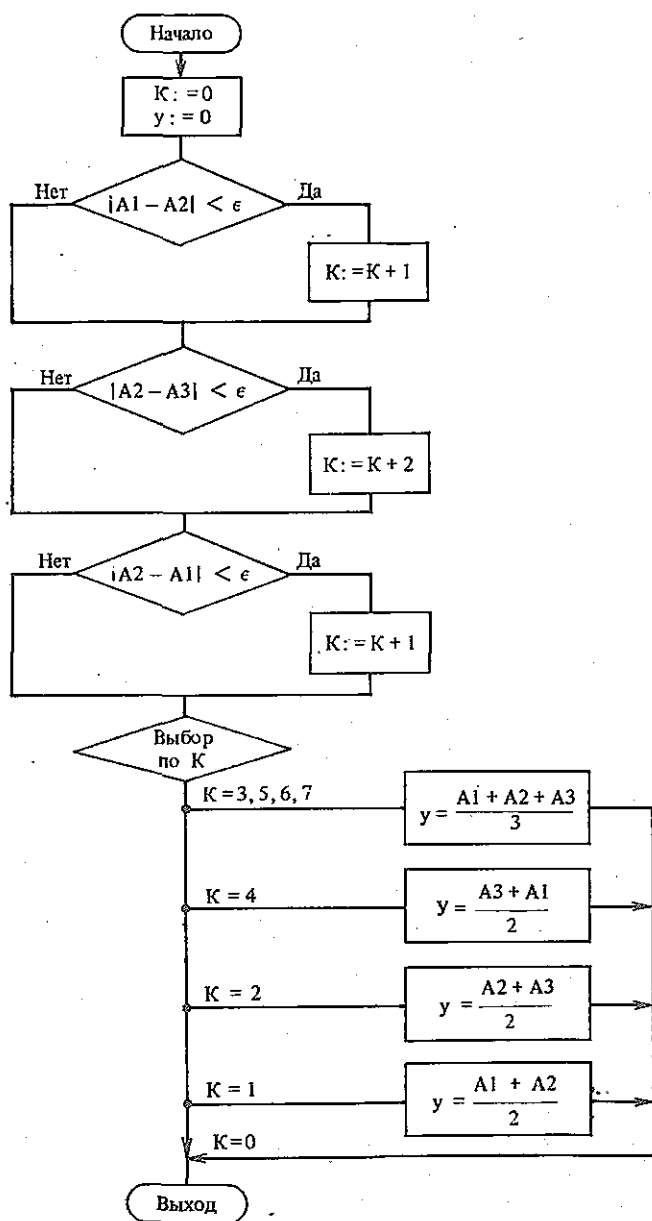


Рис. 8.6. Блок-схема алгоритма контроля достоверности по кворумной схеме

чению. К тому же выходом алгоритма является байт достоверности k , в котором задействовано три младших бита. Если результат недостоверен, $k=0$. Анализируя k в отдельном алгоритме диагностики, можно определить, какой датчик следует проверить.

Выше речь шла в основном об аналоговой информации. Однако в АСУ ТП широко применяется информация другого вида — дискретная, в основном два вида ее: собственно дискретные сигналы типа да—нет и число-импульсные сигналы. Рассмотрим вначале второй вид.

В пищевых производствах широко применяются разного рода дозаторы дискретного действия, счетчики и т. п. Во многих случаях просто и удобно передавать в ЭВМ электрический импульс, формируемый в момент срабатывания такого устройства. Например, во многих производствах используются весы-дозаторы. В момент готовности дозы происходит срабатывание весового механизма и большее число доз продукта поступает в процесс. Одновременно в момент срабатывания весового механизма простейшая релейная схема может сформировать короткий сигнал для ЭВМ. Другой пример — счетчики штучной продукции, выдающие импульс в момент прохождения очередной единицы продукции (бутылки, банки и т. п.).

Для приема такой информации в состав УСО ЭВМ входят модули ввода число-импульсных сигналов. Эти модули являются, по существу, счетчиками импульсов и в зависимости от исполнения способны накапливать, например, до 255 или до 65 535 импульсов. В момент опроса от ЭВМ счетчик сбрасывается и счет начинается сначала (есть варианты с опросом без сброса). Дальнейшая обработка таких сигналов практически не отличается от обработки аналоговых сигналов.

Применение число-импульсных сигналов имеет ряд достоинств: высокая помехозащищенность; модули ввода число-импульсных сигналов работают независимо от ЭВМ, поэтому короткие остановки ЭВМ из-за сбоев не приводят к потере информации; возможность в большинстве случаев сравнительно редкого опроса (например, при темпе 10 импульсов в минуту и емкости счетчика в 255 единиц модуль можно опрашивать через 20—25 мин без опасности переполнения).

Принципиально другой характер имеют дискретные сигналы. Как правило, они используются для ввода в ЭВМ информации не количественного, а логического характера: включен или не включен механизм, открыт или закрыт клапан и т. п. Такие сигналы вводятся в ЭВМ с помощью специальных многоканальных модулей УСО (например, 16-канальных). Опрос таких модулей чаще всего производится по времени, т. е. периодически, по инициативе ЭВМ. Однако некоторые типы таких модулей

(так называемые модули ввода инициативных сигналов) могут опрашиваться по инициативе самих модулей при изменении состояния одного любого входа модуля.

Через такие модули целесообразно вводить сигналы пред-аварийной сигнализации, а также сигналы о состоянии оборудования, необходимые для учета простоев. Программная реализация ввода инициативных сигналов относительно сложна и требует детального знания операционной системы.

Дискретные сигналы широко применяются в задачах логического управления, при реализации на ЭВМ разного рода блокировок, при организации от ЭВМ последовательного запуска механизмов, в частности для предпускового контроля готовности очередного механизма к работе. Один из примеров такой системы изображен на рис. 1.11.

§ 8.4. ПОДСИСТЕМА РАСЧЕТА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Помимо непосредственно измеряемых параметров и параметров, вводимых вручную, в АСУ ТП широко используются расчетные данные. Расчету подлежат те показатели, которые реально на объекте не существуют, а являются более или менее объективной оценкой ситуации на объекте, например ТЭП. Сюда же относится весьма широкий класс параметров, которые нельзя или нецелесообразно измерять непосредственно, а также вводить вручную. Расчет таких параметров называют косвенными вычислениями.

Простейший пример такого вычисления — расчет расхода продукта по перепаду давления на диафрагме ΔP :

$$G = A \sqrt{\Delta P}, \quad (8.7)$$

где A — коэффициент пересчета.

Однако алгоритмы типа (8.7) относятся, как правило, к первичным обработкам и выполняются либо в темпе опроса, либо при масштабировании. Формально к косвенным оценкам можно также отнести описанный выше кворумный алгоритм (см. рис. 8.6).

Результаты расчета показателей процесса по весьма сложным моделям также можно считать косвенной оценкой параметров. Однако практика эксплуатации большинства АСУ ТП показала, что если алгоритм оценки достаточно сложен, то его относят к той содержательной задаче, которая использует его результаты. Например, расчетная идентификация динамических параметров объекта включается в состав задачи управления или адаптации, а не в состав информационных задач.

Достаточно типичной является оценка качественных показа-

телей процесса по косвенным параметрам. Приведем пример такой оценки для схемы автоматизации дрожжебродильного отделения и ректификации. По таблицам равновесия водно-спиртовой смеси и экспериментальными исследованиями установлено, что концентрация на выходе из отходной (бражной) колонны y связана с температурой Θ и давлением P на верхней тарелке колонны соотношением

$$y = 5,5(95 - \Theta) - 12,5(P - 0,5) + 50. \quad (8.8)$$

Для измерения Θ используется датчик с диапазоном 80—105°C, для измерения P — датчик с диапазоном 0—16 кПа. В уравнении (8.8) объемная концентрация y выражена в процентах. При 12-битном АЦП коды АЦП будут следующими:

для Θ

$$K_{\Theta} = \frac{\Theta - 80}{25} \cdot 4095,$$

для P

$$K_P = (P/1,6) \cdot 4095.$$

С учетом этих кодов выражение (8.8) примет вид

$$y = 138,75 - (K_{\Theta}/29,78) - (K_P/204,75). \quad (8.9)$$

Полученное соотношение можно использовать как основу для программной реализации. Необходимо учесть, что выражение (8.8) действительно только в определенном диапазоне ($90 < \Theta < 100$, $0,2 < P < 1,2$), за пределами которого y недостоверно. Соотношение (8.9) достаточно просто и его при необходимости можно включить в число обработок типа масштабирования.

В определенном смысле косвенными оценками можно считать также расчет ТЭП. Назначением разного рода ТЭП, формируемых в АСУ ТП, является оценка качества функционирования по технологии от отдельных агрегатов до предприятия в целом для принятия решений по управлению, как оперативно, так и долгосрочному. Таким образом, расчет ТЭП предполагает в неявном виде, что с помощью АСУ ТП персонал решает задачи оптимального либо по крайней мере рационального управления технологическим процессом. Поэтому в организационном обеспечении АСУ ТП, в частности в должностных инструкциях технологического персонала, обязательно предусматриваются разделы с указанием, что конкретно следует делать при том или ином значении определенного ТЭП (т. е. применяется алгоритм управления). Исходя из требований таких алгоритмов, определяется номенклатура рассчитываемых ТЭП (что и за какой период вычисляется).

Из изложенного видно, что ТЭП имеют характер критерия оптимальности (целевой функции) управления. В частности, правильно выбранный показатель должен в идеальном варианте экстремально зависеть от управления. К сожалению, на практике этого добиться очень тяжело.

Во-первых, если целевая функция отвечает ряду требований, характерных для задач оптимизации, то, как правило, нетрудно построить формализованный алгоритм оптимального управления и выдавать в контуры регулирования либо оптимальное задание, либо в формах не только ТЭП, но и конкретные рекомендации по управлению. В этом случае наличие ТЭП в форме имеет чисто вспомогательный, информационный характер.

Во-вторых, требования задач управления приводят к достаточно формализованному критерию, смысл которого нелегко объяснить персоналу, особенно технологическому, незнакомому с теорией оптимального управления. Для операторов отдельных участков, сменных технологов и т. п. более понятны такие показатели, как средняя производительность, удельные затраты пара и электроэнергии на единицу продукции и т. п.

Таким образом, часто принимаются компромиссные решения с целью помочь персоналу решить трудно формализуемые во многих случаях многокритериальные задачи управления. В такой ситуации технологический персонал выступает в роли экспертов, а роль АСУ ТП — предоставить оперативно всю необходимую информацию для принятия решения. В этом смысле роль ТЭП — дать в виде нескольких (двух—пяти) показателей наглядную и обобщенную картину качества функционирования процесса.

Может создаться впечатление, что ТЭП можно использовать в качестве критерия в задачах оптимизации. В реальных АСУ ТП такое встречается крайне редко. Несмотря на то что по физическому смыслу ТЭП и критерий оптимальности часто близки, имеется определенная специфика, связанная с разными пользователями. Для ТЭП — это человек, а для критерия оптимальности — это алгоритм (задача) поиска экстремума. К тому же ТЭП, как правило, отражает фактическое состояние процесса, не обязательно оптимальное, или дает интегральную (усредненную) оценку за некоторый период. В отличие от этого для оптимальной задачи величина критерия отражает процесс поиска, обычно на модели, решения данной задачи.

Различные виды ТЭП ориентированы на соответствующие уровни управления. Оператору, обслуживающему агрегат, и начальнику участка для оперативного управления нужны ТЭП за час, иногда усредненные ТЭП на данный момент с начала смены. Средние ТЭП за смену используют более высокий уровень управления — начальник цеха, сменный технолог. Еще более

высокий уровень интеграции — ТЭП за сутки, за месяц необходим для руководства предприятия.

Опыт ряда АСУ ТП показал, что удачно подобранные ТЭП используются для оценки деятельности бригад при подведении итогов работы. По ухудшению ТЭП часто судят о состоянии оборудования.

Наконец, важное применение ТЭП, часто включаемое в технические задания на АСУ ТП, — дать информацию в АСУ более высокого уровня: АСУ предприятием, организационное АСУ и т. п. В этом случае характер ТЭП и интервал расчета задаются, исходя из требований АСУ верхнего уровня.

Пример. Рассмотрим ТЭП для управления цехом. На основе целевой функции АСУ ТП выделена переменная часть затрат на процесс. В нее входит стоимость пара и электроэнергии. Кроме того, в нее должны войти затраты на потери сырья. При переменной производительности расходы пара и электроэнергии с ростом производительности резко возрастают. Поэтому величину затрат целесообразно отнести к единице выпуска готового продукта. С учетом этого имеем

$$E = \frac{aQ + bP_p + c(F - P)}{P}, \quad (8.10)$$

где E — ТЭП; Q — расход пара; P_p — затраты электроэнергии; F — расход сырья; P — выпуск готового продукта; a, b, c — стоимость соответственно пара, электроэнергии и сырья.

Поскольку P и F различаются всего на 1%, непосредственный расчет разности $P - F$ ничего не даст из-за погрешности. Величина потерь $\Delta F = F - P$ может быть измерена лабораторным анализом и введена вручную.

Величины Q, P_p и P измеряются датчиками. Оператор центрального пульта цеха при управлении ориентируется на ежечасные показатели по Q, P_p, P и F . Поэтому для оперативного управления ему нужны величины ТЭП, рассчитанные по средним показателям за час. Поскольку в большинстве случаев роль составляющей в выражении (8.10) мала при нормальном режиме, для часовых ТЭП можно этой составляющей пренебречь. Тогда

$$E_q = \frac{aQ_q + bP_{p,q}}{P_q}, \quad (8.11)$$

где q — индекс усреднения за час.

Данные лабораторных анализов целесообразно вводить два раза в смену. Поэтому в накопительном расчете ТЭП в пределах смены потери также не участвуют.

Структура накопительных ТЭП аналогична выражению (8.11), но расчет ведется по рекуррентной формуле

$$E_{qi} = \left(E_{qi-1} + \frac{E_{qi} + E_{qi-1}}{2} \right) (P_{qi-1} / P_{qi}), \quad (8.12)$$

где i — номер текущего часа; E_q — накопительный часовой ТЭП с начала смены; P_q — накопительная производительность (интеграл) с начала смены.

В начале смены $E_{q0} = 0$ и $P_{q0} = 0$. Этот ТЭП используют как оператор, так и сменный технолог завода для оценки работы данного цеха. В конце смены определяют сменный ТЭП

$$E_c = \left(aQ_c + bP_{p,c} + c \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{2} \right) / P_{c,c}, \quad (8.13)$$

где c — индекс интеграла за смену; ΔP_1 , ΔP_2 — результаты двух лабораторных анализов за смену.

Численно E_c без члена, учитывающего потери, близко (но не равно) плановой величине $E_{пл}$ в конце смены. Показатель E_c используется начальником цеха при анализе работы каждой смены, а также сменными и главными технологами предприятия.

Аналогично выражению (8.13) рассчитывается суточный ТЭП. Суммарный суточный ТЭП по всем цехам ориентирован в основном на руководство предприятия. Разбивка по цехам, а при необходимости и по сменам осуществляется при анализе нарушений.

Указанные ТЭП не единственные. На всех уровнях учитывают производительность, простои отдельных агрегатов и цеха в целом, а также ряд качественных показателей продукта.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение первичной обработки информации в АСУ ТП.
2. Перечислите классы задач-потребителей информации в АСУ ТП.
3. Каково назначение базы данных в АСУ ТП?
4. Какие требования предъявляются к задачам представления информации персоналу?
5. По рис. 8.1 и 8.2 покажите путь прохождения информации от датчика до выходной формы.
6. Опишите порядок разработки комплекса информационных задач АСУ ТП.
7. Какие бывают базы данных?
8. Опишите информационный канал в АСУ ТП.
9. Какие бывают виды обработок сигнала?
10. Каково назначение фильтрации сигнала? интегрирования?
11. Как контролируется достоверность сигнала в АСУ ТП?
12. Что такое ТЭП? Для чего они предназначены?

Глава 9

РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ В АСУ ТП

§ 9.1. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ

Практически все известные в пищевой промышленности АСУ ТП имеют значительный объем автоматических систем, реализуемых традиционными средствами локальной автоматизации, причем во многих АСУ ТП таких систем большинство по сравнению с управлением от ЭВМ. К тому же в ряде АСУ ТП применяется управление в информационно-советующем режиме, когда в цепи управления участвует человек и именно он принимает окончательное решение.

Из изложенного следует, что главный вопрос, который следует решить, приступая к проектированию управляющей функции АСУ ТП, — какие контуры управления следует реализовать в цифровом виде (т. е. от ЭВМ), какие — средствами локальной

автоматизации, а какие — в информационно-советующем режиме. Этот вопрос требует серьезного научного (в плане синтеза алгоритмов) и технико-экономического (в плане выбора техники и достигаемого эффекта) обоснования, причем сложность заключается в том, что решения следует принять, как правило, на стадии технического задания, когда все указанные исследования, в том числе и исследования объекта, еще предстоит выполнить.

Ошибки в распределении функций приведут к тому, что ЭВМ будет загружена выполнением элементарных функций типа позиционного регулирования, а серьезные алгоритмы придется реализовать сложными локальными системами. Возможна и другая ситуация, когда недостаточная производительность выбранной вычислительной техники вызовет необходимость упрощать алгоритмы или отказываться от части контуров. Строго формализованных рекомендаций для решения данного вопроса нет.

При проектировании системы отправной точкой должны служить алгоритмы управления, достаточно подробная проработка которых обязательна. В любой АСУ ТП имеется достаточно большое число относительно простых контуров регулирования, которые легко реализовать традиционными средствами автоматизации. Во многих случаях это рациональнее всего.

Таким образом, ЭВМ следует передавать достаточно сложные управляющие функции, например управление каналами со сложными динамическими характеристиками (большое запаздывание, нелинейность): каналы, требующие адаптивного управления, управления со сложной переменной структурой, многосвязные системы с моделями и т. п.

Хорошие результаты дает сочетание оптимизационных задач с цифровым управлением. В этом случае система в целом упрощается, так как алгоритмы разных уровней (оптимизация статических характеристик, оптимизация динамических характеристик, регулирование) связаны через базу данных, а не аппаратно. (Пример такой системы приведен в § 11.4.) К сожалению, нередко ситуации, когда по тем или иным причинам алгоритм не поддается строгой формализации. В этом случае целесообразно ограничиться информационно-советующим режимом, используя человека для экспертной оценки технологической обстановки и принятия решения.

Из изложенного следует, что в ЭВМ реализуются сложные алгоритмы. Однако нижний уровень управления обычно базируется на традиционных алгоритмах П, ПИ, ПИД или позиционного регулирования. При этом реализуются сложные взаимосвязи, используются дополнительно разного рода динамические модели и т. п.

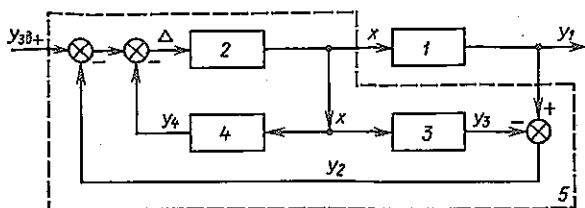


Рис. 9.1. Блок-схема НЦУ контура регулирования с упредителем:

1 — объект управления; 2 — ПИД-регулятор; 3 — модель динамического объекта; 4 — модель без запаздывания; 5 — регулятор Смита; X — запаздывание; y_1 — выход объекта; y_2 — сигнал обратной связи; y_3 — выход модели; y_4 — выход «быстрой» модели; $y_{зд}$ — задание; Δ — рассогласование

Пример. Рассмотрим блок-схему управления каналом с большим запаздыванием ($\tau/T > 1$). Теория рекомендует в данном случае применять специальные регуляторы с упредителями (преддефекторами), например, Смита или Ресвика.

Пример такой системы с упредителем Смита описан в § 4.2 (см. рис. 4.8). Как видно из рис. 4.8, в системе кроме ПИД-регулятора 2 используются две модели — полная динамическая модель (звено 4) и модель без запаздывания (звено 3). Хотя ПИД-регулятор и является центральной частью системы, в целом структура получается достаточно сложной.

В целях упрощения рассмотрим только цифровую реализацию ПИД-регулятора (т. е. дискретный алгоритм ПИД-регулирования), показанного на блок-схеме рис. 9.1. Передаточная функция непрерывного ПИД-регулятора, как известно,

$$W_2(s) = k_y + \frac{1}{T_n s} + T_d s. \quad (9.1)$$

Дискретное преобразование интегрирующего звена на основе метода трапеций

$$\frac{1}{s} = \frac{T_0}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1}, \quad (9.2)$$

где T_0 — время квантования.

Аналогично для производной

$$s = \frac{1}{T_0} \cdot \frac{z-1}{z}. \quad (9.3)$$

Подставляя выражения (9.2) и (9.3) в (9.1), получим в форме z -преобразования

$$W_2(z) = k_y + \frac{1}{2k_n} \cdot \frac{z+1}{z-1} + k_d \frac{z-1}{z}, \quad (9.4)$$

где $k_n = T_n/T_0$, $k_d = T_d/T_0$.

В несколько преобразованном виде для выражения (9.4) связь входа и выхода в изображениях по z можно представить как

$$\hat{x} = \frac{A_1 z^2 - A_2 z + A}{z^2 - z}, \quad (9.5)$$

где Δ — признак z-преобразования;

$$A_1 = k_y + \frac{1}{2k_n} + k_d; \quad (9.6)$$

$$A_2 = k_y + 2k_n - \frac{1}{2k_n}; \quad (9.7)$$

$$A_3 = k_n. \quad (9.8)$$

Переходя к оригиналам, получим

$$x_i = x_{i-1} + A_1 \Delta_i + A_2 \Delta_{i-1} + A_3 \Delta_{i-2}, \quad (9.9)$$

где i — номер такта управления.

Таким образом, выражение (9.9) задает вычислительный алгоритм ПИД-закона. Из уравнения (9.9) следует, что предысторию по Δ нужно сохранять на два шага. Предыстория по x не нужна, так как x будет записан на место x_{i-1} .

Алгоритм для модели W_3 приведен в примере § 5.1 и формуле (5.5). Алгоритм для W_4 — частный случай W_3 . В приведенном примере в уставках важную роль играет величина периода квантования T_0 . Наиболее распространен выбор этой величины, базирующийся на выводах из теоремы Котельникова: величина T_0 выбирается как

$$T_0 \leq \pi / \omega_{\max}.$$

где $\omega_{\max}$ — частота, до которой система ведет себя как непрерывная. Величину $\omega_{\max}$ выбирают в 10–30 раз больше частоты среза разомкнутой системы. Иногда также $\omega_{\max}$ выбирают, исходя из модуля амплитудной характеристики $A(\omega)$ так, чтобы $|A(\omega_{\max})| = 0,01 \dots 0,1$.

Оба подхода примерно равноценны и дают нижнюю оценку T_0 . К сожалению, эти рекомендации не всегда выполнимы из соображений загрузки процессора. Поэтому иногда рекомендуется выбирать T_0 следующим образом:

$$\begin{aligned} T_0 &\approx (1,2 \dots 0,35) \tau & \text{при } \tau/T < 1; \\ T_0 &\approx (0,35 \dots 0,22) \tau & \text{при } \tau/T \geq 1. \end{aligned}$$

Можно выбирать T_0 исходя из T . Тогда

$$T_0 \approx (0,15 \dots 0,3) T \quad \text{при } \tau/T < 0,8.$$

Для разного рода моделей иногда пользуются следующим правилом:

$$T_0 = (0,07 \dots 0,15) T_{95},$$

где T_{95} — время достижения 95% установившегося значения.

Последнее соотношение дает верхнюю оценку для T_0 , достаточно хорошую для приближенного прогнозирования процесса в развитии, но уже неприемлемую для регулирования.

Таким образом, период T_0 существенно зависит от динамических характеристик процесса. Для процессов без запаздывания, типа регулирования расхода, давления, T_0 получается весьма малым (1 с и менее), что чрезмерно загружает процессор. Исходя из этого, во многих случаях целесообразно такие контуры реализовывать аппаратно (т. е. средствами локальной автоматизации), тем более что сложные алгоритмы здесь не нуж-

ны. На ЭВМ при этом возлагается формирование задания этим контурам для управления более инерционными параметрами со сложными динамическими характеристиками, например температурой, концентрацией. Такой подход получил название супервизорного управления в отличие от непосредственного цифрового управления (НЦУ) исполнительным механизмом. Достоинством супервизорного управления (в отличие от НЦУ) является повышенная надежность системы в целом. При сбоях ЭВМ локальные контуры продолжают работать, стабилизируя текущий режим, и в целом сохраняется контроль за процессом.

При НЦУ любой сбой ЭВМ вызывает необходимость перехода на ручное управление для всей группы контуров. Поскольку ручные органы управления, как правило, расположены по месту, достаточно далеко один от другого, такой переход требует больших затрат времени и сил. Ввиду опасности аварии иногда приходится останавливать агрегат или группу агрегатов.

Другое достоинство супервизорного управления — меньшая нагрузка на ЭВМ из-за большего периода цикла управления T_0 .

К недостаткам систем супервизорного управления следует отнести повышенную стоимость (и сложность), так как локальные системы сохраняются почти в полном объеме, а часто и усложняются из-за наличия устройств для стыковки с ЭВМ. Поэтому применение систем супервизорного управления экономически и технически оправдано, если на ЭВМ реализуется достаточно эффективный, сложный алгоритм управления, дающий заметное улучшение характеристик процесса — качества регулирования, экономических и т. п.

Системы НЦУ становятся конкурентоспособными как с локальными системами на традиционной автоматике, так и с системами супервизорного управления при наличии дешевых и надежных контроллеров на базе микропроцессорной техники. Такой контроллер обязательно должен иметь в своем составе программные и, главное, аппаратные средства, реализующие функции управления контуром, достаточно удобные средства для представления информации, УСО с возможностью подключения стандартных сигналов ГСП.

§ 9.2. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫМ ПОТОКОМ

В пищевой промышленности распространены процессы, реализованные в виде цепочки последовательно соединенных агрегатов. Продукт непрерывно проходит от агрегата к агрегату, подвергаясь в каждом определенной обработке.

Важным требованием технологии является стабильность такого материального потока: Для этого между агрегатами или группой агрегатов, составляющих технологический участок, устанавливают промежуточные сборники продукта. За счет аккумулялирования продукта в этих сборниках демпфируется неравномерность работы технологических агрегатов, которые тоже имеют определенную вместимость по продукту.

Типичным является перекачивание продукта между сборниками и технологическими агрегатами с помощью насосов. В этом случае при постоянной подаче насоса расход подвержен сравнительно низкочастотным возмущениям, связанным в основном с уровнями в сборнике, а иногда — с давлением в агрегате.

Во многих случаях группа сборник-агрегат повторяется в цепочке четыре-пять и более раз. При этом достаточно высокое качество стабилизации материального потока возможно при относительно сложных алгоритмах управления. Однако эти алгоритмы имеют, скорее, логический, чем вычислительный характер. Поэтому их относительно легко реализовать на специализированном контроллере с применением систем НЦУ. В ряде случаев такие системы в упрощенном виде выполнялись на средствах локальной автоматизации. Применение цифровых контроллеров позволяет получить более «интеллектуальные» системы с высоким качеством регулирования.

Пример. На рис. 9.2 представлена технологическая схема производства от сборника сырья, поступающего в переработку, до выпарной установки. Технологическая схема показывает движение ведущего материального потока через различные стадии обработки (участки *III, VI, IX, XII, XV*) по трубопроводам *I, IV, VII, X, XIII, XVI*. Некоторые участки имеют несколько параллельных линий обработки продукта (на рисунке не показаны). Для рассматриваемой задачи важно то, что каждый участок имеет переменную производительность.

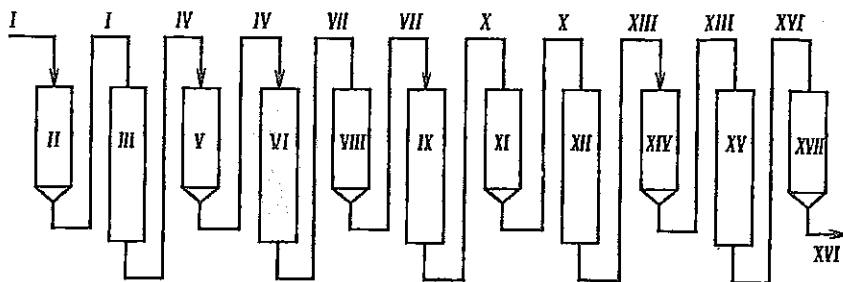


Рис. 9.2. Упрощенная технологическая схема прохождения ведущего материального потока

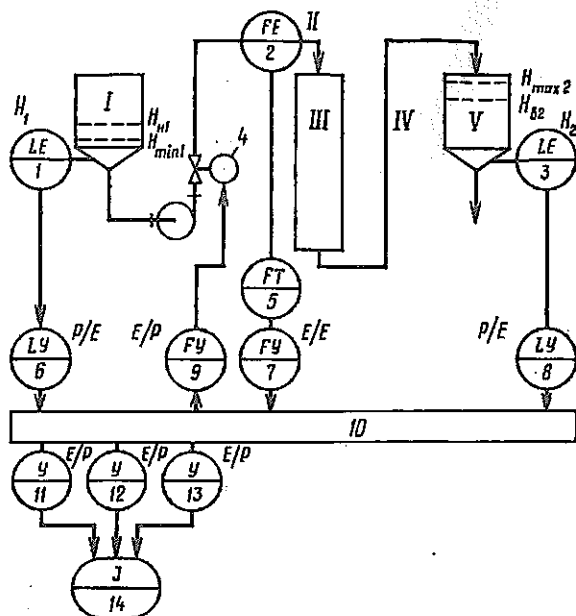


Рис. 9.3. Фрагмент схемы автоматизации управления материальным потоком на типовом участке:

I, V — промежуточные сборники; *III* — технологический аппарат; *II, IV* — трубопроводы продукта

Необходимо обеспечить ритмичную работу цепочки в целом. Технологической предпосылкой для этого является наличие промежуточных сборников *II, V, XI, XIV, XVII* между участками.

Задача автоматической системы — организовать управление потоками после сборников так, чтобы наиболее рационально использовать запас продукта в них для достижения основной цели — ритмичности работы в целом.

Технологическую схему на рис. 9.2 можно представить в виде пяти однотипных групп, каждая из которых начинается и заканчивается сборниками. Характерным для таких групп является то, что выходной сборник предыдущего участка является входным для последующего (см. также § 2.1 и рис. 2.2). Схема автоматизации для управления таким участком показана на рис. 9.3. Контроллер *10* является общим для всех участков.

От каждого сборника в контроллер вводится сигнал от датчиков уровня *1* и *3* через преобразователи *6* и *8*. Туда же вводится задание по производительности с пульта (на рис. 9.3 не показан). На основании установленного задания по производительности по упрощенным уравнениям материального баланса с учетом норматива потерь на каждом участке рассчитывается за-

дание по расходам промежуточных продуктов, в том числе и продукта, поступающего по трубопроводу II. Расчет производится однократно при изменении задания и поэтому мало загружает процессор контроллера.

В контроллер вводится величина фактического расхода (приборы 2, 5, 7 на рис. 9.3) и по ПИД-закону выполняется его стабилизация. Через преобразователь 9 контроллер воздействует на исполнительный механизм 4. Задание ПИД-алгоритму формируется следующим образом:

$$G_{зд} = G_p - (D_1 - D_{10}) - (D_2 - D_{20}), \quad (9.10)$$

где $G_{зд}$ — задание по расходу для ПИД-алгоритма; G_p — расчетная величина расхода (из материального баланса); D_1, D_2 — значения, учитывающие допустимые (верхние) уровни H_1 и H_2 в сборниках I и V соответственно; D_{10}, D_{20} — постоянные смещения.

Вид зависимостей D_1 и D_2 от уровней приведен на рис. 9.4.

Если уровень H_1 равен заданному среднему уровню, то выход $D_1 = D_{10}$, и выражение в первых скобках в уравнении (9.10) равно нулю. Одновременно если H_2 меньше граничного уровня $H_{в2}$, то $D_2 = D_{20}$. В этом случае $G_{зд} = G_p$, т. е. поддерживается расчетный расход продукта. Если на технологическом участке после сборника V уменьшилась производительность, то отток из сборника V уменьшится и уровень H_2 начнет расти.

Пока в сборнике V есть запас продукта ($H_2 < H_{в2}$), ничего не изменится и аппарат III будет работать в номинальном режиме. При дальнейшем росте H_2 (когда $H_{в2} < H_2 < H_{маx2}$) D_2 существенно увеличивается и $G_{зд}$ будет уменьшаться. Производительность аппарата III уменьшится. Если H_2 достигнет значения $H_{маx2}$ — максимально допустимого безопасного уровня (например, по условиям перелива), величина D_2 скачком увеличится до $D_{маx2}$, при которой $G_{сп} = 0$.

Аналогично система работает при снижении уровня H_1 (например, из-за остановки участка до сборника I). Зависимость D_1 от H_1 в области $H_1 \leq H_{н1}$ ($H_{н1}$ — нижнее

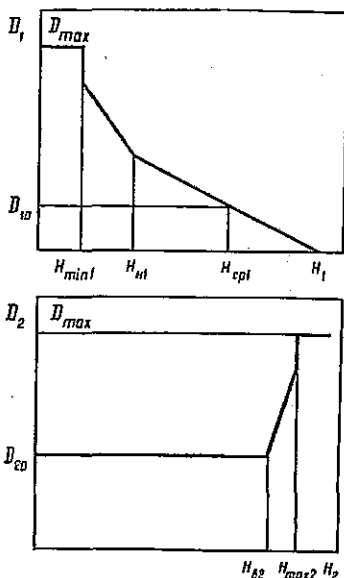


Рис. 9.4. Зависимость D_1 и D_2 от уровня в сборниках

граничное значение уровня) совпадает, в принципе, с зависимостью D_2 от H_2 . Но при $H_1 > H_{\text{н}}$ величина D_1 не постоянна. Осуществляется П-регулирование уровня H_1 с заданием $H_{1\text{ср}}$ и небольшим коэффициентом усиления. Этим компенсируются небольшие рассогласования в производительности соседних участков при нормальном режиме работы.

Таким образом, в каждом сборнике выделены три зоны:

- 1) $H_{\text{min}} < H < H_{\text{н}}$ — нижняя зона ограничения;
- 2) $H_{\text{н}} < H < H_{\text{в}}$ — зона сглаживания потока;
- 3) $H_{\text{в}} < H < H_{\text{max}}$ — верхняя зона ограничения.

При уровнях в пределах зоны сглаживания потока система стремится обеспечить расчетную производительность, минимально воздействуя на расход. При существенных нарушениях, когда полностью используется рабочий запас продукта, т. е. при попадании величины уровня в одну из зон ограничения, система предпринимает экстренные меры для ограничения нарушения режима вплоть до остановки участка.

Для контроля за работой системы предусмотрено два трехканальных вторичных прибора (один из них 14 на рис. 9.3). С пульта контроллера на эти вторичные приборы можно вызвать до шести параметров в любом сочетании (например, шесть регулируемых расходов либо расход и два уровня для группы, показанной на рис. 9.3, и т. п.).

Описанная система в целом регулирует шесть расходов с учетом семи уровней, т. е. заменяет достаточно громоздкую локальную систему. Стоимость системы НЦУ несколько выше стоимости локальной системы (из-за высокой стоимости контроллера), но надежность ее несколько выше и существенно лучше качество регулирования.

Поскольку все расходы стабилизируются после насосов, т. е. при небольшой величине высокочастотных возмущений, среднеквадратичное отклонение от составляющей с периодом 10 с и меньше составляет 10% суммарного. Исходя из этого, можно принять период работы контуров стабилизации расхода равным 2 с.

Проверим загрузку процессора при этом периоде, используя приведенные ниже значения времени выполнения операций на каждом такте для одного контура расхода (в мс):

1. Обращение к АЦП	0,5
2. Преобразование сигнала в АЦП (выполняется асинхронно с другими операциями)	100
3. Первичные обработки (фильтрация и т. п.)	2,5
4. Программа ПИД-закона	2,0
5. Взаимодействие с базой данных (суммарное время взаимодействия по пп. 3, 4, 7)	3,0

6. Системные затраты (взаимодействие программ, работа с таймером и т. п.)	1,5
7. Проверка и выдача управляющего воздействия	1,5
Всего без п. 2	11,0

Для шести контуров расхода суммарное время составит 70 мс. Как видно из приведенных данных, продолжительность преобразования в АЦП превышает продолжительность других операций. Однако в течение этого времени (100 мс) процессор свободен и может загружаться другими программами. Даже с учетом времени работы АЦП (600 мс = 0,6 с для шести контуров) продолжительность 2 с вполне достаточна для стабилизации работы.

Уровни являются сравнительно медленно меняющимися параметрами. Для разных сборников продолжительность использования зоны ограничения составляет от 20 мин до 1,5—2 ч. По загрузке процессора можно принять период работы коррекций по уровням равным 15 с, что обеспечит достаточный запас по воздействию.

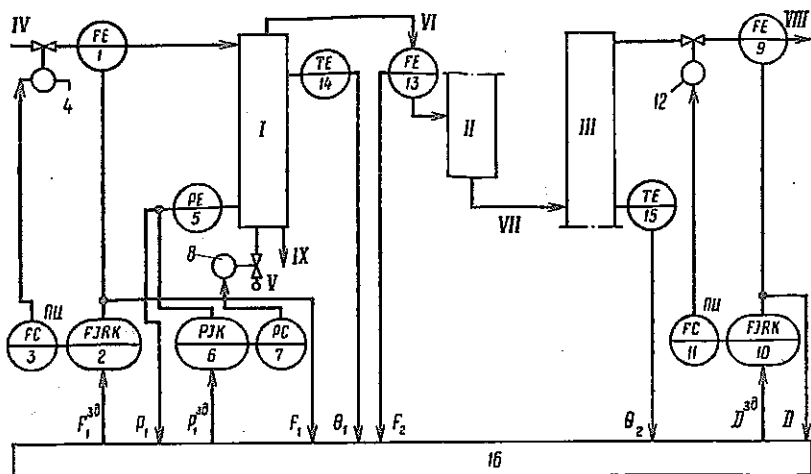
Действительно, из теоремы Котельникова при таком периоде максимальная круговая частота $\omega_{\max} \leq \pi/15 \approx 0,2 \text{ с}^{-1}$.

Характерные частоты для самого малого сборника (исходя из времени в 20 мин = 1200 с) лежат в области $\omega_1 = 2\pi/1200 = 0,005 \text{ с}^{-1}$, т. е. $\omega_{\max} \approx 40\omega_1$, что вполне достаточно (см. § 9.1). Дополнительная загрузка процессора работой с сигналами уровней незначительна (процессорное время того же порядка, что и приведенное для контура стабилизации расхода, т. е. еще 70—80 мс на 15 с).

§ 9.3. СУПЕРВИЗОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕКТИФИКАЦИЕЙ В КОЛОННЫХ АППАРАТАХ

В предыдущем примере управление потоком велось независимо от конкретного состояния технологии на каждом из участков. Решения по управлению принимались по косвенной оценке процесса — по уровням в промежуточных сборниках. Не для всех технологических процессов допустим такой упрощенный подход. Во многих случаях несогласованность производительности агрегата (или участка) с его текущим состоянием приводит к ухудшению качества продукта, потерям его и т. п.

Правильная оценка состояния технологии и принятие решения по управлению, однако, алгоритмически достаточно сложная задача. Решение такой задачи для нескольких контуров требует дополнительной существенной загрузки процессора. Поэтому в некоторых случаях целесообразно ряд простых, но решаемых часто задач передать локальной системе, разгрузив ЭВМ.



Рассмотрим систему супервизорного управления основными процессами в трехколонной брагоректификационной установке (БРУ) косвенного действия (рис. 9.5).

На рис. 9.5 показана часть локальной системы управления — контуры стабилизации расходов бражки (1—2—3—4) и спирта (9—10—11—12), а также стабилизации давления в БК (5—6—7—8). Еще два аналогичных контура давления имеют ЭК и РК. Локальная система содержит еще ряд вспомогательных (сравнительно простых) контуров, не входящих в систему супервизорного управления. Описанные контуры составляют самый нижний уровень рассматриваемой системы управления. Этот уровень предоставляет информацию (см. рис. 9.5) для второго уровня управления 16, который организует управление БРУ в целом и составляет центральную часть данной системы. Блок-

схема управления, реализуемого на данном уровне, представлена на рис. 9.6.

По температуре Θ_1 определяется концентрация бражного дистиллята y_2 (точнее, при этом учитывается также давление; подробно о таком алгоритме см. в § 8.2). Произведение концентрации y_2 на расход F_2 дает производительность БК по алкоголю Π_1 . Все эти вычисления реализуются в блоке 17. Величина Π_1 в системе используется трояко:

1) как показатель производительности БРУ и всего производства в целом. Величина Π_1 стабилизируется путем воздействия на расход бражки F_1 . Задание $F_1^{зд}$ формирует блок 18;

2) для согласования производительностей БК и РК. Из условий материального баланса РК должна выдать столько же готового продукта (спирта D), сколько его пришло из БК (Π_1). Для этого сигнал по производительности (блок 19) Π_1 поступает на вход модели БРУ, характеризующая время прохождения продукта от выхода БК до выхода из РК. В идеальном случае выход блока 19 (Π_2) мог бы служить заданием на отбор спирта $D^{зд}$. Действительно, при $D > \Pi_2$ из РК отбирается больше спирта, чем пришло, и недостаток компенсируется падением концентрации выходного продукта (т. е. ухудшением качества). При $D < \Pi_2$ избыток спирта (в силу нелинейности объекта) уйдет в потери.

Реально работа системы сопряжена с определенными ошибками измерения параметров, расчета Π_1 , Π_2 и т. д. Поэтому в систему введена обратная связь по температуре на контрольной тарелке РК Θ_2 . Эта температура весьма чувствительна как к качеству выходного продукта, так и к возникновению потерь. В определенном смысле она показатель материального баланса, так как чувствительна к накоплению спирта в контрольной

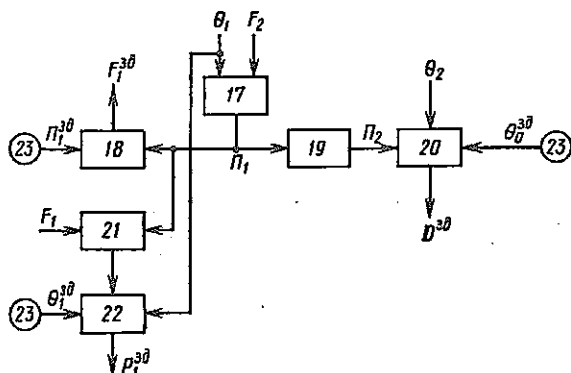


Рис. 9.6. Блок-схема для второго уровня управления БРУ

зоне. Учет как P_2 , так и Θ_2 осуществляется в блоке 20, который формирует задание $D^{зд}$;

3) для управления расходом пара в БК. Этот расход через контур давления 5—6—7—8 (см. рис. 9.5) используется для стабилизации температуры в БК Θ_1 (для БК Θ_1 функционально во многом аналогична Θ_2 для РК). Основными возмущениями для БК являются расход F_1 и концентрация x_1 бражки.

В блоке 21 рассчитывается общее воздействие этих двух параметров, причем величина x_1 определяется как P_1/F_1 . Кроме того, в блоке 21 учитывается динамический характер воздействия F_1 и x_1 на Θ и P_1 . В блоке 22 формируется задание $P_1^{зд}$ по Θ_1 и выходу блока 21. Таким образом, второй уровень управления передает нижнему уровню три задания ($P_1^{зд}$, $F_1^{зд}$ и $D^{зд}$).

При реализации на ЭВМ блоки 18, 20 и 22 — однотипные и реализуют ПИД-закон с упредителем (см. § 9.1 и рис. 9.1), но дополнительно с коррекцией по возмущению (за исключением блока 18).

Задания данным блокам регулирования (т. е. по $P_1^{зд}$, $\Theta_2^{зд}$ и $\Theta_1^{зд}$) поступают с верхнего (третьего) уровня системы. Этот уровень, реализованный в виде комплекса программ ЭВМ, определяет требуемую производительность БРУ, исходя из плановых показателей на контрольный период (обычно месяц), хода выполнения этих показателей с учетом прогнозируемых остановок, ситуации на предыдущих участках производства (в частности, наличия готовой бражки) и некоторых других факторов. Аналогично определяется задание по температуре РК (т. е. качество готового продукта) с той лишь разницей, что здесь очень жесткие ограничения.

Задача оптимального управления БРУ решается в целом. Решение ее дает оптимальный расход пара в каждую колонну при данной производительности БРУ и данных качествах бражки x_1 и готового продукта. Поскольку решение получено в статике, нетрудно пересчитать расход пара в соответствующие температуры (в частности, $\Theta_1^{зд}$, см. рис. 9.6).

Наряду с этим рассчитывают аналогичные температуры для ЭК и РК (для последней — это другая, отличная от Θ_2 температура в другой зоне РК). Реально во второй уровень управления входят еще две группы блоков (аналогичные 21 и 22) для ЭК и РК, а в локальной системе предусмотрены соответствующие контуры. (На рис. 9.5 для упрощения это не показано.)

Таким образом, описанная схема представляет собой трехуровневую систему управления. Нижний уровень реализован традиционными локальными средствами и относительно прост, а верхний составляет чисто вычислительные и оптимизационные задачи управления в статике (на смену и более). Наибольший

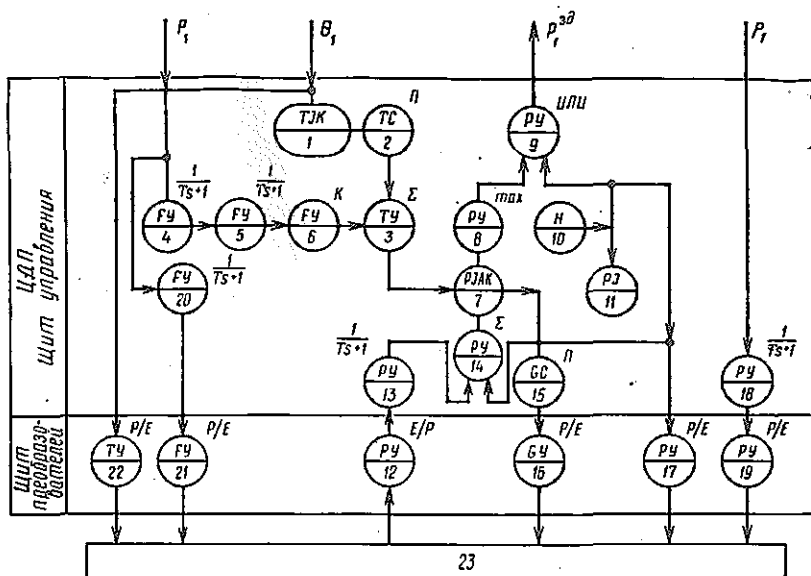


Рис. 9.7. Фрагмент схемы автоматизации второго уровня управления БРУ

интерес представляет средний (второй) уровень управления, реализующий супервизорное управление БРУ.

На рис. 9.7 в упрощенном виде приведен фрагмент схемы автоматизации второго уровня управления. Данный фрагмент иллюстрирует аппаратную реализацию подключения блоков 21 и 22 (см. рис. 9.6) к ЭВМ и к первому уровню управления.

Аппаратурная реализация позволяет в упрощенном виде дублировать функции ЭВМ на традиционных средствах. В частности, для стабилизации температуры в БК предусмотрен вторичный прибор (см. рис. 9.7) с регулятором 2, а также коррекция по расходу бражки (функциональные блоки 4, 5, 6). Однако на локальных средствах реализованы только простой П-регулятор вместо ПИД-регулятора с упредителем и упрощенная коррекция (только по бражке). Оба эти сигнала — от регулятора 2 и по возмущению от блока 6 — собираются сумматором 3 и через коммутатор 7 и ограничитель сигнала 8 поступают в конечный коммутатор 9 на контуры давления нижнего уровня. Такой режим работы (назовем его условно АД — автоматический дублирующий), по существу, ничем не отличается от каскадно-связанного регулирования. ЭВМ в этом режиме не задействована.

Система предусматривает еще два режима: основной (АМ —

автоматический от ЭВМ) — собственно режим супервизорного управления — дистанционный (Д), когда управление ведется от ручного задатчика 10. Выбор между режимами Д и АД осуществляется переключением коммутатора 9. Режим Д является вспомогательным и нужен для перехода с режима АД на режим АМ. Контроль за положением задатчика 10 осуществляется по прибору 11.

В основном режиме супервизорного управления (АМ) сигнал с выхода ЭВМ через преобразователь 12 и блок обратного предвращения 13 поступает на сумматор 14. Сюда же подводится сигнал от задатчика 10. Это необходимо для коррекции $P_1^{3д}$ в момент переключения. Выбор между сигналами ЭВМ и дублирующим контуром осуществляется переключением коммутатора 7. Положение этого коммутатора (ЭВМ или дублирующий контур) передается в ЭВМ как дискретный сигнал, который служит командой на запуск программы для данного канала супервизорного управления. По условиям безударного включения сигнал на выходе сумматора 14

$$P_1^{3д} = P_1,$$

где P_1 — текущее давление в данный момент (с учетом сглаживания).

В свою очередь,

$$P_1^{3д} = P_{1з} + P_{1н}.$$

где $P_{1з}$ — выход сигнала ЭВМ на преобразователь 12; $P_{1н}$ — сигнал от задатчика 10.

Из приведенных соотношений

$$P_{1з} = P_1 - P_{1н}.$$

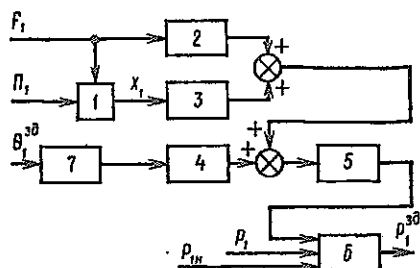
Для правильного расчета $P_{1з}$ в момент переключения в ЭВМ вводится $P_{1н}$ через преобразователь 17 и P_1 через регулятор 18 и преобразователь 19. Для работы алгоритма управления в ЭВМ вводятся температура Θ_1 и расход бражки F_1 .

Блок-схема программной реализации супервизорного управления изображена на рис. 9.8. По существу, она является детализацией блск-схемы, приведенной на рис. 9.6, но по отношению к рис. 9.7 представляет собой фрагмент одного канала управления. Блоки 1, 2, 3 на рис. 9.8 эквивалентны блоку 21 на рис. 9.6, а блоки 4, 5, 6, 7 — блоку 22.

В блоке 1 (см. рис. 9.8) вычисляется концентрация x_1 , а блоки 2 и 3 представляют собой модели динамических характеристик соответствующих каналов, определенные по принципам инвариантности Θ_1 к возмущениям по x_1 и F_1 при компенсации их расходом пара.

Блок 4 является ПИД-регулятором с упредителем Смита.

Рис. 9.8. Блок-схема программной реализации супервизорного управления БРУ



В блоке 5 осуществляется контроль выходного сигнала на допустимость. Блок 6 работает только некоторое время при запуске системы и реализует безударное переключение. Блок 7 предназначен для согласования Θ_1^{zd} . По существу, это интерфейс с базой данных.

Описанная система обладает повышенной надежностью. Например, при полном длительном отказе ЭВМ функции управления в значительной степени сохраняются за счет дублирующего режима АД. При внезапном отказе, например, модуля цифро-аналогового преобразователя выход ЭВМ резко изменится, блок обратного предупреждения 12 (см. рис. 9.7) замедлит это изменение и у оператора будет около минуты для перехода в режим Д. В этом режиме будет зафиксировано текущее состояние процесса задатчиком 10, которое будет стабилизироваться локальным контуром (например, для P_1 это контур 5—6—7—8 на рис. 9.5). У оператора будет достаточно времени, чтобы подготовить и настроить дублирующие контуры 1—2—3 и 4—5—6 (см. рис. 9.7) и включить их в работу. Ограничитель 8 также способствует безопасности режима при сбоях аппаратуры.

При отказе другой аппаратуры ЭВМ выходные цифро-аналоговые преобразователи «запоминают» последнее значение и сохраняют его на выходе. Контуры стабилизации (см. рис. 9.5) будут поддерживать текущий режим даже при полной остановке ЭВМ.

§ 9.4. СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Системы НЦУ и супервизорного управления достаточно сложны, но для их реализации хорошо разработана теория автоматического управления. При достаточно малом времени такта управления T_0 поведение системы супервизорного управления практически не отличается от поведения системы, реализованной на традиционных технических средствах автоматизации.

Системы НЦУ применяются для управления непрерывными процессами. Однако в пищевой промышленности распространены процессы другого вида — периодические (дискретные). Это — разного рода дозирование, периодические многостадийные про-

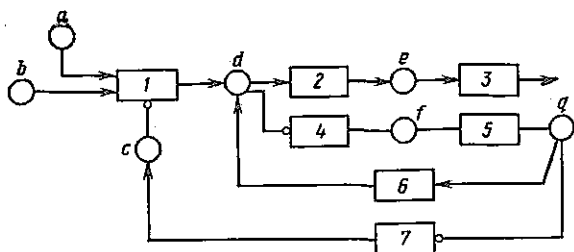


Рис. 9.9. Сеть Петри выполнения технологической операции замачивания ячменя (фрагмент)

цессы тепловой обработки и т. п. Как правило, такие процессы алгоритмически характеризуются (см. § 1.4) следующим: необходимо запустить некоторую операцию, проверить, началась ли она, выждать некоторое время, проверить окончание операции, запустить действия по подготовке следующей операции и т. д. Таким образом, необходимо выполнить строго определенную последовательность действий. Однако при сбое, когда какое-либо действие не завершилось или не выполняется, следует предпринять наперед заданные аварийные действия: в простейшем случае просто выключить сигнализацию и остановить процесс.

В ряде случаев возможно параллельное выполнение нескольких операций, причем в какой-то момент продолжение процесса становится возможным только при завершении всех параллельных операций.

В относительно простых случаях (5—10 операций, выполняемых последовательно) пользуются сравнительно простыми чисто инженерными методами синтеза управляющего устройства. Для более сложных случаев известны формализованные методы синтеза. Обычно они базируются на модели дискретного процесса. Существуют два подхода к построению таких моделей: лингвистический на основе формальных языков; на основе графа дискретного процесса.

Для описания дискретных процессов разработан ряд языков, например Форум, Ярус и др. Применение лингвистического подхода удобно при автоматизации проектирования, в частности, с использованием ЭВМ. По существу, эти языки подобны таким языкам программирования, как Фортран или Алгол, но ориентированы на специфическую область приложений — описание последовательности событий и проверки условий их выполнения. Однако описание алгоритма работы по крайней мере на большинстве известных языков не обладает наглядностью.

В отличие от первого второй подход базируется на представлении алгоритма в графической форме (так называемые граф-модели). Достоинство этого подхода — наглядность, а также

возможность применения хорошо разработанной в математике теории графов. Здесь последовательность событий и процессы перехода от одного состояния объекта (события) к другому изображаются графически в виде условных знаков, соединенных стрелками, указывающими ход процесса (рис. 9.9).

Известно несколько формальных аппаратов для анализа и синтеза граф-моделей. Это — сети Петри и созданная на их основе модель «граф-операции», автоматные системы взаимодействующих графов АСВГ, называемые диалогическими графами, и др. Большинство этих формальных аппаратов базируется на следующих принципах:

абстрагирование от конкретных физических и функциональных особенностей процесса;

компоненты технологии и их действия представляются абстрактными событиями (типа: открытие клапана, тепловая обработка и т. п.). В совокупности действия при функционировании системы образуют процесс, порождаемый этой системой, — абстрагирование во времени. В реальной системе события происходят в некоторые моменты времени и длятся некоторое время, т. е. реальный процесс синхронный, поскольку большинство событий явно привязано к определенным моментам или интервалам времени. В модели по ряду причин удобнее отказаться от временных (в указанном выше смысле) и тактированных изменений состояний. Вместо них используются причинно-следственные связи между событиями. Модели такого типа (это относится, в частности, к сетям Петри) называют асинхронными. Для привязки к времени моменты и интервалы времени представляют как события.

Рассмотрим подробнее особенности одного из наиболее распространенных метода — сеть Петри. Функциональную структуру процесса можно представить в виде некоторого набора позиций, изображающих технологические операции (типа: слив, подогрев и т. п.) и условия переключения операций (срабатывание датчиков, команды оператора и т. п.). В сети Петри позиции обычно изображаются кружками (иногда их называют местами). Кроме позиций (мест) технологический процесс характеризуется событиями типа смены операций, например начало операции. Такие события называют переходами и изображают черточкой («барьером») или прямоугольником. Переходы и места составляют вершины сети Петри. Эти вершины соединяют направленными дугами, отображающими причинно-следственные связи.

Таким образом, сеть Петри — это ориентированный граф, отображающий логику работы системы. Места, из которых ведут дуги, называют входными (например, место *a* на рис. 9.9). Если выполнено условие, обозначаемое местом, то на сети

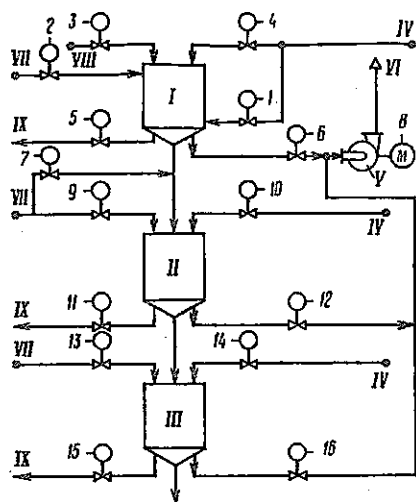


Рис. 9.10. Упрощенная технологическая схема процесса замачивания ячменя (одна линия)

его помечают точкой. При выполнении всех входных условий выполняется переход, к которому ведут дуги (на рис. 9.9 из мест *a*, *b* и *c* запускается переход *l*). Места, в которые ведут дуги из переходов, называют выходными (место *d* выходное для перехода *l*). При срабатывании перехода (т. е. символизируемое им событие произошло) снимают метки входных мест и помечают выходные места.

В ряде случаев необходимо отразить в сети альтернативные действия, когда условие не выполнялось. Для этого применяют так называемые ингибиторные сети Петри. Из места, отражающего возможность альтернативных действий, выводят две (или больше) дуги со стрелкой на конце к переходам для случаев, когда условие выполнено, и с кружком на конце или другим удобным знаком к переходам для случаев, когда условие не выполнено.

Пример. Рассмотрим периодический процесс замачивания ячменя. Процесс можно выполнять параллельно на нескольких линиях. Технологическая схема одной такой линии приведена на рис. 9.10. На каждой линии процесс выполняется в трех чанах: моечном *I* и двух для замачивания *II* и *III*. Суть процесса состоит в последовательном выполнении ряда операций. Фрагмент (начало) описания этих операций приведен ниже.

Операция	Действие
1. Подача сжатого воздуха, перемешивание и дезинфекция в чане <i>I</i> в течение времени t_1	Открыть клапаны 1 и 2
2. Завершение операции 1	Закреть клапаны 1 и 2
3. Снятие сплава (подача воды) в чане <i>I</i> в течение времени t_2	Открыть клапан 7
4. Завершение операции 3	Закреть клапан 7
5. Подача воды на орошение в чанах <i>I</i> , <i>II</i> , <i>III</i> в течение времени t_3	Открыть клапаны 3, 9, 13
6. Завершение операции 5	Закреть клапаны 3, 9, 13

Суть каждой операции состоит в выполнении определенных действий (открытие клапанов), выдержке времени и завершении операции (заккрытие клапанов). Дело осложняется тем, что ход процесса может нарушаться раз-

ными случайными причинами, например неисправностями исполнительных механизмов. В этом случае необходимо предпринять ряд действий, проверить, действительно ли имеет место нарушение, выдать аварийное сообщение, остановить процесс. Другая сложность состоит в необходимости асинхронного и независимого ведения процесса на нескольких линиях, т. е. в терминах сети Петри — представление операции в виде параллельной сети.

Для упрощения приведенный перечень технологических операций разбит на две подоперации: запуск и выполнение, например п. 3 для снятия сплава; завершение п. 4 этой же операции. Вторая подоперация отличается от первой только отсутствием выдержки времени.

Исходя из этого, каждый пункт приведенного фрагмента можно реализовать в виде однотипных фрагментов ингибиторной сети Петри. Такой фрагмент в несколько упрощенном виде без связей с параллельными процессами приведен на рис. 9.9.

Если линия включена (место *a* помечено), предыдущая операция завершена (место *b* помечено) и не зафиксирована неисправность (не помечено место *c*), запускается переход 1. Если исполнительный механизм сработал (помечено место *d*), начинается отсчет времени (переход 2) технологической операции (в частности, выдержка времени может быть нулевой). По завершении перехода 2 помечается окончание выдержки времени (место *c*) и выполняется переход 3 к следующей операции.

При несрабатывании исполнительного механизма (альтернативное условие для места *d*) выполняется переход 4 и делается три проверки с интервалами времени 1 мин (цепочка $d-4-j-5-q-6-d$). Если неисправность достоверна (альтернативное условие для места *q*), выполняется переход 7 (фиксируется аварийная ситуация).

Система реализовывалась в разное время на разной технике: специально разработанным электронном управляющем устройстве, микроЭВМ, микроконтроллере. Наиболее полный вариант реализован на микроЭВМ. В нем параллельность работы линий достигалась чисто программными средствами: каждая линия обслуживается отдельной задачей — программой. Кодовая часть (т. е. машинные команды) у всех программ общая, но каждая программа работает со своими данными. В области данных для каждой программы, обслуживающей одну линию, отмечается состояние линии (номер операции, отсчет времени и т. д.). В системе предусмотрены достаточно развитые средства представления информации, в частности выдача на дисплей текущего состояния каждой линии, наименование выполняемой операции и т. п.

Процессор этим программным комплексом загружен очень незначительно, так как программы в основном ожидают окончания очередной временной выдержки (которая составляет для разных операций от 10 до 60 мин). Постоянно (раз в минуту) опрашиваются только несколько (4—6 по числу линий) тумблеров включения.

Полученная описанным выше методом сеть Петри является исходным материалом для проектирования системы. В сущности, ее можно рассматривать как блок-схему алгоритма. При использовании ЭВМ или программируемого контроллера по этой сети непосредственно реализуется программа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите принципы выбора способа реализации управляющих функций в АСУ ТП.
2. Что такое супервизорное управление?
3. Что такое НЦУ?
4. Как выбирается тактовая частота работы задач управления?
5. Для чего предназначены промежуточные сборники при стабилизации потока?
6. Опишите работу системы НЦУ, пользуясь рис. 9.3, при увеличении (уменьшении) уровня в сборнике.
7. Опишите структуру системы супервизорного управления на основе примера, приведенного в § 9.3.
8. За счет чего достигается дублирование управляющих функций при отказе ЭВМ?
9. Как достигается согласование режима колонны по производительности в примере § 9.3?
10. Перечислите преимущества и недостатки супервизорного управления по сравнению с НЦУ.
11. Что такое сеть Петри?

Глава 10

ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

§ 10.1. АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для процессов пищевых производств достаточно характерна ситуация, когда один и тот же процесс можно вести разными способами. Например, увеличением удельных энергозатрат можно снизить потери и получить дополнительную продукцию и наоборот. Во многих случаях экономическую или иную целесообразность того или иного режима можно оценить единым критерием, который экстремально зависит от управляющих воздействий. Таким образом, имеет место задача оптимального управления.

Важным моментом в постановке такой задачи является выбор критерия оптимальности (целевой функции). Им может быть производительность установки или цеха, себестоимость продукции, прибыль, затраты на процесс и т. п. (см. § 7.1). Целевая функция должна иметь экстремум в области рабочих режимов. В противном случае задача оптимизации вырождается в поиск решения на границе допустимых режимов.

По характеру оптимизируемых режимов системы оптимального управления делятся на оптимизирующие статические и оптимизирующие динамические. Здесь и далее будем рассматривать класс систем, оптимизирующих статические режимы. Сис-

темы, оптимизирующие динамические режимы (т. е. переходные режимы), более сложны. Большинство аспектов разработки таких систем тесно примыкает к методам теории автоматического управления, рассмотренным ранее (см. § 4.3).

С точки зрения выбора оптимального статического режима системы оптимального управления делятся на два больших класса: системы с поиском экстремума непосредственно по выходному параметру объекта (иногда именно их называют системами экстремального управления) и системы с поиском экстремума по модели. В последних зависимость параметров экстремума от возмущений часто находят заранее на модели и процесс ведут по этим данным (возможно с подстройкой модели).

Различие этих двух классов систем иллюстрирует рис. 10.1. На рис. 10.1, а представлен вид зависимости целевой функции E от управления x при различных возмущениях f . При изменении возмущающего воздействия экстремум «плавает» и каждый раз нужно искать новое положение. Отметим, что такая ситуация имеет место не всегда. На рис. 10.1, в показаны зависимости, когда экстремальное значение E меняется, а соответствующее ей оптимальное управление x_* остается постоянным. Очевидно, в таком случае экстремальная система управления не нужна. Достаточно тем или иным путем (например, на модели) рассчитать x_* и стабилизировать его с помощью простейшей системы.

Вернемся к рис. 10.1, а. Здесь ситуация сложнее изображенной на рис. 10.1, в. При изменении f , например от f_1 к f_2 , процесс характеризуется новой кривой и нужно по тому или иному алгоритму выполнить поиск оптимального x_* (в данном случае x_{*2}). Работа в пределах таких «плавающих» экстремальных кривых — суть систем первого класса.

Имея достаточно адекватную модель процесса, можно заранее найти зависимость оптимального управления x_* от возму-

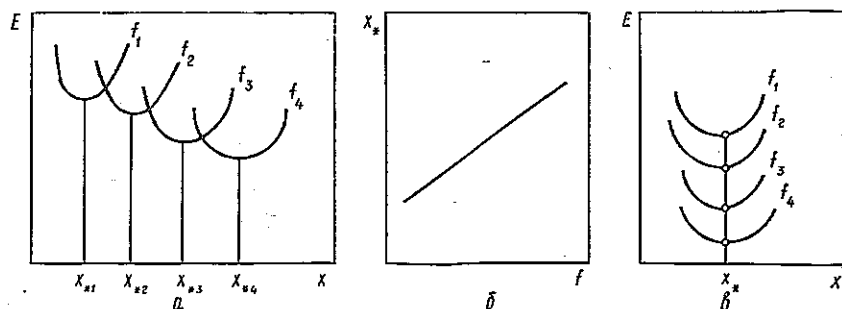


Рис. 10.1. Возможные варианты экстремальных характеристик

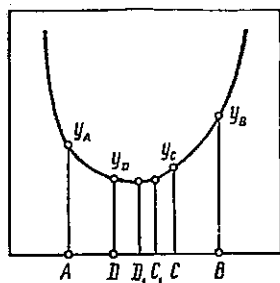


Рис. 10.2. Поиск экстремума методом «золотого сечения»:

A, B — границы интервала; D, C и D_1, C_1 — приближения при поиске

щения (см. рис. 10.1, б). Тогда, измеряя f , можно по полученной зависимости сразу (без поиска) выставлять нужное оптимальное значение x_* .

Большинство типов систем первого класса (экстремального управления) так или иначе базируется на равенстве нулю первой производной в точке экстремума. Это автоколебательные экстремальные системы, системы с запоминанием экстремума, системы с модулирующим воздействием, чисто шаговые системы экстремального регулирования, дифференциальные системы и др. Общие недостатки систем экстремального управления — высокая чувствительность к помехам; поиск только для одного параметра, поэтому системы могут управлять сравнительно простыми агрегатами; необходимость пробных шагов (или колебаний) для поиска экстремума, что ухудшает качество режима в целом.

Системы второго класса в смысле реализации менее разнообразны и классифицируются следующим образом:

1) системы, жестко реализующие характеристику $x_* = \varphi(f)$ (по типу рис. 10.1, б), т. е. поиск набора оптимальных режимов выполняется один раз при проектировании системы. Естественно, что точность такой системы, в принципе, не может быть высокой;

2) системы с периодической коррекцией характеристики $x_* = \varphi(f)$. Здесь суть коррекции заключается в адаптации модели к изменившимся характеристикам объекта. В вычислительном плане такие системы получаются достаточно сложными;

3) системы с расчетом оптимального режима по модели (как правило, адаптивной) и выдачей оптимального управления в темпе процесса. Зависимость $x_* = \varphi(f)$ или не используется, или используется во вспомогательных целях. Такие системы приближаются к системам экстремального управления. В смысле объема вычислений эти системы наиболее сложные и требуют применения высокопроизводительной вычислительной техники.

Все перечисленные структуры систем предполагают возможность многомерного оптимального управления, т. е. применения достаточно сложных алгоритмов поиска экстремума. В случае одномерного поиска применяют относительно простые методы, например чисел Фибоначчи, «золотого сечения». Суть последнего метода иллюстрирует рис. 10.2. Значение целевой функ-

ции определяется в начале и конце исследуемого диапазона (точки A и B), а также в промежуточной точке C , отстоящей от одного из краев (любого, в данном случае B) на расстоянии

$$AC = \alpha (AB),$$

где $\alpha = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \approx 0,618$ — отношение «золотого сечения»*.

Затем вычисляется целевая функция еще в одной точке, такой, что $AD = (1 - \alpha)AB$. Нетрудно показать, что $(1 - \alpha) = \alpha^2$. Если значение целевой функции в точке D меньше, чем в точке C , т. е. $y_D < y_C$, то рассматривается новый интервал AC (вместо AB). В нем аналогично предыдущему шагу выбирается следующая точка D_1 из условия $AD_1 = \alpha AC$ и т. д. до получения координаты экстремума с приемлемой точностью.

Очевидно, на каждом шаге интервал поиска составляет 0,618 предыдущего. Таким образом, для получения точности, например, 2% необходимое число шагов $n = \frac{\log 0,020}{\log 0,618} \approx 8$, т. е. вполне приемлемое в вычислительном плане на ЭВМ.

Из других методов одномерного поиска отметим методы Пауэлла (аппроксимация целевой функции квадратичным трехчленом) и Давидона (кубическая аппроксимация).

В практике часто возникает ситуация, когда положение экстремума зависит от двух и более переменных (т. е. требуется многомерный поиск экстремума). В принципе, можно воспользоваться любым методом одномерного поиска, последовательно применяя его для каждой координаты. Однако на практике этот метод слишком трудоемкий. Например, в случае двумерного поиска при не очень «плохой» форме целевой функции по каждой координате необходимо до 10 циклов поиска. Если применить метод «золотого сечения» на восемь шагов, в сумме получим $10 \times 2 \times 8 = 160$ расчетов целевой функции, что неприемлемо.

Из более эффективных методов отметим методы Хука — Дживса (несколько шагов поиска вокруг некоторой базисной точки и затем, в случае успеха, поиск по образцу) и Нелдера — Мида (развитие симплексного метода — применение деформируемого многогранника, адаптирующегося к форме целевой функции). Указанные методы не требуют модели в аналитической форме. Единственно, что требуется от модели, — дать значение

* Пропорция, возникающая при делении отрезка в среднем и крайнем отношениях, была известна еще античной науке (Пифагор, Платон, Евклид). Термин «золотое сечение» для ее наименования впервые употребил, по-видимому, Леонардо да Винчи. В его времена эта пропорция возводилась в ранг главного эстетического принципа.

целевой функции с приемлемой точностью. Если математическое описание процесса позволяет наряду со значением целевой функции получить еще и ее градиент, то можно применять алгоритмы, найденные методом наискорейшего спуска (вдоль градиента) или методами, базирующимися на многомерной квадратичной аппроксимации поверхности целевой функции.

Выбор метода оптимизации требует тщательного исследования характера изменения целевой функции, учета влияния точности вычислений и ряда других факторов.

§ 10.2. АЛГОРИТМЫ СТАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ

В § 9.3 и на рис. 9.5 приведены технологическая схема и краткое описание процесса в брагоректификационной установке (БРУ). Там же описан алгоритм управления БРУ в динамике и указано, что выбор оптимального режима БРУ (в статике) — отдельная задача. Рассмотрим постановку этой задачи.

Заданы: производительность БРУ — расход спирта-ректификата D (в статическом режиме он равен производительности бражной колонны Π), концентрация исходной смеси (основное возмущение) — бражки X_F и качество готового продукта X_D . Необходимо найти такие управляющие воздействия V_1 и V_3 — расходы пара в бражную (БК) и ректификационную (РК) колонны соответственно, чтобы обеспечить минимум критерия оптимальности Z — затрат на процесс. Можно показать, что переменная часть затрат Z имеет вид

$$Z = a_V(V_1 + V_3) + a_X(X_1W_1 + X_3W_3), \quad (10.1)$$

где X_1 , X_3 — концентрация кубовых продуктов БК и РК соответственно (потери); W_1 , W_3 — расходы кубовых продуктов; a_V , a_X — стоимость пара и потерянному продукту соответственно.

Связь параметров в выражении (10.1) задается с помощью достаточно сложной рекуррентной модели процесса брагоректификации в многоколонной установке. Расчет по такой модели требует больших вычислительных затрат. В несколько упрощенном виде модель группы тарелок в колонне можно представить как

$$\Delta_{i+k} = A^k \Delta_i, \quad (10.2)$$

где Δ_i — движущая сила процесса. Для паровой фазы

$$\Delta_i = Y_i - Y_{i-1}; \quad (10.3)$$

Y_i — концентрация паров над i -й тарелкой (однозначно связанная с концентрацией жидкости X_i); A — фактор разделения.

Для БК

$$A = f(V_1, W_1); \quad (10.4)$$

для РК

$$A = f(R), \quad (10.5)$$

где R — флегмовое число.

$$R = (V_3 - D)/D. \quad (10.6)$$

Расчет статического режима БРУ осуществляют следующим образом. Определяют сверху вниз укрепляющую часть РК для заданного R . Затем рассчитывают снизу вверх режим БК и итеративно* подбирают величину X_1 , удовлетворяющую условиям материального баланса и заданному значению концентрации бражного дистиллята Y_D . Из условий материального баланса на эшюрационной колонне уточняют концентрацию питания для РК. Итерационно снизу вверх рассчитывают режим нижней части РК до выполнения условий «стыковки» с верхней частью и условий материального баланса.

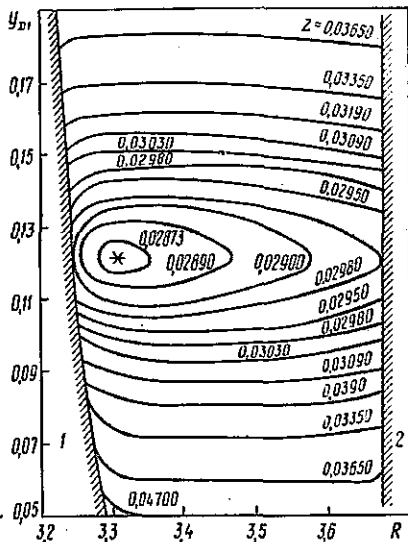
Описанный алгоритм удобен в вычислительном плане:

1) верхняя часть РК рассчитывается без итераций, а она содержит примерно половину всех тарелок рассчитываемых частей БРУ;

2) при поиске экстремума (10.1) (см. ниже) X_F и X_D остаются постоянными, а варьируются только Y_D и R , причем режим БК не зависит от R и режим верхней части РК — от Y_D . Если не поменялось R , верхнюю часть РК можно не рассчитывать; если не поменялось Y_D , можно не рассчитывать БК.

Найденный таким образом один из режимов приведен на рис. 10.3. На этом рисунке показаны линии постоянных значений Z , а также ограничения. В координатах R — Y_D сечения поверхности близки к эллипсам с осями, параллельными осям координат.

Данное свойство позволяет реализовать простой и удобный в плане вычислений алгоритм оптимизации. Сначала по одной из координат, напри-



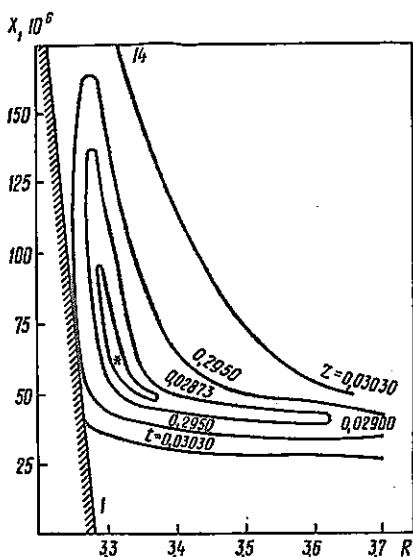


Рис. 10.4. Расчетные значения сечения поверхности Z при изменении концентрации спиртов жидкости

мер по Y_D , методом «золотого сечения» для произвольного (например, среднего) фиксированного R находится условный экстремум, а затем для найденного оптимального значения Y_D^* тоже методом «золотого сечения» отыскивается экстремум по R . Общее число шагов при расчете модели для получения требуемой точности составляет 35—40 (при этом рассчитывается только часть модели).

В целом рассмотренный алгоритм дает экономию в 3—4 раза по сравнению с другими известными способами оптимизации БРУ.

Данная задача была реализована на ЭВМ. Время расчета — порядка 80 с, что позволило ее решать один раз в час и достаточно точно отслеживать изменения ситуации, в частности по X_F . При расчете определяли давление и температуру в контрольных точках.

Задача может использоваться в двух режимах:

1) информационно-советующем, когда рассчитанные оптимальные значения выдаются в виде рекомендации оператору, который может установить их в виде задания локальной автоматической системе;

2) супервизорного управления (этот режим описан в § 9.3).

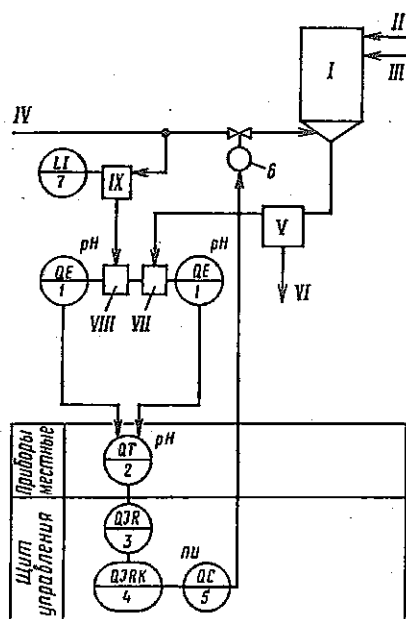
Пример оптимизации ректификации поучителен в плане методологии. Действительно, из выражения (10.1) на первый взгляд следует, что за независимые координаты при поиске оптимального режима БРУ следует принять управляющие воздействия (расходы пара V_1 и V_3) либо потери (X_1 и X_3). В последнем случае создается впечатление, что БК и нижнюю часть РК можно рассчитать без итераций, а итеративно считать только верхнюю часть РК.

Возможны также различные сочетания (например, V_1 и X_3 и т. д.). Исследования показали, что такой «лобовой» подход нерационален. Например, при использовании X_1 фактически прямой счет для БК неприменим, так как из-за малости X_1 материальный баланс с первого просчета не сходится и все равно необходимы итерации. Аналогичная ситуация и с низом РК.

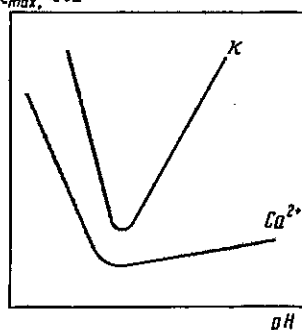
Главное же заключается в том, что при использовании вместо Y_D величины X_1 сечения поверхности Z имеют характер, показанный на рис. 10.4, где по линии I проходят ограничения. Таким образом, приходится искать экстремум в узком изогнутом «овраге». Это значительно усложняет алгоритмы поиска и требует существенно большего числа итераций (до 200 при расчете по полной модели). Аналогичная ситуация складывается для случая использования V_1 и X_3 . Замена R на V_3 практически эквивалентна [см. (10.6)], но использование R несколько удобнее, так как это относительная величина.

§ 10.3. СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ II САТУРАЦИИ СВЕКЛОВОЧНОГО СОКА

В свеклосахарном производстве важной задачей управления процессом второй сатурации является повышение доброкачественности сока за счет снижения содержания извести и ионов кальция. Этого можно достичь поддержанием оптимальной величины рН сока. Схема управления II



$K/K_{max}, \%Ca^{+2}$



10.5. Схема экстремального управления II сатурацией свекловичного сока: I — котел II сатурации; II — трубопровод известкового молока; III — трубопровод сока после I сатурации; IV — трубопровод сатурационного газа; V — контрольный ящик; VI — трубопровод сока на выходе; VII, VIII — измерительные ящики (основная и контрольная ячейки); IX — дозатор подачи сатурационного газа; 1 — электроды; 2 — датчик электропроводности; 3 — дифференциальный мост; 4 — вторичный прибор; 5 — ПИД-регулятор; 6 — исполнительный механизм; 7 — дозатор газа

Рис. 10.6. Экспериментальные зависимости концентрации ионов кальция и электропроводности сатурационного сока от рН

сатурацией (в упрощенном виде) приведена на рис. 10.5.

При обработке сока I сатурации сатурационным газом концентрация ионов кальция Ca^{2+} с ростом pH сока на выходе вначале убывает, затем либо возрастает, либо остается примерно постоянной. Характер этой зависимости показан на рис. 10.6. В результате экспериментальных исследований процесса установлено, что относительная удельная электропроводность сока $\kappa/\kappa_{\max}$ также имеет экстремальный характер, причем минимум четко выражен и в координатах $\kappa/\kappa_{\max} - \text{pH}$ совпадает с минимумом кривой концентрации Ca^{2+} (либо с точкой ее снижения). Эта зависимость лежит в основе сатурации.

Система экстремального управления сатурацией является дифференциальной беспойсковой. Сок из контрольного ящика V (см. рис. 10.5) поступает в дифференциальный датчик электропроводности, состоящий из двух измерительных ячеек VII и VIII с электродами 1. В контрольную ячейку VIII через дозатор 7 дополнительно подается постоянное количество газа. Сигналы электродов измеряются датчиком 2 и подаются на дифференциальный мост 3, выходной пневматический сигнал которого используется как переменная в контуре 4—5—6.

Система работает следующим образом. Зависимость электропроводности κ от расхода сатурационного газа V имеет вид

$$\kappa = \varphi(U) + f, \quad (10.7)$$

где φ — экстремальная функция от U (см. рис. 10.6); f — сумма всех возмущений (в частности, сюда входит погрешность измерения, связанная с изменением температуры сока).

Функцию φ можно разложить в ряд Тейлора около точки экстремума U_* . При относительно небольшом отклонении режима от экстремума можно ограничиться тремя членами ряда. Тогда уравнение (10.7) примет вид

$$\kappa = \varphi_0 + \alpha(U - U_*)^2 + f, \quad (10.8)$$

где φ_0 — значение φ в экстремуме; α — некоторый коэффициент.

Линейный член в выражении (10.8) отсутствует, так как производная в точке экстремума $d\varphi/dU = 0$. Согласно изложенному сигнал из основной ячейки VII

$$\kappa_1 = \varphi_0 + \alpha(U - U_*)^2 + f, \quad (10.9)$$

а сигнал из контрольной ячейки VIII

$$\kappa_2 = \varphi_0 + \alpha(U - U_* + \Delta U)^2 + f, \quad (10.10)$$

где ΔU — дополнительный расход сатурационного газа.

Очевидно, разность сигналов $\Delta\kappa = \kappa_1 - \kappa_2$ из выражений (10.9) и (10.10) имеет вид

$$\Delta\kappa = 2\alpha\Delta U(U - U_* + \Delta U/2). \quad (10.11)$$

Из уравнения (10.11) имеем

$$U = U_* + A,$$

где

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \kappa}{\alpha \Delta U} - \Delta U \right). \quad (10.12)$$

Таким образом, оптимальный режим поддерживается с некоторой погрешностью A , причем величина ее достаточно мала. Действительно, в простейшем случае можно установить задание так, чтобы $\Delta \kappa = 0$. Тогда $A = -\Delta U/2$. Поскольку ΔU — малая величина (существенно меньше U_*), то погрешность будет незначительной. В более сложном варианте, если известно α , можно подобрать $\Delta \kappa$ из условия $A = 0$: $\Delta \kappa \approx \Delta U^2/\alpha$. В реальных условиях при переработке дефектной свеклы рекомендуется повышенный рН. С учетом этого $\Delta \kappa$ устанавливают равным некоторой постоянной величине.

Приведенная система — пример очень простой, реализации достаточно сложной системы. Очевидно, такие приемы позволяют получить эффективные беспоисковые системы, хорошо стабилизирующие оптимальный режим. Однако простота реализации здесь существенно базируется на явно выраженной экстремальности характеристик объекта.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие бывают виды систем оптимального управления?
2. В чем состоит суть метода «золотого сечения»?
3. Какие бывают алгоритмы поиска экстремума (одно-, многомерные)?
4. В чем состоит суть алгоритма оптимизации на основе примера 10.2?
5. За счет чего достигается повышение быстродействия в примере 10.2?
6. На основе примеров из § 9.3 и 10.2 опишите трехуровневую систему управления установкой.
7. Что такое система экстремального управления?
8. За счет чего достигается работа в оптимальном режиме на примере из § 10.3?
9. Чем определяется погрешность поддержания оптимального режима в примере из § 10.3?
10. Как уменьшить указанную в вопросе 9 погрешность?

Глава 11

ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ (ДИСКРЕТНЫМИ) ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

§ 11.1. ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ (ДИСКРЕТНЫХ) ПРОЦЕССОВ

Описанные в предыдущей главе алгоритмы могут применяться для оптимизации как непрерывных производств, так и производств периодического или дискретного (в любом смысле)

действия. Это связано прежде всего с известной общностью в постановках задач оптимального управления в статике. Как правило, независимо от характера производства рассматривается некоторая целевая функция (возможно, многомерная), обязательно имеющая экстремум, который тем или иным методом требуется найти.

Однако дискретные объекты часто имеют определенную специфику для рассматриваемого класса задач. Например, весьма распространен случай, когда решение оптимальной задачи может принимать конечное количество дискретных значений. Типичный пример таких задач — оптимальное размещение зерна в элеваторе. Здесь отметим лишь распространенность дискретных объектов (элеваторы в мукомольной, масло-жировой, солодовенной и др. подотраслях). Для таких объектов характерна «двойная» дискретность: во-первых, операции по приемке и перегрузке дискретны во времени, а во-вторых, дискретен сам объект (в пространстве), состоящий из определенного числа силосов.

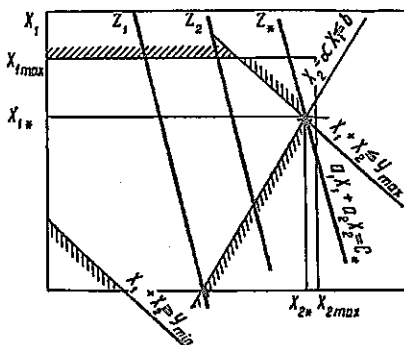
Специфической особенностью периодических (дискретных) объектов является также существенно большее количество ограничений по сравнению с непрерывными. Хотя разного рода ограничения встречаются и при оптимизации непрерывных объектов, там это мало меняет суть задачи. Для дискретных же объектов во многих случаях наличие ограничений делает задачу нетривиальной в том смысле, что целевая функция может быть вообще неэкстремальной либо ее экстремум может находиться вне области ограничений. В таких задачах оптимум лежит на границе ограничений. Поскольку ограничения — это чаще всего плоскости в координатах переменных оптимизаций, оптимум может быть в одной из точек пересечения этих плоскостей.

В ряде случаев дискретность решения определяется только этим, поскольку в остальном объект может быть непрерывным.

Наконец, для объектов периодического действия имеется определенная специфика в плане оптимального проведения одного цикла (периода) процесса. С точки зрения формального описания процесса системой дифференциальных уравнений это — задачи оптимального управления в динамике. Однако реально дело обстоит гораздо сложнее. Технологически оправданные оптимальные задачи возникают для объектов, математическая модель которых представлена нелинейными уравнениями (алгебраическими или дифференциальными).

Описанные специфические особенности рассматриваемых задач предопределяют следующее. Рассмотренные в § 10.1 методы в целом применимы и для оптимизации дискретных (пе-

Рис. 11.1. Графическое решение задачи линейного программирования (Z_1 , Z_2 , Z_* — значения целевой функции)



риодических) процессов. Однако наряду с ними широкое применение находят методы, базирующиеся на использовании ограничений. Это прежде всего методы линейного и нелинейного программирования. В связи с учетом ограничений применяются в разных формах методы, базирующиеся на штрафных функциях.

Суть задач линейного программирования рассмотрим на простейшем примере.

Пример. Пусть для производства некоторого продукта требуется периодически смешивать в емкости два ингредиента в количествах X_1 и X_2 соответственно. Стоимость ингредиентов a_1 и a_2 . На количества X_1 и X_2 наложены ограничения:

$$0 \leq X_1 \leq X_{1\max}; \quad (11.1)$$

$$0 \leq X_2 \leq X_{2\max}. \quad (11.2)$$

Кроме того, ограничена сверху и снизу рабочая емкость, т. е. производительность агрегата

$$Y = X_1 + X_2, \quad (11.3)$$

иначе говоря,

$$Y_{\min} \leq X_1 + X_2 \leq Y_{\max}, \quad (11.4)$$

и имеются ограничения на количество готового продукта, задаваемое в виде

$$X_2 - \alpha X_1 \leq b. \quad (11.5)$$

Целевая функция Z (прибыль)

$$Z = (a_y - a_1 - a_2)Y. \quad (11.6)$$

С учетом выражения (11.3) уравнение (11.6) примет вид

$$Z = K_1 X_1 + K_2 X_2, \quad (11.7)$$

где $K_1 = a_y - a_1$; $K_2 = a_y - a_2$; a_y — стоимость готового продукта.

Графическое решение задачи представлено на рис. 11.1. На нем показаны линии равных значений целевой функции при $Z_1 < Z_2 < Z_*$. Поскольку $K_1 > 0$ и $K_2 > 0$, для получения максимальной прибыли желательно работать с максимальными X_1 и X_2 . Этому препятствуют ограничения по производительности (11.4) и по качеству (11.5). При данном соотношении K_1 , K_2 , b , α и $Y_{\max}$ оптимум получается при пересечении прямых $X_2 - \alpha X_1 = b$ и $X_1 + X_2 = Y_{\max}$, что соответствует

$$\left. \begin{aligned} X_{1*} &= \frac{Y_{\max} - b}{1 + \alpha}; \\ X_{2*} &= \frac{b + \alpha Y_{\max}}{1 + \alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (11.8)$$

Простое (графическое) решение возможно при небольшой размерности задачи — двух, редко трех независимых переменных. В более сложных случаях используют специальные численные методы.

Для некоторых задач часть ограничений или целевая функция описывается нелинейными алгебраическими уравнениями. Такие задачи относят к классу задач нелинейного программирования. В постановочном плане отличие таких задач от задач линейного программирования незначительно, хотя методы решения могут существенно различаться. В частности, при решении задач нелинейного программирования широко применяется метод штрафных функций, суть которого состоит в следующем.

Пример. Для случая двумерного поиска заданы целевая функция (возможно, монотонная) вида

$$Z = \varphi(X_1, X_2) \quad (11.9)$$

и ограничение

$$\psi(X_1, X_2) \geq 0 \quad (11.10)$$

где φ и ψ — некоторые функции.

Для учета ограничения вводится модифицированная целевая функция в виде

$$Z_1 = \varphi(X_1, X_2) + S(\psi), \quad (11.11)$$

где S — функция штрафа.

Например, S можно задать в виде

$$S = \begin{cases} 0 & \text{при } \psi(X_1, X_2) \geq 0; \\ -A\psi(X_1, X_2) & \text{при } \psi(X_1, X_2) \leq 0, \end{cases} \quad (11.12)$$

где A — большая постоянная величина.

Таким образом, задача поиска экстремума (11.9) при ограничении (11.10) сводится к задаче поиска безусловного экстремума (11.11). Такую задачу можно решить одним из методов, приведенных в § 10.1.

Несколько иной подход требуется для периодических технологий, связанных с «развитием» процесса во времени. Один из возможных путей оптимизации таких процессов подробно описан в § 11.3. Здесь рассмотрим ситуацию, когда требуется оптимизировать цепочку последовательных процессов (безразлично, непрерывных или периодических). Близкой разновидностью такой ситуации является необходимость оптимизации нескольких стадий одного периодического процесса. Для этой цели часто применяется метод динамического программирования.

В основе метода лежит принцип оптимальности Беллмана, который гласит: любая часть оптимального многостадийного процесса также оптимальна. В частности, последняя часть (стадия, участок) процесса может оптимизироваться независимо от режима предыдущих частей. Предпоследняя часть процесса должна оптимизироваться так, чтобы в сумме обеспечить оптимальность последней и предпоследней частей и т. д.

Такой алгоритм оптимизации «с конца» получил некоторое распространение для решения многошаговых задач небольшой размерности. В более сложных задачах решение отыскивается на основе так называемого уравнения Беллмана, которое решается, как правило, численными методами (см. § 4.4).

Следовательно, в отличие от систем экстремального управления непрерывными объектами (см. § 10.1 и 10.3) системы оптимального управления периодическими (дискретными) процессами относительно сложны как в плане логики принятия решения, так и в вычислительном. Поэтому реализация таких систем базируется на применении мини-ЭВМ или в крайнем случае микропроцессоров.

Степень загрузки ЭВМ задачами рассматриваемого класса достаточно разнообразна. Например, задача оптимального размещения зерна в элеваторе (см. § 11.2) решается по времени сравнительно редко, но требует больших затрат ресурсов ЭВМ. Для такого рода задач целесообразно применять достаточно мощную ЭВМ, которая может параллельно решать еще целый ряд других задач. Для других систем, когда объект требует более или менее частого управляющего воздействия, рациональнее применять менее мощные и дешевые ЭВМ либо микроконтроллеры, которые решают только эту одну оптимальную задачу для одного агрегата (участка) или группы однотипных агрегатов.

§ 11.2. АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЗЕРНА {СЕМЯН} В ЭЛЕВАТОРЕ

Задачи оптимального размещения в элеваторе зерна, семян масличных культур и т. п. имеют относительно широкую область распространения. Такие задачи возникают в зерноперерабатывающей и мукомольной подотраслях (при размещении зерна), в солодовенной (при размещении солода и ячменя), в масло-жировой (при размещении семян подсолнечника) и некоторых других подотраслях пищевой промышленности. Постановку данной задачи и алгоритм ее решения рассмотрим на примере приемки, хранения и выдачи на переработку семян масличных культур. Постановки таких задач для других под-

отраслей практически аналогичны, а алгоритмы решения в основном близки, но различаются рядом деталей.

Технологически задача заключается в следующем. Семена подсолнечника поступают партиями определенного качества, отличающегося от партии к партии. Каждая партия размещается для хранения в элеваторе, состоящем из 50—100 силосов достаточно большого объема (порядка 600—800 м³).

Для масло-жировой промышленности характерно поступление на завод партий семян существенно меньших, чем вместимость силоса, — в среднем около 40 м³. Технологические особенности процессов маслособывающего производства таковы, что экономическая эффективность их тем выше, чем однороднее качественные показатели перерабатываемой порции сырья (обычно целого силоса).

Качество семян характеризуется в основном следующими показателями: влажностью, кислотным числом и сорностью. В некоторых модификациях алгоритма контролировались еще и другие показатели.

Очередную партию необходимо поместить так, чтобы неоднородность семян в данном силосе увеличилась в минимальной степени. Для оценки степени однородности размещенных партий семян в элеваторе использован дисперсионный критерий следующего вида:

$$Z = \sum_{j=1}^l \alpha_j \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_{ij}^2 G_i}{\sigma_{\text{вх}}^2 \sum_{i=1}^k G_i}, \quad (11.13)$$

где j — индекс качественного показателя ($j=1, 2, \dots, l$, в данном случае $l=3$, т. е. три качественных показателя); i — индекс номера силоса ($i=1, 2, \dots, k$); k — число силосов; σ_{ij}^2 — дисперсия j -го показателя в i -м силосе; $\sigma_{\text{вх}}^2$ — то же, но во входном потоке семян; G_i — количество семян в i -м силосе; α_j — весовой коэффициент.

Решение данной оптимальной задачи осуществляется с помощью двухуровневого параметрически настраиваемого алгоритма. Собственно алгоритм оптимального управления процессом размещения (нижний уровень) заключается в следующем. Диапазон изменения основных качественных показателей партии семян разбивается на n диапазонов однородности. Строго говоря, n может выбираться индивидуально для каждого показателя. Однако для простоты далее будем полагать величину n постоянной для всех качественных показателей семян. Каждому диапазону однородности присвоен численный код. Таким образом, каждая партия семян получает свой n -значный код.

Все силосы элеватора условно делятся на две области: основную и вспомогательную. Относительный размер основной области элеватора g . Эта область предназначена для размещения партий семян с высокой вероятностью появления. Все силосы основной области получают код, численно равный коду партий семян, помещаемых в данном силосе.

Во вспомогательной области помещают остальные партии семян (не попавшие в основную область). Для вспомогательной области априорное соответствие между кодами силосов и партий не обеспечивается.

После размещения партий в любом из силосов устанавливается текущий код силоса равным коду первой размещенной партии. При последующих размещениях во вспомогательной области выбор силоса осуществляют в соответствии с критерием (11.13) и при необходимости корректируют код силоса. В процессе хранения качественные показатели семян изменяются. В связи с этим коды силосов периодически корректируются.

Таким образом, непрерывное многомерное распределение качественных показателей сведено к дискретному с ограниченным числом состояний. Например, при $n=4$ и трех качественных показателях число возможных партий $N=n^3=4^3=64$; большинство сочетаний кодов (т. е. типов партий) относительно маловероятно.

При выбранных n и g задача оптимального размещения решается простым перебором из относительно небольшого числа возможностей (например, 50 силосов, 64 кода партий). Качество работы нижнего уровня алгоритма существенно зависит от выбора n и g для данного числа силосов k . Такой выбор — настройка — является верхним уровнем алгоритма.

Эта часть алгоритма выполняется сравнительно редко и заключается в следующем. По мере поступления партий семян накапливается статистика их показателей. На основе этой статистики выполняется моделирование процесса размещения. При этом варьируются величины n и g так, чтобы получить минимум (11.13) при ограничении на вероятность отказа*

$$P \leq P_{\max}. \quad (11.14)$$

В результате исследований и эксплуатации системы установлено, что оптимальное значение g_* мало зависит от исходных условий и $g_* \approx 0,7$. Поэтому алгоритм настройки в основном ориентирован на выбор оптимального значения n_* , которое обычно лежит в диапазоне 3—5. Блок-схема описанной системы приведена на рис. 11.2.

* Под отказом понимается невозможность разместить сырье без нарушений требований ГОСТа.

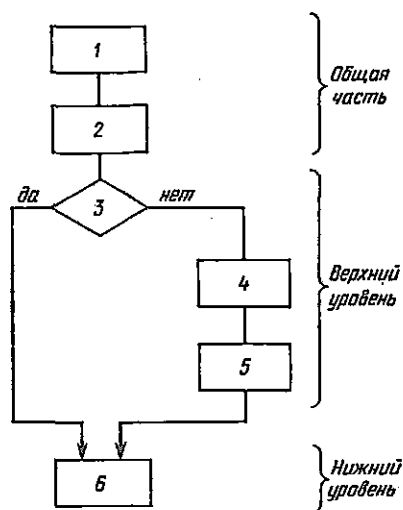


Рис. 11.2. Блок-схема алгоритма оптимального управления размещением семян

Система реализована в основном на центральной ЭВМ. К тому же в системе задействована ЭВМ для решения задач, обеспечивающих прием партий семян по качественным показателям. Для ввода показателей кислотности и влажности поступившей партии семян использована автоматизированная система экспресс-анализа качества семян подсолнечника (АСЭАК-СП, описанная в § 15.1), которая подключена к УСО ЭВМ. Информ-

мация между двумя ЭВМ в реальном времени передается по межмашинной связи.

Работа системы начинается с приходом очередной партии семян. Вручную с дисплея вводятся следующие данные: масса семян, номер партии и часть качественных показателей. Остальные показатели вводятся через АСЭАК-СП автоматически (см. блок 1 на рис. 11.2). После этого в блоке 2 определяется стационарность статистических свойств входного потока партий семян. Кроме того, информация об очередной партии включается в базу данных. Если условия стационарности нарушились, то в блоке 3 принимается решение на перенастройку. Тогда в блоке 4 выполняется моделирование процесса размещения с учетом новых статистических свойств входного потока. По результатам моделирования выбирают новые оптимальные значения n_* и g_* . Далее в блоке 5 в соответствии с новыми n_* и g_* выполняют перекодировку силосов в базе данных.

Блок 6 реализует нижний уровень алгоритма — выбор оптимального силоса для размещения данной партии (как описано выше).

В начале работы системы при недостатке статистических данных о качественных показателях поступающих семян для первых партий берутся прогнозируемые значения параметров алгоритма.

Из описанного следует, что алгоритм в определенной степени является адаптивным. Верхний его уровень (блоки 4 и 5) реализует настройку параметров n и g и изменение статистических свойств входного потока партий семян.

Система работает относительно редко. Сигнал нижнего уровня возникает по мере поступления очередной партии семян несколько раз в сутки. Сигнал верхнего уровня возникает еще реже — практически (по опыту эксплуатации) один раз в 30—50 сут. Это обстоятельство наряду с применением весьма мощной ЭВМ предопределило допустимость нескольких «лобовых» решений вычислительного плана — прямой перебор в базе данных для блока 6; достаточно емкое в плане затрат машинного времени моделирование и прямой поиск n_* и g_* в блоке 4. В итоге данная задача загружает ЭВМ незначительно.

Рассмотренный пример — лишь один из возможных подходов к решению подобной задачи. Известны, например, решения аналогичной задачи (для размещения солода) при менее «дискретном» подходе, когда поиск силоса осуществляется на основе критерия, близкого по идее к критерию (11.13), но без кодирования партий. Это исключает необходимость настройки параметров (их просто нет), но усложняет нижний уровень: минимизация критерия ведется методом случайного поиска с использованием функций штрафов.

§ 11.3. СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

Рассмотренный в предыдущем параграфе алгоритм в определенном смысле является адаптивным. Наличие свойств адаптируемости вообще достаточно характерно для задач оптимального управления, поскольку положение экстремума может «плавать» в зависимости не только от возмущений, но и от изменения параметров (коэффициентов модели) процесса. Один из возможных методов адаптивного оптимального управления (см. § 5.2) заключается в применении эталонной модели.

Пример. Рассмотрим процесс рашения дрожжей в аппарате периодического действия. Этот процесс описывается дифференциальным уравнением Моно вида

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\mu_0 G D}{1 + aG}, \quad (11.15)$$

где D — концентрация дрожжевых клеток в аппарате; G — концентрация субстрата (сахаров); μ_0 — константа скорости роста; a — константа ингибирования.

При производстве дрожжей процесс в упрощенном виде протекает следующим образом. В аппарат задают небольшое количество питательной среды (субстрата) V_0 с концентрацией дрожжей D_0 и концентрацией сахаров G_0 . При этом V_0 — небольшая часть объема аппарата (общий рабочий объем его V_w). После этого выполняют ряд технологических операций (задают некоторые ингредиенты, включают аэрацию и т. п.). В ходе процесса в соответствии с уравнением (11.15) дрожжи размножаются, а концентрация G изменяется (убывает, см. ниже). Процесс все время подпитывают субстра-

том с расходом $F(t)$ и концентрацией G_0 (для простоты будем считать, что дрожжей в исходном субстрате нет). Тогда изменение концентрации сахаров в аппарате описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dG}{dt} = \frac{F}{V} G_0 - \frac{\alpha \mu Q}{1 + aG} D, \quad (11.16)$$

где V — текущий объем субстрата в аппарате; α — коэффициент пересчета. Смысл α заключается в следующем. При некоторых допущениях (аэробное брожение, т. е. спирт не образуется и т. п.) можно принять

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dG}{dt}. \quad (11.17)$$

Иначе говоря, выражение (11.17) представляет собой дифференциальную форму материального баланса, а α выражает количество сахара, необходимое для формирования одной дрожжевой клетки. Объем продукта в аппарате, очевидно, определяется как

$$dV/dt = F. \quad (11.18)$$

Интегрируя выражение (11.17), с учетом уравнения (11.18) получим

$$D = \frac{V_0}{V} \left(D_0 + \frac{G_0}{\alpha} \right) + \frac{1}{\alpha} (G_0 - G). \quad (11.19)$$

С учетом выражения (11.19) уравнение (11.16) примет вид

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\mu_0 G \left[\frac{V_0}{V} \left(D_0 + \frac{G_0}{\alpha} \right) + \frac{G_0}{\alpha} - \frac{G}{\alpha} \right]}{1 + aG}. \quad (11.19a)$$

Из уравнения (11.19a) следует, что производительность аппарата определяется величиной dD/dt , т. е. массой дрожжей, полученных за единицу времени. Нетрудно показать, что правая часть выражения (11.19a) имеет максимум по G , причем оптимальное значение G_* определяется как

$$G_* = \frac{\sqrt{1 + ab} - 1}{a}, \quad (11.20)$$

где $b = \frac{V_0}{V} (aD_0 + G_0) + G_0$.

Очевидно, по мере заполнения аппарата (т. е. с ростом V) G_* уменьшается по вполне определенному закону (11.20). В соответствии с уравнением (11.16) $G(t)$ будет изменяться по-иному. Задача управления состоит в том, чтобы, воздействуя на расход F , обеспечить нужный оптимальный закон изменения $G(t)$.

Преобразуем уравнение (11.16) аналогично выражению (11.19a)

$$\frac{dG}{dt} = UG_0 + \frac{\mu_0}{1 + aG} (b - G), \quad (11.20a)$$

где $U = F/V$.

Представим выражение (11.20а) в виде

$$dG/dt = KF + AG, \quad (11.20б)$$

где

$$K = G_0/V; \quad (11.21)$$

$$A = \frac{\mu_0(b - G)}{1 + aG}. \quad (11.22)$$

Из уравнений (11.21) и (11.22) видно, что параметры выражения (11.20б) переменны, причем K меняется весьма существенно (в начале $V \approx V_0 \approx 0,02 V_{\max}$, в конце $V = V_{\max}$, т. е. K меняется в $1/0,02 = 50$ раз). Изменение A также существенно. Кроме того, μ_0 и a характеризуют микробиологический процесс и могут меняться случайным образом.

Рис. 11.3. Схема автоматизации управления процессом рашения дрожжей:

I — дрожжегенератор; II — трубопровод дрожжей; III — трубопровод сусли

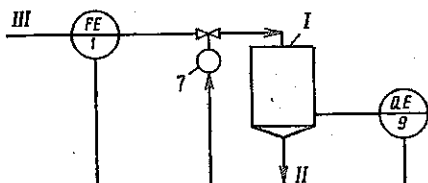


Рис. 11.4. Блок-схема адаптивной системы управления процессом рашения дрожжей:

1 — объект; 2 — управляющее устройство; 3 — блок эталонной модели; 4 — временный задатчик оптимального управления; 5, 6 — временные задатчики эталонных параметров модели; 7, 8 — узлы формирования поправки коэффициента передачи; 9 — блок корректировки коэффициента передачи; 10, 11, 12 — узлы формирования поправки к постоянной времени; 13 — блок корректировки постоянной времени

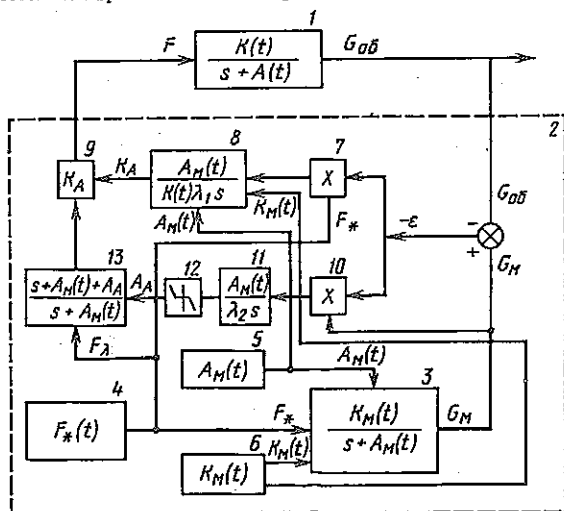
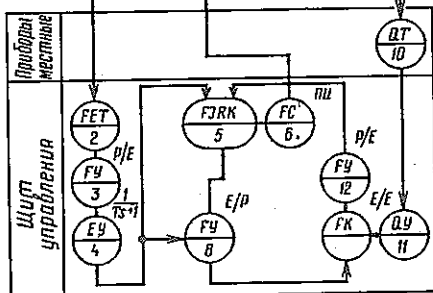


Схема автоматизации управления процессом представлена на рис. 11.3. Управление осуществляется сравнительно простой локальной системой, задание которой формирует адаптивное оптимизирующее управляющее устройство (рис. 11.4).

Оптимальное эталонное управление $F_*(t)$ формируется задатчиком 4 на основе выражений (11.20) и (11.20а) следующим образом. На основе предварительных оценок μ и a численно решается уравнение (11.20а) с учетом выражения (11.20). Расчет выполняется только при проектировании системы и получается в виде соотношений

$$G_* = \varphi_1(t); \quad (11.23)$$

$$V_* = \varphi_2(t), \quad (11.24)$$

формируемых на ЭВМ, например, в табличном виде. Величина F_* определяется из выражений (11.24) и (11.18):

$$F_*(t) = \int_0^t \varphi_2(\tau) d\tau. \quad (11.24a)$$

Задатчик 4 реализует выражение (11.24а). При этом φ_2 может быть задано либо в виде таблицы, либо аппроксимировано более или менее сложной функцией. (Детали реализации этого узла относятся к области оптимального управления и в данном случае не рассматриваются.)

Алгоритм адаптации здесь выбран на основе использования эталонной модели, так как система должна отслеживать оптимальный сигнал F_* и обеспечивать эталонный переходный процесс $G_*(t)$, соответствующий оптимальному (в указанном выше смысле) режиму дрожжегенерации. Суть алгоритма адаптации — в следующем. Из выражения (11.16б) имеем в изображениях

$$G_{ог}(s) = \frac{K}{s + A} F(s). \quad (11.25)$$

Причем K и A , как уже отмечалось, — некоторые неизвестные функции от времени. В то же время оптимальный процесс должен описываться как

$$G_* = \frac{K_*}{s + A_*}, \quad (11.26)$$

где * — знак оптимальных эталонных величин.

Соотношение (11.26) реализовано в блоке 3 управляющего устройства (см. рис. 11.4) и является эталоном процесса. Величины $K_* = K_*(t)$ и $A_* = A_*(t)$ получаются заранее как побочный продукт расчета соотношений (11.23) и (11.24). Зависи-

мости $K_m(t)$ и $A_m(t)$ реализуются аналогично $F_*(t)$ соответственно в блоках 5 и 6. Сигналы от этих блоков постоянно корректируют эталонную модель. Таким образом, выход блока 3 $G_m(t) = G_*(t)$ (что естественно при достаточно точной реализации блоков 3, 4, 5, 6).

Поскольку в общем случае $K(t) \neq K_m(t)$ и $A(t) \neq A_m(t)$, выход объекта $G(t)$ отличается от эталонного $G_m(t)$. Для определения ошибки

$$\varepsilon = G - G_m \quad (11.27)$$

представим выражения (11.25) и (11.26) в оригиналах

$$\dot{G} + \dot{G}A(t) = K(t)F_* \quad (11.28)$$

и

$$\dot{G}_m + G_m A_m(t) = K_m(t)F_*. \quad (11.29)$$

Кроме того, $K(t)$ и $A(t)$ представим в виде

$$K(t) = K_m(t)K_A; \quad (11.30)$$

$$A(t) = A_m(t) + A_A, \quad (11.31)$$

где K_A , A_A — адаптируемые корректирующие параметры (которые тоже, естественно, зависят от времени).

Вычтем почленно выражение (11.29) из (11.28) с учетом уравнений (11.30), (11.31) и (11.27) и получим

$$\dot{\varepsilon} + \varepsilon A(t) - A_A G_m = \gamma F_*, \quad (11.32)$$

где $\gamma = K_m(t)(K_A - 1)$.

Таким образом, подстройке подлежат два параметра — γ и A_A , т. е. необходима двухканальная адаптивная система. Рассмотрим каждый канал в отдельности. Вначале предположим, что $A_A = 0$. Тогда из уравнения (11.32) имеем

$$\dot{\varepsilon} + A_m(t)\varepsilon = \gamma F_*. \quad (11.32a)$$

Выберем настройку γ , исходя из соображений устойчивости, причем оценивать устойчивость будем по Ляпунову. Примем функцию Ляпунова в виде квадратичной положительно определенной формы

$$L = A_m(t)\varepsilon^2 + \lambda_1 \gamma^2, \quad (11.33)$$

где λ_1 — положительная постоянная.

Полная производная по времени от уравнения (11.33) имеет вид

$$dL/dt = 2A_m \dot{\varepsilon} + \dot{A}_m \varepsilon^2 + 2\lambda_1 \dot{\gamma}\gamma. \quad (11.34)$$

Поскольку $A_m(t)$ меняется во времени сравнительно медлен-

но, членами $\varepsilon^2 A_m$ можно пренебречь. Тогда с учетом выражения (11.32а) получим

$$dL/dt = 2(A_m \gamma F_* \varepsilon - A_m^2 \varepsilon^2 + \lambda_1 \dot{\gamma} \gamma). \quad (11.34a)$$

Для обеспечения неположительности правой части (11.34а), т. е. для устойчивости процесса настройки, достаточно выполнить условие

$$A_m F_* \gamma \varepsilon + \lambda_1 \dot{\gamma} \gamma \leq 0, \quad (11.34б)$$

откуда, очевидно,

$$\dot{\gamma} \leq - \frac{A_m(t) F_* \varepsilon}{\lambda_1}. \quad (11.35)$$

Поскольку $\gamma = K_m(K_A - 1)$,

$$\dot{\gamma} = K_A K_m + K_m K_A - K_m.$$

Как и ранее, в выражении (11.34) величиной K_m можно пренебречь [в силу медленных изменений $K_m(t)$]. Тогда $\dot{\gamma} = K_c K_m$ и с учетом уравнения (11.35) можно принять

$$\dot{K}_c = \frac{A_m(t) F_* (-\varepsilon)}{K_m(t) \lambda}. \quad (11.35a)$$

Соотношение (11.35а) реализовано в блоках 7, 8 и 9.

Рассмотрим теперь второй канал самонастройки. С учетом наличия первого канала примем критерий устойчивости в виде

$$L = A_m(t) \varepsilon^2 + \lambda_1 \gamma^2 + \lambda_2 A_A^2. \quad (11.36)$$

Аналогично предыдущему получим

$$\frac{dL}{dt} = 2[A_m(t) \gamma F_* \varepsilon + A_m(t) A_A G_m \varepsilon + \lambda_1 \dot{\gamma} \gamma + \lambda_2 \dot{A}_A A_A - A_m(t) A(t) \varepsilon^2]. \quad (11.37)$$

При неположительности (11.37) с учетом (11.34б) достаточно

$$A_m(t) A_A G_m \varepsilon + \lambda_2 \dot{A}_A A_A \leq 0. \quad (11.38)$$

При $A \neq 0$

$$\dot{A} = \frac{A_m(t) G_m (-\varepsilon)}{\lambda_2}. \quad (11.38a)$$

Необходимо лишь ограничить абсолютную величину A_A

$$|A_A| \geq \delta, \quad (11.39)$$

где δ — малая величина.

Этот алгоритм [т. е. выражения (11.38а) и (11.39)] реализован в блоках 10, 11, 12.

Поскольку $A(t)$ влияет только на динамические параметры процесса, собственно корректировка вводится с помощью динамического звена с передаточной функцией вида

$$\frac{s + A_m + A_A}{s + A_m}, \quad (11.40)$$

реализованной в блоке 13.

Описанное устройство самонастройки имеет достаточно сложную структуру. Более того, при проектировании реального устройства необходимо учитывать дополнительные динамические свойства, соответствующие контуру регулирования расхода (1—2—3—4—5—6—7 на рис. 11.3), дополнительное запаздывание в датчике 9, динамические параметры самого устройства и т. п.

В приведенном примере в целях упрощения рассмотрены динамические свойства, описанные дифференциальным уравнением первого порядка, хотя реально следует рассмотреть по крайней мере дифференциальное уравнение второго порядка. Однако это повлияет на структуру системы незначительно (в цепочки 7, 8, 9 и 10, 11, 12, 13 добавится по одному динамическому звену). К тому же не рассмотрен логически достаточно сложный блок контроля нарушений (для его работы в устройство вводится фактический расход F через преобразователь 8 — см. рис. 11.3). Работа этого блока не имеет прямого отношения к алгоритму адаптации.

Таким образом, технически устройство управления может быть реализовано достаточно просто только средствами микропроцессорной техники. Структура, представленная на рис. 11.4, с учетом дискретной работы микропроцессора реализуется в виде программного комплекса, обеспечивающего оптимальное адаптивное управление процессом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы особенности дискретных производств с точки зрения задач оптимального управления?
2. Что такое линейное программирование? (его суть).
3. В чем суть метода штрафных функций?
4. Как описывается постановка задачи оптимального размещения партии семян в элеваторе?
5. Как достигается адаптивность алгоритма оптимального управления в примере оптимального размещения семян в элеваторе?
6. Как описывается постановка задачи оптимального управления дрожжегенерацией?
7. Как достигается адаптивность оптимального управления в примере системы управления с эталонной моделью?
8. Как описывается блок-схема реализации системы оптимального управления с эталонной моделью?

ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

§ 12.1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА И МЕТОДЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ

Одной из основных функций любой АСУ ТП является оптимальное или по крайней мере рациональное управление технологическим комплексом в целом. Смысл, вкладываемый в термин «оптимальное управление технологическим комплексом», достаточно разнообразен. Характер оптимального управления в первую очередь определяется видом критерия (целевой функции) управления. В подавляющем большинстве случаев (как было показано в § 7.1) для АСУ ТП в целом выбирают критерий экономического характера типа прибыль, затраты, себестоимость и т. п. Достоинствами такого рода критериев являются четко выраженный технико-экономический смысл и практически однозначная связь с важнейшей характеристикой АСУ ТП — экономическим эффектом от внедрения системы. Однако экономические критерии слабо учитывают технические особенности процессов и обычно не имеют экстремума в рабочей области.

Пример. Пусть суммарные потери продукта на некотором технологическом комплексе в первом приближении пропорциональны квадрату производительности, т. е.

$$\Delta = bX^2, \quad (12.1)$$

где Δ — потери; b — некоторый коэффициент; X — производительность.

Прибыль от такого комплекса E очевидна:

$$E = CX - C\Delta - \alpha CX - K, \quad (12.2)$$

где C — оптовая цена готового продукта; α — доля стоимости сырья в цене готового продукта (т. е. αC — стоимость сырья); K — постоянные затраты (общезаводские и т. п.).

Более точно в уравнении (12.2) следовало бы учесть затраты и других видов: пара, электроэнергии, материалов и т. п. Однако приближенно можно принять, что эти затраты примерно пропорциональны X или Δ и можно учесть их либо поправкой к α , либо к b . С учетом уравнения (12.1) выражение (12.2) представим в виде

$$E = C[(1 - \alpha)X - bX^2] - K. \quad (12.2a)$$

Из условия $\partial E / \partial X = 0$ получим

$$(1 - \alpha) - 2bX_* = 0 \quad (12.3)$$

или

$$X_* = \frac{1 - \alpha}{2b}. \quad (12.4)$$

С учетом условия (12.4) определим долю потерь относительно выпуска готового продукта. Очевидно, выпуск $X_1 = X - \Delta$, а относительные потери

$$\delta = \frac{\Delta}{X - \Delta} \quad (12.5)$$

или с учетом выражений (12.4) и (12.1)

$$\delta = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}. \quad (12.5a)$$

Для пищевой промышленности характерны значения α в пределах 0,5..0,7 (т. е. стоимость сырья составляет от 50 до 70% стоимости продукции). Тогда значение δ будет находиться в диапазоне от 33 до 17%. Очевидно, такой процент потерь совершенно недопустим.

Таким образом, приходим к необходимости ограничения по потерям. Реально потери продукта в производстве достаточно жестко регламентируются разного рода технологическими инструкциями. Однако с учетом указанного ограничения величина X , по выражению (12.4) не может быть достигнута и технологический комплекс должен, исходя из уравнения (12.1), всегда работать при постоянной производительности с максимально допустимыми потерями. Иначе говоря, задача оптимального управления для комплекса в целом вырождается в тривиальную стабилизацию производительности.

Данный пример иллюстрирует два важных обстоятельства. Во-первых, критерии оптимальности экономического характера обязательно должны дополняться целой системой ограничений, учитывающих самые разнообразные технологические и технические ограничения на процесс в целом и, что важнее, на его отдельные части. Во-вторых, уже на ранней стадии разработки АСУ ТП в большинстве случаев простейшие выкладки типа приведенных выше позволяют оценить характер задачи управления комплексом в целом: действительно ли имеет место задача оптимизации или речь идет о существенно более простой задаче стабилизации режима при тех или иных (каких?) ограничениях. Имеется возможность оценить пригодность различных критериев, относительную важность ограничений и т. п. Естественно, точность такого анализа невелика, так как он базируется по необходимости на простых и, следовательно, неточных аппроксимациях* реальных соотношений, но качественная сторона ситуации прослеживается достаточно четко.

Необходимость такого предварительного анализа диктуется следующим: в относительно простых случаях автоматизируемый комплекс состоит из трех-пяти, а чаще всего из большего числа участков (цехов). Каждый участок включает несколько агрегатов, которые с точки зрения оптимального управления являются многомерными объектами. В итоге полная размерность задачи управления комплексом составляет порядка 100

* От латинского *approximate*, что означает приближенное выражение каких-либо величин через другие, более простые величины.

и более параметров. Естественно, что при такой размерности задача оптимизации становится совершенно необозримой в алгоритмическом смысле и, как правило, нерешаемой из-за вычислительной сложности. Поэтому либо стремятся упростить задачу в целом до приемлемой размерности, либо применяют различные методы декомпозиции общей задачи на несколько взаимосвязанных более простых задач, а чаще всего применяют оба подхода одновременно. Рассмотрим некоторые методы декомпозиции.

Метод декомпозиции по технологии. В этом методе блоком будет смеситель, сборник, бродительный аппарат, печь и т. п. Достоинство метода состоит в его очевидности и технологической обоснованности. Однако имеются и определенные трудности. Средней сложности технологический комплекс состоит из нескольких десятков блоков. В более сложных случаях их число доходит до 200—300. Разнообразие технологии пищевых производств предопределяет весьма разнообразный характер соединения блоков и соответственно высокую сложность полученной сети. Другая сложность характерна вообще для всех методов декомпозиции и состоит в необходимости учета взаимного влияния блоков.

Пример. Пусть имеется некоторый технологический комплекс, состоящий для простоты из двух последовательно соединенных блоков. Вклад в общую целевую функцию каждого из блоков имеет вид

$$E_i = (x_i - f_i - a_i y_{i-1})^2 + b_i y_{i-1}, \quad (12.6)$$

где i — номер блока ($i=1, 2$); E — целевая функция или ее составляющая; x_i — управление для i -го блока; f_i — возмущение для i -го блока; y_{i-1} — выход предыдущего ($i-1$)-го блока; a, b — коэффициенты.

Для простоты выразим линейную модель блока в виде

$$y_i = k_i x_i, \quad (12.7)$$

где k_i — коэффициент передачи.

Кроме того, примем, что все возмущения для первого блока учтены в f_1 , т. е. $y_0=0$. С учетом этого общая целевая функция

$$E_2 = a_1 (x_1 - f_1)^2 + a_2 (x_2 - f_2 - a_2 y_1)^2 + b_2 y_1, \quad (12.8)$$

где a_1, a_2 — весовые коэффициенты.

Без потери общности можно принять $a_1=a_2=1$. Тогда выражение (12.8) с учетом уравнения (12.7) примет вид

$$E_2 = (x_1 - f_1)^2 + (x_2 - f_2 - a_2 k_1 x_1)^2 + b_2 k_1 x_1. \quad (12.8a)$$

Ввиду простоты выражения (12.8a) нетрудно найти оптимальные x_1 и x_2 без декомпозиции из условий.

$$\partial E_2 / \partial x_1 = 0 \text{ и } \partial E_2 / \partial x_2 = 0.$$

В результате получится система

$$\begin{cases} x_2 - f_2 - a_2 k_1 x_1 = 0; \\ x_1 - f_1 - a_2 k_1 (a_2 - f_2 - a_2 k_1 x_1) + \frac{b_2 k_1}{2} = 0. \end{cases} \quad (12.9)$$

Решая систему (12.9), получим

$$x_{1*} = f_1 - \frac{b_2 k_1}{2}; \quad (12.10)$$

$$x_{2*} = f_2 + a_2 k_1 f_1 - \frac{a_2 b_2 k_1^2}{2}. \quad (12.11)$$

Рассмотрим декомпозиционный вариант решения этой же задачи, который нас собственно и интересует. Исходя из принципов динамического программирования (см. § 11.1), последний — второй блок можно оптимизировать независимо, т. е. исходя только из минимума E_2 :

$$E_2 = (x_2 - f_2 - a_2 y_1)^2 + b_2 y_1. \quad (12.11a)$$

Из условия $\partial E_2 / \partial x_2 = 0$ получим с учетом выражения (12.7)

$$x_{2*} = f_2 + a_2 k_1 x_1, \quad (12.12)$$

т. е. оптимальное управление x_2 зависит от действий на предыдущем шаге — от выбора x_1 . Попробуем теперь найти x_1 из локальной для одного блока целевой функции

$$E_1 = (x_1 - f_1)^2. \quad (12.12a)$$

Аналогично предыдущему получим простой и неверный результат

$$x_1 = f_1. \quad (12.13)$$

Ошибочность этого результата легко видеть из сопоставления выражений (12.13) и (12.10). Разница объясняется тем, что E_2 зависит от y_1 [см. (12.11a)] и, следовательно, x_1 должно выбираться с учетом этого обстоятельства. В данном случае целесообразно на втором шаге (т. е. для одного блока) рассмотреть всю целевую функцию. Из уравнения (12.6) с учетом выражений (12.7) и (12.12) получим

$$E_2 | x_2 = x_{2*} = b_2 k x + (x_1 - f_1)^2. \quad (12.14)$$

Из условия $\partial E_2 / \partial x_1 = 0$ получим с учетом выражения (12.7)

$$x_{1*} = f_1 - \frac{b_2 k_1}{2}, \quad (12.14a)$$

что идентично выражению (12.10). Подставив выражение (12.14a) в уравнение (12.12), получим соотношение для x_{2*} , аналогичное соотношению (12.11).

Декомпозиция, очевидно, упростила только первый шаг (для последнего блока). Остальные блоки можно оптимизировать только с учетом их «вклада» в целевую функцию последующих блоков. В то же время оптимальное управление последующих блоков зависит от режима предыдущих. Этот вывод — общий для всех методов декомпозиции. По существу, декомпозиция задачи оптимизации сводится к решению локальных (для отдельного блока) задач при учете тем или иным способом взаимного влияния блоков. В приведенном выше примере оба решения в вычислительном плане примерно равноценны.

Метод декомпозиции по блокам моделей. В более сложных

случаях преимущества декомпозиции по технологии тоже далеко не всегда очевидны. Характерный пример этому — оптимальное управление БРУ (см. § 10.2). В ранних работах по данной проблеме эта задача решалась методом декомпозиции по технологии — БРУ разбивалась на три колонны, каждая из которых оптимизировалась локально, а стыковка (т. е. оптимизация для БРУ в целом) осуществлялась подобно описанному выше простейшему примеру — методом динамического программирования. В целом такой подход давал корректное в математическом и технологическом смысле решение. Вычислительные затраты были значительными, но в целом приемлемыми, так как речь шла об одноразовом решении в пакетном режиме для достаточно мощных ЭВМ. Необходимость решения этой же задачи на менее мощной управляющей ЭВМ в реальном масштабе времени потребовала другого подхода, который и описан в § 10.2. Этот подход в определенном смысле можно считать отказом от декомпозиции вообще.

Однако в неявном виде — в плане организации вычислительного алгоритма — декомпозиция все же присутствует. Различные блоки модели (т. е. блоки в вычислительном, а не в технологическом смысле) рассчитываются более или менее независимо, что дает заметный вычислительный выигрыш — примерно на два порядка по сравнению с методом технологической декомпозиции.

Это — пример широко применяемой декомпозиции по моделям. Во многих случаях оба метода — декомпозиция по технологии и по моделям — совпадают, поскольку блоки математической модели обычно соответствуют реальным технологическим агрегатам. Однако декомпозиция по блокам модели имеет то преимущество, что модель можно «рассечь» в таком месте, чтобы взаимное влияние полученных блоков было по возможности минимальным. В простейшем случае это требует небольшой перекомпоновки уравнений. Например, для описанного выше примера в выражении (12.6) слагаемое $b_i y_{i-1}$ следует отнести не к E_i , а к E_{i-1} . Тогда для E_i имеем [аналогично выражению (12.12a)]

$$E_i = (x_i - f_i)^2 + b_2 k_1 x_i, \quad (12.146)$$

откуда оптимальное значение x_i получается сразу в соответствии с уравнением (12.10). Отметим, что выражение (12.146) аналогично уравнению (12.14), хотя они получены разными путями. Выражение (12.146) получено исходя из эвристических*, но достаточно очевидных в силу простоты примера сооб-

* От греческого *heurisko* нахожу — совокупность логических приемов и методических правил теоретического исследования и нахождения истинного значения.

ражений. Что касается выражения (12.14), то его вывод имеет более общий характер, но несколько сложнее. При более сложных моделях подобного рода декомпозиция требует серьезного анализа вычислительного алгоритма и трудно формализуема.

Иерархический метод декомпозиции. Во многих случаях применяют методы декомпозиции, базирующиеся на иерархическом представлении системы. При этом возможно несколько подходов: декомпозиция по принципу иерархии оптимизационных задач, декомпозиция по принципу иерархии уровней управления и т. п.

При любом подходе иерархический метод декомпозиции так же, как и метод декомпозиции по блокам модели, направлен на «развязку» блоков. Идея всех разнообразных подходов к данному методу одна и та же — связи между блоками нижнего уровня так или иначе замыкаются через верхний уровень. Более подробно некоторые разновидности иерархического метода декомпозиции будут рассмотрены ниже.

§ 12.2. ВЫБОР МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

Из изложенного в предыдущем параграфе следует достаточно большое разнообразие как методов декомпозиции, так и способов их применения. В целом удачная декомпозиция технологического комплекса часто базируется на неформальном анализе структуры и опыте разработчика.

Известны, однако, некоторые методы, способные отчасти формализовать данную задачу. Применяя их, следует помнить, что далеко не все моменты реального функционирования производства поддаются формализации и могут быть учтены в моделях. К тому же точность математических моделей, используемых для оптимизации (обычно это модели статике), невелика, в лучшем случае погрешность составляет 3—5%, а чаще порядка 10—15%.

Поэтому желательно заранее иметь, хотя бы приблизительную оценку взаимного влияния блоков, например, на основе грубых простейших моделей типа использованных в предыдущем параграфе. Это позволяет сразу же «отсеять» некоторые связи и упростить структуру общей модели комплекса, подлежащей декомпозиции. С учетом этого рассмотрим некоторые методы анализа технологического комплекса, используемые для декомпозиции.

Структурный анализ. Этот метод возник как средство уменьшения размерности задач расчета оптимальных статических режимов сложных технологических комплексов. Как правило,

расчет одного и того же комплекса может быть сведен к решению различных нелинейных систем уравнений разных порядков.

Пусть расчет схемы сводится к решению некоторой системы нелинейных уравнений

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; i = 1, 2, \dots, n. \quad (12.15)$$

Порядок системы уравнений (12.15) равен сумме размерностей разорванных потоков. Основная цель декомпозиции состоит в том, чтобы система (12.15) была по возможности наиболее простой и имела наименьшую размерность. Структурный анализ решает эту задачу двумя путями. Первый путь — это выделение в схеме совокупностей блоков (агрегатов), охваченных обратными связями, так называемых комплексов*. Комплекс — это связанная совокупность блоков схемы, обладающая следующими свойствами: 1) каждый блок комплекса входит в какой-нибудь цикл; 2) если j -й блок входит в комплекс i , то и все блоки, принадлежащие циклам, включающим j -й аппарат, входят в комплекс i .

Если в схеме выделены комплексы, то расчет ее сводится к последовательному расчету отдельных комплексов и блоков, не входящих в комплексы. Математически это эквивалентно тому, что система уравнений (12.15) распадается на ряд независимых подсистем меньшей размерности, каждая из которых может рассчитываться независимо. Один из алгоритмов выделения комплексов рассмотрен ниже.

Метод упрощения системы уравнений. Этот метод состоит в определении в каждом комплексе до некоторой степени оптимальной совокупности разрываемых потоков [см. систему (12.15)]. В качестве критерия оптимальности обычно используют соотношение вида

$$N = \sum_{i=1}^m n_i, \quad (12.16)$$

где n_i — размерность i -го разорванного потока; m — число разорванных потоков; N — сумма размерностей разрываемых потоков.

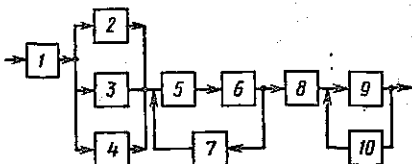
Очевидно требуется, чтобы N было минимальным. Когда размерности потоков одинаковы, требуется, чтобы число m разрываемых потоков было минимальным. Этот путь также будет более подробно проанализирован ниже.

Рассмотрим один из алгоритмов декомпозиции сложных технологических схем и выделения циркуляционных комплек-

* Не следует путать с технологическим комплексом как объектом управления АСУ ТП.

Рис. 12.1. Блок-схема технологического комплекса со структурами разных видов:

1, 8 — отдельные блоки; 2, 3, 4 — блоки параллельного включения; 5, 6, 7 и 9, 10 — циркуляционные комплексы



сов. Алгоритм базируется на использовании матрицы смежности. Это квадратная матрица — обычно ее обозначают $\bar{A}$ — размерности $n \times n$ (где n — число блоков в анализируемой схеме). Матрица состоит из нулей и единиц. Номера элементов a_{ij} в строках и столбцах соответствуют определенным блокам; $a_{ij}=1$ указывает на связь блока i в блоке j ; $a_{ij}=0$ означает, что связи нет. Поскольку ни один блок не связан сам с собой, диагональные элементы матрицы нулевые.

В качестве примера рассмотрим блок-схему технологического комплекса (рис. 12.1). Он состоит из десяти технологических блоков. Возможно, это идеализированные блоки модели, более или менее точно аппроксимирующие интересующие нас для оптимального управления процессы. С точки зрения алгоритма это безразлично. Матрица смежности $\bar{A}$ в данном случае имеет вид

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (12.17)$$

В схеме (см. рис. 12.1) блок 2, например, связан с блоком 5 и в матрице $\bar{A}$ (12.17) в строке 2 и столбце 5 стоит единица. Блок 2 больше ни с чем не связан (по выходу), поэтому все остальные элементы строки 2 нулевые.

Алгоритм заключается в следующем.

1. Рассчитывают последовательность степеней матрицы смежности $\bar{A}$, т. е. $\bar{A}$, $\bar{A}^2$, $\bar{A}^3$, ..., $\bar{A}^n$.

2. По этим данным находят последовательность матриц достижимости:

$$\bar{R}_i = \sum_{j=1}^l \bar{A}^j. \quad (12.18)$$

При расчете $\bar{A}^j$ и R_i правила вычисления матриц обычные, но применяется буква арифметики, т. е. для каждого элемента выполняются по правилам сложение

$$\left| \begin{array}{l} 0 + 0 = 0 \\ 0 + 1 = 1 \\ 1 + 1 = 1 \end{array} \right|$$

и умножение

$$\left| \begin{array}{l} 0 \times 0 = 0 \\ 0 \times 1 = 0 \\ 1 \times 1 = 1 \end{array} \right|$$

На практике это эквивалентно обычной арифметике при последующей замене всех целых положительных чисел единицей.

3. Смысл матрицы достижимости в следующем. Если $\bar{R}_n$ содержит информацию о потоках, прошедших через n блоков, а именно это определяется в выражении (12.18), то $r_{ij}=1$ означает, что воздействие от блока i через n блоков (или раньше) достигнет блока j . Теперь можно построить матрицу $\bar{W}$ вида

$$\bar{W} = \bar{R}_\infty \cap \bar{R}_\infty^t, \quad (12.19)$$

где t — знак транспонирования; $\cap$ — логическая операция суперпозиции (пересечения).

Правила этой операции такие же, как и для булевого умножения (см. выше). Для системы, изображенной на рис. 12.1, имеем

$$\bar{A}^2 = \left| \begin{array}{cccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right| \quad (12.20)$$

$$\bar{A}^{10} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (12.21)$$

Соответственно с этим матрица достижимости будет иметь вид

$$\bar{R}_{10} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (12.22)$$

В уравнении (12.18) в общем случае используется $\bar{R}_{\infty}$. Реально достаточно ограничиться конечным порядком вычисления $\bar{R}$, равным размерности системы, так как при дальнейшем увеличении порядка $\bar{R}$ не меняется.

В соответствии с матрицами (12.19) и (12.22) имеем

$$\bar{W} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (12.23)$$

Ненулевые блоки в матрице (12.23) и определяют замкнутые циркуляционные комплексы. В данном случае это два комплекса: первый — из блоков 5, 6, 7, второй — из блоков 9, 10. Таким образом, технологическая схема на рис. 12.1 разбивается на следующие пять декомпозиционных блоков, соединенных последовательно: на самостоятельные блоки 1 и 8, параллельную группу из блоков 2, 3 и 4 и на указанные выше два циркуляционных комплекса.

Декомпозиция на основе критерия управления. Достоинство критерия (12.16) (и алгоритмов на его основе) — в следующем. Величина N равна порядку системы нелинейных дифференциальных уравнений. В общем случае: чем меньше N , тем легче решить указанную систему. Большинство методов решения таких задач требует вычислительных затрат, пропорциональных N^α , где $\alpha > 1$. Поэтому декомпозиция по минимуму (12.16) в определенном смысле оптимальна в вычислительном плане.

Основных недостатков у данного критерия два.

1. Критерий может дать такую совокупность разрываемых потоков, что итерационный процесс решения системы (12.15) будет сходиться плохо или расходиться. В то же время часто эвристическими методами можно подобрать другую совокупность разрываемых потоков, дающую лучшую сходимость. Поэтому на практике требуется несколько пробных расчетов с разными вариантами разбиения.

2. Часто знание технологических особенностей процесса дает достаточно хорошее приближение для параметров некоторых потоков. В то же время критерий (12.16) может потребовать разрыва совсем других потоков, для которых неизвестны начальные приближения. В результате итерационная процедура решения может затягиваться.

Оба эти недостатка во многих случаях можно устранить следующим приемом. Вначале разрываем те потоки, для которых известны достаточно хорошие начальные приближения. Пользуясь этими приближениями, однократно рассчитываем всю систему, получая при этом приемлемое приближение для потоков, которые следует разрывать с точки зрения минимума N . После этого разрываем потоки в оптимальных в смысле N точках и выполняем полный расчет системы.

В виде примера рассмотрим схему на рис. 12.2, а. Предположим, что все потоки одномерны. Тогда в смысле критерия (12.16) оптимальный разрыв следует делать после блока 2 — поток A . В этом случае $N=1$. Однако начальные приближения известны для выходов блоков 5 и 6 — потоки B и C соответственно. После разрыва потоков B и C получим схему, представленную на рис. 12.2, б. Для расчета приближения для потока A достаточно рассчитать только блоки 1 и 2. Блоки 3—6 в этом

Рис. 12.2. Расчет технологической схемы с рециклами с помощью разных структур:

a — исходная; b — для предварительного расчета потока A (разрыв по B и C); c — основная расчетная (разрыв по A)

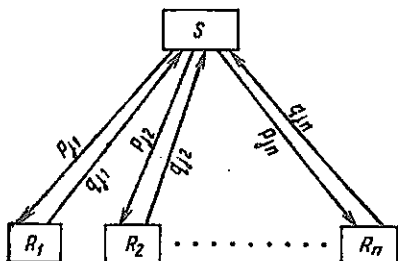
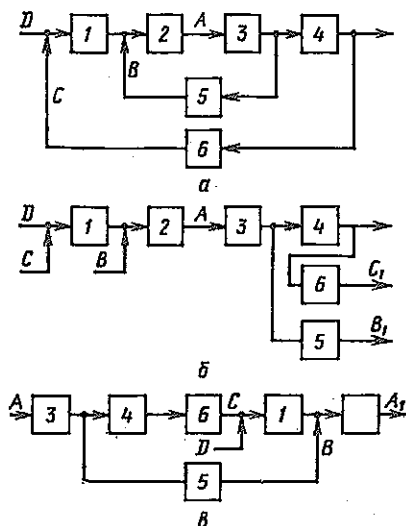


Рис. 12.3. Блок-схема алгоритмов иерархической декомпозиции

расчете не участвуют. Имея приближение для потока A , разрываем схему по этому потоку (см. рис. 12.2, b). Это и есть основная расчетная схема.

§ 12.3. ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО И ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Изложенные в предыдущем параграфе алгоритмы позволяют свести технологическую схему практически любой сложности к трем видам структур — параллельному соединению блоков, последовательному соединению блоков и к циркуляционным комплексам, причем последние при расчете сводятся к двум предыдущим видам структур. Таким образом, задачи управления технологическими комплексами в результате предварительной декомпозиции можно свести к задачам двух видов — управлению параллельно работающими блоками и управлению последовательно включенными блоками.

Алгоритм оптимизации управления последовательно включенными объектами. В общем случае управление последовательностью блоков сложнее, но этот вариант встречается чаще. Сложности, возникающие при этом, частично уже приводились [см. § 12.1 и выражения (12.6) — (12.14)]. Как отмечалось, динамическое программирование здесь далеко не всегда рационально в вычислительном плане. Как альтернативу ему рассмотрим один из методов иерархической декомпозиции.

Такого рода декомпозиционные алгоритмы состоят из центрального (общего) алгоритма — назовем его условно S — и местных (локальных) алгоритмов R_i ($i=1, 2, \dots, n$), где n — число блоков. Блок-схема алгоритма иерархической декомпозиции приведена на рис. 12.3. Решение общего алгоритма осуществляется следующим образом: центральный алгоритм S посылает каждому локальному алгоритму некоторую совокупность параметров $P_{j1}, P_{j2}, \dots, P_{jn}$. Локальные алгоритмы R_i проводят оптимизацию отдельных блоков, а результаты в виде некоторой совокупности данных $q_{j1}, q_{j2}, \dots, q_{jn}$ ($i=1, 2, \dots, n$) возвращают центральному алгоритму S . Центральный алгоритм на основе этих данных измеряет совокупности $P_{j1}, P_{j2}, \dots, P_{jn}$ ($i=1, 2, \dots, n$) с точки зрения требований комплекса в целом и опять посылает совокупности P_{ji} локальным алгоритмам. Этот процесс продолжается итерационно, до выполнения некоторого условия сходимости.

В основе данного подхода лежат следующие соображения. Из-за взаимного влияния последовательно соединенных блоков оптимизировать каждый блок независимо нельзя, поэтому необходимо каким-либо образом исключить это взаимное влияние. Например, в одном из широко применяемых алгоритмов на базе иерархической декомпозиции искусственно вводят цены на все промежуточные переменные. В введенных выше обозначениях — это P_{ji} . Таким образом, имеется возможность составить локальный критерий оптимизации для каждого блока и при фиксированных P_{ji} проводить оптимизацию блоков независимо. В этом смысле работу центрального алгоритма S можно интерпретировать как выработку промежуточных цен P_{ji} и анализ входных и выходных переменных каждого блока q_{ji} , полученных по результатам независимой локальной оптимизации. Управляя промежуточными ценами P_{ji} , центральный алгоритм S согласует входные и выходные переменные блоки.

Рассмотрим кратко еще один алгоритм на этой же основе. Здесь центральный алгоритм S посылает в локальные алгоритмы значения входных и выходных переменных. Локальный алгоритм R_i проводит оптимизацию i -го блока при фиксированных значениях входных и выходных переменных и возвращает в центральный алгоритм значения локального критерия, полученного в результате оптимизации i -го блока. Центральный алгоритм, управляя всеми входными и выходными переменными блоков, находит оптимальный режим для комплекса в целом.

Пример. Пусть требуется оптимизировать работу трех последовательно включенных агрегатов (рис. 12.4, а). Каждый блок описывается уравнением

$$x_i = f_i(x_{i-1}, u_i, Q_{i-1}). \quad (12.24)$$

где x_i — концентрация продукта на выходе из i -го блока; Q_{i-1} — расход продукта на входе в i -й блок; u_i — управляющее воздействие.

Целевая функция для комплекса в целом имеет вид

$$E = \sum_{i=1}^3 e_i(x_{i-1}, u_i, Q_{i-1}), \quad (12.25)$$

Кроме того, в статике

$$Q_i = Q_{i-1} = Q. \quad (12.26)$$

Иначе говоря, производительность отдельных блоков (агрегатов) согласована, например, с помощью отдельной системы автоматического управления и соответствует заданной производительности комплекса Q . Основное возмущающее воздействие такого комплекса — концентрация исходного продукта x_0 .

В соответствии с изложенным выше алгоритм верхнего уровня должен выработать ряд приближений для концентраций $x_0, x_1, \dots, x_6$. Поскольку Q_{i-1} фиксировано, каждый локальный алгоритм оптимизации минимизирует слагаемые в целевой функции (12.25) с помощью какого-либо метода одномерной оптимизации, т. е. отыскивается оптимальное значение u_i при данном x_{i-1} .

В этом смысле локальные алгоритмы достаточно просты. Для центрального алгоритма нужна процедура выбора x_i . Если математическая модель процесса (12.24) и критерий (12.25) известны в явном виде, то удобно заранее рассчитать зависимости x_i от x_{i-1} при оптимальном u_i и фиксированных Q и x_0 . Такие зависимости имеют вид

$$x_i = \varphi_i(x_{i-1}) = f_i(x_{i-1}, u_{i*}, Q). \quad (12.27)$$

Для первого блока такая зависимость находится минимизацией первого слагаемого в выражении (12.25), для второго — минимизацией суммы первых двух слагаемых в выражении (12.25) и т. д. Отметим, что в зависимости (12.27) фиксировано (т. е. задано числом) только Q , а u_{i*} — функция от x_{i-1} и x_0 .

Таким образом, расчет зависимости (12.27) — достаточно сложная задача в вычислительном плане. Однако семейства зависимостей вида (12.27) могут быть рассчитаны заранее и заданы, например, в графической форме. На рис. 12.4, б приведен возможный вид таких зависимостей. Там же показана процедура графического выбора x_1, x_2, x_3 в центральном алгоритме.

Описанная процедура в целом в определенном смысле эквивалентна мето-

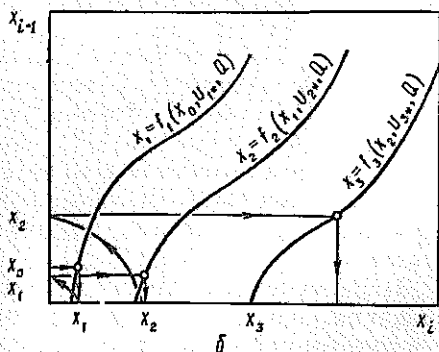
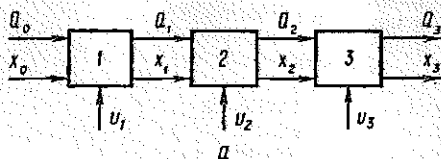


Рис. 12.4. Пример расчета последовательно включенных блоков: а — технологическая структура; б — графический расчет режима

ду динамического программирования. Однако разделение вычислений на два уровня позволяет часть данных рассчитать заранее, что упрощает оперативное управление.

Алгоритм оптимизации управления параллельно включенными блоками. Наиболее сложная проблема — взаимное влияние блоков здесь в явном виде не проявляется. Каждый блок работает более или менее независимо и его оптимизацию, если она не связана с производительностью, можно выполнять без учета режима остальных (параллельных) блоков.

В данном случае задачи оптимального управления имеют несколько иной характер — обычно требуется наилучшим образом распределить нагрузку между блоками, т. е. выбрать оптимальную производительность каждого блока с учетом ограничения — заданной общей производительности. Рассмотрим решение этой задачи в относительно простом случае — линейной целевой функции. Пусть эта целевая функция для каждого блока имеет вид

$$e_i = a_i + b_i X_i, \quad (12.28)$$

где X_i — производительность (нагрузка) i -го блока; a_i , b_i — коэффициенты,

Тогда общая целевая функция

$$E = \sum_{i=1}^N e_i, \quad (12.29)$$

где N — число блоков.

Кроме того, заданы ограничения

$$X_2 = \sum_{i=1}^N X_i \quad (12.30)$$

и

$$0 < X_i < X_{i \max} \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (12.31)$$

Найдем из ограничения (12.30), например, X_N и подставим в функцию (12.29). Тогда с учетом функции (12.28) получим

$$E = \sum_{i=1}^N a_i + \sum_{i=1}^{N-1} (b_i - b_N) X_i + b_N X_2. \quad (12.32)$$

Очевидно, первое и третье слагаемые в выражении (12.32) постоянны. В общем случае величина $b_i - b_N$ может быть как положительной, так и отрицательной для разных i . Если $b_i - b_N > 0$, то для минимизации E соответствующее $X_i = 0$.

Поскольку блоки можно упорядочивать произвольно, всегда можно выбрать такой порядок, чтобы b_N было минимальным. Это означает, что без учета ограничений (12.31) работать дол-

жен один блок — с номером N , т. е. с минимальным b . Поскольку в большинстве случаев $X_z > X_{N\max}$, то этот блок всю нагрузку принять не может. Тогда нужно его загрузить по максимуму, т. е. $X_N = X_{N\max}$, вычислить новое $X_{z1} = X_z - X_{N\max}$ и повторить описанную процедуру.

Таким образом, оптимальное распределение нагрузки заключается в передаче ее блокам с минимальными значениями b_i . Технологический смысл этой рекомендации в следующем. Представим b_i в виде

$$b_i = b_0 / X_{ni},$$

где b_0 — некоторая технологическая константа, характеризующая процесс в целом независимо от размеров агрегата; X_{ni} — номинальная производительность агрегата.

Тогда, очевидно, оптимальной будет наиболее полная загрузка самых больших (мощных) и выключение из работы самых малых агрегатов. В идеальном случае лучше иметь один большой агрегат. Это свидетельствует о достаточно универсальном общетехническом принципе выгодности агрегатов большой единичной мощности.

В случае нелинейных характеристик решение задачи несколько усложняется. Проиллюстрируем его на примере распределения нагрузки между двумя агрегатами. Пусть целевая функция для каждого агрегата аппроксимируется выражением вида

$$e_i = a_i + b_i X_i + c_i X_i^2. \quad (12.33)$$

(Обозначения те же, что и раньше.) Тогда с учетом того, что

$$X_2 = X_z - X_1, \quad (12.34)$$

имеем

$$E = a_1 + a_2 + (b_1 - b_2) X_1 + c_1 X_1^2 + c_2 (X_2 - X_1)^2 + b_1 X_2. \quad (12.35)$$

Из условия $\partial E / \partial X_1 = 0$ найдем

$$b_1 - b_2 + 2c_1 X_1 - 2c_2 (X_2 - X_1) = 0$$

или

$$X_{1*} = \frac{2c_2 X_2 - b_1 + b_2}{2(c_1 + c_2)} \quad (12.36)$$

и из уравнения (12.34)

$$X_{2*} = \frac{2c_1 X_2 + b_1 - b_2}{2(c_1 + c_2)}. \quad (12.37)$$

Однако, как известно, минимум E действительно будет иметь место, если $\frac{\partial^2 E}{\partial X_1^2} > 0$, т. е.

$$2c_1 + 2c_2 > 0. \quad (12.38)$$

Поскольку характеристики агрегатов подобны, для наличия экстремума необходимо, чтобы $C_1 > 0$ и $C_2 > 0$, т. е. характеристики должны быть вогнутыми. Отметим, что если отыскивается максимум E , то $\frac{\partial^2 E}{\partial X_1^2} < 0$, и необходимо, чтобы $C_1 < 0$, $C_2 < 0$. Характеристики агрегатов при этом, естественно, будут выпуклыми.

Рассмотрим выражения (12.36) и (12.37) для одинаковых агрегатов, т. е. при $C_1 = C_2$ и $b_1 = b_2$. Тогда

$$X_{1*} = \frac{1}{2} X_2 = X_{2*}. \quad (12.39)$$

Иначе говоря, при вогнутых характеристиках одинаковых агрегатов их загрузка должна быть равномерной. Найдем условия загрузки для разных агрегатов. Определим оптимальные значения производных

$$\left. \frac{\partial e_i}{\partial X_i} \right|_{X_i = X_{i*}} = b + 2C_i X_{i*}. \quad (12.40)$$

Учитывая выражения (12.36) и (12.37), получим

$$\left. \frac{\partial e_1}{\partial X_1} \right|_{X_1 = X_{1*}} = \left. \frac{\partial e_2}{\partial X_2} \right|_{X_2 = X_{2*}} = \frac{b_1 C_2 + b_2 C_1 + 2C_1 C_2 X_2}{C_1 + C_2}. \quad (12.41)$$

Можно показать, что это условие выполняется и для произвольного числа агрегатов. Таким образом, если требуется минимизировать вогнутую целевую функцию для каждого из N параллельно включенных агрегатов, условие оптимальности должно быть следующим:

$$\frac{\partial e_1}{\partial X_1} = \frac{\partial e_2}{\partial X_2} = \dots = \frac{\partial e_N}{\partial X_N}. \quad (12.42)$$

Условие (12.42) не зависит от вида

$$e_i = f_i(X_i). \quad (12.43)$$

Необходимо лишь, чтобы

$$\frac{\partial^2 e_i}{\partial X_i^2} > 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (12.44)$$

Если условие (12.42) не выполняется, то решение будет на граничных значениях области определения X_i , т. е. аналогично линейному случаю.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при постановке задач оптимального управления необходимо учитывать ограничения?

2. В чем сущность предварительного анализа объекта оптимального управления?
3. Что такое декомпозиция?
4. Какие бывают виды декомпозиции?
5. Почему некорректно вести оптимизацию каждого блока в отдельности без учета общей ситуации?
6. Какие существуют методы выделения блоков в сложных технологических объектах?
7. Что такое циркуляционный комплекс?
8. Что описывает матрица смежности?
9. Какая существует методика решения задачи оптимального управления последовательно работающими аппаратами?
10. Какие бывают варианты ситуации при распределении нагрузок между параллельно работающими аппаратами?

Глава 13

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АСУ ТП

§ 13.1. СОСТАВ И СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ЕГО ОБЪЕМ И КАЧЕСТВО

В настоящее время большинство специалистов относят программные системы, работающие в режиме реального времени, а также системы цифрового управления к одному из наиболее сложных видов программного обеспечения, требующему высокой надежности программных средств, больших затрат на разработку и высокой квалификации программистов.

Достаточно сказать, что, например, «Ценник на разработку проектов АСУ ТП» определяет стоимость программного обеспечения в 25—35 % стоимости АСУ ТП в целом. Если учесть, что ведущие программисты-разработчики должны принимать самое активное участие в разработке математического и информационного обеспечения, а также постоянно консультировать разработчиков общесистемного и технического обеспечения, то получится, что реальные затраты на создание АСУ ТП более чем на 50 % определяются затратами на разработку программного обеспечения. Рассмотрим структуру программного обеспечения АСУ ТП (рис. 13.1).

Обычно программное обеспечение (ПО) делят на две крупные части — общее (ОПО) и специальное (СПО) АСУ ТП. Впрочем, эта классификация применяется и в других видах ПО, например для АСУП. Общая идея такого деления состоит в следующем: ОПО — это часть, типовая для многих АСУ ТП, отличающаяся от системы к системе лишь в некоторых незначительных деталях; СПО — часть ПО, разрабатываемая индивидуально для данного АСУ ТП, хотя, возможно, и на базе типовых решений (например, пакетов прикладных программ).

Исходя из этого деления сложился состав ОПО. Это преж-

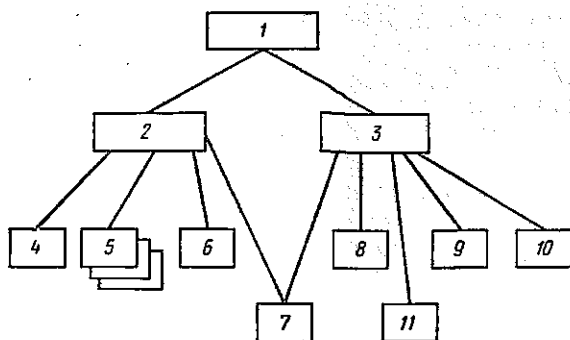


Рис. 13.1. Укрупненная структура программного обеспечения АСУ ТП:

1 — ПО АСУ ТП; 2 — ОПО; 3 — СПО; 4 — ОС РВ; 5 — набор трансляторов; 6 — система подготовки программ; 7 — СУБД. Подсистемы: 8 — сбора и первичной обработки информации; 9 — ручного ввода и представления информации; 10 — вычислительных функций (расчет ТЭП, модели и т. п.); 11 — управляющих функций

де всего операционная система (блок 4 на рис. 13.1). Поскольку АСУ ТП функционирует в реальном времени, то практически всегда речь идет о мультипрограммных системах реального времени.

Операционная система. Эту систему еще называют супервизорной, мониторной, исполнительной. Она представляет собой организованную совокупность программ (систем), которая действует как интерфейс между аппаратурой ЭВМ и пользователями, и обеспечивает пользователей набором средств для общения (в широком смысле) с ЭВМ и в то же время управляет распределением ресурсов для обеспечения эффективной работы. Существует несколько категорий ОС, каждая из которых может быть охарактеризована определенным типом взаимодействия между пользователем и его заданием и ограничениями на время ответа системы.

Наиболее известны ОС пакетной обработки, когда задания пользователей поставляются ЭВМ на обработку последовательно в виде пакетов на входных устройствах, а также ОС разделения времени, когда обеспечивается как бы одновременное обслуживание многих пользователей в режиме «on-line»*. Представляет интерес ОС реального времени, т. е. системы, которые обслуживают внешние процессы в режиме «on-line» с ЭВМ, имеющие жесткие ограничения на время реакции ЭВМ. Действиями системы управляют сигналы от внешних

* Дословно — «в линию» с ЭВМ. Обычно под этим понимается активное взаимодействие пользователя со своим заданием ЭВМ, например, путем диалога.

процессов. Как правило, они обрабатываются путем прерывания текущей программы и фиксации по крайней мере факта наличия данного события, а в большинстве случаев — также в некоторых более или менее сложных ответных действиях ЭВМ. Если указанные прерывания не будут достаточно быстро обработаны (в течение микросекунд, миллисекунд или секунд в зависимости от характера процесса), то ход внешнего процесса может нарушиться. Самым общим методом функционирования ОС является мультипрограммирование.

Мультипрограммная система. Данная система обеспечивает одновременное нахождение в памяти нескольких программ пользователя, разделяя процессорное время, пространство памяти и другие ресурсы между активными пользовательскими заданиями. Это разделение ресурсов распространяется на операционную систему. Программы, составляющие ОС, сами подвержены мультипрограммированию.

В ряде случаев, особенно для мини-ЭВМ с небольшим объемом оперативной памяти, ОС может обеспечить одновременную обработку нескольких заданий посредством так называемого свопинга*. В таких ОС в любое время обеспечивается одновременное нахождение нескольких заданий во вспомогательной памяти, на диске и только одного задания — в основной памяти. Система переключается на другое задание посредством перемещения текущего задания из основной памяти в область «свопинга» вспомогательной памяти и загрузки выбранного задания из вспомогательной памяти в основную. Если предыдущее задание не выполнено до конца, оно будет позднее вновь возвращено в основную память.

Мультипрограммирование иногда путают с мультиобработкой. Вычислительная система с мультиобработкой — это комплекс аппаратуры ЭВМ с несколькими независимыми обрабатывающими устройствами. Она включает центральные процессоры, процессоры ввода-вывода, каналы данных и процессоры специального назначения. Как правило, этот термин применяется к многопроцессорным и многомашинным комплексам.

В последние годы единицу обработки ОС называют процессом или задачей, а под заданием понимают совокупность нескольких логически связанных процессов. Общепринятого определения для этого понятия нет.

Для систем реального времени важно следующее свойство процесса — выполнение некоторых действий строго последовательно. Асинхронное выполнение действий достигается работой нескольких процессов.

В подавляющем большинстве типов ОС реального времени

* Дословный перевод слова swapping — обмен, перезагрузка.

возможность мультипрограммирования является органической составной частью ее. Естественно, в таких системах более или менее эффективно реализуются свойства систем с разделением времени. Наиболее совершенные ОС реального времени представляют пользователю отдельные специальные средства для работы в режиме «on-line» с разделением времени. Кроме того, многие ОС реального времени допускают отдельный «фоновый» режим для пакетной обработки, когда ЭВМ не занята задачами реального времени. Типовые средства реального времени и возможностью мультипрограммной работы в режиме с разделением времени позволяют легко организовать каждому пользователю свой «пакетный режим». Поэтому для наиболее совершенных ОС отдельные средства для пакетной обработки не нужны.

Наряду с ОС в состав ОПО всегда входят набор трансляторов с языков программирования и система подготовки программ (блоки 5 и 6 на рис. 13.1). Многие авторы относят набор трансляторов к системе подготовки программ. В функциональном смысле это, в общем, обоснованно. Но почти любая система трансляции с конкретного языка — практически автономная часть ОПО. Включение того или иного транслятора в состав ОПО определяется использованием данного языка программирования при разработке СПО. В этом смысле система трансляции — настраиваемая под конкретные потребности часть ОПО и поэтому рассматривается отдельно (см. § 13.2). Здесь же перечислим языки программирования (и, естественно, трансляторы с них), которые применяются в АСУ ТП.

ОПО любой АСУ ТП содержит так называемый макроасемблер, т. е. транслятор с языка, ориентированного на команды данной ЭВМ. Наряду с ним используются один или несколько языков так называемого высокого уровня. В большинстве реализованных АСУ ТП пищевой промышленности — это язык Фортран (как правило, его версия Фортран IV), в разработках восьмидесятых годов — также PL/M и Паскаль. Некоторое применение нашел язык SPL. Очень редко применяются такие языки, как Алгол-60, Кобол, PL-11. Из перспективных языков следует назвать прежде всего такие, как СИ, Модула-2, Ада. Отметим, что Модула-2 и особенно АДА ориентированы как раз на системы реального времени, на встроенные микропроцессорные системы и мультипрограммирование. Более того, эти языки в какой-то мере содержат в себе встроенные средства ОС реального времени и при хорошей реализации транслятора могут готовить программы для автономной работы без ОС (см. приложение 4).

Транслятор — это программа, работающая под управлением ОС и предназначенная для преобразования исходного

текста программы, написанной на данном языке, в вид, «понятный» ЭВМ.

Двоичное представление оттранслированной программы называют объектным кодом. Программа в таком виде еще не готова к непосредственному выполнению на ЭВМ по следующим причинам. Во-первых, исполняемая программа состоит из нескольких отдельно оттранслированных модулей, которые надо собрать вместе. Во-вторых, любой транслятор начинает генерацию объектного кода с нулевого адреса, поэтому необходимо настроить нашу программу на конкретные адреса памяти, которую ответит программе ОС.

Эти и ряд других функций выполняет другая программа — компоновщик. В разных операционных системах ее называют также загрузчиком, строителем задач, редактором связей и т. п. Эта программа чаще всего — компонент операционной системы. Иногда ее относят к системе подготовки программ.

Возвращаясь к системе трансляции, отметим важное обстоятельство — трансляторы с языков высокого уровня не все действия реализуют в виде машинных команд. Некоторые сложные операции (например, ввод-вывод) включаются в объектный код в виде обращений к специальным подпрограммам. Набор таких подпрограмм, часто довольно значительный по объему занимаемой памяти и выполняемым функциям, называют исполняющей системой данного языка, например Фортрана. Поскольку в состав исполняющей системы всегда входят подпрограммы связи с ОС (для многих языков — подпрограммы распределения памяти и т. п.), для простых программ небольшого размера языка высокого уровня объем исполняющей системы может в несколько раз превосходить объем сгенерированного объектного кода.

Таким образом, кроме собственно транслятора в состав системы трансляции должна входить библиотека исполняющей системы данного языка. Совокупность программы-транслятора с соответствующей библиотекой и составляют систему трансляции. Иногда в эту систему включают несколько библиотек, ориентированных на разные условия применения; может в нее входить, например, отладчик для данного языка в виде отдельной программы или библиотеки, а также некоторые вспомогательные программы. Но транслятор с библиотекой — это основа системы трансляции, которая присутствует всегда.

Наряду с трансляторами используется еще одна технология работы с языками высокого уровня — интерпретаторы. Интерпретатор считывает исходный текст программы с внешнего устройства (чаще всего с дисплея) и тут же выполняет (интерпретирует) указанные действия. Таким образом, интер-

прематор совмещает в себе свойства как транслятора, так и исполняющей системы. Безусловное достоинство интерпретаторов — простота и наглядность общения с ними. Пользователь, вводя очередную команду исходного языка, тут же видит ее результаты. Стадии трансляции и компоновки в данном случае не нужны.

Типичный и распространенный язык интерпретации — Бейсик. Меньше распространены Фокал, APL. К сожалению, совмещение функций трансляции и исполнения существенно увеличивает объем интерпретатора. С точки зрения ОС такой интерпретатор — отдельный процесс. Если в системе реального времени нужна параллельная работа нескольких процессов, то в памяти ЭВМ должно присутствовать соответствующее число копий интерпретатора, исполняющих разные процессы.

К тому же, и это главное, катастрофически (иногда в 100 раз) возрастает время выполнения программы, поскольку каждый раз необходимо распознать и проанализировать часть текста на исходном языке и только после этого передать его исполняющей части интерпретатора.

Из-за этого языки типа Бейсик или Фокал в системах реального времени не применяются. Однако есть и исключения. Например, на ЭВМ класса СМ-4 есть система программирования на Бейсик-2 плюс. В ней предусмотрены как режим интерпретации, так и режим предварительной трансляции. В этом случае эффективность оттранслированной и скомпонованной программы достаточно высокая.

Интерпретаторы специальной разработки нашли в АСУ ТП некоторое применение в качестве средства для реализации некоторых прикладных функций. (Подробно этот вопрос рассмотрен в главе 14.)

Состав системы подготовки программ. Сюда прежде всего относятся программы для подготовки и редактирования текстов программ — так называемые редакторы. В связи с наличием в составе ЭВМ дисплеев получили распространение экранные редакторы. В этих программах на экран выводится фрагмент редактируемого текста и, передвигая курсор, пользователь может изменять, вставлять, удалять отдельные символы текста. Экранные редакторы имеют специальный режим (в разных вариантах его называют командным, подэкраным и т. п.), позволяющий пользователю производить различные манипуляции с текстом, например переносить часть текста из одного места в другое, находить в большом тексте заданный фрагмент, выполнять разного рода замены и т. п.

Выше уже упоминались библиотеки исполняющих систем языков. Большинство ОС допускает также создание пользователем своих библиотек с наиболее употребительными модуля-

ми (подпрограммами). Речь идет о библиотеках объектных модулей, т. е. оттранслированных и готовых к компоновке подпрограммах. Для обслуживания таких библиотек в систему подготовки программ включают программу-библиотекарь. Такая программа позволяет создавать библиотеку, включать в нее очередной модуль, удалять или заменять модули.

К системе подготовки программ часто относят также подсистему обслуживания файлов. Обычно это одна или несколько программ, реализующих различные операции над файлами — создание, удаление, копирование, распечатка и т. п.

В составе ОПО имеется большая группа сервисных программ (на рис. 13.1 эта часть ОПО не показана). Условно можно считать, что она отнесена к блоку 6 — системе подготовки программ, поскольку именно на этапе подготовки и отладки программного обеспечения сервисные программы используются наиболее интенсивно.

Конкретное назначение сервисных программ определить достаточно трудно из-за их разнообразия. Отметим лишь группы программ, выполняющих главные функции. Это — прежде всего обслуживание магнитных носителей информации — дисков, лент, дискет и т. д. При этом выполняются следующие функции: подготовка носителя (диска, ленты) к использованию (его разметка, инициализация и т. п.); создание и сверка копий магнитных носителей; проверка правильности структуры носителя (диска или дискеты) и исправление мест сбоя.

Другая группа сервисных программ — это разного рода обработчики файлов, дополняющие стандартную файловую систему. Сюда входят программы распечатки файлов в различных форматах, программы сравнения текстовых файлов и т. п., а также программы-документаторы, выполняющие форматирование текстов, подготовленных в произвольной форме редактором текста. Таким образом, состав сервисных программ ОПО достаточно разнообразен.

На рис. 13.1 к составу ОПО отнесен также блок 7 — система управления базой данных (СУБД). Этот же блок имеет и вторую связь — со СПО. Это свидетельствует о том, что система управления базой данных в зависимости от конкретного вида и возможностей базы данных может быть либо достаточно универсальной и в силу этого входить в состав ОПО, являясь единым средством многих АСУ ТП и АСУП, либо более или менее специализированной, ориентированной на структуры данных конкретного АСУ ТП (или группы однотипных АСУ ТП). В этом случае СУБД, естественно, логичнее отнести к СПО.

Состав СПО гораздо менее стабилен по сравнению с ОПО. Тем не менее во многих АСУ ТП можно выделить четыре под-

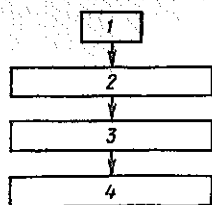


Рис. 13.2. Иерархия ПО АСУ ТП:

1 — персонал АСУ ТП; 2 — ОПО; 3 — СПО; 4 — объект

системы СПО (блоки 8—11 на рис. 13.1): сбора и первичной обработки информации (иногда в простых АСУ ТП совмещенные с ведением базы данных); ручного ввода и представления информации; вычислительных функций, специфичных для данной АСУ ТП (расчет ТЭП, прогноз состояния процесса по моделям и т. п.) и управляющих функций. В последнюю иногда включают и оптимизационные задачи. Степень типизации решений в каждой подсистеме различна. Первые две (сбора и первичной обработки, ввода-вывода) обычно решаются на базе типовых пакетов, и в ряде случаев их можно даже отнести к ОПО, например «Дисковый пакет программных модулей сбора и обработки информации» (ДППМ СОИ) в составе операционной системы ДОС АСПО. Но функциональная часть (число и типы обрабатываемых датчиков, выводные формы) всегда индивидуальна для конкретной АСУ ТП.

Что касается двух других подсистем, то здесь типовые решения встречаются реже. Функциональный состав каждой из подсистем СПО описан в главе 7, некоторые особенности их программной реализации — в главе 14.

Из изложенного следует, что в иерархии ПО АСУ ТП рассмотренные программные средства (ОПО и СПО) составляют два слоя — верхний ОПО и нижний, более близкий к объекту СПО (рис. 13.2). В этой иерархии ОПО, точнее, его основная часть — ОС управляет СПО, а также остальными системами СПО.

Очень часто набор трансляторов, компоновщик и многие другие части ОПО относят к ОС. Это связано с тем, что все компоненты ПО (как ОПО, так и СПО) в той или иной мере ориентированы на работу под управлением конкретной ОС. Однако для частей ОПО это характерно в большей степени. К тому же с ЭВМ поставляются собственно ОС, набор трансляторов к ней (иногда неполный), а также комплект программ для сервисных функций и подготовки программного обеспечения. Часто в документации это называют операционной системой.

Комплект поставки ОС (по существу, большую часть ОПО) не следует путать с собственно ОС в смысле, изложенном выше, т. е. с комплексом управляющих программ.

К функциям ОС прежде всего относятся: организация так называемого интерфейса с пользователем; разделение аппаратных ресурсов между пользователями; организация возможности работы с общими данными в режиме коллективного пользования; планирование доступа пользователей к общим ресурсам; обеспечение эффективного выполнения операций ввода-вывода; восстановление информации и вычислительного процесса в случае ошибки аппаратуры или оператора.

Операционная система управляет следующими основными ресурсами: процессором (или процессорами), памятью, устройствами ввода-вывода, данными. Операционная система взаимодействует с операторами ЭВМ, прикладными программистами, системными программистами, административным персоналом, программами ОПО и СПО, аппаратными средствами, пользователями (например, технологами, операторами установок).

Пользователи — это абоненты вычислительного комплекса, которые применяют ЭВМ для выполнения полезной работы. Операторы ЭВМ — это специально подготовленные люди, которые следят за работой ОС, вмешиваются в работу ЭВМ для устранения каких-либо препятствий и выполняют те функции, связанные с ЭВМ, которые пока не удается автоматизировать. В современных ОС реального времени роль оператора невелика, поэтому хорошо спроектированное ПО АСУ ТП позволяет существенно упростить операторские функции так, чтобы большую часть их мог выполнять пользователь.

Программы обращаются к ОС при помощи специальных команд, известных под названиями вызов супервизора, вызов монитора, запрос исполнительной программы, директива управляющей системы и т. п. Эти команды дают пользователям возможность прибегать к услугам, предоставляемым ОС, не нарушая ее целостности и работоспособности.

Приведенное определение пользователя предполагает в неявном виде, что речь идет о человеке. Но для общения с ЭВМ человек использует некоторое внешнее устройство по отношению к процессору ЭВМ, например дисплей. Ввод-вывод с дисплея обслуживает часть ОС, ответственная за ввод-вывод. Данные, полученные с дисплея, интерпретируются специальной программой. Эта программа — часть ОС — известна под названиями «монитор связи с оператором», «монитор управления системой», «интерпретатор командного языка» и т. п. Общение с ОС возможно через специально написанные программы. Таким образом, ОС общается с человеком через специальные программы, и в этом смысле именно они с точки зрения ОС и ПО в целом являются пользователями.

Сама ОС имеет статус самого полномочного пользователя с доступом ко всем видам аппаратных ресурсов, всем программам ОПО и СПО, всем данным и т. д. В некоторых случаях определенные части ОС получают более узкие полномочия, поскольку людям и программам, работающим с этими частями, не требуется свободного доступа к ресурсам для выполнения любых операций и поэтому для лучшей надежности системы целесообразно им его не предоставлять.

Исходя из определения процесса (см. § 13.1), можно считать в первом приближении синонимами понятия «пользователь в смысле ОС» и «процесс». В период своего существования процесс проходит через ряд дискретных состояний, диаграмма которых представлена на рис. 13.3.

Процесс выполняется (состояние выполнения), если в данный момент ему выделен центральный процессор. Процесс готов к выполнению (состояние готовности), если он мог бы сразу использовать центральный процессор, предоставленный в его распоряжение. Процесс заблокирован (состояние блокировки), если он ожидает некоторое событие (например, завершение ввода-вывода), чтобы получить возможность продолжить выполнение. Во многих ОС предусмотрено еще одно состояние процессов — приостановка. Приостановленный процесс не продолжит свое выполнение до тех пор, пока его не активизирует какой-либо другой процесс.

В ОС с разделением времени, а также в некоторых ОС реального времени предусмотрено выделение процессу определенного кванта времени для выполнения. Операционная система

устанавливает в специальном блоке время этого кванта и по прерываниям от аппаратного таймера контролирует, не освободил ли процесс центральный процессор ЭВМ. По истечении этого времени процесс, если он не завершился, переводится в состояние готовности, а первый процесс из списка готовых — в состояние выполнения. Во мно-

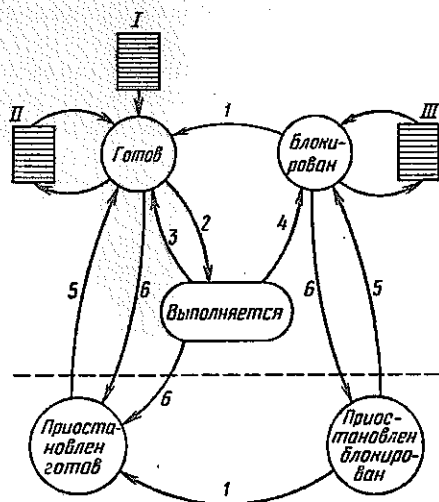


Рис. 13.3. Диаграмма состояний процесса:

I — список по времени; II — список готовых процессов (по приоритетам); III — список заблокированных процессов

гих ОС реального времени больше никаких состояний процесса не предусмотрено.

Выполнение по времени процессов достигается тем, что в число событий, которые может ожидать заблокированный процесс, входит завершение заданного интервала времени. Если, например, процесс должен работать каждые 30 с, то каждый раз по завершении основных действий он блокирует себя на 30 с, после чего повторяет все действия сначала. В некоторых ОС реального времени предусмотрена еще одна возможность — блокировка до заданного времени, например до 12 ч 25 мин 40 с. В таких ОС имеется отдельный модуль — так называемые системные часы — и в заданный момент времени этот модуль вырабатывает сигнал ОС на пересмотр состояний заблокированных процессов.

Блокировка до заданного абсолютного времени предполагает какое-либо средство для хранения этого времени для каждого из заблокированных процессов, т. е. некоторый список. Естественным развитием такого списка является характерный для многих ОС реального времени список выполнения процессов по времени. Периодически просматривая этот список, ОС переводит процесс в состояние готовности, если наступило время его запуска.

В большинстве ОС общего назначения и во всех ОС реального времени каждому процессу присваивается приоритет — число, характеризующее важность процесса с позиций ОС. Список готовых процессов всегда упорядочивается по приоритетам. При равных приоритетах процессов порядок в списке соответствует порядку поступления туда процессов, т. е. первым поступил — первым обслужен. Список блокированных процессов, как правило, не упорядочен.

На рис. 13.3 показаны два вида состояний приостановленного процесса: приостановлен — готов и приостановлен — блокирован. Выше штриховой линии показаны активные состояния,

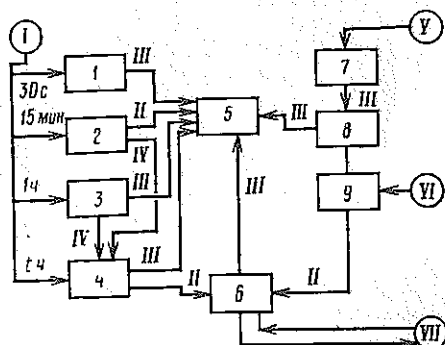


Рис. 13.4. Блок-схема управления процессами в мультипрограммной СПО простейшей АСУ ТП:

I — запуск по времени; *II* — постановка в очередь запроса на запуск процесса без ожидания, завершения или ответа; *III* — то же, но с ожиданием завершения или ответа; *IV* — посылка сообщения процессу; *V* — прерывание от технологического процесса; *VI* — прерывание и ввод на дисплей; *VII* — устройства представления информации (печатать, дисплей)

а ниже — состояния приостановки. Состояния приостановки могут иметь свои списки. Однако часто удобнее просто отмечать факт приостановки процесса в основных списках готовых и блокированных процессов (II и III на рис. 13.3).

Теперь, когда механизм работы ОС ясен, рассмотрим мультипрограммный режим работы на примере функционирования СПО достаточно простого АСУ ТП. Блок-схема взаимодействия процессов (задач) такого СПО приведена на рис. 13.4, где предусмотрены две задачи опроса и первичной обработки: 1 — с частотой опроса 30 с (например, расходов, давлений) и 2 — с частотой 15 мин (например, температур). Имеются также оптимизационная задача 3 и расчет ТЭП 4. Эти задачи должны работать в конце каждого часа, причем оптимизационная задача после задачи 2, а расчет ТЭП после обеих этих задач. Предполагается, что в расчете ТЭП использованы результаты работы указанных задач. Все задачи взаимодействуют с базой данных через СУБД — задача 5 (управление базой данных). По результатам работы задач 1—4, а также 8 (расчеты по прерываниям) ежечасно выдаются формы задач 6 (вывод форм). К тому же в системе использована информация о состоянии оборудования в виде инициативных сигналов. Эти сигналы фиксируются задачей 7 по прерываниям от УСО, а детально (с расчетами) обрабатываются задачей 8.

В системе предусмотрена также выдача форм по запросам с дисплеев. Ввод с дисплеев осуществляет задача 9 (ввод диалектив оператора), которая запускает задачу 6.

В реализации СПО предусмотрено несколько видов системных запросов (т. е. обращений к ОС) для запуска задач и межзадачного взаимодействия. Это запуск по времени 1. В соответствии с ним задачи 1—4 постоянно находятся в списке по времени (см. рис. 13.3) и переводятся в список готовых через заданный диапазон времени: задача 1 — через 30 с, задача 2 — через 15 мин, причем с каждым четвертым запуском в конце часа; задача 3 — каждый час с запуском в середине часа (так как она работает достаточно долго и должна завершиться к концу часа); задача 4 — через час с запуском в конце часа.

По окончании вычислений задача 4 запускает универсальную задачу выдачи форм 6. Для этого используется обращение к ОС типа II (см. рис. 13.4) для постановки в очередь запроса к задаче. Необходимость организации очереди связана с тем, что задача 6 — разделяемый ресурс ОС, так как ее может запускать еще и задача 9 по запросу с дисплея. Если задача 4 просто обратится к ОС для создания процесса задачи 6 и такой процесс уже имеется (т. е. задача 6 выполняется по запросу от задачи 9), то реакция ОС, вообще говоря, непред-

сказуема. В конкретных реализациях ОС реального времени она может быть различной.

Различные ОС предоставляют пользователю разные средства для организации обращения типа *II*. Для обращения этого типа важно отметить следующее:

1) процесс задачи 6 существует, пока не исчерпана очередь к нему;

2) если этого процесса нет, то обращение типа *II* его создает;

3) процесс, выдавший такое обращение к ОС, не ожидает никакого ответа от запущенного процесса, а продолжает свою работу или завершается.

Другим близким по свойствам разделяемым ресурсом является задача 5 — СУБД. Она является интерфейсом между пользовательскими задачами и базой данных. Здесь тоже необходимо обращение к ОС для постановки в очередь запроса к задаче. Однако процесс, выдавший такое обращение к ОС (на рис. 13.4 оно обозначено как обращение типа *III*), блокируется и ожидает либо сообщения об успешной записи порции данных в базу (если запрос был на запись), либо получения данных (если запрос был на получение данных, т. е. чтение). Таким образом, различия обращений типов *III* и *II* состоят в следующем:

1) процесс, выдавший обращение типа *III*, блокируется до ответа запущенного процесса;

2) ОС должна обеспечить обмен процессов достаточно большими порциями данных.

В нашей системе предусмотрен еще один вид межзадачного взаимодействия — обращение к ОС типа *IV*. Задача 4 должна работать только после того, как задачи 2 и 3 поместили свою информацию в базу данных. Поэтому процесс задачи 4 переходит в список готовых по времени и блокируется или приостанавливается в зависимости от особенностей конкретной ОС. Теперь этот процесс ожидает сообщений от задач 2 и 3. Эти задачи, получив ответ от СУБД (задачи 5) об успешном завершении, выдают обращение к ОС типа *IV*, например, на возобновление процесса задачи 4 (если использовался механизм приостанова) либо инициируют событие, разблокирующее этот процесс (если использовался механизм блокировки). Указанный процесс переходит снова в состояние готовности и выполняется в соответствии со своим приоритетом.

Несколько иначе построена подсистема обработки прерываний по состоянию технологического оборудования. Здесь реализована работа с прерываниями на уровне СПО. Процесс задачи 7 блокирован и ожидает прерывания сообщения *V*, которое ему передает ОС. Этот процесс должен быть высокоприоритет-

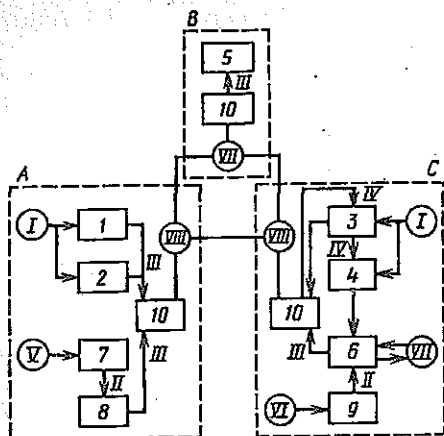


Рис. 13.5. Вариант СПО, реализованного на трехмашинном комплексе:

А — ЭВМ (активное УСО); В — ЭВМ (процессор распределенной базы данных); С — центральная ЭВМ; VIII — межмашинный обмен (остальные обозначения аналогичны приведенным на рис. 13.4)

может работать достаточно долго. Если поступает серия прерываний, то к процессу организуется очередь благодаря использованию обращения типа II.

Аналогично работает задача 9 по вводу информации с дисплея VI (или от нескольких дисплеев). Отличие состоит в том, что роль задачи 7 здесь в основном выполняет драйвер дисплея*. Таким образом, в рассмотренном СПО осуществляется мультипрограммный режим работы, т. е. несколько прикладных задач (в данном случае до девяти) могут функционировать как бы параллельно, хотя в каждый данный момент процессор занимает какая-либо одна задача.

Рассмотрим вариант СПО этой же АСУ ТП, работающей в режиме мультиобработки. Эта система реализована на трех ЭВМ — центральной и двух подчиненных (рис. 13.5). Одна из подчиненных ЭВМ — А на рис. 13.5 — выполняет функции активного УСО. На ней работают задачи опроса (1 и 2 на рис. 13.4) и обработки прерываний от объекта (7, 8 на рис. 13.4).

Вторая вспомогательная ЭВМ — В на рис. 13.5 — это процессор базы данных. На ней находятся основные массивы базы данных и СУБД (задача 5). В СПО присутствует еще одна задача (10 на рис. 13.5). Эта задача есть на каждой ЭВМ. Она реализует две функции: 1) обслуживает локальную часть базы данных, т. е. «разбирается», присутствует ли необходимая информация в памяти этой ЭВМ или ее следует запросить с другой ЭВМ; 2) осуществляет межмашинную связь. За центральной ЭВМ — С на рис. 13.5 — оставлены только функции слож-

* Определение драйвера и некоторые подробности о нем см. в § 8.3.

ных расчетов (задачи 3 и 4) и предоставления информации (задачи 6 и 9).

В настоящее время в АСУ ТП используется сравнительно небольшое число ОС реального времени — обычно одна-две на каждом типе ЭВМ. Например, для первого поколения АСУ ТП пищевых производств, реализованных в основном на базе ЭВМ типа М-6000, использовалась практически всегда операционная система реального времени ДОС-РВ-2. Несколько позднее второе поколение АСУ ТП было реализовано на более разнообразной технике — СМ-1, СМ-2, СМ-4, СМ-1800. Это предопределило некоторое разнообразие применяемых ОС. На ЭВМ типа СМ-1 и отчасти на СМ-2, система команд которых не очень отличалась от М-6000, применялся адаптированный вариант ДОС-РВ-2. Кроме того, на СМ-2 использовалась рекомендуемая разработчиками этой ЭВМ операционная система ДОС АСПО. На ЭВМ типа СМ-4 применялась одна из самых совершенных операционных систем реального времени (ОС РВ) в начале версии* 2.1, позднее 3.0. На микроЭВМ типа СМ-1800 использовалась МОС РВ.

В последние годы номенклатура ОС реального времени меняется не очень сильно (по сравнению с другими компонентами ПО). На усовершенствованных моделях ЭВМ класса СМ-4, таких как СМ-1420, сохраняется ОС-РВ. На новых ЭВМ типа СМ-1810 используется усовершенствованный вариант МОС-РВ — так называемая ОС-СФП (ОС специализированных функций процессора), а также БОС (так называемая большая ОС).

Учитывая зарубежный опыт, можно ожидать некоторого распространения универсальной операционной системы UNIX в варианте со средствами поддержки реального времени.

§ 13.3. НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И СПОСОБЫ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

При анализе надежности программного обеспечения следует выяснить, что такое ошибка в программном обеспечении и что такое надежность программного обеспечения.

Например, является ли ошибкой в программном обеспечении ситуация, возникающая в схеме автоматизации взвешивания продукта (рис. 13.6). Для некоторого технологического процесса исходный продукт накапливается в двух промежуточных сборниках I и II и через клапаны 3 и 4 подается на переработку. Для управления процессом в ЭВМ нужна информация о

* Вариант программы, обладающий некоторой совокупностью функциональных возможностей и отличающийся от предыдущих вариантов этой программы.

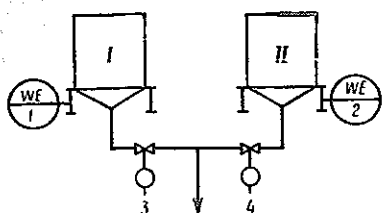


Рис. 13.6. Схема автоматизации взвешивания продукта в сборниках:
I, II — сборники продукта; 1, 2 — тензометрические датчики; 3, 4 — клапаны

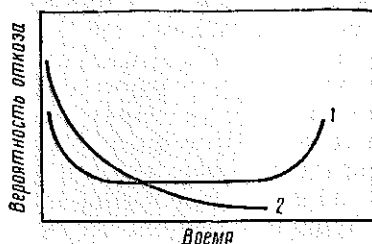


Рис. 13.7. Кривые надежности:
1 — для технических средств; 2 — для ПО

суммарном запасе продукта в сборниках. Эта информация вводится в ЭВМ от двух тензометрических датчиков 1 и 2. В процессе работы периодически (например, один раз в месяц) одна из емкостей опорожняется для очистки и дезинфекции, а производство продолжается только со второй. В постановке задачи, а следовательно, в алгоритме и ПО предполагается, что во время очистки продукта в емкости нет (т. е. показания датчика нулевые). Поэтому запас продукта — это всегда просто сумма сигналов от датчиков 1 и 2.

В процессе работы вдруг выясняется, что все предположения были справедливы, но для очистки емкости в нее спускается рабочий и некоторое время там находится. Естественно, его вес включается в общий запас продукта. С точки зрения персонала АСУ ТП и технолога это, безусловно, ошибка. Но разработчик ПО может настаивать на том, что ему было задано считать продуктом все, что находится в обеих емкостях. И главное, как определить, что в емкостях находится*. Дело в том, что разные люди неодинаково понимают, что такое ошибка в ПО.

Известным специалистом в области ПО Г. Майерсом предложено следующее определение. В программном обеспечении имеется ошибка, если оно не выполняет того, что пользователю разумно от него ожидать. Отказ программного обеспечения — это проявление ошибки в нем. В соответствии с этим надежность ПО есть вероятность его работы без отказов в течение определенного периода времени, рассчитанная с учетом стоимости для пользователя каждого отказа.

Характер надежности ПО полезно сравнить с надежностью технических средств (см. также § 16.1). В большинстве случаев возможны три причины отказа некоторого устройства: ошиб-

* Одно из возможных решений — вводить в ЭВМ сигнал о положении крышки люка на емкости или клапанов 3 и 4.

ка в конструкции, т. е. ошибка разработчика, производственный дефект и случайный сбой. Примером ошибки в конструкции для автоматической системы может служить неправильный выбор каналов регулирования. Если регулируемая переменная слабо зависит от параметра, выбранного в качестве управляющего воздействия, то контур регулирования не будет справляться с возмущениями и неработоспособность его выявится уже на начальной стадии наладки.

Производственный дефект для автоматической системы — это, например, ошибки монтажа, некачественная стендовая проверка приборов. Выявление таких дефектов — основная цель наладки системы.

Сбой — это дефекты, ранее не присутствовавшие в изделии или системе и не возникшие под влиянием физического износа, перегрева, неправильной эксплуатации. Примером сбоя может быть нарушение герметичности пневматической линии, заедание клапана и т. п.

На рис. 13.7 показан примерный вид вероятности отказов для технических средств и ПО. Техническая система вначале малонадежна, поскольку идет выявление конструктивных и производственных дефектов, а также доводка малонадежных в смысле сбоев узлов. После этого техническая система достаточно долго функционирует на уровне надежности, определяемой только случайными сбоями. В конце жизненного цикла системы элементы ее стареют, изнашиваются и вероятность отказа возрастает. Характер надежности ПО совершенно иной. Программы не изнашиваются, поломка программы невозможна.

Многие авторы считают, что для ПО общего назначения неактуален также учет производственных дефектов. В этом смысле СПО АСУ ТП является исключением. (Этот вопрос будет рассмотрен несколько позднее.) Отметим, что главный источник отказов ПО — ошибки конструкции, т. е. ошибки, внесенные при проектировании алгоритмического и программного обеспечений. Эти ошибки в процессе комплексной отладки системы и опытной эксплуатации исправляются сразу после обнаружения и больше не появляются. Поэтому вероятность отказа ПО (кривая 2 на рис. 13.7) монотонно убывает в процессе эксплуатации системы.

Вернемся к вопросу производственных дефектов СПО АСУ ТП. Поскольку СПО работает в тесном взаимодействии с аппаратурой — датчиками сигналов, исполнительными механизмами, преобразователями и т. п., в нем важную роль играет настройка на конкретную конфигурацию комплекса технических средств, т. е. какой датчик к какому входу подключен, какие у него шкала, режим преобразования сигнала и т. п.

В СПО, выполненном на уровне современных требований,

эта часть работы выделена в отдельный этап, выполняемый в диалоговом режиме в процессе подготовки СПО к работе на объекте. По характеру и приемам настройки СПО очень близка к работе наладчика сложной системы, что требует от выполняющего ее программиста дополнительной квалификации в этой сфере. Однако в целом этот этап работы влияет на надежность ПО также монотонно: выявленные несоответствия устранены и больше не появляются. Поэтому характер кривой 2 (см. рис. 13.7) справедлив для СПО АСУ ТП.

Из изложенного различия в природе надежности ПО и технических средств можно сделать важный практический вывод. Работа отлаженного ПО в отличие от техники детерминированна. Если ПО надежно работало какой-то период, то его надежность не может уменьшиться. Появление случайных сбоев — результат неисправности аппаратуры.

Учитывая высокую сложность ПО вообще, а систем реального времени в частности, трудовые затраты, как показывает отечественный и зарубежный опыт, на тестирование, комплексную отладку и сопровождение ПО составляют 70—80% общих трудовых затрат на его разработку.

Под сопровождением ПО понимают устранение замеченных ошибок и внесение небольших изменений в ходе эксплуатации системы. Формально сопровождением ПО АСУ ТП разработчик должен заниматься только до конца периода опытной эксплуатации, а затем — это функция персонала АСУ ТП. На практике так бывает не всегда. Во многих случаях, создав ненадежное ПО, коллектив разработчиков должен продолжать сопровождение.

Известные методы обеспечения надежности можно разделить на четыре группы: предотвращение ошибок, обнаружение ошибок, исправление ошибок, обеспечение устойчивости к ошибкам.

Методы предотвращения ошибок. Это — наиболее эффективные методы. Существуют два аспекта появления ошибок. Ошибки могут возникать, во-первых, из-за неправильного представления постановщика задачи или разработчика алгоритма о процессе и о том, что в действительности хочет получить персонал предприятия от АСУ ТП; во-вторых, из-за запутанности блок-схемы алгоритма или программы на этапе их проектирования.

Первый аспект предполагает необходимость тщательного изучения объекта и разработки детальных схем взаимодействия технологического персонала с АСУ ТП. Хотя связанные с ним ошибки, строго говоря, не относятся к ошибкам программистов, исправление их в итоге приводит к модификации СПО, иногда довольно значительной. Второй аспект связан с ясно-

стью изложения описаний, простотой блок-схем алгоритмов, удобочитаемостью программ.

Большинство методов предотвращения ошибок базируется на стремлении справиться со сложностью задачи, свести ее к минимуму. По своей идее — это методы декомпозиции.

Методы обнаружения ошибок. В программное обеспечение следует включать средства обнаружения и диагностики ошибок. К тому же на обнаружение ошибок направлено тестирование программ, которое должно выполняться на всех этапах разработки ПО.

Методы исправления ошибок. Этап исправления ошибок ПО в большинстве случаев не представляет особой сложности. Здесь важно, однако, не внести новых ошибок.

Представляют также интерес методы исправления ошибок самой программой — типа восстановления испорченной информации таблиц или структур данных на диске. Парадокс заключается в том, что если программист предполагает наличие какой-либо ошибки, то, очевидно, целесообразнее ее устранить, чем разрабатывать средства борьбы с ее последствиями. Если же, как чаще всего бывает, характер ошибки неизвестен, то борьба с ней затруднительна.

Обеспечение устойчивости к ошибкам. Для СПО АСУ ТП, как правило, предусматривается определенная устойчивость к сбоям технических средств (дисков, датчиков и т. д.). В состав технических средств следует включать также средства, делающие СПО в целом устойчивым к некоторым программным ошибкам. Необходимо, например, предусмотреть средства проверки корректности данных при межзадачным обмене, тщательно проектировать синхронизацию задач и т. п.

Анализ приведенных методов показывает, что большую роль в разработке надежного ПО играют, во-первых, технология проектирования и кодирования ПО, а во-вторых (по порядку, но не по важности), технология тестирования ПО на разных этапах его разработки.

При рассмотрении языков программирования мы уже останавливались на вопросах их связи с качеством ПО. В общем случае чем «выше» уровень языка, тем меньше ошибок. Языки высокого уровня устраняют несколько уровней ошибок: некоторые виды описок, несоответствие типов данных, иногда несоответствие интерфейсов. Текст программы получается короче и «обозримее». В силу этого он легче поддается анализу на предмет выявления ошибок.

Достоинством языков высокого уровня (например, языка Паскаль) является их способность надежно работать со сложными структурами данных. Таким образом, выбор удачного основного языка для программирования СПО — важный момент

технологии разработки. Еще более важно применение (см. § 13.3) технологии структурного проектирования и программирования.

На рис. 13.8 приведена блок-схема некоторого алгоритма или реализующей его программы. Несмотря на то что алгоритм не слишком сложен, рис. 13.8, *а* может создать впечатление чего-то довольно запутанного, со сложной логикой. Если по такому алгоритму разработать программу, реализовав эту блок-схему и воспроизведя все «зигзаги» логики, то в итоге получим нечитаемую программу, на отладку которой потребуется совершенно необозримое время, и никогда нельзя быть уверенным, что она действительно работает правильно.

На рис. 13.8, *б* изображена та же блок-схема, но ставшая гораздо более ясной исключительно за счет более продуманного расположения блоков. Это еще не структурное проектирование, но первый шаг к нему. К сожалению, с ростом сложности алгоритмов подобный метод быстро себя изживает, так как требуются либо огромные листы бумаги для изображения блок-схемы и «обозримость» все равно теряется, либо многочислен-

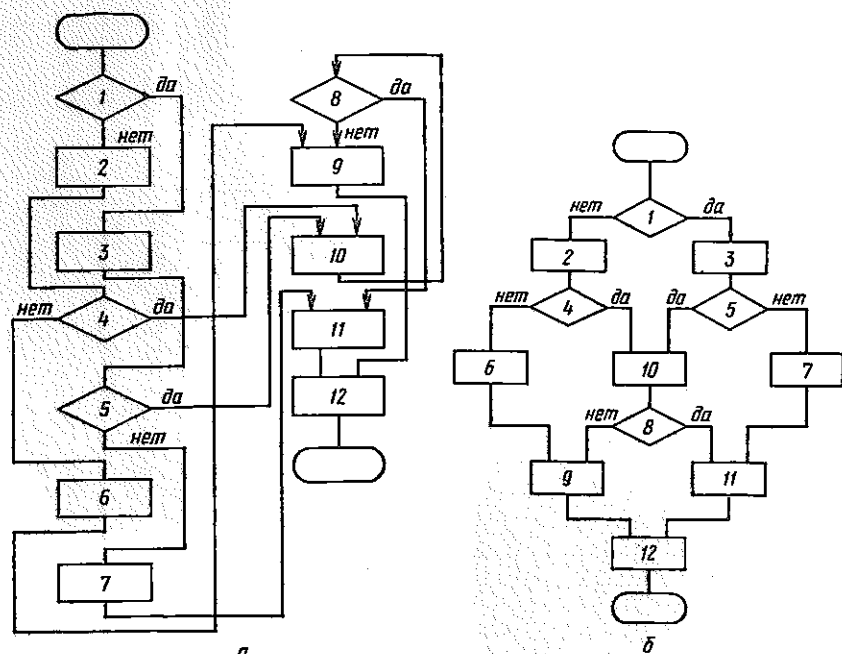
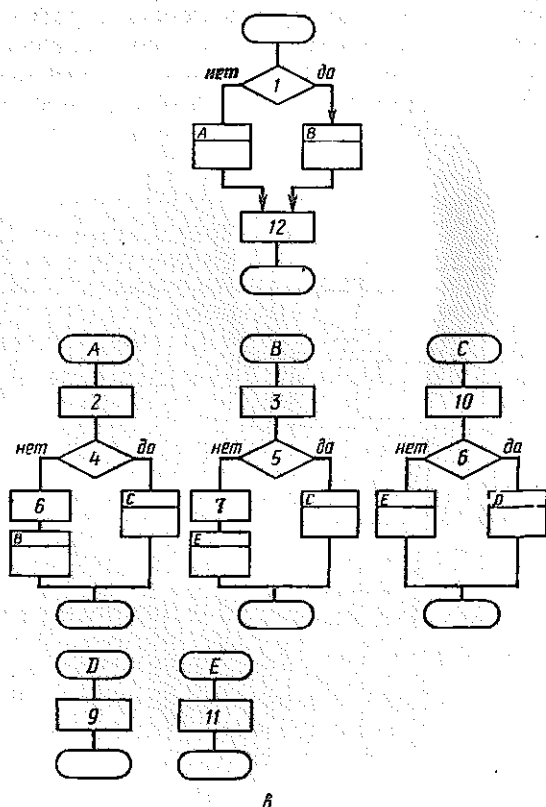


Рис. 13.8. Варианты представления блок-схемы про
а — беспорядочное; б — упорядоченное графически;

ные переходы с листа на лист, окончательно заслоняющие суть алгоритма.

На рис. 13.8, в представлен рассматриваемый алгоритм в виде блок-схемы, построенной на основе структурных методов. Теперь блок-схема состоит из головного алгоритма и пяти вложенных блоков, которые будут реализованы простыми подпрограммами. Головная программа также предельно проста — блок логики 1, вызов двух подпрограмм А и В, заключительный блок 12. Очевидно, на первом этапе проектирования этим главным алгоритмом можно ограничиться. Необходимо лишь детально проработать, что (но не как) должны делать блоки А и В.

Следующий этап нисходящего проектирования — разработка алгоритмов подпрограмм А и В. Относительно сложная логика



в

граммы реализации алгоритма:

в — преобразованное структурным методом

нашей блок-схемы требует, чтобы блоки 9, 10, 11 выполнялись при разных условиях, причем блок 10 всегда предшествует блоку логики 8. С учетом этого выделим блоки 9 и 11 в две отдельные простейшие подпрограммы *D* и *E* и с учетом этого спроектируем *A* и *B*. Теперь осталось спроектировать последнюю подпрограмму *C*.

Как видно из рис. 13.8, *в*, все шесть фрагментов полученной блок-схемы весьма просты и легкообозримы.

При тестировании ПО отладка подпрограмм *D* и *E* не представляет проблемы — это прямой счет, вероятно, не очень сложный, без всякой логики. Тестирование *A*, *B* и *C* также относительно несложно и, главное, дает возможность ограничиться небольшим числом проверок, так как логика их относительно проста.

Если при тестировании задачи в целом все же возникнут ошибки, их легко локализовать, так как хорошие трансляторы обычно позволяют диагностировать, в каком из программных модулей работающей программы произошел сбой. Относительная простота и обозримость всех частей такой программы делает ее легкомодифицируемой и в целом обеспечивает высокую надежность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое ОПО?
2. Что такое СПО?
3. Дайте определение операционной системы. Каковы ее функции?
4. Как классифицируются операционные системы?
5. Что такое мультипрограммный режим?
6. Какие компоненты входят в состав ОПО?
7. Что такое процесс (задача) с точки зрения операционной системы?
8. Как описываются блок-схема управления процессами в мультипрограммной СПО и взаимодействие задач в системе реального времени?
9. Что такое мультиобработка?
10. Какие языки программирования наиболее употребительны?
11. В чем заключается сущность метода структурного программирования?
12. Что такое надежность программного обеспечения?

Глава 14

УНИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУ ТП

§ 14.1. ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ. СОЗДАНИЕ ОТРАСЛЕВОЙ БИБЛИОТЕКИ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ

Развитие технологии программирования шло по нескольким направлениям. Рассмотрим некоторые из них.

Создание технологии структурного программирования. В

принципе, это путь существенного повышения производительности труда программистов и надежности программного обеспечения (см. также главу 13). Речь идет о хорошо продуманной методике повышения квалификации программистов. В этом смысле данное направление весьма перспективно.

Технология структурного программирования появилась вследствие необходимости более полно использовать возможности языков высокого уровня для получения надежного программного обеспечения. В свою очередь, идеи структурного программирования существенно повлияли на новые языки программирования, например Паскаль, Модула-2, Ада и др.

Создание библиотек стандартных вычислительных функций. Это направление также связано с использованием языков высокого уровня. Например, в Фортране такие действия, как извлечение корня, вычисление синуса, косинуса, логарифма и т. д., выполняются специальными библиотечными подпрограммами, имеющимися в библиотеке исполняющей системы Фортрана.

В первоначальном варианте типичными примерами таких библиотечных функций были, например, подпрограммы решения системы алгебраических уравнений, подпрограммы интегрирования дифференциальных уравнений, подпрограммы различных методов оптимизации и т. п.

Применительно к СПО АСУ ТП примерами стандартных библиотечных функций могут служить подпрограммы сглаживания, фильтрации, интегрирования и т. п. в подсистеме сбора и первичной обработки сигналов от датчиков. Другим типичным примером их является набор интерфейсных подпрограмм для связи с операционной системой.

Данное направление облегчает программирование в том смысле, что освобождает от разработки и отладки подпрограмм, реализующих некоторые, часто встречающиеся действия. Однако задачу в целом, даже если она функционально не очень сложная, построить только этими средствами нельзя, так как необходимо запрограммировать и отладить один или несколько головных модулей, организующих вызов стандартных подпрограмм, распределение данных между ними и т. п. Иначе говоря, необходимо разработать «каркас» задачи, что чаще всего достаточно сложно.

Разработка стандартных диспетчеров. Стандартные диспетчеры содержат мониторы, которые по специальным таблицам настройки вызывают в нужном порядке подпрограммы, написанные пользователем. Здесь программисту предоставляется как бы готовый «каркас» отдельной задачи или даже подсистемы АСУ ТП, который можно наполнить содержанием, написав по определенным правилам подпрограммы, реализующие нужные элементарные действия.

Примером такого подхода могут служить некоторые пакеты сбора и первичной обработки сигналов от датчиков. В них реализован диспетчер, который организует в нужные моменты времени вызовы указанных подпрограмм либо стандартных, либо написанных специально для данного АСУ ТП. Такие подпрограммы трактуются как специальные обработки и могут выполнять достаточно сложные функции.

Разработка специальных проблемно-ориентированных языков. В главе 13 уже упоминались интерпретаторы (в отличие от трансляторов) с языков высокого уровня. Применительно к разработке сложных систем, в том числе АСУП, АСУ ТП, этот подход оформился в отдельное направление. Примером реализации такого подхода может служить комплекс программ для расчета ТЭП. В наиболее универсальной версии на вход интерпретатора подается набор формул, где переменными являются ключи (указатели) базы данных, а знаки операций и константы описываются по обычным правилам для языков высокого уровня.

Другие примеры подобного рода — различные генераторы форм. Здесь входной информацией для интерпретатора являются макет формы и настроечная информация с указанием, что из базы данных следует поместить в то или иное поле формы.

Создание универсальных пакетов программ. Этот подход синтезирует в себе идеи трех последних подходов и реализует какую-либо функцию АСУ ТП, например представление информации с необходимыми предварительными расчетами и т. п. В этом случае пакет должен обладать известной гибкостью, чтобы учесть разнообразные требования разных АСУ ТП. В то же время собственно программирование при настройке должно быть сведено к минимуму. Тем не менее у пользователя должна быть возможность «вставить» свои специально написанные характеристики для данного конкретного АСУ ТП модели. Этот комплексный подход представляется наиболее прогрессивным, но он и наиболее сложный.

Цели всех пяти рассмотренных направлений сводились в основном к следующему — дать разработчику такой инструмент создания программного обеспечения, чтобы большую часть работы могли выполнить специалисты средней и низкой квалификации, т. е. не программисты. На долю же специалистов высокой квалификации должна остаться наиболее сложная в творческом плане, но небольшая по объему работа, заключающаяся, во-первых, в выборе идеологии и структуры системы в целом, а во-вторых, в выборе и сопровождении стандартных программных средств, реализующих эту идеологию.

При разработке универсального СПО возникает ряд трудностей, относящихся в основном к последнему подходу. Первая

и главная трудность — это очень большое разнообразие состава выполняемых функций. Один и тот же цех на разных предприятиях может иметь разное число линий, агрегатов, разное число резервного оборудования (либо не иметь резерва вовсе). Нередки случаи более или менее существенных различий в технологических схемах и т. п.

Однако в высококачественном универсальном СПО это все должно отражаться только на уровне настроечной информации. Причем речь идет не только и не столько о количественных характеристиках в настройке (т. е. о числе датчиков, агрегатов и т. п.), но прежде всего об изменении алгоритмов функционирования технологии и переработки информации в АСУ ТП. Добиться этого, меняя только настройку, достаточно сложно.

Другая трудность, тесно связанная с предыдущей, — необходимость достаточно сложной интерпретации настроечной информации. На уровне изменения алгоритмов работы некоторых частей СПО это требует дополнительных сложных логических операций и может существенно замедлить работу программного обеспечения. Однако СПО АСУ ТП — это всегда часть системы реального времени. Время его работы — критическая величина, во многом определяющая работоспособность АСУ ТП. Поэтому нельзя чрезмерно увеличивать гибкость настройки и усложнять логику ее интерпретации. Вследствие этого универсальность стандартных пакетов всегда ограниченная. Помимо временных характеристик, универсальность СПО часто ограничивается объемом оперативной памяти. Это ограничение может стать особенно существенным, если в целях ускорения интерпретации настроечную информацию размещать в памяти ЭВМ.

Принципиальная трудность связана с тем, что любая АСУ ТП и, следовательно, ее центральная часть — СПО имеют достаточно сложную структуру. Эту структуру можно рассматривать в плане выполняемых функций и их взаимодействия, в плане переработки информации и взаимодействия разных информационных потоков и т. п. Но в любом случае это изучение и адекватное ему описание будут достаточно сложными. В то же время цели создания универсального СПО, изложенные выше, как раз и заключаются в возможно более простом описании системы на некотором языке настройки, доступном мало-квалифицированным пользователям. Таким образом, требуется простыми и понятными средствами описать сложную структуру СПО.

Учитывая перечисленные трудности, нетрудно заметить, что разработка действительно полезного и универсального СПО — сложная и трудоемкая задача. Для ее решения должны привлекаться наиболее квалифицированные программисты и постановщики. Однако получив такой комплекс даже ценой значи-

тельных трудовых затрат, в дальнейшем можно широко тиражировать его для большого числа АСУ ТП. Более того, коллектив из достаточного числа специалистов средней квалификации может с успехом одновременно работать над СПО нескольких АСУ ТП. Производительность труда программистов при этом возрастает в десятки раз. Иногда наиболее существенно то, что трудовые затраты программистов высокой квалификации в данном случае будут незначительными — только на сопровождение стандартных средств и рассмотренного универсального комплекса.

Выясним на примере, ориентированном на совместное применение разных подходов, за счет чего достигается экономия затрат на программирование.

Пример. Пусть требуется разработать оптимизационную задачу (типа задачи, изображенной на рис. 13.4). Такая задача обязательно должна взаимодействовать с другими задачами СПО, с ОС и базой данных. Исходя из этого, блок-схема такой задачи в укрупненном виде представлена на рис. 14.1. Поскольку требуется получить достаточно универсальное изделие, необходимо сделать задачу настраиваемой. Из-за сложности и продолжительности интерпретации настройки целесообразно выполнять ее один раз при первом запуске задачи в системе.

Для этого в задаче предусмотрена инициализационная часть (блоки 1, 2, 3). В процессе функционирования в реальном времени работает основная часть задачи (блоки 4—10). Инициализационная часть задачи выполняет следующее: устанавливает рабочие поля в задаче, настраивается на базу данных (блок 1); получает настроечную информацию из базы данных (блок 2) и интерпретирует ее (блок 3). Интерпретация (настройка) заключается в выполнении следующих действий: определение структуры взаимодействия данной задачи с другими задачами СПО — для блоков 4 и 9; установка ключей данных, необходимых для вычислений и помещения результатов, т. е. настройка блоков 5 и 8; расчет времени перезапуска задачи для блоков 4 и 10. После этого задача готова к нормальной работе.

Каждый раз, получив управление от ОС, основная часть задачи (блоки 4—10) должна выполнить следующие действия: проверить состояния предыдущих задач на предмет их завершения (блок 4), что необходимо для гарантии наличия новой информации в базе данных (если указанные условия не выполнены, организуется их ожидание); получить исходную информацию из базы данных и проверить ее достоверность (блок 5); в зависимости от технологической ситуации (признаки ее получены из базы данных) выбрать необходимый вариант расчета, т. е., по существу, осуществить еще одну настройку (блок 6); выполнить собственно расчетную часть (блок 7) (строго говоря, таких блоков может быть несколько, их выбор осуществляет блок 6. На рис. 14.1 показан только один блок); записать в базу данных результаты (блок 8); передать информацию ОС к другим задачам готовности результирующей информации (блок 9); приостановить задачу до следующего времени выполнения (блок 10).

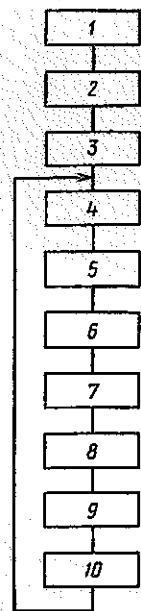


Рис. 14.1. Блок-схема вычислительной задачи

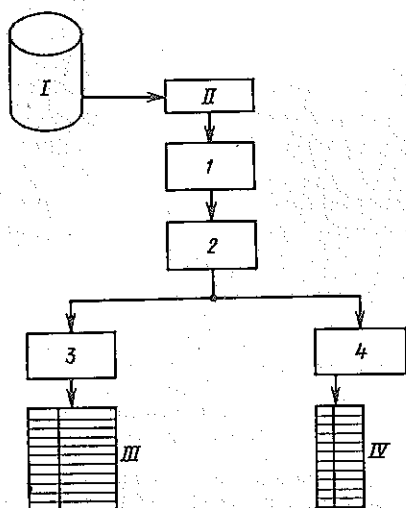


Рис. 14.2. Упрощенная блок-схема интерпретации настроечной информации

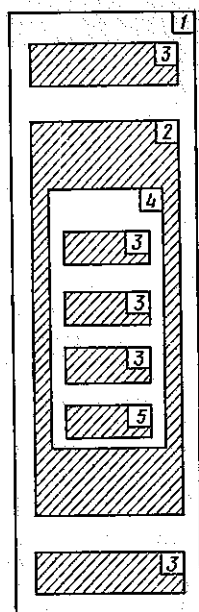


Рис. 14.3. Примерная структура вычислительного модуля оптимизационной задачи

Как видно из рис. 14.1, доля содержательной части в программе невелика (блок 7). Большая часть блоков задачи (1, 2, 4, 5, 8, 9, 10) занимается взаимодействием с ОС и базой данных. Эти блоки достаточно сложны для разработки, требуют детального знания ОС, особенностей межадачного взаимодействия, подробного знания интерфейса с базой данных. Иными словами, разработка этих блоков не под силу недостаточно подготовленному программисту. В то же время работа этих блоков в большинстве случаев не зависит от того, что должна делать содержательная часть задачи — блок 7. Это позволяет разработать типовой «каркас» задачи из семи блоков (1, 2, 4, 5, 8, 9, 10).

Несколько сложнее обстоит дело с блоками интерпретации 3 и 6. В несколько упрощенном виде блок-схема такой интерпретации (на примере блока 3) показана на рис. 14.2.

Настроечная информация 1 из базы данных порциями II поступает в блок предварительной обработки 1. Фактически пересылка информации из базы данных на вход блока 1 несколько сложнее (через блок 2 на рис. 14.1). На рис. 14.2 в целях упрощения это не показано.

Полученная информация анализируется и интерпретируется в основном в блоке 2 (см. рис. 14.2). Затем в зависимости от вида и назначения этой информации блоками 3 или 4 формируются две таблицы настройки — таблица III настройки на базу данных и таблица IV настройки для межадачного взаимодействия и связи с ОС.

В алгоритмическом плане блоки 1—4 на рис. 14.2 могут быть однотипными для всех задач, т. е. они практически не зависят от содержательной

части задачи. В этом смысле блоки 3 и 6 на рис. 14.1 могут быть универсальными. Однако размеры окончателных таблиц III и IV (см. рис. 14.2) зависят от количественных характеристик конкретной задачи. Например, одна задача требует десять исходных параметров из базы данных, а другая — 100. Естественно, таблицы III в этих задачах будут разного размера. Аналогичная ситуация и с таблицей IV. Поэтому при программировании задачи этот факт необходимо учитывать.

Таким образом, в отдельном программировании нуждается только содержательная часть задачи (блок 7 на рис. 14.1). Однако и здесь во многом можно воспользоваться стандартными средствами.

На рис. 14.3 представлена примерная структура такого модуля. Напомним, что речь идет о некоей оптимизационной задаче.

В главах 10 и 11 описаны разные методы решения оптимальных задач. При наличии библиотеки подпрограмм, реализующих указанные методы, нетрудно выбрать подпрограмму (подпрограмма 2 на рис. 14.3). Для работы этой подпрограммы необходимы модель и расчет целевой функции. Обычно это достаточно специфичные вопросы и их пользователю придется писать программы отдельно для каждого конкретного случая. На рис. 14.3 — это подпрограммы 4 и 5. Для оптимизационных расчетов необходимо резервировать память под промежуточные результаты и выполнить ряд подготовительных расчетов. Эту нестандартную часть (головной модуль 1) также нужно подготовить пользователю.

Таким образом, пользователь должен выполнить определенный объем программирования. Эта работа может быть в значительной мере облегчена за счет дальнейшего использования библиотечных подпрограмм.

При выполнении вычислений, расчете моделей часто встречаются такие ситуации, как решение системы алгебраических уравнений, вычисление сложных интегралов и т. п. При наличии хорошей библиотеки соответствующие подпрограммы могут быть взяты из нее (подпрограммы 3 на рис. 14.3).

Соотношение стандартных и нестандартных подпрограмм в вычислительных задачах бывает самым разным. В среднем можно считать, что стандартными подпрограммами реализуется около 50% объема вычислительного модуля, хотя в неблагоприятных случаях эта доля может уменьшиться до 15—20%, а в особо благоприятных — увеличиться до 90%. Речь здесь идет только о собственно вычислительной части, специфичной для конкретного АСУ ТП, т. е. например, о блоке 7 на рис. 14.1.

Как видно из рис. 14.1, такие блоки — даже если их несколько — небольшая часть задачи в целом: от 10 (если блок один) до примерно 35% (если их, например, пять). В любом случае — это меньшая часть объема задачи. Таким образом, весь комплекс унификации программных средств для вычислительных задач дает экономию трудовых затрат примерно на порядок.

Такого рода задачи составляют меньшую часть СПО — около 20%. Остальное занимают стандартные пакеты, такие как сбор и обработка информации от датчиков, ввод-вывод форм, базы данных и т. п. Даже с учетом настройки таких пакетов при использовании индустриальных методов программирования СПО трудовые затраты составят 3—5% объема работ, который пришлось бы выполнить, программируя все СПО от начала до конца.

Из изложенного следует, что унифицированные средства для создания СПО достаточно разнообразны как по своей структуре, так и по объему. Это и стандартные пакеты, например, сбо-

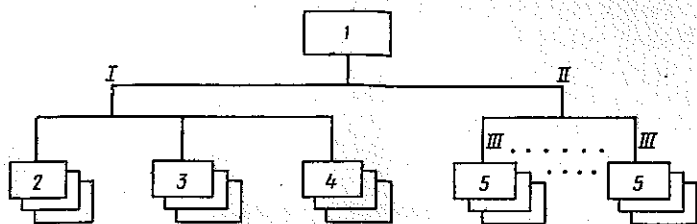


Рис. 14.4. Упрощенная структура библиотеки программных средств для разработки СПО:

1 — библиотека; 2 — универсальные пакеты для выполнения определенных функций; 3 — универсальные «каркасы» для специфических функций, программируемых пользователем; 4 — универсальные модули; 5 — модули, ориентированные на конкретные процессы; I — межотраслевое ядро; II — отраслевая часть библиотеки; III — модули конкретной подотрасли

ра и первичной обработки информации от датчиков. Такие пакеты представляют собой достаточно сложные программные комплексы, требующие от пользователя не обязательного программирования, а только настройки. Некоторые из таких пакетов описаны в § 14.2. Это и более или менее стандартные «каркасы» типа описанного выше (см. рис. 14.1). Наконец, это наборы стандартных вычислительных процедур (оптимизации, решения уравнений и т. д.). Все эти средства целесообразно собрать вместе в виде библиотеки стандартных технических решений, употребляемых при разработке специального программного обеспечения.

Помимо разработки универсальных программных средств, в процессе создания АСУ ТП появляются также программные средства, ориентированные на управление конкретными процессами (брожение, выпаривание, смешивание и т. п.), а также разрабатываются программные средства для решения задач расчета на основе материального баланса режима работы участка или производства в целом.

Средства, разработанные первоначально для конкретного АСУ ТП, при выполнении несложных правил универсальности модулей СПО целесообразно также включать в библиотеку для дальнейшего использования в аналогичных и близких АСУ ТП. Указанные средства менее универсальны, так как они ориентированы на конкретные технологические процессы и производства, но зато дают возможность реализовать специфичные для данного производства функции, например такие, как модули 4 и 5 на рис. 14.3. Структура описанной выше библиотеки приведена на рис. 14.4. Методика ее использования изложена в § 17.1.

§ 14.2. УНИФИЦИРОВАННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ

Стандартные, функционально-законченные пакеты составляют в целом основу любой АСУ ТП. Набор таких пакетов в сумме составляет до 80% СПО АСУ ТП. Наиболее распространены из них следующие.

Пакет сбора и обработки информации. Данный пакет, работающий под управлением операционной системы ДОС АСПО на ЭВМ типа СМ-1, СМ-2, СМ-2М, СМ-1634, эксплуатируется уже более десяти лет. Пакет представляет собой набор программных модулей, при помощи которых могут быть созданы:

информационные системы, осуществляющие сбор информации, ее первичную обработку при необходимости, индикацию результатов измерения на пульте технолога-оператора, непрерывную регистрацию по требованию оператора измеренных значений параметров при помощи самопишущих приборов, а также периодическую печать измеренных и (или) средних значений параметров;

системы централизованного контроля, реализующие наряду с упомянутыми выше функциями функции технологического контроля, включая выдачу сообщений о нарушениях на пульт технолога-оператора, регистрацию и, если требуется, изображение мнемосхемы, чтение и изменение с пульта заданных границ контроля и других часто изменяемых констант обработки параметров;

информационные подсистемы диспетчерских систем управления.

Наряду с функциями информационных систем и систем централизованного контроля для создания диспетчерских систем пакет предоставляет средства для обмена обработанными данными с разработанными независимо от него задачами диспетчерского управления, например задачами оптимального управления, технико-экономического анализа и т. п.

Требования к конкретной системе сбора и обработки информации, ее возможности описываются на входном языке пакета в виде задания на генерацию задач. Пакет позволяет генерировать системы, реализующие следующие функции: ввод информации от датчиков аналоговых, число-импульсных, дискретных и кодовых сигналов по времени с периодами сканирования от 100 мс до 8 ч; ввод информации от датчиков дискретных и число-импульсных сигналов по их инициативе; обработка введенной информации; связь технолога-оператора с системой и вывод оперативных сообщений о ходе процесса.

Программы сгенерированной системы могут выполнять следующую стандартную обработку измеренных значений анало-

говых сигналов: линеаризацию и масштабирование измеренных значений параметров процесса; компенсацию влияния температуры свободных концов термопар; контроль измеренных значений параметров на достоверность; введение поправок по давлению и температуре к расходам газовых потоков; фильтрацию измеренных значений; технологический контроль измеренных значений на соответствие заданным регламентным и (или) аварийным границам и скорости изменения параметров технологического процесса; усреднение измеренных значений параметров.

Функции сгенерированной системы могут быть расширены путем включения дополнительных подпрограмм, написанных пользователем.

Как отмечалось, пакет обрабатывает также сигналы от число-импульсных и дискретных датчиков. Сигналы от этих датчиков могут приниматься либо по их инициативе, либо, так же как аналоговые, сканироваться с периодом от 100 мс до 8 ч. В процессе преобразования данных обеспечивается контроль результатов на достоверность информации по перегрузке. Результаты проведенной проверки выводятся на пульт оператора и на печать.

Пакет позволяет генерировать системы, обеспечивающие выполнение следующих функций связи с технологом-оператором: выдачу сообщений о нарушениях процесса на печать (обязательно, если ведется технологический контроль) или на пульт технолога-оператора (при наличии пульта) и мнемосхему (при ее наличии);

контроль за ходом процесса посредством команд, вводимых с пульта технолога-оператора — дисплея. Действия оператора регистрируются на устройстве печати. Обращение оператора к константам обработки и измененным значениям параметров процесса осуществляется при помощи трех—пяти символьных имен (шифров) параметров;

регистрацию тенденции изменения технологических параметров на самопишущих приборах.

Создаваемые на базе пакета системы сбора и обработки технологической информации являются многозадачными системами, работающими под управлением операционных систем реального времени АСПО. По функциональному назначению каждую задачу системы можно отнести к одной из следующих трех групп:

задачи сбора и обработки, реализующие такие функции, как опрос датчиков, обработка и хранение информации от них;

задачи связи с технологом-оператором, обеспечивающие вывод сообщений об обнаруженных отклонениях в ходе процесса, а также вызов по инициативе оператора на индикацию или

замену измеренных значений параметров и некоторых констант обработки;

служебные задачи, при помощи которых осуществляются начальный запуск системы, доступ к обработанным данным от других задач пользователя, вывод на печать.

Наряду с задачами, создаваемыми при генерации средствами пакета, в систему сбора и обработки могут быть включены любые задачи пользователя, написанные, например, на Фортране или Мнемокоде. Эти задачи могут обмениваться информацией с УСО на уровне программ связи с базой данных, на уровне подпрограмм ввода информации от датчиков и вывода управляющих воздействий, а также на уровне прямого доступа к базе данных.

Набор программ связи с базой данных обеспечивает интерфейс между задачами пользователя и базой данных системы сбора и обработки. Программы связи выполняют следующие основные функции: чтение текущего значения параметра и текущих или средних значений групп параметров по их шифрам; присваивание параметру нового значения.

Посредством программ связи задачи пользователя обмениваются с базой данных обработанными значениями технологических параметров. Эти значения представлены в шкале физических величин с введенными, если это требовалось, поправками. Через программы связи с базой данных могут быть также получены усредненные значения параметров или накопленное число импульсов от датчиков число-импульсных сигналов.

Уровень подпрограмм ввода информации от датчиков и вывода управляющих воздействий реализует прямые связи задач пользователя с устройствами ввода-вывода. Эти связи реализуются набором специальных подпрограмм.

Пакет представления и ввода информации. Этот пакет разработан в 1985 г. и также нашел широкое применение. Несмотря на то, что он предназначен для использования на микроЭВМ типа СМ-1800 с ограниченным объемом памяти, возможности его достаточно широки.

Пакет программных модулей «Ввод-вывод» в СМ-1800 (в дальнейшем ВВ-1800) предназначен для построения на его основе подсистем оперативного обмена информацией между технологом-оператором и ЭВМ с использованием алфавитно-цифровых дисплеев и печатающих устройств.

Подсистема ВВ-1800 обеспечивает следующие функции:

групповой обмен информацией между оператором и ЭВМ посредством форм, представляющих собой графическое отображение документа, содержащего поля данных и выводимого на дисплей или печатающее устройство;

ввод и корректировку информации путем изменения полей данных в отображаемой на экране дисплея форме;

контроль выводимой и вводимой информации, выдачу при необходимости диагностических сообщений;

динамическое обновление выводимой информации;

взаимодействие ВВ-1800 с другими программами и программными комплексами;

инициацию технологом-оператором запросов на работу с формой путем выбора запроса из перечня на экране дисплея или по инициативе внешней программы;

создание подсистемы ввода-вывода с помощью подсистемы проектирования ВВ-1800.

Функционально ВВ-1800 состоит из двух подсистем: подсистемы проектирования (СПВВ-1800); подсистемы управления вводом-выводом (СУВВ-1800). СПВВ-1800 представляет собой набор трансляторов с подязыков входного языка ВВ-1800. СУВВ-1800 состоит из постоянного ядра СУВВ, библиотек модулей, подключаемых к ядру при компоновке конкретной системы ввода-вывода, и настроенной базы данных СУВВ, находящейся в памяти ЭВМ (т. е. ОЗУ-резидентной) и создаваемой с помощью СПВВ-1800.

Подсистема проектирования СПВВ-1800 работает под управлением инструментальной операционной системы ДОС-1800. Исполнительная часть пакета СУВВ-1800 в основном ориентирована на работу под управлением операционной системы реального времени МОС-РВ.

Требования к операторскому интерфейсу:

простота инициации запроса на работу с формой (предпочтительный вариант — выбор из перечня);

групповой доступ к информации;

надежная работа при вводе и корректировке информации, простота и наглядность средств редактирования информации на экране дисплея;

обеспечение связи оператора с процессами, происходящими в ЭВМ (возможность воздействия на эти процессы).

Требования к программной реализации сводятся к следующему:

работа как в ДОС-1800, так и в МОС-РВ;

модульная структура СУВВ-1800, обеспечивающая подключение только модулей, необходимых в конкретной реализации;

работа с разными типами дисплеев и печатающих устройств;

подключение пользовательских подпрограмм;

связь с внешними по отношению к СУВВ-1800 программами и программными комплексами в реальном времени при работе под управлением МОС-РВ;

выдача аварийных сообщений от внешних программ и программных комплексов;

динамическое обновление информации с указанной при проектировании периодичностью;

получение твердой копии дисплейных форм на печатающем устройстве;

компактность кодовой части и настроечной базы данных СУБВ.

Пакеты, подобные описанным, разработаны также для других типов ЭВМ и других ОС. Широкое применение находят также стандартные пакеты баз данных (например, СЕТОР для ЭВМ класса СМ-4), пакеты, реализующие функции управления (см. § 17.1).

§ 14.3. УНИФИЦИРОВАННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Изложенное в предыдущем параграфе иллюстрирует важную особенность многих стандартных пакетов: наличие двух компонентов — системы настройки, а в сложных случаях системы автоматизированного проектирования (САПР); исполнительные системы, функционирующей в реальном времени.

Если в пакете сбора и обработки основной по объему является исполнительная часть и настройка в основном осуществляется системными средствами АСПО (хотя и здесь присутствует достаточно сложный входной язык), то в пакете ВВ-1800 эти две составляющие практически равноценны: наряду с достаточно сложной СУБВ-1800 имеется мощная система проектирования СПВВ-1800, без которой настройка пакета практически невозможна. Еще в большей степени это соотношение «сдвинуто» в сторону САПР для пакетов, реализующих функции управления.

Объясняется это тем, что программная реализация исполнительной части пакетов управления по необходимости должна иметь небольшой объем в целях повышения быстродействия и т. п. В то же время с точки зрения выполняемых функций, особенно в случае сложных нелинейных, многосвязных объектов, это весьма сложные системы, описываемые дифференциальными уравнениями высоких порядков, часто нелинейными. Поэтому настройка таких систем, особенно многоканальных, представляет собой сложную задачу. Например, канал управления, содержащий ПИД-регулятор с упредителем Смита и коррекцией по возмущению, имеет 10—12 настроечных параметров. Система, например, из пяти таких контуров содержит уже 60 настроечных параметров, которые при многосвязности объекта

существенно влияют один на другой. Естественно, такая система становится совершенно необозримой.

Наряду с указанным следует учитывать необходимость наладки системы управления на действующем оборудовании. Любая ошибка в выборе уставок в процессе наладки может привести к нарушению хода процесса, потерям продукта, браку и даже аварийной ситуации. К тому же в системе (как в программном обеспечении, так и в комплексе технических средств) могли остаться неявные, глубоко скрытые ошибки типа мелких неточностей в монтаже, нечеткой работы приборов в определенных режимах, трудно диагностируемых ошибок в программах и т. п. Поэтому далеко не всегда ясно, почему собственно технологический процесс идет неудовлетворительно — неправильно выбраны уставки, есть ошибки или неисправности в системе или это нарушение чисто технологического характера, не связанное с системой.

Указанные сложности наладки требуют от специалистов, выполняющих эту работу, следующего:

знания теории автоматического регулирования, статики, динамики и технологии объекта;

высокой квалификации, так как комплекс программ управления пишется обычно на ассемблере и тесно взаимодействует с ОС и другими программами систем;

детального знания комплекса технических средств от УСО ЭВМ до исполнительных механизмов, включая сюда знание особенностей монтажа, проверки и наладки всего этого достаточно разнотипного парка приборов, а также умение быстро диагностировать и устранять неисправности в них.

Очевидно, недостаточно разработать корректные высокоэффективные алгоритмы управления и без ошибок их реализовать (программно и технически). Если предполагается тиражирование такой системы, то необходим комплекс технических и, главное, программных средств, существенно облегчающих диагностику и наладку такой системы, чтобы ее мог включить в работу специалист средней квалификации.

Необходимость наладки технических средств останется всегда. Однако, как показано в § 13.3, надежность программного обеспечения определяется только качеством его разработки и настройки и не нарушается при тиражировании. Поставленную задачу можно решить, хорошо отработав исполнительную часть ПО задач управления и дополнив ее достаточно мощной САПР, обеспечивающей как надежную настройку системы, так и автоматизированный выбор уставок, а также уточнение структуры системы применительно к особенностям объекта. На САПР возлагается полный или частичный синтез системы управления или исследование ее поведения при разных уставках.

В любом случае сложный объект с системой управления математически описывается моделью на базе дифференциальных уравнений обычно достаточно высокого порядка, часто нелинейных. В настоящее время известны два подхода к созданию таких САПР.

Первый базируется в основном на аналитическом интегрировании системы дифференциальных уравнений. В линейном случае такое решение, хотя и весьма громоздко (при высоком порядке системы), принципиальных трудностей не представляет. При достаточно мощной ЭВМ оценка качества работы даже сложной системы занимает не более 1 мин. Это — безусловное достоинство такого подхода. Однако дело существенно усложняется, если речь идет о нелинейных системах. В большинстве случаев математические трудности исключают точное аналитическое решение, а разного рода упрощения и линеаризации либо существенно ухудшают точность результата, либо вообще невозможны.

В связи с этим широкое применение получил второй подход — на базе имитационного моделирования системы. Отметим сразу его недостаток — относительно большое время решения. Однако в большинстве случаев даже для сложных систем оно не превосходит 10—15 мин, что для САПР вполне приемлемо. Существенное достоинство САПР на базе имитационного моделирования — практически любая сложность исследуемой системы.

Поскольку дифференциальные уравнения интегрируются каким-либо численным методом, например Рунге—Кутта, любые нелинейности, дополнительные связи, ограничения и т. п. можно легко учесть. При имитационном моделировании удобно оценивать вероятностные свойства объекта — статистические особенности возмущений, дрейф параметров, влияние случайных дискретных событий и т. п. В связи с этим имитационное моделирование быстро развивается в отдельную отрасль программного обеспечения.

Разработан ряд универсальных языков моделирования высокого уровня. Их возможности рассмотрим на примере языка Симула-67. Это пример языка широкого назначения. Пример системы более узкого назначения — это «Система исследования, моделирования и оптимизации функций адаптивных систем с идентификатором» — в дальнейшем СИМО АСИ. Она предназначена для автоматизации анализа экспериментальных данных и имитационного моделирования систем управления непрерывными процессами с целью разработки нового или проверки (испытания) и оптимизации существующего алгоритмического и программного обеспечения. Она может использоваться автономно, а также в составе САПР на ЭВМ класса СМ-4. Система ори-

ентирована на пользователя, не связанного с программированием, и работает в диалоговом режиме.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют направления развития технологии программирования?
2. Что такое библиотека стандартных подпрограмм?
3. Как на примере блок-схемы вычислительной задачи можно описать технологию создания прикладной задачи АСУ ТП?
4. Как описывается структура пакета сбора и обработки информации для ДОС АСПО?
5. Какие функции выполняет упомянутый выше пакет?
6. Как можно описать структуру пакета ВВ-1800?
7. Какая существует технология работы с пакетом ВВ-1800?
8. Что такое настройка программного обеспечения?
9. Как строится технология создания системы цифрового управления на базе соответствующей САПР?
10. Какие функции может выполнять система имитационного моделирования?

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Глава 15

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

§ 15.1. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Повышение качества продукции растениеводства и содержания в ней полезных веществ имеет большое народнохозяйственное значение. Так, например, повышение только на 1% содержания сухих веществ в томатах позволяет выработать из того же количества их на 16—20% больше томата-пасты без дополнительных капитальных затрат. Однако наблюдаются случаи снижения полезных веществ в продукции растениеводства (например, в ряде районов страны снизились сахаристость свеклы, крахмалистость картофеля и др.). Одним из эффективных путей повышения качества продукции растениеводства является экономическое стимулирование сельскохозяйственных предприятий и установление закупочных цен на продукцию растениеводства не только по ее массе, но и в зависимости от содержания в ней основных полезных компонентов.

Экспрессное измерение содержания полезных компонентов (сахаристости свеклы, масличности семян, крахмалистости картофеля и др.) в растительном сырье необходимо также предприятиям перерабатывающей промышленности для организации правильного хранения и переработки сырья, повышения выхода готовой продукции и ее качества. Однако отбор проб из массы растительного сырья производится в основном вручную (что трудоемко и длительно), а измерение состава полезных компонентов осуществляется лабораторными продолжительными методами (например, определение содержания масла в семенах длится в течение нескольких часов).

Из изложенного следует важность обеспечения автоматизированными системами экспресс-анализа качества (АСЭАК) растительной продукции участков приемки перерабатывающих предприятий, а по отдельным видам культур (зерно, семена масличных культур) — приемных и заготовительных элеваторов.



Рис. 15.1. Функциональная структура АСЭАК растительной продукции

Создаваемые автоматизированные системы экспресс-анализа растительного сырья имеют унифицированную функциональную структуру, приведенную на рис. 15.1.

Системы экспресс-анализа включают следующие основные узлы и устройства.

1. Устройство для автоматического и автоматизированного измерения массы партии принимаемого сырья, присвоения этой партии определенного кода и автоматической передачи результатов измерения массы, реквизитов и кода партии в вычислительное устройство.

2. Автоматическое или автоматизированное устройство для

отбора разовых проб из партии сырья, составления общей пробы, сокращения ее (при необходимости) до пробы, передаваемой на экспресс-анализ показателей качества, включающее устройство для присвоения каждой пробе кода партии (для кодирования при последующих определениях информации, относящейся к данной пробе, и распознавания ее в вычислительном устройстве).

3. Узел для автоматического или автоматизированного определения загрязненности (сорности) пробы сырья, состоящий из устройств для измерения массы пробы (до и после удаления примесей) и введения результатов измерения в вычислительное устройство; для удаления свободных сорных примесей, связанной земли (например, путем мойки в АСЭАК сахарной свеклы и картофеля), зеленой массы (в АСЭАК сахарной свеклы) и поверхностной влаги после мойки (в АСЭАК сахарной свеклы и картофеля).

4. Автоматический или автоматизированный приборно-аналитический комплекс, предназначенный для определения содержания в пробе сырья основного технологического компонента (сахаров, крахмала, жиров и т. п.), технологических показателей качества (влажности, кислотности, потенциального выхода продукта, содержания белков и т. п.), фракционного состава, поражения болезнями и т. д. В комплекс входят автоматические устройства для измерения массы пробы или ее частей (навесок) на разных этапах определений, подготовки пробы или ее частей (навесок) к анализам и определениям; получения информации для определения содержания в пробе анализируемых компонентов (сахара, крахмала, влаги, белков и т. п.) и фракционного состава (например, процентного содержания гребней, суслу и выжимок в пробе винограда или клубней диаметром менее 30 мм в пробе картофеля); контроля определенных признаков (например, подвяленности свеклы, подмороженности свеклы и картофеля, поражения корней и клубней болезнями и т. п.); преобразования получаемой в процессе определений и анализов информации в соответствующие сигналы и передачи (ввода) их в вычислительное устройство.

5. Вычислительно-управляющее устройство, осуществляющее следующие операции:

обработку вводимой от устройств по пп. 1, 3, 4 информации в соответствии с заданным алгоритмом (вычисление показателей качества принимаемой партии сырья и сравнение их с заданными базисными значениями, определение скидок или надбавок к базисной стоимости сырья с учетом показателей качества, определение стоимости партии сырья для расчетов с поставщиком и т. п.);

автоматическое управление работой всех устройств, входящих в АСЭАК;

контроль и сигнализацию исправности входящих в АСЭАК устройств и сбоев в их работе.

6. Устройство вывода информации из АСЭАК, в состав которого входят:

табло для индикации оперативной информации о коде партии сырья, показателях его качества, расчетной стоимости с учетом показателей качества и т. п.;

устройство печатания сертификата, служащего документом для расчета с поставщиком и учета принятого сырья;

устройство связи с АСУП или ОАСУ (путем непосредственного ввода информации или запоминания ее на машинных носителях).

Автоматизированная система экспресс-анализа качества разрабатывается для каждого вида сырья. Отличительными в ней являются устройства отбора проб и приборно-аналитический комплекс.

При разработке приборных комплексов автоматизированных систем определения качества сельскохозяйственного сырья используются или создаются приборы, основанные на применении современных методов: ядерно-магнитного резонанса, СВЧ-спектроскопии, колориметрических, рефрактометрического, хемилюминесцентного, рН-метрии, титрометрического. Наиболее перспективными являются приборы, основанные на бесконтактных измерениях (например, в отраженных инфракрасных лучах). Такие приборы не требуют пробоотбора, и измерения можно производить непрерывно, автоматически в потоке.

§ 15.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ САХАРНУЮ СВЕКЛУ

Переработка сахарной свеклы осуществляется на сахарных заводах, представляющих собой крупнотоннажное материалоемкое производство. Непрерывно-поточный характер производства, преобладающее применение непрерывно действующего оборудования для подготовки свеклы, получения, очистки и сгущения сока, высокая степень модернизации внутризаводских процессов, транспортирования и переработки полупродуктов и продуктов создают хорошие предпосылки для автоматизации производственных процессов на сахарных заводах. В то же время применение циклически действующего оборудования для фильтрования соков, уваривания и центрифугирования утфелей усложняет решение вопросов автоматизации этих процессов.

Неустойчивость сахарной свеклы к хранению обуслов-

ливают сезонность производства, снижает эффективность использования средств и систем автоматизации, в частности вычислительной техники. Большинство агрегатов и технологического оборудования сахарных заводов относится к статическим объектам, многие из них обладают высокой инерционностью и соответствующими величинами самовыравнивания, что облегчает автоматическое управление.

Наряду с общими чертами, присущими химико-технологическим процессам, сахарное производство имеет ряд характерных особенностей, отличающих его от других производств и существенно влияющих на решение вопросов технологического регламента регулирования процессов и управления производством.

Целевой функцией автоматизированного управления технологическими процессами свеклосахарного производства является: максимизация прибыли завода от реализации готовой продукции

$$P = |G_{cx}(C_{cx} - C_{cx})| \rightarrow \max \quad (15.1)$$

или минимизация себестоимости белого сахара за смену

$$C_{cx} = \left| 10^{-2} \frac{A}{G_{cx}} (10^2 C_{cv} + C_t \alpha_t + C_n \alpha_n - C_{ж} \alpha_{ж} - C_m \alpha_m) + \right. \\ \left. + C_{в.м} \frac{A}{G_{cx}} + C_{в.м} \right| \rightarrow \min; \\ C_{cx} = A \cdot 10^{-2} (G_{cx, cv} - P_{cx})$$

при нормируемых ограничениях по потерям сахара в жоме, фильтрпрессном осадке и мелассе

$$G_{п. ж} \leq G_{п. ж}^H; G_{п. ф} \leq G_{п. ф}^H; G_{п. м} \leq G_{п. м}^H$$

и с учетом технологических ограничений управляющих воздействий

$$A_{min} \leq A \leq A_{max}; \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}; \\ \alpha_{и min} \leq \alpha_{и} \leq \alpha_{и max}; \alpha_{в. ф min} \leq \alpha_{в. ф} \leq \alpha_{в. ф max};$$

где A — производительность завода по свекле; G_{cx} — расход (выпуск) белого сахара; C_{cx} — технологическая составляющая себестоимости сахара; C_{cv} — цена свеклы; C_{cx} — цена сахара; C_t — цена топлива; C_n — цена известкового камня; $C_{ж}$ — цена товарного жома; C_m — цена товарной мелассы; $C_{в.м}$ — удельная стоимость вспомогательных материалов; $C_{ам}$ — удельная стоимость амортизации оборудования и трудовых затрат, относительный (в % к массе свеклы) расход условного топлива; α_n — относительный расход извести на очистку сока; $\alpha_{в.ф}$ — относительный расход воды на промывку фильтрпрессного осадка; $\alpha_{ж}$ — относительный расход товарного жома; α_m — относительный расход товарной мелассы; α — относительный расход сока на производство; $G_{cx, cv}$ — относительно содержание сахара в свекло-вичной стружке; P_{cx} — относительные суммарные потери сахара в производстве; $G_{п. ж}$ — относительные потери сахара в жоме; $G_{п. ф}$ — относительные потери сахара в фильтрпрессном осадке; $G_{п. м}$ — относительные потери сахара в мелассе; n — индекс нормы.

Рост объема сложного многопроцессного, материало- и энергоемкого сахарного производства, находящегося под действием существенных возмущений, возросший объем информации о производственно-хозяйственной деятельности сахарного завода, повышение разрешающей способности и надежности средств вычислительной техники (ВТ) предопределяют техническую и экономическую целесообразность применения ВТ для взаимосвязанного управления сахарным заводом на всех уровнях его производственной и хозяйственной деятельности. Такое управление реализуется с помощью АСУ, которая по своей структуре является трехуровневой системой, включающей три системы (рис. 15.2):

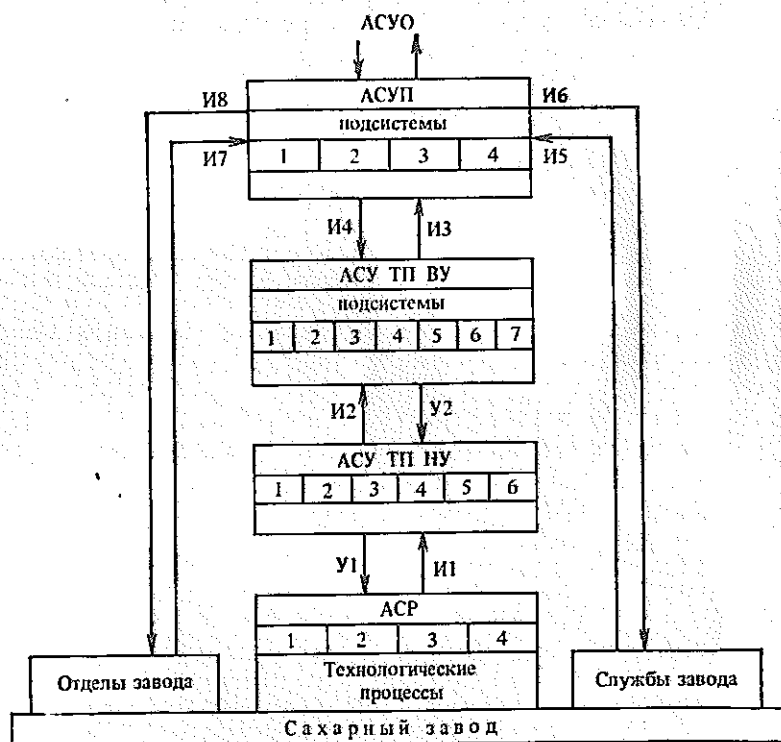


Рис. 15.2. Функциональная структура АСУ сахарного завода:

U1 — управляющие функции АСР; U2 — управляющие функции регулирования по заданиям АСУ ТП ВУ; I1 — сбор, преобразование и передача информации от ТП; I2 — передача обработанной информации для выполнения функций контроля и управления; I3 — исходная информация; I4 — информация о плановых заданиях производству; I5, I7 — исходная информация от отделов и служб завода; I6, I8 — информация по результатам решения задач АСУП

автоматизированную систему управления организационно-экономической деятельностью завода (АСУП);

автоматизированную систему управления технологическими процессами производства на верхнем уровне (АСУ ТП ВУ);

автоматизированную систему управления технологическими процессами на нижнем уровне (АСУ ТП НУ).

В состав АСУП входят четыре подсистемы (см. рис. 15.2):

1 — технико-экономического и оперативного планирования производства;

2 — учета готовой продукции, сырья и материалов;

3 — учета и анализа трудовой деятельности на заводе;

4 — учета и анализа финансовой деятельности на заводе.

В состав АСУ ТП верхнего уровня входят семь подсистем:

1 — сбора, преобразования и передачи информации о состоянии технологических процессов и оборудования;

2 — централизованного контроля технологических процессов и оборудования;

3 — управления продуктовым потоком;

4 — расчета рационального режима водоиспользования и контроля его соблюдения;

5 — оперативного расчета и представления основных технико-экономических показателей производства;

6 — оперативного учета затрат электрической и тепловой энергии;

7 — контроля и учета качества продукции.

В подсистеме сбора, преобразования и передачи информации решаются комплексы задач информационного обеспечения АСУ ТП верхнего уровня, автоматического интегрируемого контроля достоверности информации, технически- и программно-имитационной проверки работы подсистемы и одновременно измерительных средств локальных систем автоматического регулирования, входящих в АСУ ТП нижнего уровня.

В подсистеме контроля технологических процессов и оборудования решаются комплексы задач по централизованному (диспетчерскому) оперативному интегрированному контролю аварийных ситуаций по участкам и отклонений основных режимных параметров производства от их регламентных значений, по ориентировочному распознаванию места и причины аварии относительно текущих значений режимных параметров данного и смежных участков, по составлению сменных и бригадных сводок о всех видах нарушений технологических процессов и режима работы оборудования в целях определения качества работы бригад и узких мест производства.

В подсистеме расчета и представления основных ТЭП решаются комплексы задач оперативного расчета результатов выполнения часовых, сменных и суточных плановых показателей

по выработке готовой продукции, ее качественных показателей и удельных затрат сырья, энергии и материалов на производство; сменного расчета данных о состоянии незавершенного производства (продуктового верстата); сменного и суточного расчета коэффициентов неравномерности работы завода.

В подсистеме управления продуктовым потоком решаются комплексы задач продольной стабилизации сокового потока, согласования производительности основных производственных участков, создания псевдонепрерывного продуктового потока путем прогнозируемого оптимального (по критерию неравномерности) порядка запуска вакуум-аппаратов с применением ситуационного алгоритма управления.

В подсистеме расчета и контроля режима водоснабжения решаются комплексы задач расчета рационального режима водоиспользования по адаптируемой математической модели, контроля за соблюдением этого режима на всех основных участках производства, расчета компонентов водного баланса на заводе и неучтенных потерь воды при потреблении на технологические нужды производства.

В подсистеме контроля и учета качества продукции решаются комплексные задачи по учету результатов анализов качества промежуточных и готовых продуктов, выполняемого лабораторией теххимического контроля завода, косвенному определению и расчету качественных и физико-химических параметров продуктов, ведению лабораторией соответствующих журналов.

В подсистеме учета затрат электрической и тепловой энергии решаются комплексы задач автоматического учета электроэнергии, вырабатываемой ТЭЦ завода, идущей на производственные нужды завода и собственные нужды заводской ТЭЦ, отдаваемой в районную электросеть или получаемую от сети; учета расходов тепловой энергии на производственные и собственные нужды; оперативного расчета основных технико-экономических показателей работы ТЭЦ.

В состав АСУ ТП нижнего уровня входят десять подсистем автоматизированного управления технологическими процессами отдельных производственных отделений и участков, из которых одна группа предусматривает применение микропроцессорной вычислительной техники и непосредственное цифровое управление (НЦУ) от УВК и, следовательно, является группой отдельных АСУ ТП отделений или участков, а другая — автоматическое регулирование технологическими процессами без применения средств ВТ и представляет собой группу традиционных автоматических систем регулирования (АСР).

В первую группу входят (см. рис. 15.2) АСУ ТП подачи и мойки свеклы, АСУ ТП диффузионного отделения, АСУ ТП сокоочистительного отделения АСУ ТП выпарной станции, АСУ

ТП кристаллизационного отделения, сушки и упаковки сахара, АСУ ТП фильтрационного отделения; во вторую — АСУ известкового отделения, АСУ участка сульфитаторов соков и сиропа, АСУ автоматического учета готовой продукции, АСУ жомосушильного отделения.

В АСУ ТП подачи и мойки свеклы решаются комплексы задач (см. § 1.1 и рис. 1.1) автоматической блокировки и программного включения оборудования в определенной последовательности, управления расходом свеклы, подаваемой на завод.

В АСУ ТП диффузионного отделения решаются комплексы задач централизованного контроля основных параметров процессов, выбора рационального режима экстрагирования сахара из свеклы по специально разработанному алгоритму, стабилизации или дистанционного регулирования режимных параметров нагрева, расходов и уровней сока, стружки и сокоотружечной смеси в диффузионных аппаратах и сборниках.

В АСУ ТП сокоочистительного отделения решаются комплексы задач контроля и выбора рационального режима дефекации по специальному алгоритму, автоматической стабилизации или дистанционного регулирования режимных параметров нагрева сред, величины рН преддефекации, I и II сатурации, расходов соков в ряде пунктов отделения, а также щелочности дефекованного сока.

В АСУ ТП выпарной станции решаются комплексы задач контроля параметров процессов, выбора рационального режима работы выпарной станции, исходя из производительности завода и начальных параметров сока, стабилизации температурного режима выпаривания, давлений соковых паров по корпусам, уровней в корпусах и сборнике конденсата, расходов сока и сиропа.

В АСУ ТП кристаллизационного отделения, сушки и упаковки сахара решаются комплексы задач контроля параметров процессов, выбора рациональной программы варки утфеля в вакуум-аппаратах, исходя из начальных значений параметров сиропа и разрежения, автоматического программного управления варкой утфеля, стабилизации температуры нагрева сиропов и оттеков, уровней в сборниках сиропа, утфелемешалках, утфелераспределителях, плотности и температуры клеровок, расхода и температуры сушильного агента в сушильных аппаратах.

В АСУ ТП фильтрационного отделения решаются комплексы задач контроля параметров процесса, выбора и корректировки рациональной программы управления фильтрами и автоматического управления фильтрами.

Характерной особенностью АСУ сахарными заводами в указанном составе является наличие функциональных прямых и обратных связей между АСУП и АСУ ТП верхнего уровня, АСУ

ТП верхнего и АСУ ТП нижнего уровней. К первой группе связей относится, в частности, передача из АСУП в АСУ ТП верхнего уровня оперативных плановых заданий и других исходных данных, необходимых для расчета производительности участков и управления материальным потоком производства. Из АСУ ТП верхнего уровня в АСУ ТП нижнего уровня передаются результаты автоматического расчета ТЭП и данных о качестве работы смен и бригад, используемых при анализе финансовой деятельности завода и расчете заработной платы соответственно. Из АСУ ТП верхнего уровня в АСУ ТП нижнего уровня и АСР передаются исходные данные, необходимые для расчета и выбора оптимальных и рациональных технологических процессов и режимов работы оборудования. Из АСУ ТП нижнего уровня и АСР в АСУ ТП верхнего уровня передается текущая информация о ходе производственных процессов, необходимая для решения задач, предусмотренных на этом уровне управления.

Структурной схемой управления технологическими процессами предусматриваются стационарные операторские пункты управления для следующих участков и отделений: кагатного поля, механизированного склада свеклы, тракта подачи свеклы и свекломоечного отделения, свеклоперерабатывающего отделения, отделения сокоочистки, выпарной станции, кристаллизационного отделения (вакуум-аппаратов и конденсаторов, утфелемешалок и кристаллизаторов, центрифуг, клеровочных и аффинационных аппаратов), отделения сушки сахара, жомосушильного отделения, известкового отделения (известково-газовой печи, участка приготовления известкового молока).

Для заводов мощностью менее 3 тыс. т переработки свеклы в сутки, где не используется комплексная автоматизация, оправданно применение децентрализованной системы управления технологическими процессами. При такой системе на каждом технологическом участке размещается свой индивидуальный пункт управления, оснащенный щитом контроля и управления.

Основой автоматизации завода является документация типовой схемы автоматизации, обеспечивающая возможность проведения всего комплекса работ в области автоматизации технологических процессов. На основе документации типовой схемы автоматизации выполняются следующие работы: разработка проектов автоматизации вновь строящихся и реконструируемых сахарных заводов, технических заданий на создание образцов автоматизированного оборудования, технических требований на создание новых средств автоматизации, методики определения уровня, объема и степени автоматизации в свеклосахарном производстве, оценка необходимости усовершенствования автоматизации технологических процессов, оценка и анализ

состояния и уровня автоматизации в свеклосахарном производстве, создание АСУ ТП разных уровней.

В структурных схемах применены апробированные в сахарной промышленности приборы электрической и пневматической ветвей ГСП с учетом особенностей технологических участков. Так, на участках — кагатное поле свеклы, тракт подачи свеклы, загрузка известково-газовой печи — использованы приборы электрической ветви ГСП; на других технологических участках наряду с электрическими — пневматические приборы, а для жомосушильного отделения предусмотрено применение приборов пневматической и электрической ветвей ГСП.

Модульный принцип построения схем автоматизации позволит применять на сахарных заводах как комплексную, так и частичную автоматизацию в зависимости от условий конкретных заводов, что особенно важно при их реконструкции и техническом перевооружении.

§ 15.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ СЕМЕНА МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

Маслоэкстракционное производство, основанное на переработке масличных культур, характеризуется рядом особенностей. Важнейшими из них являются непрерывно-дискретный характер технологических процессов, неритмичное поступление семян, значительные колебания показателей качества семян, частая замена одной перерабатываемой культуры другой, взрыво- и пожароопасность отдельных участков и помещений.

В маслоэкстракционном производстве получили распространение одноконтурные автоматические стабилизирующие системы (стабилизация температурного режима процесса дистилляции мисцеллы), каскадные системы (регулирование расхода мисцеллы в дистиллятор с коррекцией по уровню в мисцелло-сборнике), системы статической оптимизации (система оптимального распределения загрузки параллельно действующих экстракторов) и т. п.

Типовая технологическая схема маслоэкстракционного производства предусматривает предварительное извлечение масла на прессах (форпрессование) с последующим извлечением масла из экстрагируемого материала с помощью растворителя (бензина) и дистилляцией мисцеллы по многоступенчатой схеме. Основными участками маслоэкстракционного завода являются элеватор семян, рушально-веечное отделение, прессовое отделение, экстракционное отделение, маслосливная станция и элеватор шрота.

АСУ ТП базового маслоэкстракционного производства пред-

ставляет собой двухуровневую иерархическую структуру, предусматривающую АСУ ТП элеватора семян и АСУ ТП собственно маслоэкстракционного производства. На верхнем уровне осуществляются централизованный контроль и управление производством в целом, обеспечивающие координацию работы и взаимодействие основных и вспомогательных технологических участков: элеватора семян, рушально-веечного, прессового, экстракционного, дистилляционного, гидратационного, нейтрализационного отделений и маслосливной станции. Управление осуществляется с центрального диспетчерского пункта с использованием УВК.

Цель управления наиболее полно отражает обобщенный технико-экономический показатель — прибыль предприятия от реализации готовой продукции, математическое выражение которой приведено в формуле (7.1). Необходимость использования этого показателя для оценки эффективности управления обусловлена следующими особенностями производства: выпуском и реализацией нескольких видов продукции (масла, шрота, фосфатидов); реализацией значительной доли продуктов по сортам (более 30% в денежном выражении).

Управление производством по критерию прибыли от реализации готовой продукции затруднено. В частности, отсутствуют адекватные уравнения связи между режимными параметрами и целевой функцией, недостаточны чувствительность последней к применению отдельных управляющих воздействий, а также точность ее расчета.

В целях сокращения размерности проведена декомпозиция общей задачи управления и получены частные критерии управления отдельными технологическими участками и процессами. В качестве общего критерия управления комплексом процессов экстракции и дистилляции используется технико-экономический показатель, представляющий собой разницу между стоимостью извлеченного масла и стоимостью растворителя и пара, затраченных на извлечение масла в процессах экстракции и дистилляции:

$$I = C_m C_{mc} G_{mc} - C_p K G_p - C_n G_n, \quad (15.2)$$

где C_m , C_p , C_n — соответственно цены масла, растворителя, пара, руб/т; G_{mc} — расход мисцеллы, м³/ч; G_p — расход растворителя, т/ч; G_n — расход пара на дистилляцию, т/ч; K — коэффициент пропорциональности между расходом и потерями растворителя; C_{mc} — концентрация мисцеллы, %.

Исходя из общего критерия управления комплексом процессов экстракции и дистилляции сформулирован частный критерий управления процессом дистилляции: расход пара на дистилляцию. Для четырехступенчатой линии дистилляции частная

целевая функция управления с учетом ограничений по плану производства и технологическому регламенту имеет вид

$$\begin{aligned}
 I_{\pi}(0, T) &= \int_0^T G_{\pi}(t) dt \rightarrow \min; \\
 G_{\pi}(t) &= \sum_{i=1}^4 G_{i \text{ гл. п.}}(t) + \sum_{i=1}^4 G_{i \text{ о. п.}}(t); \\
 G(0, T) &\geq G^{\text{пл}}(0, T); \\
 \theta_{i \text{ мц}} &\leq \theta_{i \text{ мц}}^{\text{р}}; \\
 \theta_{\text{всп. м}} &\geq \theta_{\text{всп. м}}^{\text{р}}; \\
 U_j^{\min} &\leq U_j \leq U_j^{\max},
 \end{aligned} \tag{15.3}$$

где i — номер ступени дистилляции; G_{π} , $G_{i \text{ гл. п.}}$, $G_{i \text{ о. п.}}$ — соответственно общий расход пара на дистилляцию, расход глухого и острого пара на i -ю ступень дистилляции; $G(0, T)$, $G^{\text{пл}}(0, T)$ — соответственно фактическая и плановая выработка масла за интервал времени $(0, T)$; $\theta_{i \text{ мц}}$, $\theta_{i \text{ мц}}^{\text{р}}$ — соответственно фактическая и регламентная температура мисцеллы на i -й ступени; $\theta_{\text{всп. м}}$, $\theta_{\text{всп. м}}^{\text{р}}$ — соответственно фактическая и регламентная температура вспышки масла; U_j , $U_j^{\min}$, $U_j^{\max}$ — соответственно фактическое, минимальное и максимальные значения i -го управляющего воздействия.

Поставленная цель управления предприятием достигается путем выполнения АСУ ТП совокупности информационных и управляющих функций (рис. 15.3).

Появление единого центра сбора, обработки и выдачи информации, через который замыкаются все информационные связи, приводит в условиях АСУ ТП к частичной перестройке организационной структуры управления. Оперативным персоналом верхнего уровня являются диспетчер (начальник смены) и оператор ЦДП. На нижнем уровне управление осуществляется аппаратчиками с местных щитов управления и операторами с операторских пунктов.

АСУ ТП элеватора семян обеспечивает выполнение следующих функций:

централизованное диспетчерское автоматизированное управление транспортными системами элеватора;

автоматический контроль температуры семян в силосах элеватора с представлением информации в операторский пункт элеватора;

оперативный учет массы и качества хранящихся семян с использованием автоматизированной системы экспресс-анализа качества семян (АСЭАК);

оперативный учет семян, поданных в производство;

оптимальное управление в советующем режиме размещени-

ем семян и подачей их на переработку в зависимости от качества семян.

АСУ ТП маслоэкстракционного производства обеспечивает выполнение следующих функций:

по рушально-веечному отделению — централизованный контроль состояния оборудования и параметров технологических процессов, диспетчерское автоматизированное управление транспортными механизмами в дистанционном режиме с обеспечением противозавальных блокировок, автоматическое регулирование производительности цеха по сырью, учет запасов сырья в промежуточных емкостях;

по прессовому отделению — централизованный контроль и диагностику состояния работы оборудования, параметров процессов жарения и прессования, диспетчерское автоматизированное управление транспортными механизмами в дистанционном режиме с обеспечением противозавальных блокировок, оперативный расчет технико-экономических показателей работы (удельные затраты сырья, тепловой и электрической энергии на 1 т масла);

по экстракционному отделению — централизованный контроль процесса экстракции и состояния оборудования, диспетчерское автоматизированное управление транспортными механизмами с обеспечением противозавальных блокировок, косвенное измерение (вычисление) процесса экстракции (входных переменных, технико-экономических показателей, оптимальных управляющих воздействий), оперативное отображение и регистрацию результатов измерения параметров, сигнализацию состояния оборудования; регулирование подачи экстрагируемого материала, расхода растворителя, уровня материала в загрузочном бункере, уровня материала в роторах, температуры растворителя, разрежения в экстракторе, уровня шрота в тостерах, оптимальное управление процессом экстракции и дистилляции;

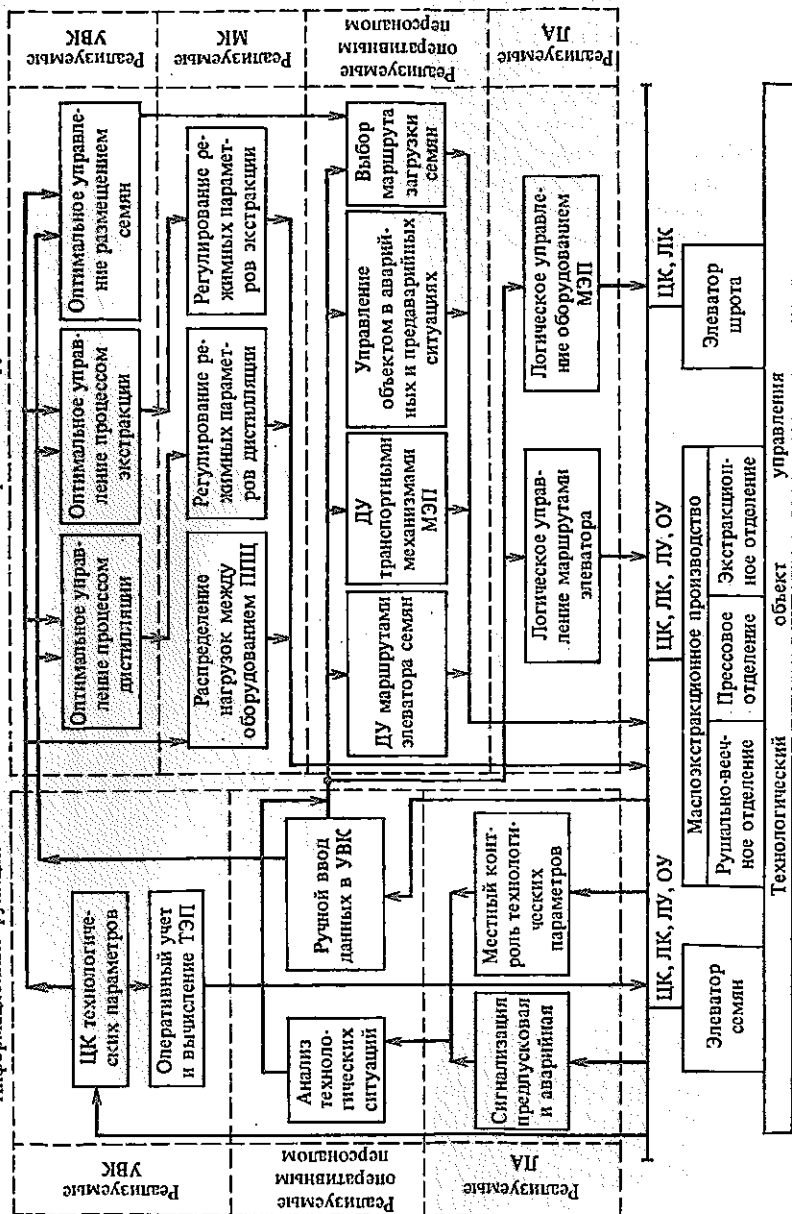
по маслосливной станции — контроль уровней в баках с выходом на вычислительный комплекс, оперативный межцеховой учет поступления и выдачи жиров, блокировка, отключающая насосы при достижении предельных уровней, учет запасов жиров с использованием ВТ;

по учету энергоресурсов — автоматизированный учет энергоресурсов, оперативный контроль за режимами потребления энергоресурсов как всего завода, так и его подразделений по сменам, суткам, месяцам в целях оптимизации этих режимов.

С использованием указанных на рис. 15.3 функций в АСУ ТП реализуются задачи централизованного контроля производством (ЦКП), расчет технико-экономических показателей (ТЭП) производства, расчет учетных показателей управления.

Информационные функции

Управляющие функции



Задача ЦКП обеспечивает представление диспетчеру следующих показателей:

36 технологических параметров, в том числе влажность мятки, шрота и маслосемян, масличность лузги, кислотное число маслосемян, масла до и после нейтрализации, сорность маслосемян, содержание бензина в масле, концентрация мисцеллы, щелочи, расход бензина на первом и втором экстракторах, мисцеллы на I и II ступенях дистилляции, масла и воды на гидратацию, масла и щелочи на нейтрализацию, воды на увлажнение мятки, давление масла после сепараторов линии гидратации, температуры мисцеллы после I и III ступеней дистилляции, масла после III ступени, в шестом чане жаровни, шрота из первого и второго экстракторов, уровень бензина в баке;

30 учетных показателей, включающих переработку сырья, выработку масла, расход энергоресурсов, вспомогательных материалов за разные интервалы времени;

39 нагрузок основного технологического оборудования;

27 оперативных технико-экономических показателей;

120 показателей состояния технологического оборудования.

Входная информация в УВК поступает от автоматических датчиков (аналоговых, дискретных и число-импульсных) и устройств ручного ввода. Общее число входных сигналов, поступающих в УВК, равно 135.

Представление диспетчеру перечисленной выше информации осуществляется с помощью аналоговых приборов, установленных на пульте управления, дисплеев, цифронечатающих устройств (на узкой и широкой лентах), световых табло, мнемосхемы. При необходимости, помимо текущих значений параметров, диспетчеру представляются усредненные и интегрированные величины за 2, 8 и 24 ч.

В задаче расчета ТЭП определяются масса семян, поступающих на переработку, выработка (выход) прессового масла, выработка (выход) экстракционного масла, суммарная выработка прессового и экстракционного масел, соотношение между выработкой прессового и экстракционного масел, удельный расход семян, потери масла с лузгой, потери масла со шротом, выход шрота, удельный расход тепло-(пара) и электроэнергии, бензина, воды. Перечисленные ТЭП усредняются в интервалах 2, 8 и 24 ч. При необходимости осуществляется сравнение рассчитанных ТЭП с плановыми нормами.

Рис. 15.3. Схема функциональной структуры АСУ ТП маслоэкстракционного производства:

ЛА — локальная автоматизация; ЦК — централизованный контроль; ЛК — локальный контроль; ЛУ — локальное управление; ОУ — оптимальное управление; ДУ — диспетчерское управление; МК — микроконтроллер; МЭП — маслоэкстракционное производство; Р — регулирование

Задача расчета учетных показателей предназначена для оперативного расчета и регистрации отдельных отчетных показателей. В АСУ ТП рассчитываются следующие показатели: масса отгруженной продукции по видам и сортам, запас масла на маслосливной станции, растворителя в бензохранилище, сырья в элеваторе по видам и качеству, масса семян, доставленных железнодорожным транспортом, и др. Получаемая информация используется в отчетных документах о работе предприятия за сутки, декаду, месяц и т. д.

§ 15.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ МУКОМОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мукомольный завод как объект управления характеризуется следующими свойствами: функциональной самостоятельностью отдельных участков технологических процессов, непрерывным характером производства, разветвленной сетью поточно-транспортных маршрутов, необходимостью всестороннего оперативного контроля технологических этапов и работы оборудования, многопараметричностью характеристик зерна как биологического продукта, промежуточных продуктов его размола и муки разных сортов, зависимостью режимов технологических процессов от этих характеристик.

Проблема интенсификации мукомольного производства связана с новым, качественным подходом к управлению технологическими процессами на базе современной ВТ и создания АСУ. Учитывая распределенный характер мукомольного производства при разработке АСУ ТП, используют современные тенденции распределения ВТ в пределах системы.

Создание АСУ ТП мукомольного производства предусматривает: формулирование генеральной цели и дерева частных целей управления производством, постановку основных и вспомогательных задач управления технологическим процессом, разработку КТС АСУ ТП и программного обеспечения системы, анализ технико-экономических показателей внедренных АСУ ТП.

Генеральная цель управления производством формулируется следующим образом: максимизация прибыли за счет повышения выходов готовой продукции, в основном высоких сортов, относительно зерна базисных кондиций при ограничениях: по производительности — в пределах оптимальных нагрузок оборудования; по качеству — не ниже предусмотренных соответствующими регламентами.

С помощью декомпозиции целевой функции путем анализа и классификации управляющих воздействий, реализуемых на современных предприятиях, формулируются следующие частные цели, обуславливающие достижение генеральной цели: создание

запасов зерна мельничных кондиций, однородных в пределах каждого компонента будущих помольных смесей; обеспечение оптимальных физико-технологических свойств и стабилизация качественных показателей помольных смесей зерна перед размолом; обеспечение оптимального извлечения на этапе крупнообразования и стабилизация белизны муки каждого сорта в регламентированных пределах.

Перечисленные частные цели управления достигаются на отдельных участках процесса, между которыми существует ряд прямых и обратных связей. Такими участками являются элеватор, зерноподготовительное отделение, размольное и выбойное отделения, склад бестарного хранения готовой продукции.

В целом АСУ ТП мукомольного завода — трехуровневая (рис. 15.4). Управление на нижнем уровне осуществляется следующими системами:

- дистанционного автоматизированного управления поточно-транспортными механизмами элеватора и электроприводами механизмов сушильной установки;

- автоматической стабилизации режимов работы сушильной установки;

- автоматической стабилизации влажности зерна после увлажнения;

- автоматической стабилизации производительности по зерну на выходе из бункеров и времени отволаживания;

- автоматической стабилизации соотношения расходов зерно—вода при доувлажнении зерна;

- автоматической стабилизации расхода зерна на первую дражную систему;

- автоматизированной системой управления формированием помольной смеси в зерноочистительном отделении;

- автоматической стабилизации белизны муки I и II сортов, а также контроль белизны муки высшего сорта.

Задачи, решение которых позволяет реализовать частные цели управления на среднем уровне АСУ ТП, сводятся к следующему:

- по элеватору — оптимальное размещение поступившего зерна и зерна, перемещаемого из силоса в силос; оперативный количественный и качественный учет зерна; выдача оператору информации о количестве и качественных показателях зерна в отдельных силосах, в объеме силосного корпуса или всего элеватора; учет работы смен;

- по зерноподготовительному отделению — подготовка данных для выбора рецептуры помольной смеси (ПС); выдача данных о наличии на элеваторе зерна с заданными качественными показателями; оптимальный начальный выбор компонентов ПС; оптимальное управление соотношением компонентов ПС; выбор

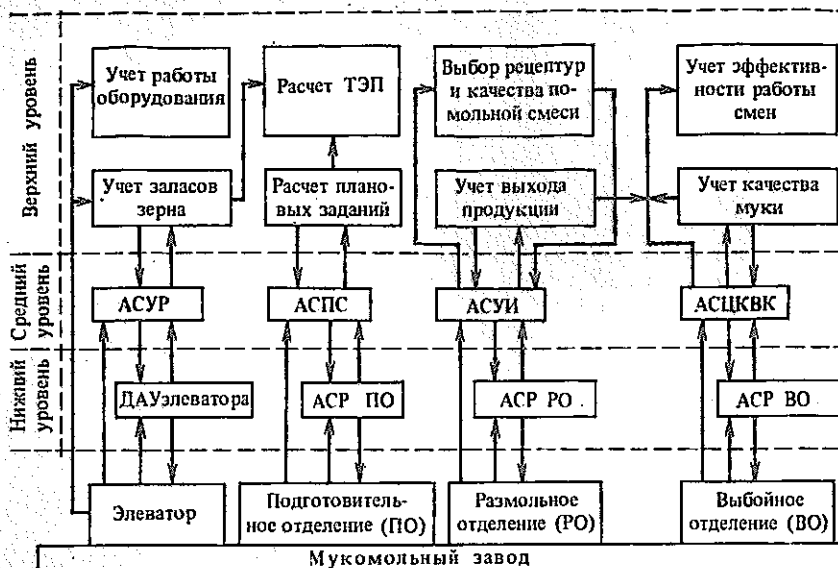


Рис. 15.4. Функциональная структура подсистемы «Элеватор» АСУ ТП мукомольного производства:

АСУР — автоматизированная система управления размещением зерна; АСПС — автоматизированная система подготовки смесей; АСУИ — автоматизированная система управления извлечением на этапе крупнообразования; АСЦКВК — автоматизированная система централизованного контроля и управления выходами и качеством муки

компонента ПС взамен израсходованного; централизованный контроль показателей ПС; определение оптимальных режимов гидротермической обработки зерна; определение расчетных выходов готовой продукции; централизованный контроль систем стабилизации влажности зерна;

по размольному и выбойному отделениям — оптимальное управление драными системами; оперативный централизованный контроль за текущими значениями показателей технологического процесса; учет эффективности работы бригад.

На верхнем уровне управления технологическим процессом функционируют директор, главный инженер завода (заместитель директора по качеству) с главным технологом и начальником ОТХК. Используя результаты выполнения программ информационно-управляющего и вычислительного комплексов, они уточняют плановые месячные и суточные задания по по-мольным смесям зерна, по выходам готовой продукции и производительности мукомольного завода, выдают оперативные задания, анализируют показатели эффективности работы бригад по сменам, месяцам; периодически, с необходимой часто-

той осуществляют контроль за ходом технологического процесса, техническим состоянием оборудования, организуют через службы главного механика и главного энергетика его ремонт; обеспечивают через зам. главного инженера по АСУ своевременное обслуживание и ремонт вычислительной и информационной техники, средств КИП и А; разрабатывают и внедряют систему материального стимулирования и поощрения бригад, обуславливающую рост эффективности их работы.

Построение описанной выше АСУ ТП мукомольного завода базируется на следующих основных принципах:

- локализация управления технологическим процессом по отдельным участкам с помощью информационно-управляющих систем (ИУС), имеющих относительную функциональную независимость и решающих ограниченный круг задач, что обеспечивает возможность создания типовых АСУ отдельными участками (например, АСУ ТП — эlevator);

- организация комплекса ИУС и информационных каналов между ними в целях синтеза АСУ ТП, распределенной по ходу технологического процесса всего производства;

- установление связей локальных систем автоматического регулирования с ИУС в АСУ ТП в целях централизованного контроля за процессом регулирования и фиксации отклонений;

- построение ИУС на базе мини- или микроЭВМ, имеющих межмашинную связь, связи со всеми внешними устройствами комплекса, а также возможность связи с элементами других уровней иерархии АСУ ТП и АСУП;

- использование в ИУС мини- или микроЭВМ и централизация управления в пределах ИУС с помощью диспетчерского пункта (например, панели, пульта или стола оператора и т. п.);

- предоставление в распоряжение оператора технологического процесса специализированных внешних устройств ввода данных в систему и устройств вывода из нее результатов обработки для организации общения оператора с системой в естественной форме представления данных.

Децентрализация управления технологическим процессом, а также использование мини- или микроЭВМ в каждой отдельной ИУС значительно улучшает характеристики управления, так как появляется возможность управления участками технологического процесса разной степени охвата; при этом существенно улучшаются динамические свойства системы «технологический процесс — АСУ ТП».

Применение принципов децентрализации АСУ ТП, построение ИУС на базе мини-ЭВМ и типовых модулей, связи ИУС между собой при разработке систем управления технологическими процессами мукомольного предприятия позволили обобщить основные системные и технические решения в целях их

тиражирования в подотрасли и использования при синтезе аналогичных АСУ ТП, гибких по функциональным, конструктивным и другим характеристикам.

§ 15.5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ХЛЕБОПЕКАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Автоматизация в хлебопекарной подотрасли производится по следующим основным направлениям: внедрение локальных систем автоматизации, поставляемых комплектно с технологическим оборудованием; ввод систем автоматизации линий, участков, производств в ходе строительства новых и реконструкции существующих предприятий; создание и внедрение АСУ ТП.

Поставляемые в настоящее время вместе с технологическим оборудованием устройства автоматизации относятся в основном к отдельным агрегатам поточных технологических линий (устройства дозирования, укладчики, расстойные шкафы, хлебопекарные печи). Системы автоматизации внедряются отдельными участками и технологическими линиями, объединяющими ряд агрегатов и установок.

Развитие автоматизации в подотрасли связано с разработкой нового технологического оборудования, характеризующегося повышенной надежностью функционирования, способностью к дистанционному управлению и обладающего дополнительными возможностями, способствующими более эффективному и качественному протеканию производственных и технологических процессов. Например, на складах бестарного хранения муки к такому оборудованию относятся смесительные установки для подсортировки муки; в отделениях для дополнительного сырья — средства коммутации материалопроводов и установки для безразборной санитарной обработки оборудования и трубопроводов.

В основном производстве существует потребность в дозаторах разного типа (для сыпучих и жидких ингредиентов, непрерывного и периодического действия), комплексно-механизированных и автоматизированных линиях выпуска хлебобулочных изделий. В этой связи важнейшей задачей, стоящей перед машиностроением, является переход от разработки и выпуска отдельных разрозненных установок и агрегатов к комплексным линиям, включающим все необходимые устройства.

На участке складирования хлебобулочных изделий и погрузки их для отправки в торговую сеть необходимы укладчики в торговые контейнеры, комплексно-механизированные склады с автоматизацией адресаций и вызовом контейнеров на погрузку в автотранспорт.

АСУ ТП хлебозаводов имеют в основном двухуровневую структуру и решают задачи информационного характера. Непо-

средственное управление автоматизированными агрегатами, машинами, механизмами из-за отсутствия математических описаний для частных критериев управления сводится к выполнению традиционных функций стабилизации режимов и логического (сблокированного) управления поточно-транспортными системами по жестко заданным программам. С этой точки зрения применение вычислительной техники на локальном уровне нельзя считать экономически оправданным.

Функциональная структура АСУ ТП хлебозавода (рис. 15.5) включает следующие комплексы задач:

- централизованный контроль запасов и расхода муки и дополнительного сырья (ЦКС);
- централизованный контроль количества потребляемой энергии, расхода энергоносителей и воды (ЦКЭ);
- централизованный контроль технологических параметров и показателей состояния оборудования (ЦКТ);
- централизованный контроль и учет прохождения заготовок и выпуска готовой продукции (ЦКП);
- расчет технико-экономических показателей производства (ТЭП).

Особенностью схем функциональной структуры разрабатываемых АСУ ТП является включение в их состав (либо наличие связи с отдельно разрабатываемыми системами) комплекса

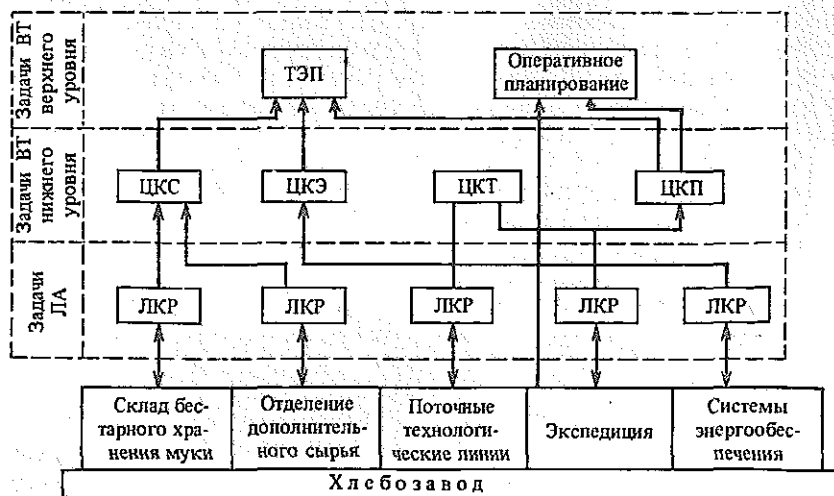


Рис. 15.5. Упрощенная схема функциональной структуры АСУ ТП хлебозавода:

ЛА — локальная автоматизация; ЛКР — локальный контроль и регулирование

задач, относящихся к сфере организационно-экономической деятельности предприятия. К ним относятся в первую очередь задачи оперативного планирования (диспетчеризации): сбор и обработка заказов, поступающих от торговой сети, составление графиков работы технологического оборудования, составление графиков подачи автотранспорта, контроль за соблюдением указанных графиков и т. п.

Общие критерии управления разрабатываемых АСУ ТП хлебозаводов предусматривают получение максимума прибыли при ограничениях по объему выпускаемой продукции и ее номенклатуре (в соответствии с полученными заказами) и допустимым удельным расходам сырья и энергии. Максимум прибыли достигается при полном совпадении потребности в продукции, не подлежащей длительному хранению, с ее фактическим выпуском, для чего эта потребность должна быть точно определена. Трудность оперативного планирования объема производства заключается в том, что в качестве прогнозируемой оценки реализации выступают заказы торговых организаций, которые могут корректироваться и обладают невысокой достоверностью.

Недовыпуск продукции означает потерю потенциально возможной прибыли, излишний выпуск чреват потерями при второй переработке возврата.

Как уже указывалось, формально декомпозиция общего критерия отсутствует, однако качественно частные критерии очевидны: это повышение достоверности прогнозирования потребительского спроса, четкое выполнение технологического регламента, минимизация непроизводительных потерь, в первую очередь за счет ликвидации аварий и незапланированных простоев.

Отсюда появляется необходимость включения в состав структуры АСУ ТП подсистемы (задач) оперативного планирования, а также учета (контроля) расходов сырья, энергоресурсов, готовой продукции и контроля выпускаемой продукции, организуемых по сменам, линиям и участкам.

Создаваемые АСУ ТП обладают следующими особенностями. В части технического обеспечения преобладающим является использование централизованных устройств контроля и управления. Отсутствие подходящих средств для распределенного управления в значительной мере определило применение информационных подсистем.

В части математического и программного обеспечения получили широкое применение универсальные (настраиваемые) пакеты прикладных модулей, осуществляющие сбор и обработку информации, получаемой от датчиков, и управление устройствами индикации и регистрации.

Для оперативного управления производством и транспортом на основе применения ВТ на хлебозаводе создается автоматизированная система оперативного диспетчерского управления, состоящая из трех подсистем.

1. Подсистема обработки заказов и контроля их выполнения. Ею рассчитывается заказ производству — количество хлебобулочных изделий в ассортименте, которые необходимо изготовить на каждый час суток по принятому заказу торговой сети, производится выборка невыполненных заказов по часам снабжения, определяется достаточность количества изделий в ассортименте в экспедиции хлебозавода для выполнения этих заказов.

Количество изделий в экспедиции рассчитывается по данным об их фактическом поступлении с производства в экспедицию и выдаче из экспедиции на погрузку в автомобили с учетом ожидаемого дополнительного изготовления изделий на технологических линиях к моменту выполнения заказа.

2. Подсистема контроля и управления работой транспорта. Этой подсистемой рассчитываются графики первой подачи автомобилей с автопредприятия на хлебозавод, обеспечивающие поступление автомобилей под погрузку изделий с учетом их возвратов из рейсов в соответствии с почасовым заказом. График составляется в два этапа: на первом рассматривается и согласовывается с автопредприятием график подачи автомобилей на месяц; на втором — согласованный график на месяц корректируется с учетом принятого заказа на очередные сутки.

Подсистемой производится контроль за выполнением графика подачи на сутки по числу подаваемых автомобилей в каждый час суток и продолжительности их работы на линии, определяются фактическая выработка на один физический и условный автомобиль и время сверхнормативных простоев автомобилей на хлебозаводе, рассчитывается ожидаемое число автомобилей, поступающих под погрузку на хлебозавод в очередной час суток, по числу автомобилей, отправленных в рейсы с учетом их фактического возвращения из рейсов и первой подачи с автопредприятия по графику на данные сутки.

3. Подсистема контроля и управления производством. Задания на производство готовой продукции по сменам рассчитываются подсистемой на основании заказа производству с учетом фактических остатков изделий к началу расчетных суток. Персонал хлебозавода распределяет эти задания по технологическим линиям и вводит полученные сменно-суточные задания (ССЗ) в ЭВМ для расчета ожидаемых запасов изделий и времени их хранения в экспедиции, а затем корректирует ССЗ в режиме диалога с ЭВМ, чтобы запасы каждого вида изделий в течение суток не снижались ниже минимально допустимой

величины, а суммарный запас — не превышал вместимость экспедиции.

Работа основного технологического оборудования контролируется путем определения времени работы и простоев ведущих машин технологических процессов раздельно по видам изделий и причинам простоев. Контроль выполнения ССЗ осуществляется непрерывно по поступающей информации о фактическом изготовлении готовой продукции по видам. Система оперативного диспетчерского управления создается на базе специфицированного управляющего вычислительного комплекса (УВК), состоящего из мини-ЭВМ и дополнительных видеотерминалов.

§ 15.6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПЛОДООВОЩНЫЕ КУЛЬТУРЫ

Перерабатывающее предприятие является стимулятором интенсификации выращивания плодовоовощных культур, гарантирующим потребление скоропортящегося сырья с устранением потерь от сезонных избытков. Агропромышленные комплексы (АПК) — одна из перспективных форм кооперирования сельскохозяйственных и промышленных перерабатывающих предприятий по консервированию скоропортящегося сырья. Типичной для таких АПК является структура, когда в его состав входят одно перерабатывающее предприятие и агрозоны (совокупность сельскохозяйственных предприятий).

Так, в состав базового АПК входят около 120 сельскохозяйственных предприятий восьми административных районов и четыре совхоза с радиусом доставки до 150 км. Агрозона поставляет в год для переработки на консервный комбинат свыше 60 тыс. т скоропортящегося сырья 35 наименований. Производство и оформление продукции выполняется на 56 технологических линиях и участках перерабатывающего комплекса.

Процесс производства в технологических цехах характеризуется многопоточностью переработки сырья и широким ассортиментом выпускаемой продукции. Один и тот же вид продукции может фасоваться на одной и нескольких линиях. Одновременно в каждом из цехов выпускается несколько видов консервов в разной таре. Характерной особенностью консервного производства является его сезонность: 70—80% годового плана выполняется за 3—4 месяца. В этот период особенно необходимо оперативное управление всеми технологическими участками и службами обеспечения производства.

Консервное производство характеризуется разнообразием технологических процессов. Подготовленность отрасли к автоматизации определяется в первую очередь наличием поточных технологических циклов производства от момента поступления

сырья до выдачи готовой продукции с выработкой продукции на высокопроизводительном оборудовании.

Однако многие операции технологического цикла до сего времени не поддаются механизации, требуют ручного труда и, вклиниваясь в механизированный поток, мешают созданию комплексно-механизированных и автоматизированных линий. Это в первую очередь относится к погрузочно-разгрузочным операциям, инспекции, операциям дочки, межоперационным перевозкам продукта, фасовке и т. п. Причем эти недостатки присущи самым современным линиям производства консервов и являются следствием недостаточного качества сырья, поступающего на заводы.

Погрузочно-разгрузочные операции, операции фасовки, укупорки, стерилизации и упаковки продукции тесно связаны с видами тары, применяемыми для транспортировки сырья и готовой продукции и фасовки консервов. Наличие в обороте заводов кустарно изготовленной и кустарно ремонтируемой в течение сезона сырьевой ящичной тары делает невозможной полную механизацию операций по перевалке сырья на сырьевых площадках и загрузке сырья в линии. Применение деревянных ящиков для упаковки готовой продукции обуславливает наличие большого числа ручных операций.

С точки зрения подготовленности к механизации и автоматизации операций внутри собственно технологического цикла различают две группы вырабатываемых продуктов:

продукты жидкие и пюреобразные, однородные (томат-паста, соки с мякотью, детские консервы и т. п.);

продукты разнородные по составу, требующие сохранения формы каждого продукта в консервах либо представляющие собой смеси многих компонентов по сложной рецептуре (салаты, овощезакусочные консервы, маринады, компоты, варенье и т. д.).

Оборудование по выпуску ассортимента первой группы в настоящее время можно считать наиболее механизированным и автоматизированным. В промышленности используется следующее отечественное и импортное оборудование: линии производства томата-пасты, линии производства томатного сока, линии производства фруктовых соков с мякотью, линии производства виноградного сока, линии производства осветленных фруктовых соков, линии производства консервов из зеленого горошка.

Оборудование по выпуску ассортимента второй группы не обеспечивает достаточной механизации даже внутри собственно технологического цикла производства. В большей своей части оно разнотипно на разных предприятиях, компоновочные схемы носят случайный, местный характер.

Высокая экономическая эффективность автоматизации достигается тогда, когда работы по автоматизации ведутся параллельно с работами по механизации и созданию прогрессивных технологических схем. Все вновь создаваемое оборудование должно проектироваться совместно со средствами автоматизации, которые смогут обеспечить работу его в оптимальном режиме.

Работы по автоматизации технологических процессов ведутся на действующих предприятиях: предусматривается автоматизация процессов производства томата-пасты, томатного сока, виноградного, яблочного, сливового и др. соков, консервов из зеленого горошка, варенья, джема, повидла, овощной икры, продуктов детского питания и т. д.

Автоматизация технологических процессов осуществляется с помощью локальных систем регулирования (которые охватывают в основном регулирование тепловых процессов), ведется продольная стабилизация технологических потоков, управление в сблокированных режимах работы, сигнализация состояния технологических процессов. Автоматизацией обеспечиваются регулирование и контроль уровней продукта в аппаратах и машинах, регулирование и контроль давления и вакуума, контроль качества и учет продукции, регулирование и контроль температурных режимов, регулирование загрузки основного технологического оборудования, программное управление процессом стерилизации, дозирование различных компонентов и т. д.

Управление и контроль производства предусматриваются с местных щитов контроля и регулирования, отдельных для каждой технологической линии, с координацией работы отдельных участков производства. Такая система управления обусловлена тем, что технологическое оборудование в основном несовершенно и не может находиться без постоянного или периодического контроля со стороны обслуживающего персонала, а технологические циклы из-за своей неподготовленности к полной автоматизации не могут обойтись без непосредственного участия человека.

Автоматизация технологических процессов в указанном выше объеме представляет собой первый этап. Решение вопросов по сырьевой зоне и технологии позволит создать высокопроизводительное механизированное оборудование с последующим переходом к автоматизированному поточному производству. Для крупных консервных заводов со сложной технологической структурой, широким ассортиментом выпускаемой продукции, большим масштабом производства и широким кругом решаемых задач создается информационно-советующая АСУ ТП. Система реализует в реальном масштабе времени задачи сбора, обработки и представления информации диспетчеру для обеспе-

чения ритмичности работы технологических линий по выпуску готовой продукции на консервном заводе и оперативного управления его службами.

§ 15.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИВА

Развитие систем управления пивоваренным производством осуществляется в направлении от локальных автоматических систем управления отдельными технологическими процессами к автоматизированным системам управления агрегатами (участками, цехами), всем технологическим процессом (АСУ ТП) и созданию интегрированных автоматизированных систем управления предприятием (ИАСУ). Разработка и эксплуатация перечисленных систем управления обеспечиваются серийно выпускаемыми отечественной приборостроительной промышленностью средствами автоматизации и вычислительной техники, удовлетворяющими требованиям пивоваренного производства.

В системах управления предусматриваются создание АСУ ТП производства солода и пива (на уровне решения основных задач); разработка и внедрение автоматизированной системы управления производственным объединением, отдельными предприятиями и АСУ производственно-хозяйственной деятельностью объединения.

В АСУ ТП пивоваренного завода использованы основные достижения предыдущих ступеней развития систем управления технологическими объектами: локальной автоматизации; систем централизованного контроля и управления, построенных на базе вычислительной и микропроцессорной техники. Разработке АСУ ТП пивоваренного завода предшествовало решение вопросов централизации управления производством и применения средств вычислительной техники в сфере автоматизированного контроля и управления. Вычислительные машины применяются как для программного управления процессами затирания, осахаривания, кипячения сусла, так и для брожения и дображивания с периодической мойкой и дезинфекцией танков. Программы устанавливает диспетчер-технолог.

В области диспетчерского управления производством пива большое число данных относится к АСУ комплексами: планирование сбыта, розлив, склад тары, экспедиция готовой продукции, доставка продукции заказчикам, расчеты с ними и оформление платежно-отчетной и налоговой документации. Диспетчер с помощью ЭВМ выбирает программу подачи продукции на розлив согласно имеющимся либо прогнозируемым заказам; ведет учет тары, отпущенной продукции; дает указания о пуске и остановке линий розлива и подает заявки на передачу в роз-

лив тех или иных сортов пива; рассчитывает рациональные маршруты доставки пива и вывоза тары.

В пивоваренной подотрасли разработаны типовое техническое задание на создание АСУ ТП, математические модели основных технологических процессов и отдельные подсистемы АСУ ТП, использующие вычислительную технику, которые позволяют внедрять АСУ ТП на пивоваренных заводах. В качестве основного критерия управления технологическими процессами производства пива принимается суммарная прибыль Π_r , достигаемая за фиксированный период T реализации технологического процесса. Указанный критерий зависит от следующих факторов: качества и количества сырья, технологических потерь, мощности и состояния оборудования, технологического регламента; затрат пара, электроэнергии, топлива, холода; затрат рабочей силы в сфере производства; планового задания на выработку продукции в ассортименте. Таким образом, принятый критерий управления является обобщенным, охватывает все сферы производства пива.

Выбор прибыли как критерия управления предопределяет интенсификацию технологического процесса в условиях технических, технологических, плановых ограничений и ограничений по качеству полупродуктов и готовой продукции. Поэтому принятый критерий позволяет определить оптимальную производительность каждого технологического участка Y_{*k} , а его декомпозиция позволяет сформулировать задачу управления для этих участков. Целью АСУ ТП является достижение максимума основного критерия эффективности управления:

$$\Pi_r = \max \sum_{j=0}^T \sum_{k=1}^m |C^0 - C(Z^{jk}, Y^{jk}, \Delta V_j^k, X^k, F^k)| mY^0 \quad (15.4)$$

при ограничениях:

связанных с пропускной способностью оборудования

$$\begin{aligned} Y_{\max}^{jk} &\geq Y^{jk} \geq 0; \\ V_{\max}^{jk} &\geq V^{jk}; \\ F_{\max}^k &\geq F^k \geq F_{\min}^k; \end{aligned} \quad (15.5)$$

плановых по выпуску пива за период T

$$\sum_{j=0}^T \sum_{k=1}^m Y_{pT}^0 \geq Y_{pT}^0;$$

по качеству продукта

$$K(Y^{jk}) \geq K_p.$$

где P_T — прибыль от реализации за период T , руб.; C — себестоимость пива, руб/дал; k — индекс технологического участка; C^0 — оптовая цена пива, выработанного j -й сменой, руб/смену; Z^h — затраты производства k -го участка, руб/смену; Y^h — выпуск продукта k -м участком, дал/смену; V_j^h — объем полупродукта, запасаемого на k -м участке; ΔV_j^h — изменение количества продукта, запасаемого k -м участком, дал; X^h — вектор неуправляемых параметров процесса k -го участка; F^h — вектор управляемых процессов k -го участка; Y_{opt}^0 — плановый выпуск пива за период T , дал; K_p — вектор качества продукта; K — значение вектора K_p , соответствующего стандарту; j — индекс смены; m — индекс варки.

Исходя из поставленной цели, основная задача АСУ ТП формулируется следующим образом. Из пространств допустимых управлений $U(F, Y)$ необходимо выбрать такое $U_*(F_*, Y_*)$, которое обеспечивает максимум функции (15.4) при ограничениях (15.5). Указанная задача приводится методом декомпози-

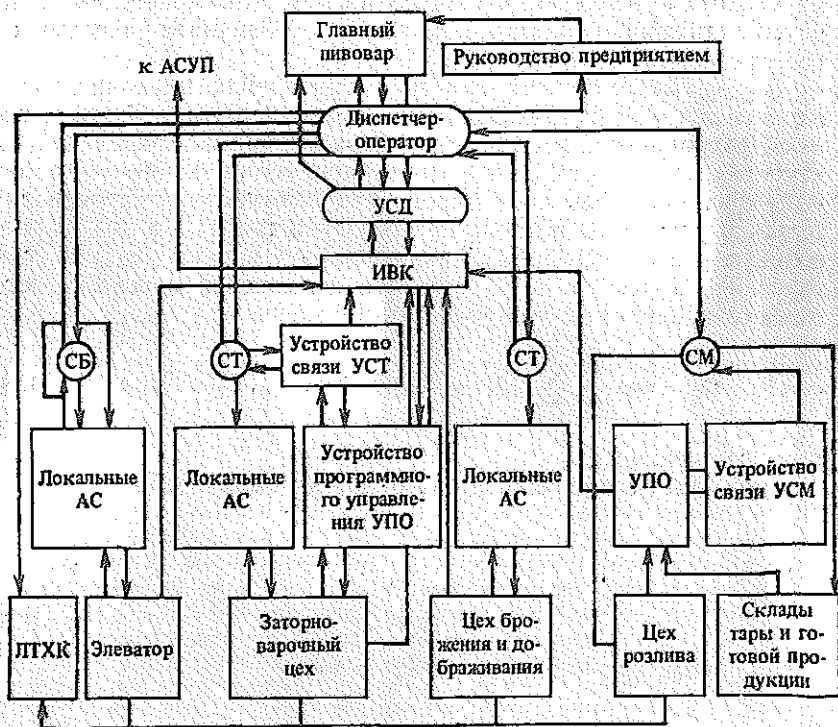


Рис. 15.6. Организационная структура АСУ ТП производства пива:

УСД — устройство связи с диспетчером; ИБК — информационно-вычислительный комплекс; СМ — сменный мастер; СТ — сменный технолог; СБ — сменный бригадир; ЛТХК — лаборатория технологического контроля; УПО — устройство предварительной обработки информации; УСТ — устройство связи со сменным технологом; УСМ — устройство связи с мастером

ции к задаче оперативного планирования и управления производительностью цехов и комплексу задач управления технологическими процессами отдельных участков производства.

В общем виде задача оперативного планирования и управления производительностью заключается в выборе из пространства производительностей Y^k таких производительностей цехов и участков Y_{*}^k , которые удовлетворяли бы выражению (15.4) при ограничениях (15.5), а задачи управления каждым технологическим участком сводятся к выбору из пространства управлений F^k таких F_{*}^k , при которых достигается минимум производственных затрат на данном участке при ограничениях (15.5) и производительности участка не меньше чем Y^k . Для решения указанных задач схема реализует информационные функции, включающие централизованный контроль за состоянием технологического объекта управления, вычислительные и логические операции информационного характера, управляющие функции.

Для пивоваренного производства принята двухуровневая АСУ ТП (рис. 15.6) на верхнем уровне советующего типа с элементами управляющих функций. Реализация рекомендаций центральной ЭВМ по оптимальному управлению выполняется локальными автоматическими системами управления, базирующимися на серийных средствах автоматизации, вычислительной и микропроцессорной техники. На верхнем уровне управление обеспечивают главный пивовар завода и сменный диспетчер-оператор. Задачи оптимального управления решаются с помощью УВК с разработкой расчетных показателей и программы работ для сменных диспетчеров-операторов на весь планируемый период.

При несогласованности расчетных показателей с фактическими решения сменного диспетчера должны обеспечить максимизацию целевой функции. Одновременно с помощью УВК проводится анализ влияния факторов на отклонение значений функции эффективности от расчетной, формируются рекомендации по автоматизированному управлению продуктовыми потоками пивоваренного производства в целом и управлению технологическими процессами отдельных участков завода. На основе рассчитанных данных сменный диспетчер дает указания персоналу заторно-варочного цеха по выбору рецептуры и программы затирания, обменивается информацией со сменным мастером цеха розлива и передает ему указания о режиме работы цеха, рассчитывает и передает бригадиру элеватора оптимальные маршруты приемки зерноприпасов.

Подсистемы нижнего уровня включают следующие локальные системы автоматизации:

элеватор — управление операциями приема и отпуска зер-

на, автоматическое управление поступлением, хранением и выдачей в производство ячменя и солода, а также контроль материальных потоков на входе и выходе элеватора и конкретных силосов;

заторно-варочный цех — управление подачей и дроблением ячменя и солода, контроль плотности готового сусла, программное управление затиранием и кипячением сусла, контроль и управление процессом фильтрования, контроль и регулирование расхода и температуры воды, расхода и давления пара, контроль материальных потоков на выходе цеха;

цех брожения и дображивания — управление процессами осветления и охлаждения сусла, контроль и управление процессами главного брожения, охлаждения молодого пива, дображивания и фильтрования готового пива, контроль уровня в емкостях, материальных потоков на входе и выходе цеха, управление операциями контроля качественных параметров, перекачки продукта, мойки и дезинфекции емкостей и установок;

цех розлива в бутылки и автоцистерны — управление движением тары, продукта, готовой продукции по складу оборотной тары, линиям бутылочного розлива, складу готовой продукции, автоматический учет тары, бутылочной продукции в соответствии с текущими плановыми заданиями; автоматический учет длительности простоев конкретных видов технологического оборудования; управление температурным режимом мойки бутылок;

холодо-, воздухо- и теплоснабжение — автоматическую стабилизацию температуры в помещениях технологических участков, автоматическую защиту агрегатов и т. д.

На нижнем уровне АСУ ТП управление ведут подчиненные диспетчеру сменные бригадир элеватора, мастер заторно-варочного цеха, технолог цеха брожения и дображивания, мастер цеха розлива. С их участием осуществляется определенная последовательность решения задач на каждом уровне управления АСУ ТП завода.

§ 15.8. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТАБАЧНОГО ЛИСТА

Автоматизация технологических процессов переработки табачного листа проводится в сочетании с техническим перевооружением табачно-ферментационных заводов, включающим создание и внедрение прогрессивной технологии и высокопроизводительного оборудования. В табачной подотрасли различают два типа предприятий, которые как объекты автоматизации различаются по виду выпускаемой продукции: табачно-ферментационные заводы, выпускающие в виде готовой продукции табак с заданными качественными показателями; табачные фабрики,

изготавливающие курительные изделия (сигареты, папиросы).

Ферментация, как последний процесс послеурожайной обработки, является основным технологическим процессом табачно-ферментационного производства, определяющим качество готового продукта, величину потерь сухого вещества табачного сырья, расход энергии на обработку табака. В табачно-ферментационном производстве отсутствуют отработанные рациональные системы автоматического управления ферментацией табака. Это связано с недостаточной отработанностью технологии и оборудования табачно-ферментационных производств, а также методов контроля за ходом технологического процесса.

Перспективным является создание систем автоматического управления процессом ферментации табака по таким параметрам, как температура, влажность табака и воздуха, интенсивность выделения диоксида углерода.

Процесс ферментации табака состоит из трех периодов. Первый период — прогревание табачного сырья до требуемой температуры (применяется один из температурных режимов: 50, 55, 60, 70°C) — осуществляется путем равномерного подъема температуры воздуха в ферментационных камерах. Относительная влажность воздуха в камерах в первый период поддерживается в пределах 40—80% в зависимости от влажности табака.

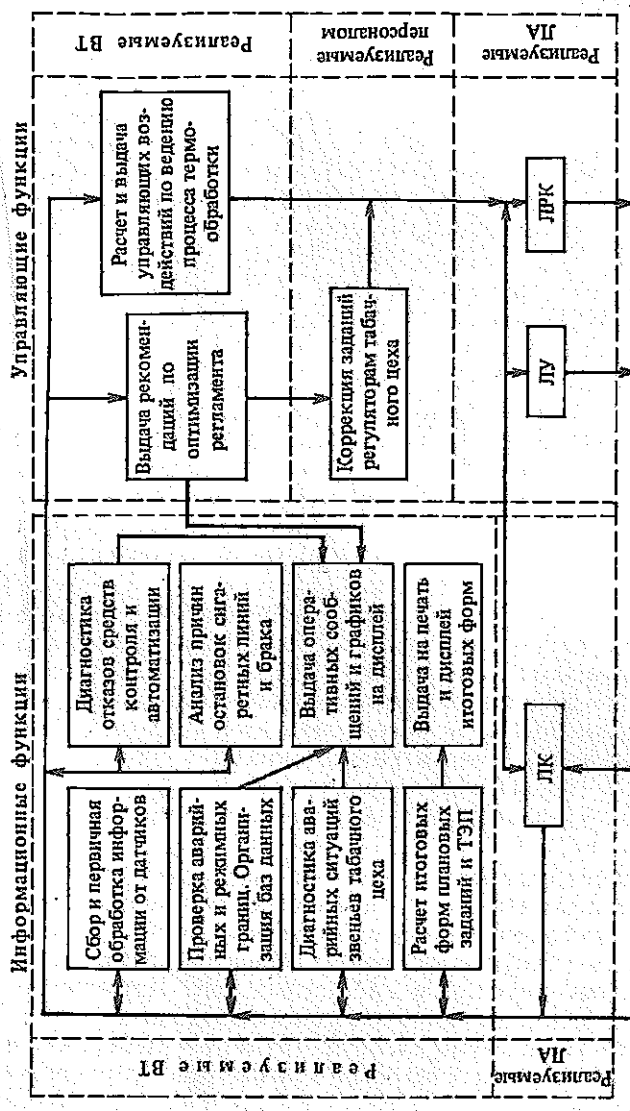
Второй период — развитие процесса ферментации — характеризуется формированием товарных свойств табака (цвета, аромата, вкуса, эластичности). Температура воздуха в камере поддерживается на постоянном уровне, а относительная влажность табака — в пределах 16—18%. Окончание второго периода определяется по снижению концентрации диоксида углерода после достижения его максимального значения.

Третий период — охлаждение табака после ферментации до 25—30°C.

На табачно-ферментационных предприятиях внедряются системы локальной автоматизации, выполненные на традиционных технических средствах серийного производства. Система локальной автоматизации табачно-ферментационного производства предусматривает автоматическое регулирование температуры табака в процессе ферментации и влажности воздуха в ферментационной камере. Этой системой осуществляются измерение и регистрация основных технологических параметров (температу-

Рис. 15.7. Схема функциональной структуры АСУ ТП производства курительных изделий:

ЛК — локальный контроль; ЛУ — локальное управление; ЛРК — локальное регулирование и контроль



Участок вакуум-увлажнения		Участок доувлажнения	Участок смешивания листового табака	Барaban термообработки резанного табака	Силосы для резанного табака	Сигаретные линии	Упаковочные агрегаты
Табачный цех				Сигаретный цех			

ры воздуха в ферментационной камере; температуры табака в процессе ферментации; относительной влажности воздуха в ферментационной камере; объема диоксида углерода, выделяющегося из табака; давления пара, поступающего на обогрев ферментационной камеры), а также автоматическая сигнализация работы вентилятора кондиционера, водяного насоса и окончания ферментации табака.

Технологический процесс производства курительных изделий на табачных фабриках определяет два основных вида производства: подготовку табака к изготовлению папирос и сигарет и их изготовление и упаковку. Каждый вид производства, как и вся фабрика в целом, имеет цеховую структуру. Табак подготавливают в сырьевом и табачном цехах, курительные изделия производят в сигаретном и папиросно-сигаретном цехах.

Технологический процесс подготовки табака к производству курительных изделий состоит из расщепления листового табака, его увлажнения на паротермических установках и резки с последующей обработкой в пневморазрыхлительных установках. Производственный процесс изготовления курительных изделий как объект управления обладает дискретным характером и сопряжен с использованием высокопроизводительного неритмично работающего оборудования, значительными колебаниями показателей состояния оборудования, высокой стоимостью сырья, отклонениями от нормальных значений показателей расхода сырья и бумажных материалов на единицу продукции.

Отсутствие универсальных средств непрерывного контроля ряда важных показателей при производстве сигарет и папирос обусловило возможность использования ВТ только в информационно-советующем режиме, представляющем собой первую стадию АСУ ТП производства в целом (рис. 15.7).

Функции АСУ ТП производства курительных изделий на базовой табачной фабрике реализуются двухуровневой структурой. К нижнему уровню управления отнесены локальные системы автоматизации по подготовке табака к производству сигарет, осуществляющие автоматический контроль, дистанционное управление исполнительными механизмами и регулирование технологических параметров при вакуум-увлажнении, дополнительном увлажнении листового табака и сушке резаного табака.

Локальные системы автоматизации нижнего уровня выполнены на серийно выпускаемых промышленностью приборах и средствах автоматизации. На базовой табачной фабрике (имеется техническая документация для тиражирования на табачных фабриках подотрасли) внедрены и эксплуатируются АСУ ТП нижнего уровня в следующем объеме: локальная система

контроля и управления барабаном термообработки; локальная система контроля и управления барабаном доувлажнения; локальная система контроля и управления вакуум-увлажнительной установкой; автоматический контроль работы силосов листового и резаного табака.

На верхнем уровне АСУ ТП табачной фабрики решаются следующие задачи: сбор, обработка и представление оперативной информации о производственной обстановке в табачном и сигаретном цехах; централизация контроля и управления режимными параметрами процесса подготовки табака к производству; анализ ритмичности работы всего комплекса оборудования табачного цеха и сигаретно-упаковочных линий; учет и контроль выработки продукции по линиям и бригадам; учет и контроль расхода материальных ресурсов (сигаретной бумаги, бобин с фольгой и целлофаном); расчет ТЭП работы фабрики и представление оперативно-производственной информации на средства отображения и печати.

В качестве критерия управления взята прибыль предприятия от реализации готовой продукции, рассчитываемая по формуле (7.1). Увеличение прибыли достигается за счет применения современных методов и средств контроля работы и состояния оборудования, оперативности управления производственным процессом и осуществления его в ритме производства.

Основными требованиями, предъявляемыми к АСУ ТП указанного класса, являются своевременность решения необходимых задач и выдача информации для принятия решений. Время, затрачиваемое на решение задач в соответствии с алгоритмом управления, представляется в виде суммы следующих компонентов:

$$T_{\text{упр}} = t_{\text{обр}} + t_{\text{оц}} + t_{\text{пр.реш}} + t_{\text{п.з}} + t_{\text{исп.реш}}, \quad (15.6)$$

где $t_{\text{обр}}$ — время, необходимое для получения и обработки данных о состоянии производственного процесса и оборудования; $t_{\text{оц}}$ — время, затрачиваемое на уяснение задачи и оценку обстановки; $t_{\text{пр.реш}}$ — время, необходимое для принятия решения по локализации нарушения хода производства; $t_{\text{п.з}}$ — время, затрачиваемое на постановку задач; $t_{\text{исп.реш}}$ — время, затрачиваемое на выполнение поставленных задач.

Путем выполнения системой информационных функций реализуются задачи централизованного контроля и расчета ТЭП производства курительных изделий, на основе которых административно-управленческий персонал фабрики выполняет функции управления.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким путем решается проблема измерения содержания полезных компонентов в растительном сырье?
2. Что является целевой функцией АСУ ТП свеклосахарного завода?

3. Охарактеризуйте структуру АСУ свеклосахарного завода. Какие подсистемы входят в состав АСУ ТП верхнего и нижнего уровней?
4. Какой показатель используется в качестве критерия управления АСУ ТП маслоэкстракционного завода и как достигается поставленная цель управления?
5. Охарактеризуйте АСУ ТП мукомольного завода, ее основную структуру и выполняемые функции.
6. Какие задачи решает автоматизация хлебопекарного производства?
7. В каком объеме автоматизируются предприятия, перерабатывающие плодовоовощные культуры, и какие проблемы необходимо решить для развития автоматизации?
8. Как сформулирована основная задача АСУ ТП пивоваренного завода, исходя из поставленной цели?
9. Какой объем автоматизации внедряется на табачно-ферментационных заводах и табачных фабриках?

Глава 16

НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

§ 16.1. ОЦЕНКА И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ АСУ ТП

Надежность АСУ ТП — свойство системы выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных показателей в заданных пределах при заданных условиях эксплуатации. Надежность АСУ ТП является комплексным свойством, включающим безотказность, ремонтпригодность и долговечность. Решение вопросов, связанных с установлением и обеспечением необходимого уровня надежности (выбора номенклатуры показателей надежности, задание норм надежности, выбор методов оценивания и повышения надежности), осуществляется на разных стадиях создания и эксплуатации АСУ ТП.

Анализ показателей надежности АСУ ТП осуществляют по ее составляющим — безотказности, ремонтпригодности и долговечности. При этом требования к безотказности и ремонтпригодности АСУ ТП задают соответственно по отдельным функциям АСУ ТП и при необходимости — по отдельным видам отказов этих функций, а требования к долговечности АСУ ТП — по отдельным подсистемам и АСУ ТП в целом.

Для нормирования требований к безотказности и ремонтпригодности АСУ ТП устанавливают перечень функций и видов их отказов, по которым регламентируют требования надежности, а также критерии этих отказов. При установлении для некоторой функции нескольких видов отказов критерий отказа должен быть сформулирован для каждого из них. Общий порядок оценки и контроля надежности АСУ ТП осуществляется в соответствии с ГОСТ 24.701—86.

Требования к надежности АСУ ТП устанавливаются по от-

дельным составляющим ее при помощи единичных показателей, а также по нескольким составляющим совместно при помощи комплексных показателей. Показатели безотказности и ремонтпригодности АСУ ТП выбираются в зависимости от типов выполняемых функций (непрерывные, дискретные или непрерывно-дискретные).

Для непрерывных и непрерывно-дискретных функций применяются следующие основные показатели: безотказности — вероятность безотказного выполнения i -й функции в течение заданного времени $t — P_i(t)$; ремонтпригодности — среднее время восстановления способности АСУ ТП к выполнению i -й функции ($T_{вр}$); комплексный показатель, характеризующий совместно безотказность и ремонтпригодность, — коэффициент оперативной готовности i -й функции ($K_{ог i}$).

Для дискретных функций основным показателем безотказности является вероятность успешного выполнения заданной процедуры по запросу R_i (с соблюдением требований к своевременности, безошибочности и точности), основным показателем долговечности — установленный срок службы i -й подсистемы или АСУ ТП в целом ($T_{сл.у i}$). Показатель долговечности означает, что в течение указанного срока службы не должна возникать потребность в реконструкции i -й подсистемы или АСУ ТП в целом.

Оценка надежности АСУ ТП осуществляется с учетом надежности технических средств, а также содержания и структуры алгоритмов и программ. При оценке надежности реализации каждой функции АСУ ТП представляется как выполнение совокупности действий по переработке информации, подчиненных определенному алгоритму и обеспечиваемых управляющим вычислительным комплексом (УВК) и каналами локальных автоматических систем (КЛС), которые построены на базе средств измерения и автоматизации (СИА).

Поскольку отказы функций, вызванные отказами средств вычислительной техники, и отказы, обусловленные отказами СИА, являются независимыми событиями, вероятность безотказного выполнения некоторой i -й функции оценивают следующим образом:

$$P_{\Phi i}(t) = P_{УВК i}(t) P_{КЛС i}(t), \quad (16.1)$$

где $P_{УВК i}(t)$ — вероятность безотказного выполнения в течение времени t совокупности информационно-управляющих программ (задач), реализуемых УВК и обеспечивающих выполнение i -й функции; $P_{КЛС i}(t)$ — вероятность безотказного выполнения в течение времени t действий по переработке информации, реализуемых КЛС и обеспечивающих выполнение i -й функции.

Исходными данными для расчета показателей $P_{УВК i}(t)$ и $P_{КЛС i}(t)$ служат показатели безотказности для соответствующих

компонентов, являющихся в данном случае элементарными и обеспечивающих выполнение i -й функции: показатели $P_{увкiz}(t)$ (где k — номер некоторой задачи) и $P_{клси}(t)$ (где l — номер канала локальной автоматической системы, построенной на базе СИА).

Исходные данные для получения оценок показателей $P_{увкiz}(t)$ и $P_{клси}(t)$ включают в себя априорную информацию (данные о надежности аппаратурных компонентов УВК и КЛС, критерии отказов и т. п.) и данные, получаемые в процессе эксплуатационных испытаний АСУ ТП.

Оценки надежности включают следующие этапы: подготовительные работы, экспериментально-статистические исследования, анализ полученных результатов, разработка рекомендаций по доработке системы.

Подготовительные работы. На этом этапе осуществляются сбор и обработка априорной информации, характеризующей особенности структуры системы и показатели надежности ее компонентов, а также подготовка системы к подконтрольной эксплуатации. Подготовительные работы, связанные со сбором и обработкой априорной информации, включают структурный надежность-функциональный анализ АСУ ТП, сбор данных о надежности компонентов системы, режимах и условиях функционирования и режимах обслуживания АСУ ТП. В результате структурного надежность-функционального анализа строят надежность-функциональные схемы (НФС) для каждой из функций системы, требования к надежности выполнения которых установлены в Техническом задании на создание АСУ ТП.

Для построения НФС (рис. 16.1) каждому из реализующих

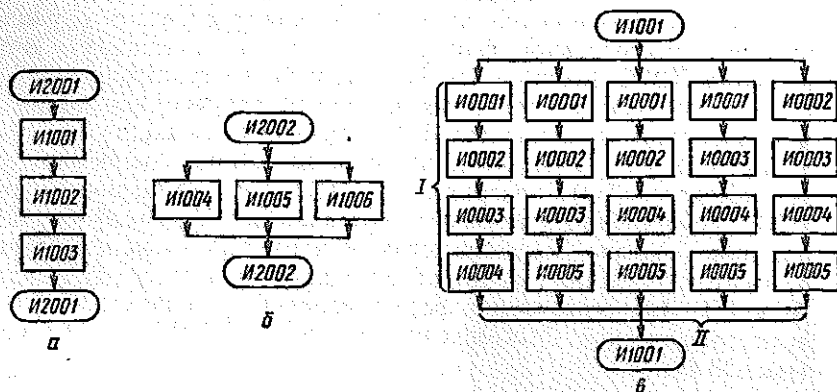


Рис. 16.1. Структуры надежность-функциональных схем:

а — последовательная; б — параллельная; в — мажоритарная (m -безотказная) с $n=5$, $m=2$ [I — $(n-m+1)$ простых функций; II — $(n-m+1)$ последовательных ветвей]. Здесь n — число элементов; m — число параллельных ветвей

функцию элементов ставится в соответствие узел графа; ребра же, соединяющие узлы, соответствуют надежно-функциональным связям, существующим между элементами. При построении НФС учитывают возможность разных видов отказов одной и той же функции, по отношению к которой НФС может быть различна. В этих случаях НФС строят для каждого вида отказов.

Под элементами в зависимости от степени декомпозиции могут пониматься средство измерения и автоматизации, канал локальной автоматической системы, задача АСУ ТП, функция АСУ ТП, составная функция АСУ ТП.

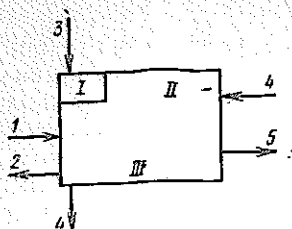
В зависимости от критерия отказа можно выделить три основных типа структур НФС: последовательная, параллельная, мажоритарная* (m -безотказная). Последовательная структура имеет место, когда отказ любого из элементов, реализующих функцию, приводит к отказу функции; параллельная — при наличии резервирования, когда к отказу функции приводит лишь совместный отказ всех реализующих ее элементов; мажоритарная (m -безотказная) — при наличии резервирования, когда критерием отказа функции является отказ определенного числа (m из n) реализующих ее элементов без указания конкретных совокупностей элементов, отказ которых приводит к отказу функции.

Возможными являются также и сочетания перечисленных структур, наиболее распространенными из которых являются параллельно-последовательные и последовательно-параллельные. Упомянутые структуры могут быть выделены как для простых, так и для составных функций АСУ ТП. Для простых функций элементами НФС являются компоненты АСУ ТП, для составных — составляющие их простые или составные функции, причем для составной функции r -го ранга элементами НФС являются НФС функции $(r-1)$ -го или более низких рангов.

Для получения априорных исходных данных, необходимых для определения показателей безотказности выполнения УВК задач АСУ ТП [$P_{увк\ i\ k}(t)$], проводится анализ особенностей технического (ТО), программного (ПО) и информационного (ИО) обеспечений системы и составляется формализованное описание состава, характеристик и характера взаимодействия элементов указанных видов обеспечения при выполнении задач АСУ ТП. Для составления формализованного описания используют графический язык описания структур ТО-ПО-ИО системы (рис. 16.2).

* От французского *majoritaire* — большинство, основывающаяся на большинстве.

Рис. 16.2. Ключевой блок описания структур ТО-ПО-ИО системы:



I — приоритет; II — номер программы и подсистемы; III — название программы; 1, 2 — устройства ввода-вывода соответственно; 3 — программы, запускающие данную программу; 4 — программы, запускаемые данной программой; 4, 5 — входные и выходные файлы соответственно

Экспериментально-статистические исследования*. Целями этих исследований являются определение временных характеристик выполнения УВК функциональных задач АСУ ТП; определение характеристик потоков перемежающихся отказов (сбоев) аппаратуры УВК АСУ ТП и регистрация внезапных отказов элементов КТС АСУ ТП; сбор и обработка экспериментальных данных, необходимых для оценивания показателей надежности КЛС [$P_{\text{КЛС}}(t)$]; сбор и первичная обработка данных об отказах функций АСУ ТП.

Для определения временных характеристик выполнения УВК функциональных задач АСУ ТП используют пакет программных модулей (ППМ) «Оценивание фактических затрат процессорного времени УВК при определении характеристик надежности АСУ ТП», который обеспечивает оценивание загрузки ЭВМ с учетом дисковых операций, загрузки процессора ЭВМ, распределения загрузки ЭВМ между задачами АСУ ТП.

Средние продолжительности выполнения УВК системных и потребительских задач определяются на основании данных о загрузке по формуле

$$\bar{T}_i = \frac{tZK_i}{S_i},$$

где $\bar{T}_i$ — средняя продолжительность выполнения i -й задачи; t — продолжительность исследования загрузки с помощью ППМ; Z — коэффициент загрузки ЭВМ выполняемыми задачами; K_i — коэффициент загрузки ЭВМ, создаваемой некоторой i -й задачей; S_i — число выполнений i -й задачи за время t .

Сбор и обработка экспериментальных данных, необходимых для оценки показателей надежности КЛС $P_{\text{КЛС}}(t)$, позволяют получить следующие показатели: для каналов автоматической защиты, сигнализации и контроля — коэффициент оперативной готовности ($K_{\text{ог}}$), для каналов регулирования (стабилизации) — параметр потока «динамических» отказов $\omega_{\text{дин}}$ и параметр потока «статических» отказов $\omega_{\text{стат}}$.

* Программа экспериментальных исследований, порядок и методика регистрации внезапных отказов КТС АСУ ТП, сбор и первичная обработка об отказах функций АСУ ТП осуществляются в соответствии с ОСТ 18 428—84.

Анализ полученных результатов. Целью работ этого этапа является оценивание на основании априорных и экспериментально-статистических данных показателей, характеризующих фактически достигнутый уровень функциональной надежности. Для уточнения априорных исходных данных о надежности компонентов системы на основании результатов экспериментальных исследований используют метод непрерывного объединения информации. Априорная информация о надежности компонентов при этом должна быть приведена к форме вероятности безотказной работы $P(t)$.

Построение имитационной модели функционирования УВК АСУ ТП и ее исследование в целях оценки показателей надежности выполнения функциональных задач АСУ ТП $P_{\text{УВК}}(t)$ осуществляют с использованием программного комплекса «Оценивание характеристик надежности функционирования УВК АСУ ТП методом имитационного моделирования (REVAL)» (Инв. № 5011 отраслевого фонда алгоритмов и программ).

При построении имитационной модели используется представление УВК в виде системы массового обслуживания (СМО), в которой потоки задач и потоки сбоев и отказов аппаратуры УВК соответствуют входным потокам заявок СМО, аппаратура УВК — обслуживающим устройствам СМО, а механизм диспетчеризации оперативной системы — дисциплинам обслуживания заявок, принятым в СМО. По каждой из моделируемых задач программный комплекс REVAL позволяет получить в форме таблиц статистические данные по следующим показателям, включающим четыре вида отказов:

запаздывание при несвоевременности выполнения задачи;

наработка между отказами «несвоевременность выполнения задачи»;

наработка между отказами с длительным восстановлением (для восстановления необходим ремонт отказавшего устройства) и время восстановления после таких отказов;

наработка между отказами с кратковременным восстановлением (для восстановления достаточно заменить отказавшее устройство нагруженным или ненагруженным резервом) и время восстановления после таких отказов;

наработка между перемежающимися отказами (сбоями);

продолжительность прерываний, вызванных сбоями.

По каждому из перечисленных показателей автоматически рассчитываются и выводятся на печать: число регистраций случайной величины; среднее значение; среднеквадратичное отклонение, а также ряд дополнительных данных.

Оценки вероятности безотказной работы по отношению к отказам каждого из видов могут быть получены исходя из интер-

прегации результатов моделирования как результатов биномиальных * испытаний:

$$P_{\text{УВК}ik}^{(j)}(t) = R_{\text{УВК}ik}^{(j)} M_{ik}^{(t)}; \quad (16.2)$$

$$R_{\text{УВК}ik}^{(j)} = 1 - \frac{m_{ik}^{(j)}(\tau)}{N_{ik}(\tau)}, \quad (16.3)$$

где $P_{\text{УВК}ik}^{(j)}(t)$ — вероятность безотказного выполнения в течение времени t по отношению к отказам j -го вида k -й задачи при реализации i -й функции АСУ ТП; $R_{\text{УВК}ik}^{(j)}$ — вероятность однократного безотказного выполнения указанной задачи по отношению к отказам j -го вида; $M_{ik}(t)$ — математическое ожидание числа выполнений указанной задачи за время t ; $m_{ik}^{(j)}(\tau)$ — число отказов j -го вида, зафиксированных за время модельных испытаний; $N_{ik}(\tau)$ — заданное число выполнений указанной задачи за время модельных испытаний (для спорадических задач — математическое ожидание этого числа); τ — продолжительность модельных испытаний по внутреннему таймеру модели.

Если число отказов достаточно велико, а соотношение среднего значения и среднеквадратичного отклонения наработки между отказами позволяет предполагать экспоненциальность закона распределения, то для определения показателей $P_{\text{УВК}ik}^{(j)}(t)$ могут быть использованы взятые из таблиц входных данных средние значения наработки между отказами $T_{\text{УВК}ik}^{(j)}$:

$$P_{\text{УВК}ik}^{(j)}(t) = \exp(-t/T_{\text{УВК}ik}^{(j)}). \quad (16.4)$$

При условии независимости упомянутых четырех видов отказов интегральный показатель может быть определен по формуле

$$P_{\text{УВК}ik}(t) = \prod_{j=1}^4 P_{\text{УВК}ik}^{(j)}(t). \quad (16.5)$$

Для КЛС возможны отказы двух основных видов: внезапные (устойчивые и перемежающиеся) и постепенные. В большинстве случаев отказы этих видов являются взаимонезависимыми случайными событиями. Для определения показателей $P_{\text{КЛС}ii}(t)$ в общем случае используют формулу

$$P_{\text{КЛС}ii}(t) = P_{ii}^{(1)}(t)P_{ii}^{(2)}(t)P_{ii}^{(3)}(t), \quad (16.6)$$

где $P_{ii}^{(1)}(t)$ — вероятность безотказной работы (ВБР) по отношению к устойчивому внезапному отказу; $P_{ii}^{(2)}(t)$ — ВБР по отношению к перемежающемуся внезапному отказу; $P_{ii}^{(3)}(t)$ — ВБР по отношению к постепенному отказу.

* Алгебраических выражений, представляющих собой сумму или разность двух одночленов,

Показатели $P^{(1)}_{ii}(t)$ следует рассчитывать на основании данных о надежности технических средств, входящих в состав канала, которые содержатся в технической документации заводов-изготовителей или в справочниках. Показатели $P^{(2)}_{ii}(t)$ и $P^{(3)}_{ii}(t)$ рассчитывают на основании данных, собранных в процессе экспериментально-статистических исследований.

Для измерительных каналов

$$P^{(2)}_{ii}(t_u) = 1 - \frac{m_{ii}(t_u)}{n_{ii}(t_u)}, \quad (16.7)$$

где $m_{ii}(t_u)$ — число проверок, в ходе которых был зафиксирован выход погрешности измерения за допуск; $n_{ii}(t_u)$ — число проверок канала за время испытаний (опытной эксплуатации) t_u .

Показатели $P^{(2)}_{ii}(t)$ для измерительных каналов не определяются ввиду сложности получения исходных данных и незначительного влияния единичных перемежающихся отказов измерительных КЛС на эффективность функционирования системы.

Для каналов регулирования (стабилизации)

$$P^{(2)}_{ii}(t) = P^{дин}_{ii}(t) P^{стат}_{ii}(t), \quad (16.8)$$

где $P^{дин}_{ii}(t)$ — ВБР по отношению к перемежающемуся отказу типа «динамический» (самоустраняющийся выход текущего значения регулируемого параметра за допустимые отклонения); $P^{стат}_{ii}(t)$ — ВБР по отношению к перемежающемуся отказу типа «статический» (самоустраняющийся выход усредненного значения регулируемого параметра за допустимые отклонения),

$$P^{дин}_{ii}(t) = e^{-\omega_{дин} t}; \quad P^{стат}_{ii}(t) = e^{-\omega_{стат} t} \quad (16.9)$$

где $\omega_{дин}$ — параметр потока «динамических отказов»; $\omega_{стат}$ — параметр потока «статических отказов».

Показатели $P^{(3)}_{ii}(t)$ для каналов регулирования отдельно не определяются, поскольку их надежность по отношению к постепенным отказам косвенно учитывается показателями $P^{дин}_{ii}(t)$ и $P^{стат}_{ii}(t)$.

Расчет вероятности безотказного выполнения функций АСУ ТП осуществляют по формуле (16.1). Показатели $P_{увк i}(t)$ и $P_{клс i}(t)$ рассчитывают по формулам в зависимости от структуры НФС:

при последовательной структуре (отказ любого из элементов, реализующих функцию, приводит к отказу функции)

$$P_i(t) = \prod_{j=1}^n P_{ij}(t), \quad (16.10)$$

где $P_{ij}(t)$ — вероятность за время t безотказной работы i -го элемента при реализации j -й функции; n — число элементов, участвующих в реализации функции;

при параллельной структуре (к отказу функции приводит лишь совместный отказ всех реализующих ее элементов)

$$P_i(t) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P_{ij}(t)]; \quad (16.11)$$

при мажоритарной (m -безотказной) структуре (к отказу функции приводит отказ определенного числа m из n реализующих ее элементов)

$$P_i(t) = \sum_{j=0}^{m-1} A_{jn}, \quad (16.12)$$

где A_{jn} — коэффициент при Z^n в выражении производящей функции:

$$\varphi_{in}(Z) = \prod_{j=1}^n \{P_{ij}(t) + [1 - P_{ij}(t)] Z\},$$

получаемом при ее представлении в виде номинала.

Для расчета коэффициентов A_{jn} рекомендуется применять ЭВМ.

Возможным является также сочетание перечисленных структур. При этом формула для $P_i(t)$ представляет собой комбинацию формул (16.10)—(16.12).

§ 16.2. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

При несоответствии полученных показателей $P_{\Phi i}(t)$, характеризующих фактически достигнутый уровень функциональной надежности системы заданным требованиям, применяют метод выбора оптимальных мер по обеспечению заданного уровня надежности АСУ ТП. Этот метод основывается на оптимальном использовании имеющейся в системе или дополнительно вводимой избыточности разных видов (в основном временной и информационной) и предусматривает следующее:

построение для каждой из функций системы полиномиальной* модели регрессионного анализа, в которой функция отклика (зависимая переменная) представляет собой некоторую характеристику надежности выполнения функции АСУ ТП, а в качестве факторов используются предположительно влияющие на надежность параметры реализации системой этой функции, уровни которых, в принципе, могут быть изменены;

* Алгебраическое выражение, состоящее из нескольких одночленов, соединенных между собой знаком сложения или вычитания.

определение коэффициентов регрессии и отсеивание мало-значимых факторов;

оптимизация мер по обеспечению требуемой надежности выполнения функций (выбор оптимального набора уровней факторов) по критерию минимум затрат.

При построении регрессионных моделей используют полином первой степени вида

$$\frac{t}{\{-\ln [P_{\Phi i}(t)]\}} = b_{0i} + \sum_{j=1}^{M_i} b_{ji} x_{ji}, \quad (16.13)$$

где b_{0i} — свободный член уравнения регрессии; b_{ji} — коэффициент регрессии; x_{ji} — значения факторов; M_i — число факторов в уравнении регрессии для i -й функции.

При определении коэффициентов регрессии следует учитывать отмеченное в § 16.1 деление совокупности компонентов АСУ ТП, участвующих в реализации отдельной функции, на две подсистемы, каждая из которых характеризуется своим показателем надежности: $P_{\text{КЛС } i}(t)$ и $P_{\text{УВК } i}(t)$.

Для первой подсистемы, выполняющей реализуемые каналами локальных автоматических систем действия по переработке информации, показатели $P_{\text{КЛС } i}(t)$ можно считать независимыми. Это позволяет найти соответствующие коэффициенты регрессии аналитическим путем, не прибегая к эксперименту. Для второй подсистемы, обеспечивающей выполнение информационно-управляющих программ (задач), показатели $P_{\text{УВК } i}(t)$ могут быть достаточно тесно коррелированы между собой. Вследствие этого для определения соответствующих коэффициентов регрессии следует осуществлять многофакторный эксперимент (МФЭ) на имитационной модели функционирования УВК АСУ ТП. Программный комплекс REVAL обеспечивает широкие возможности модификации имитационных моделей и позволяет автоматизировать проведение МФЭ.

Ввиду значительного числа факторов, определяющих надежность выполнения задач, при проведении МФЭ предпочтительно использовать дробные факторные планы. Для первой подсистемы применению уровня фактора соответствует введение структурного резерва или изменение условий эксплуатации, приводящее к повышению надежности технических средств. Для второй подсистемы наряду с этим изменениям уровней могут соответствовать изменения приоритетов задач, периодичности продолжительности и допустимого запаздывания их выполнения, перечня используемых при выполнении устройств и т. д.

Интервалы варьирования факторов на этапе МФЭ определяются физическими возможностями и целесообразностью изме-

При формировании исходных данных для регрессионного анализа следует особым образом интерпретировать результаты опытов для тех задач, которые не отказывали в ходе модельных испытаний. Ввиду невозможности получения точечных оценок вместо них определяют нижние доверительные границы соответствующих показателей надежности по формулам:

для вероятности безотказной работы

$$P_n(t) = \sqrt[\eta]{1 - \gamma}; \quad \eta = \tau/t; \quad (16.14)$$

для наработки на отказ

$$T_n = \tau/r_0, \quad (16.15)$$

где γ — доверительная вероятность (как правило, $\gamma = 0,8$); τ — продолжительность модельных испытаний по внутреннему таймеру модели; r_0 — коэффициент, определяемый в зависимости от значения γ (при $\gamma = 0,8$ $r_0 = 1,61$).

Основным методом, применяющимся при обработке результатов МФЭ и нахождении коэффициентов регрессии, является метод наименьших квадратов. Для проведения вычислений этим методом рекомендуется использовать вычислительную технику и Пакет научных подпрограмм на языке Фортран IV (см. руководство программиста. Книга 1. ПРО.309.004.Д1.1976).

На основании данных регрессионного анализа можно осуществить оптимизацию мер по обеспечению требуемой надежности выполнения функций по критерию минимум затрат. Задача оптимизации состоит в выборе оптимального набора уровней факторов, обеспечивающего соответствие требований к надежности выполнения функций. При этом учитываются затраты материальных ресурсов, времени, живого труда и т. д., требующиеся для преодоления трудностей технического и организационного характера, которые возникают при изменении уровней факторов в требуемом направлении.

Методы получения оценок показателей надежности позволяют на стадии разработки выбрать лучший вариант АСУ ТП. Однако эти методы основаны на весьма обобщенных статистических данных и учитывают только приближенно конкретные особенности технических и программных средств АСУ ТП. Указанные обстоятельства вызывают необходимость дополнять на стадии разработки расчетные критерии оценки надежности другими, в основном качественными критериями и методами, позволяющими повысить надежность проектируемых АСУ ТП.

Можно выделить три стадии АСУ ТП, на которых применяются характерные методы повышения надежности: проектирование, внедрение, эксплуатация. На стадии проектирования АСУ ТП повышение надежности достигается путем улучшения схемных и конструктивных решений. На стадии внедрения АСУ ТП повышение надежности достигается за счет устранения

внешних возмущений путем совершенствования технологии, оборудования и организации производства, механизации трудоемких процессов и сокращения доли ручных операций и т. п. На стадии эксплуатации АСУ ТП основным приемом повышения надежности является организация оптимального (планового) профилактического обслуживания.

§ 16.3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АСУ ТП

Для предприятий пищевой промышленности особенно важным является создание АСУ ТП с высокими показателями безотказности и ремонтпригодности из-за нехватки достаточно подготовленного обслуживающего персонала. Это вызывает необходимость тщательного подхода к вопросам повышения надежности на стадии разработки.

Методы повышения безотказности подразделяются на схемные и конструктивные. Схемные методы обладают большим разнообразием, они обеспечивают повышение надежности АСУ ТП за счет совершенствования принципов построения схем. Наиболее существенным в совершенствовании схем является создание схем, обладающих структурной избыточностью (резервированием) по способу мажоритарной логики (два из трех). Например, существенное повышение надежности обеспечивается указанным способом резервирования микропроцессорной техники (микроконтроллеров), применяемых для управления непрерывными технологическими процессами.

При мажоритарном резервировании три микроконтроллера работают параллельно, используя одинаковые программы и входные сигналы. Выходные сигналы микропроцессорной системы формируются совпадающими с большинством (двумя) аналогичных выходных сигналов микроконтроллеров, входящих в систему. Таким образом, отказ одного из микроконтроллеров не приводит к нарушению управляющей функции микропроцессорной системы в целом (рис. 16.3). Каждый из входных сигналов поступает одновременно на входы трех микроконтроллеров непосредственно (при $V_{вх}=24$ В) либо через устройства сопряжения (УСО). Программы, выполняемые каждым из трех микроконтроллеров, аналогичны. Функции согласования выходов микроконтроллеров с исполнительными устройствами и мажоритарного сравнения и выбора реализованы в выходных УСО.

На рис. 16.4 представлена схема УСО, обеспечивающая работу микропроцессорной системы с мажоритарным резервированием микроконтроллеров. Схема УСО выполнена на элементах серии «Логика-И» и применима при питании модулей выхода микроконтроллеров напряжением 15 В. На схеме УСО одного выхода микропроцессорной системы с использованием

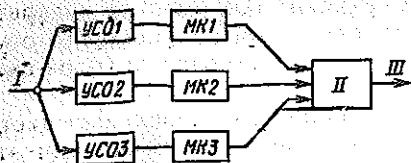


Рис. 16.3. Структурная схема микропроцессорной системы:

I — выходные сигналы; *II* — УСО и мажоритарный элемент; *III* — выходные сигналы

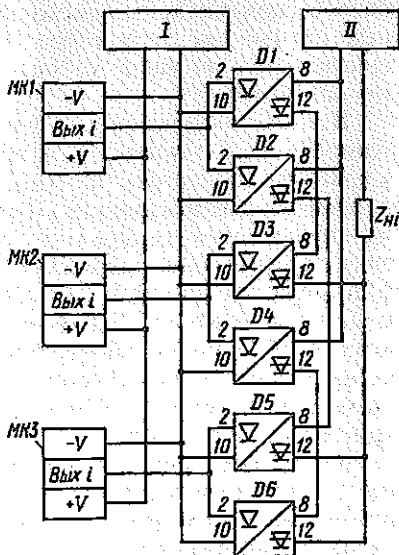


Рис. 16.4. Схема устройства сопряжения:

D1–D6 — интегральные элементы; *МК1–МК3* — разъемы микроконтроллера; *I* — источник питания выходных цепей микроконтроллеров; *II* — источник питания внешних нагрузок

трех микроконтроллеров выполнено с использованием шести элементов и шести усилителей. Номинальное выходное напряжение и сила тока выходной схемы УСО соответствуют номинальным выходным параметрам применяемых в схеме элементов (усилителей). Особенностью приведенной схемы УСО является сохранение работоспособности микропроцессорной системы не только при отказе одного из микроконтроллеров, но и при отказе любой пары элементов (усилителей), подключенных к одному выходу любого из микроконтроллеров. Недостатком схемы является относительно высокая стоимость ввиду применения шести элементов (усилителей) на один вход микропроцессорной системы.

При разработке микропроцессорной системы с мажоритарным резервированием необходимо учитывать, что для правильного формирования выходного сигнала мажоритарного элемента должна быть обеспечена синхронность работы микроконтроллеров, входящих в систему. Однако время выполнения команд (в том числе формирующих выдержки времени), которое определяется внутренней тактовой частотой, неодинаково для разных микроконтроллеров. Поэтому при реализации алгоритмов, включающих несколько последовательных выдержек времени, необходимо принимать дополнительные меры для синхронизации работы микроконтроллеров.

Эффективным средством повышения надежности АСУ ТП является также построение электрических схем управления на

базе бесконтактной электронной техники, например на дискретных логических элементах. Построение схемы управления осуществляется из типовых модулей непосредственно по блок-схеме алгоритма.

В качестве примера на рис. 16.5 приведена небольшая часть блок-схемы алгоритма для решения задачи включения или отключения электромагнитного пускателя электродвигателя технологического механизма. В условных вершинах 1 и 2 алгоритма проверяется контролируемое состояние выключателя (контакт замкнут или разомкнут). В операторных вершинах 4 и 5 формируются команды на включение или отключение электромагнита пускателя. Выходы условных вершин 1 и 2 суммируются в объединяющей вершине 3, представляющей собой логическую схему «или» с соответствующим числом входов. Для запоминания команд в операторных вершинах 4 и 5 применяются триггеры любого типа.

Аппаратная реализация объединяющей вершины 3 алгоритма осуществляется на специально разрабатываемом типовом алгоритмическом модуле (рис. 16.6). Этот модуль имеет вход сигнала алгоритма x_a и вход переменной x_n и два выхода «Да» и «Нет». Единичному логическому значению входной переменной $x_n=1$ соответствует логическая 1 на выходе «Да» и 0 на выходе «Нет». Значению переменной $x_n=0$ соответствует 0 на выходе «Да» и 1 на выходе «Нет».

Логический модуль образует на выходе «Да» логическую функцию «И» над сигналом алгоритма и проверяемой переменной, а на выходе «Нет» — логическую функцию «И» над сигналом алгоритма и инверсией проверяемой переменной. Схемная реализация типового модуля для отрицательной логики обладает большой надежностью, так как активными являются нулевые сигналы и сигнал об обрыве провода на одном из входов.

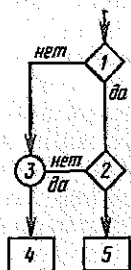


Рис. 16.5. Часть блок-схемы алгоритма устройства управления:

1, 2 — условные вершины; 3 — объединяющая вершина; 4, 5 — операторные вершины

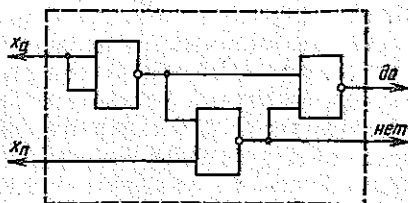


Рис. 16.6. Принципиальная схема типового модуля в базисе «И-НЕТ» для отрицательной логики

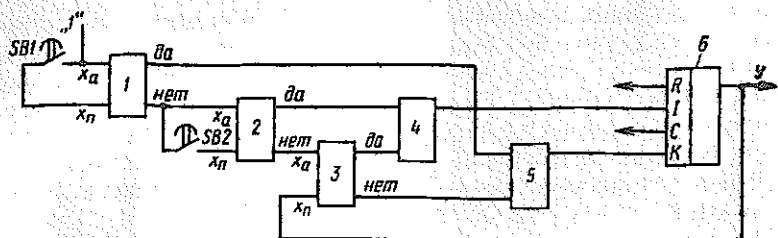


Рис. 16.7. Функциональная схема бесконтактной системы управления:
1—5 — логические модули; 6 — триггер; Y — включение; R — установка; C — сигнализация

аналогичный подаче единичного сигнала, не приводит к ложным действиям в схеме управления.

На функциональной схеме (рис. 16.7) соединение элементов выполняется по блок-схеме алгоритма, в более сложных случаях составляются промежуточные булевы уравнения.

Схема работает следующим образом. В начальный момент времени сигналы $SB1$, $SB2$ и Y имеют уровни логического нуля, так как кнопки управления отпущены и триггер сброшен сигналом установки. Это приводит к появлению уровня логической единицы на выходе «Нет» логического модуля 1. Полученный сигнал поступает на вход алгоритмического модуля 2, что приводит к появлению уровня логической единицы на его выходе «Нет». Аналогично появляется уровень логической единицы на выходе алгоритмического модуля 3, удерживающий триггер в сброшенном состоянии.

При пуске нажатием кнопки $SB2$ уровень логической единицы, поступающей на вход алгоритмического модуля 2, приводит к появлению сигнала логической единицы на его выходе «Да», подающегося на вход алгоритмического блока 4 схемы «ИЛИ» и дальше на вход 1 триггера 6. В результате на выходе триггера 6 появляется уровень логической единицы сигнала Y .

После отпускания кнопки $SB2$ поддерживается уровень логической единицы, так как на вход переменного логического модуля 2 поступает уровень логического нуля, что приводит к появлению уровня логической единицы на его выходе «Нет», поступающего на вход логического модуля 3. На вход переменной этого модуля поступает уровень логической единицы сигнала Y , вследствие чего на его выходе «Да» появляется уровень логической единицы, поступающий на вход модуля 4 «ИЛИ» и дальше на вход 1 триггера 6.

При остановке выходной сигнал Y принимает значение логического нуля, так как нажатием на кнопку $SB1$ уровень ло-

гической единицы поступает на вход x_n модуля 1, на выходе которого «Да» появляется уровень логической единицы, поступающий на вход логического модуля 5 схемы «ИЛИ» и дальше на вход K триггера 6. После отпускания кнопки SBI уровень логического нуля поступает на вход x_n модуля 1, на его выходе «Нет» появляется уровень логической единицы, схема возвращается в исходное состояние и сигнал Y имеет уровень логического нуля.

Аппаратурная реализация схемы позволяет создать устройство управления с повышенной ремонтпригодностью путем разработки набора унифицированных печатных плат, состоящих из следующих функциональных блоков: входов, выходов, логики, памяти, таймеров, управления и контроля. Ремонтпригодность повышается за счет того, что конструктивно блоки выполнены в виде легко заменяемых отдельных печатных плат, устанавливаемых в кассету блочной унифицированной конструкции.

Наиболее существенными направлениями конструктивных методов повышения безотказности являются использование высоконадежных элементов и создание благоприятного режима их работы. При проектировании АСУ ТП используются элементы и детали, выпускаемые промышленностью. Предпочтительны элементы повышенной надежности — бесконтактные логические элементы, герметические магнитоуправляемые контакты и т. п. Порядок применения приборов, средств и элементов должен соответствовать техническим условиям. Облегчение условий и режимов работы аппаратуры значительно (иногда в десятки раз) повышает ее безотказность.

Методы повышения ремонтпригодности предусматривают применение модульно-блочных принципов конструирования. Суть их заключается в том, что элементы схемы, выполняющие одну элементарную функцию (логическая функция, усиление и т. п.), объединяются конструктивно в один обособленный модуль, используемый затем как единое неремонтируемое целое. Объединение в модули и блоки делается таким образом, чтобы число типов блоков и модулей было минимальным. Это позволяет при небольшом числе запасных модулей и блоков иметь стопроцентный резерв.

Блоки подсоединяются к схеме с помощью штепсельных разъемов, что позволяет быстро проводить с блоками необходимые коммутационные операции. Блочное построение систем позволяет при нарушении какой-либо функции управления сравнительно быстро найти отказывающийся блок и заменить его заведомо исправным резервным, т. е. восстановить работоспособность системы. Отказывающийся блок после замены неисправных модулей переводится затем в резервный.

Для контроля исправности и локализации неисправности при

сложных разветвленных системах управления применение только блочно-модульного построения систем оказывается недостаточным. В этих случаях применяют методы технической диагностики; в частности методы тестового контроля.

Алгоритм проверки исправности и поиска мест повреждений реализуется путем контроля выходной реакции схемы на табулированные проверяющие и диагностические тесты, подаваемые на вход схемы с помощью специальных тестеров. После подачи тестового набора сигналов на цифровом табло тестера появляется набор цифр. Если этот набор совпадает с контрольным, схема исправна. Если набор цифр отличается от контрольного, то соответствующий набор находят в диагностическом словаре с указанием места неисправности с точностью до модуля или до блока в зависимости от уровня диагностики.

Машинные анализаторы применяются в целях механизации анализа схем и построения диагностических словарей, а также для исключения ошибок при проектировании. С помощью машинного анализатора могут быть реализованы следующие операции: сравнение двух схем одного принципа действия, но разных исполнений с целью выявить их логическую эквивалентность; определение полной или частичной таблицы состояний заданной комбинационной схемы; нахождение значений выходных переменных последовательностей схемы, соответствующих строкам ее таблицы переходов; определение соответствия логических функций, реализуемых схемами отдельных блоков, заданным функциям; проверка правильности синтеза таблиц контролирующих тестов; вычисление выходных чисел диагностических словарей (упорядоченных совокупностей наборов выходных переменных, соответствующих схемам с повреждениями); определение факта — является ли известная схема отрицанием другой и т. п.

В целях сокращения срока ремонта на стадии разработки должен быть произведен расчет необходимого числа запасных частей, а также необходимых сроков и объема профилактических работ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие свойства АСУ ТП определяет надежность и каковы ее составляющие?
2. Какие показатели безотказности и ремонтпригодности применяются для непрерывных, непрерывно-дискретных и дискретных функций АСУ ТП?
3. По какой формуле оценивается безотказность некоторой i -й функции АСУ ТП?
4. Какие этапы работ осуществляются для оценки надежности АСУ ТП и что они предусматривают?
5. Какие мероприятия выполняются на этапе подготовительных работ?

6. Какие работы выполняются на этапе экспериментально-статистических исследований надежности АСУ ТП; порядок и методы их проведения?
7. Охарактеризуйте порядок и методику анализа и расчета полученных результатов при оценке надежности АСУ ТП.
8. В чем заключается метод выбора оптимальных мер по обеспечению заданного уровня надежности АСУ ТП?
9. Что предусматривается схемными и конструктивными методами для повышения безотказности? Приведите примеры.

Глава 17

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ АСУ ТП

§ 17.1. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТОК АСУ ТП

В пищевой промышленности основным направлением автоматизации технологических процессов является создание АСУ ТП. Эффективность АСУ ТП в значительной степени определяется качеством разрабатываемых проектов. При этом проекты АСУ ТП должны разрабатываться с минимальными затратами (сметной стоимостью проекта) и в сжатые сроки.

Недостатки существующей технологии работ по созданию АСУ ТП сводятся к недостаточной разработке методологии по видам обеспечивающих частей проекта АСУ ТП и их единой взаимоувязке, недостаточной систематизации процесса разработок (по обеспечивающим частям), высокой доле ручного труда в разработке проектной документации. Для разработки проектных документов на разных этапах отсутствуют эффективные методики, которые должны представлять собой совокупность приемов для получения исходных данных и их обработки в целях получения конечного результата. Особо ощущается отсутствие методов контроля правильности содержательной части проектных материалов. Обычно проектная документация проверяется лишь на правильность оформления.

В настоящее время в отрасли уже используется автоматизация проектных работ. В частности, в проектах АСУ ТП автоматизированным способом разрабатывается сметная и проектная документация монтажно-коммутационных схем для изготовления щитов и пультов контроля и управления. Непрерывно расширяются работы по автоматизации проектирования программного обеспечения, являющегося наиболее трудоемкой частью проекта АСУ ТП, стоимость которого составляет практически половину общей стоимости проектных работ. В целом уровень автоматизации проектных работ по разработке АСУ ТП в отрасли составляет около 12%. В ближайшее время объем проектных работ в отрасли, выполняемых автоматизированным способом, намечено довести до 28%.

В настоящее время в пищевой промышленности ведутся разработки по созданию системы автоматизации проектных работ. Автоматизированное проектирование представляет собой процесс, осуществляемый человеком совместно с ЭВМ по составлению описаний, которые необходимы для выполнения проектных операций в целях получения соответствующих проектных документов. В качестве исходных данных используются алгоритмы и соответствующие программы на языке ЭВМ. В комплекс средств автоматизации проектирования входят различные графопостроители, периферийные устройства ЭВМ и специальные приставки, обеспечивающие изготовление (по содержанию и форме) соответствующей проектной документации в необходимом количестве.

Системой автоматизации проектных работ (САПР) называют комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанный с коллективом специалистов проектной организации, выполняющих автоматизированное проектирование. Основными нормативными документами по созданию и использованию САПР являются ГОСТы серий 22 и 23 и ОРММ по созданию САПР.

В соответствии с ГОСТом в составе САПР различают два вида программ: проектирующие, с помощью которых выполняются проектные операции на применяемых комплексах средств автоматизации проектирования, и обслуживающие, которые обеспечивают работоспособность проектирующих программ. Этим ГОСТом также предусмотрено создание программных компонентов, выполняющих проектные операции, которые непосредственно зависят от конкретного объекта проектирования, и инвариантных программных компонентов, которые выполняют унифицированные операции, не зависящие от проектируемого объекта.

При разработке САПР огромное внимание обращается на совершенствование технологии автоматизированного проектирования, включающей совокупность методов и проектирующих программ для решения составных частей проекта АСУ ТП: технического обеспечения, синтеза и настройки подсистем цифрового управления, автоматизированного проектирования программного обеспечения, информационного обеспечения, а также на экономические и организационные проблемы создания АСУ ТП.

Для лучшего понимания задач, решаемых САПР при разработке проектов АСУ ТП, ниже рассмотрены три подхода к реализации автоматизированного проектирования.

Основные принципы автоматизации разработки технической структуры АСУ ТП. При разработке технической структуры АСУ ТП необходимо учитывать, что если ее проектирование ос-

новывать на разработке математических моделей и алгоритмах функций системы, то результат может быть получен только на заключительных стадиях проектирования. Однако сложившееся положение с комплектованием систем управляющей вычислительной техникой (необходимость оформления заявок за 18 мес до планируемого года поставки) требует решения задачи синтеза технической структуры на начальных стадиях разработки АСУ ТП.

Возможность решения этой задачи определяется относительно небольшой номенклатурой технических средств, на базе которых возможно создание ограниченного числа вариантов ТС АСУ ТП с точностью до конкретных наименований серийно выпускаемой техники при неполной информации об алгоритме функционирования будущей системы управления. При этом использование математического аппарата теории графов позволяет получить модель централизованной ТС АСУ ТП, дающую представление о ее качественных показателях (времени реакции, достоверности, надежности и т. п.). Однако в централизованной системе управления управляющая машина удалена от объекта управления, что обуславливает значительный расход дефицитной кабельной продукции, а также низкую живучесть системы.

Эти недостатки устраняют применением рассредоточенных систем управления, которые получают в результате декомпозиции централизованной ТС АСУ ТП по выбранным критериям (территориально разнесенные узлы управления). Для решения задач декомпозиции модели централизованной системы на узлы управления используют алгоритмы упорядоченного перебора и оценки полученных решений. В качестве критерия декомпозиции ТС АСУ ТП принимают достижение минимальной длины линий связи (кабелей), добиваясь минимальных затрат на создание АСУ ТП при соблюдении заданных ограничений.

Постановка задачи декомпозиции учитывает наличие орграфа $G(V, B)$, являющегося моделью централизованной ТС создаваемой АСУ ТП. В этом орграфе V — подмножество функциональных элементов и B — подмножество ориентированных связей между ними. Необходимо определить целесообразность применения рассредоточенной системы управления на данном объекте, а также размещение и число узлов управления, обеспечивающих достижение заданного критерия декомпозиции. При этом учитывают, что каждой вершине орграфа $v \in V$ приписан вес, соответствующий стоимости функционального вычислительного устройства $\{S_i[i, \dots, \omega]\}$, $\omega \in \Omega$, и каждой дуге $b \in B$ — вес, равный длине соответствующей линии связи $\{L(ij) [ij \in I]\}$. Здесь Ω и I — соответственно множества индексов вершин и

дуг в орграфе $G(V, B)$, а $L(ij)$ не превышает некоторого значения $L(ij)_{\text{доп}}$.

Задача декомпозиции заключается в разбиении орграфа $G(V, B)$ на h подграфов $\{G_j(V_j, B_j) [j=1, \dots, h]\}$ таким образом, чтобы сумма весов всех дуг L в орграфе $G(V, B)$, описывающем новую структуру системы, была минимальной, а сумма весов вершин S не превысила допустимого значения $S_{\text{доп}}$. При этом показатели загрузки (пропускной способности) элементов $g \in V; B$ не должны превышать максимально допустимого значения $R_g \leq R_{g \text{ max}}$, а показатель структурной живучести системы V не должен быть меньше $V_{\text{доп}}$. В такой постановке декомпозиция орграфа $G(V, B)$ сводится к задаче линейного назначения:

$$\left. \begin{aligned} \min L &= \sum_{ij \in I} L(ij); \\ S &\leq S_{\text{доп}}; L(ij) \leq L(ij)_{\text{доп}}; \\ v &\geq v_{\text{доп}}; R_g \leq R_{\text{доп}}, g \in V; B; h \geq 2. \end{aligned} \right\} \quad (17.1)$$

Приступая к декомпозиции, рассматривают особенности конкретной АСУ ТП, позволяющие значительно сократить размерность задачи (17.1) и время поиска ее решения, что учитывают в разрабатываемой схеме последовательности основных процедур (в целях упрощения методика разработки схемы здесь не приводится). Формализацию процесса проектирования ТС АСУ ТП производят на основании того, что любая система управления в соответствии с общей теорией системы может быть представлена моделью

$$E = (G; C; P), \quad (17.2)$$

где G — упорядоченная определенным образом совокупность элементов системы $g \in G$; C — множество возможных состояний элементов G ; P — множество возможных процессов, происходящих в системе.

Изменение состояния C_g в каждом элементе $g \in G$ происходит в соответствии с некоторой временной шкалой $\tau_g = \{t_{g1}, \dots, t_{gn}\}$ при $\tau_g \in T$ и $C_g \in C$, где T — множество шкал, принадлежащих различным элементам $g \in G$. В этом случае процесс, протекающий в каждом элементе g , может быть представлен как отображение

$$P_g: \tau_g \rightarrow C_g \quad (17.3)$$

где $P_g \in P$; $C_g \in C$; $\tau_g \in T$.

Процесс функционирования АСУ ТП может быть представлен отображением

$$P: G \times T \rightarrow C. \quad (17.4)$$

Кроме того, АСУ ТП может быть представлена отображением множества показателей поступающей в систему информации в множество показателей выходящей из системы информации. Тогда выражение (17.4) может быть преобразовано следующим образом:

$$P_x: X \times T_x; \quad (17.5)$$

$$P_y: Y \times T_y, \quad (17.6)$$

где X и Y — соответственно множества входных и выходных элементов системы $X, Y \subset G$; $P_x, P_y \subset P$; $T_x, T_y \subset T$; $C_x, C_y \subset C$.

Тогда процесс целенаправленного функционирования АСУ ТП может быть представлен как отображение

$$N: P_x \rightarrow P_y, \quad (17.7)$$

где N — функция, по которой реализуется отображение множества P_x в множество P_y .

Отображение (17.7) представляет собой функционирование АСУ ТП как последовательную смену процессов, протекающих в функциональных элементах некоторого множества ориентированных маршрутов преобразования показателей информации $M(X, Y) \subseteq G(V, B)$. В этом случае функции АСУ ТП могут быть типизированы, а синтез необходимого разнообразия ТС функциональных подсистем реализуется из ограниченного набора типовых маршрутов $m(x; y) \in M(X; Y) \subseteq G(V; B)$, имеющих определенные технические характеристики и функциональные возможности ($x \in X; y \in Y$).

Как указывалось, на основании типизации маршрутов преобразования информации в АСУ ТП формируются графовые модели функциональных подсистем, узлов (станций) управления и системы в целом. Большая размерность этих моделей требует привлечения ЭВМ для решения соответствующих задач анализа и синтеза. В этих случаях возникает необходимость перейти от графовых моделей к их матричным эквивалентам, ввод которых в ЭВМ менее трудоемок. Значительными преимуществами в этом смысле обладают матрицы связей. В основу их разработки положена возможность типизации маршрутов преобразования информации и создания на их основе банков типовых маршрутов для каждого типа управляющих вычислительных комплексов.

Модели ТС АСУ ТП в виде матриц связи позволяют значительно снизить размерность задачи синтеза и свести разработку возможных альтернатив функциональных подсистем в целом к конструированию соответствующих матриц связей с использованием типовых маршрутов преобразования информации.

Индустриальные методы создания программного обеспече-

ния АСУ ТП. В целях сокращения затрат и сроков разработки программного обеспечения (ПО) АСУ ТП в пищевой промышленности проводятся работы по созданию модульной технологии проектирования, составляющей основу перехода к индустриальным методам компоновки ПО из готовых элементов и создания САПР ПО. В соответствии с программой работ Государственного комитета СССР по науке и технике в отрасли был выполнен первый этап работ по индустриализации проектирования математического (МО) и программного обеспечения АСУ ТП. Результатом этих работ явилось составление сборника алгоритмических модулей и библиотеки программных модулей (БПМ).

БПМ обеспечивает накопление, корректировку и обновление готовых элементов ПО, выдачу программных модулей (ПМ) и пакетов ПМ пользователям для включения в состав ПО АСУ ТП в качестве готовых элементов. БПМ построена так, что ее состав обеспечивает реализацию основных функций АСУ ТП пищевых производств унифицированными программными средствами. К тому же входящие в библиотеку программы не зависят от данных, написаны на алгоритмических языках Фортран IV и Мнемокод и работают под управлением операционной системы реального времени. Обслуживание БПМ осуществляется справочной системой, позволяющей получить необходимый модуль в соответствии с заданными классификационными признаками.

В основе БПМ лежит межотраслевое ядро, разработанное в соответствии с типовой структурой ПО путем выделения из функциональных структур АСУ ТП различных производств общей, характерной для всех систем части (ΦC_0). Эта характерная межотраслевая функциональная структура обеспечивается унифицированными алгоритмическими ($A O_0$) и программными ($P O_0$) средствами.

Средства ($P O_0$) реализованы в виде пакетов программных модулей, выполняющих функции сбора и обработки информации, расчетов технико-экономических показателей, доступа к базе данных и представления информации оператору. Эти средства составляют межотраслевое ядро БПМ. Для моделирования алгоритмов управления в состав межотраслевого ядра включены универсальные модули типовых звеньев автоматических систем регулирования.

В состав БПМ входят также отработанные решения, реализующие алгоритмы функциональной структуры АСУ ТП, которые применимы в каждой конкретной подотрасли пищевой промышленности.

Программное обеспечение конкретной системы $P O_k$ формируется из общего для всех систем программного обеспечения



Рис. 17.1. Функциональный состав БПМ

$ПО_0$ и полученных программированием специфических для данной отрасли алгоритмов. Поскольку $ПО_0$ является унифицированным программным средством, возникает проблема его «привязки» к условиям конкретной системы, т. е. нахождению операторов F формирования $ПО_k$ из $ПО_0$. Операторы F определяются отображениями алгоритмической, информационной и технической структур конкретной системы ($АО_k, И_k, Т_k$) на базу данных программного обеспечения $ПО_0$, т. е.

$$F_1: AO_k \rightarrow PO_0; F_2: I_k \rightarrow PO_0; F_3: T_k \rightarrow PO_0.$$

Исследование этих зависимостей и разработка соответствующих им программно-технических средств являются одними из важных задач дальнейшего развития БПМ и создания на их основе САПР ПО. БПМ (рис. 17.1) состоит из четырех основных функциональных групп: контроля, моделирования, управления и организации вычислительного процесса.

В первую группу входят упомянутые выше пакеты модулей, образующие межотраслевое ядро БПМ. Пакет модулей сбора и первичной обработки информации от датчиков аналоговых сигналов в реальном масштабе времени может быть использован для работы с датчиками разных типов при разных схемах их подключения к вычислительному комплексу. Первичная обработка включает в себя масштабирование, корректировку, фильтрацию, контроль границ, усреднение и интегрирование. Эти модули входят не только в состав пакетов, но и как самостоятельные изделия — в состав БПМ.

Пакет модулей унифицированного расчета ТЭП выполняет функции унифицированной процедуры расчетов ТЭП по типовым формулам, к которым сводится большинство конкретных расчетных формул, и организации расчетов в реальном масштабе времени в соответствии с периодичностью расчетов, необходимой для конкретной АСУ ТП.

Пакет модулей построения системы отображения информации обеспечивает обмен информацией между одним или несколькими операторами-технологами и базой данных АСУ ТП. Обмен информацией осуществляется параллельно-групповым способом, при котором единицей обмена информацией является страница формы, содержащей значение группы технологических параметров.

В группу модулей моделирования входят модули моделирования возмущений, управляемых объектов, исполнительных устройств и др. В группу модулей управления входят программы, реализующие типовые законы регулирования (П, ПИ, ПИД), закон регулирования с изменением структуры в зависимости от качества переходного процесса, модули оптимизации, реализующие методы случайного поиска, Гауса — Зейделя, градиентный, а также программы управления некоторыми типовыми участками (выпарной станцией, участком сокового потока и т. п.).

В группу модулей организации вычислительного процесса входят комплекс пакетов программ управления данными, обеспечивающий доступ к базе данных из программ на уровне элементарных данных; диалоговый драйвер дисплея СИД-1000, буферный драйвер устройства ввода перфоленты в УВК для абсолютных программ; модуль имитации пакетного режима ввода ответов на вопросы генератора операционной системы ДОС РВ и др.

БПМ состоит из комплекта программной документации и программ на машинных носителях информации. На УВК сформирован информационный раздел БПМ, позволяющий выбрать необходимые модули по следующим классификационным признакам: типу используемой машины, функциональной принадлежности, отраслевой принадлежности.

Развитие библиотеки осуществляется в следующих основных направлениях: доработка и расширение межотраслевого ядра БПМ на основе опыта эксплуатации и с учетом перспектив изменения функционально-алгоритмической и технической структур АСУ ТП; повышение «интеллектуального уровня» входящих в БПМ модулей за счет существенного расширения группы модулей управления; унификация интерфейсных связей между пакетами модулей и разработка процедур «привязки» пакетов к условиям конкретного применения в соответствии с операторами F_1 , F_2 , F_3 , т. е. создание САПР ПО.

Автоматизация процедур разработки подсистем цифрового управления. Для автоматизации процесса выбора алгоритмов и компоновки программного обеспечения систем прямого цифрового управления (ПЦУ) разрабатывают пакеты программных модулей (ППМ), обеспечивающие выполнение соответствующих функций. Разработка ППМ является развитием работ по созданию и использованию отраслевой библиотеки алгоритмических и программных модулей АСУ ТП. Эти ППМ обеспечивают компоновку систем ПЦУ из библиотечного набора алгоритмов.

Для компоновки системы ПЦУ в соответствии со структурой (рис. 17.2) используются два пакета программных модулей: «Автоматическое регулирование», «Автоматизация настройки». Первый пакет включает библиотеку модулей и универсальную организующую программу, второй — средства компоновки модулей в блоки и блоков в систему в соответствии со схемой автоматизации.

Основным функциональным модулем первого пакета является модуль цифровой фильтрации РЕГ, представляющий обобщенное цифровое звено. В зависимости от настроек это звено реализует передаточные функции П-, И-, ПИ-, ПД-, ПИД-регу-

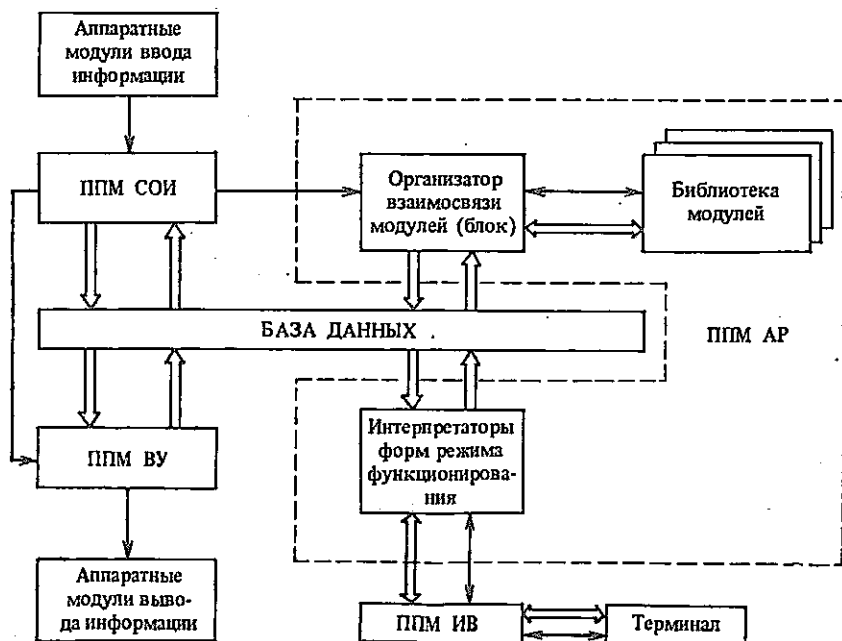


Рис. 17.2. Структура системы ПЦУ

ляторов, а также звеньев первого и второго порядков, колебательного звена второго порядка, звена упреждения-запаздывания. В состав пакета включены модули, обеспечивающие расчет настроек звена в зависимости от вида и коэффициентов исходной передаточной функции, что позволяет при конструировании блоков, в процессе наладки и эксплуатации системы оперировать традиционными представлениями о структуре системы регулирования.

В состав библиотеки включены также следующие функциональные модули:

модули арифметических операций (сложение, вычитание и умножение переменных, сложение с константой, умножение на константу, вычитание константы, вычитание из константы);

модули нелинейностей (ограничение сигнала, нечувствительность);

модули логических операций (И, ИЛИ, НЕ, триггер Шмидта);

вспомогательные модули (установка реперной точки, смещения предыстории, поддержка параметрической коррекции, генератор линейной функции, фиксатор аварийного режима, модуль копирования сигнала).

Для оценки качества переходного процесса в состав пакета включены модули расчета степени колебательности, времени переходного процесса и интегральных оценок (интегралов квадрата ошибки, управления и производной управления за заданный промежуток времени).

Пакет «Автоматическое регулирование» предназначен для функционирования на управляющей микроЭВМ в операционной системе реального времени МОС РВ. Он должен взаимодействовать по информации и управлению с пакетами модулей сбора и обработки информации от датчиков (ППМ СОИ), интерактивного взаимодействия с оператором (ППМ ИВ) и вывода информации (ППМ ВУ). Состав библиотеки модулей пакета позволяет проводить исследования замкнутых систем. Включение в процедуру проектирования этапа конструирования блоков позволяет работать с устройствами, осуществляющими нестандартные законы регулирования, например с упредителями, регуляторами с настраиваемыми параметрами, регуляторами с переменной структурой и др.

Для корректировки параметров настройки в процессе наладки, изменения задания контурам, дистанционного управления, контроля состояния системы в нормальном и аварийном режимах используются соответствующие дисплейные формы.

Пакет «Автоматизация настройки» представляет проектировщику транслятор с табличного языка высшего уровня. В языке предусмотрены четыре основные таблицы. Заполняя таблицу

«конструирование», проектировщик может сконструировать набор необходимых для его системы управления регулирующих блоков. С помощью таблицы «проектирование» из сконструированных блоков создается система. Таблица «настройка» предназначена для того, чтобы каждому использованному в системе регулируемому блоку указать проектные значения параметров настройки, тексты аварийных сообщений, выдаваемых блоком в процессе функционирования. Таблица «конфигурация» предназначена для включения в состав ППМ новых модулей, с помощью которых конструируются блоки.

Перечисленные программные средства позволяют автоматизировать процесс проектирования программ ПЦУ как путем компоновки из блоков, соответствующих традиционным аналоговым средствам автоматизации, так и на основе методов синтеза оптимальных и субоптимальных систем.

§ 17.2. ТИПИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ АСУ ТП

Типовым проектным решением (ТПР) АСУ ТП является техническое решение, принятое в завершенных разработках (НИР и ОКР), определяющее принципы функционирования и способы реализации отдельных объектов типизации, пригодное и рекомендуемое для многократного применения. К типовым проектным решениям относятся типизированные технические решения, оформленные в виде отдельных документов или комплектов документов, предназначенных для использования при разработке проектов.

В соответствии с ГОСТ 24.703—85 ТПР подразделяют на простые и комбинированные в зависимости от числа охватываемых видов обеспечения АСУ ТП. Если ТПР охватывает один вид обеспечения АСУ ТП (информационное, программное и т. д. по ГОСТ 24.103—84), оно является простым и называется типовым решением (ТР). Если ТПР охватывает два и более видов обеспечения АСУ ТП, оно является комбинированным.

Основными задачами типизации технических решений и разработки ТПР являются следующие:

выявление принятых при проведении НИОКР апробированных технических решений по АСУ ТП, которые целесообразно рекомендовать для использования в проектах новых и реконструируемых пищевых предприятий и при проведении работ по плану внедрения новой техники на действующих предприятиях;

определение области применения ТПР данного назначения при проведении работ по созданию АСУ ТП;

разработка возможных вариантов технических решений с

учетом их использования в различных специфических условиях в определенной области.

В целях типизации технических решений в процессе проведения НИОКР выявляются объекты типизации путем расчленения создаваемой АСУ ТП предприятия, цеха, технологического участка на отдельные элементы, каждый из которых имеет самостоятельное значение и может быть сдан в промышленную эксплуатацию в установленном для НИОКР порядке. Типизацию технических решений желательно осуществлять применительно к установленным этапам работ при поэтапном внедрении разработок с длительным сроком выполнения работ в целом. Типизация технических решений может осуществляться и по отдельным заданиям в порядке обобщения результатов ранее выполненных НИОКР для таких объектов типизации, как АСУ определенных видов технологического оборудования и т. п.

Типовые решения классифицируются в зависимости от вида обеспечения. Основные виды типовых решений приведены ниже.

<i>Вид ТР</i>	<i>Проектная документация</i>
По техническому обеспечению (ТО)	Документация на типовой вычислительный комплекс, типовые устройства локальной автоматизации и т. п.
По математическому обеспечению (МО)	Типовые алгоритмические модули
По программному обеспечению (ПО)	Документация на типовые библиотеки программных модулей, типовые пакеты прикладных программ и т. п.
По информационному обеспечению (ИО)	Документация на типовые формы выходных документов, типовые системы кодирования и т. п.
По организационному обеспечению (ОО)	Документация на типовую организационную структуру, типовые должностные инструкции и т. п.

В табл. 17.1 приведены комбинированные ТПР, которые подразделяются в зависимости от области применения и степени набора решений. В таблице ОТР означает общепромышленные комбинированные типовые решения, СТР — системы типовых

17.1. Классификация типовых проектных решений

Признак ТПР	ОТР	СТР	КТР	УТП
Область применения ТПР				
общепромышленное	+	—	—	—
системное	—	+	—	—
объектное	—	—	+	+
Полный набор решений для одностадийного проектирования АСУ ТП	—	—	—	+

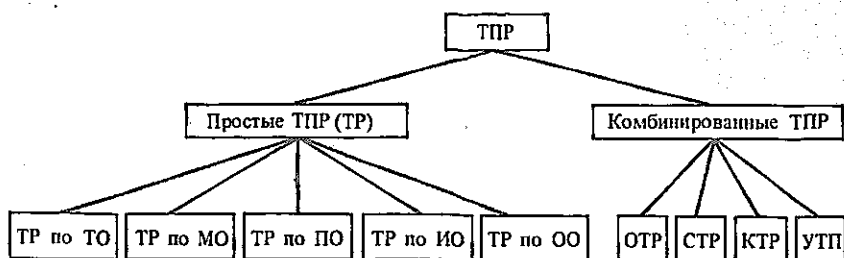


Рис. 17.3. Классификация типовых проектных решений

решений, КТР — комплекты типовых решений, УТП — унифицированные технические решения, знак «+» — обязательное наличие отмеченного признака у данного вида ТПР, знак «—» — отсутствие данного признака.

Классификация всех видов ТПР приведена на рис. 17.3. В зависимости от способа компоновки документации все виды ТПР подразделяются на ТПР-компоненты и ТПР-комплексы. В состав документов ТПР-компонент не входят более мелкие самостоятельно оформленные ТПР, а ТПР-комплекс отличается тем, что в состав ее документов включены более мелкие самостоятельно оформленные ТПР. Разработка документации на все виды ТПР осуществляется в соответствии с ГОСТ STD АСУ.

На рис. 17.4 приведена структура обозначений любого документа ТПР. Порядок выбора значений разрядов каждой кодовой группы для ТР, ОТР, СТР, УТП, КТР конкретизируют специально разработанными правилами.

В состав комплекса документации на любую типовую раз-

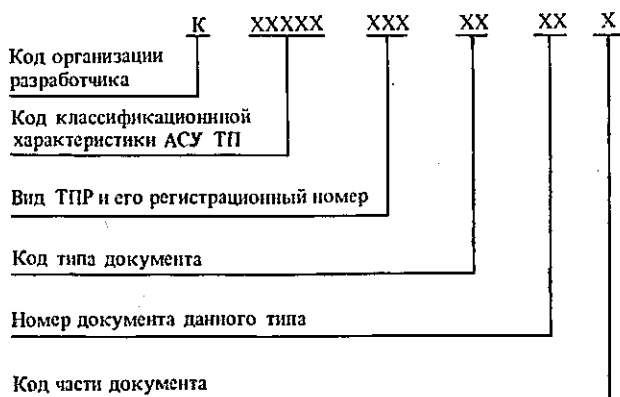


Рис. 17.4. Структура обозначений любого документа ТПР

работку должны входить ведомость документов ТПР, аннотация, содержательная часть ТПР (проектная, конструкторская, программная и другая документация), указания по применению ТПР. Ведомость документов ТПР является основным документом, на титульном листе которого помещаются все необходимые согласующие и утверждающие подписи.

Содержание ТПР должно соответствовать требованиям ГОСТ, СТД АСУ ТП, которые устанавливаются в зависимости от того, к какому классу относятся ТПР. Содержание комбинированных ТПР определяется техническим заданием, составляемым организацией-разработчиком. Указания по применению должны включать сведения о последовательности действий при применении ТПР, составе и форме представления исходных данных, а также описании способов определения исходных данных и правилах выбора модификации ТПР.

Требования к содержанию и оформлению ТР по математическому, программному, информационному и техническому обеспечению определяются соответственно государственными и отраслевыми стандартами для каждого вида обеспечения.

Срок действия ТПР и срок введения их в действие указываются в пояснительной записке к комплекту документации ТПР. Срок действия ТПР устанавливается разработчиком в каждом конкретном случае в зависимости от класса объекта типизации, номенклатуры примененных технических средств и т. д. Использование ТПР после истечения срока их действия согласовывается с разработчиком.

§ 17.3. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ АСУ ТП

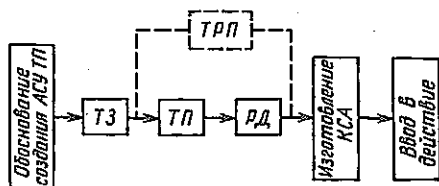
Разработка и внедрение АСУ ТП осуществляется для трех принципиально отличающихся состояний ТОО: для действующих пищевых предприятий, для вновь строящихся и для реконструируемых. Во всех случаях создание АСУ ТП осуществляется по планам капитального строительства, предусматривающим проектные, строительно-монтажные и наладочные работы.

Содержание работ по созданию АСУ ТП, порядок их выполнения и проектирования определяются основополагающим документом. Общеотраслевые методические материалы по созданию и применению автоматизированных систем управления технологическими процессами в отраслях промышленности (ОРММ-3 АСУ ТП) и комплексом государственных и отраслевых стандартов. Создание АСУ ТП осуществляется в несколько стадий (рис. 17.5).

Работы по созданию АСУ ТП выполняются основными участниками:

Рис. 17.5. Стадии создания АСУ ТП:

ТЗ — техническое задание; ТП — технический проект; РД — рабочая документация; ТРП — технорабочий проект; КСА — комплекс средств автоматизации



заказчик — юридическое лицо (орган управления пищевой промышленности союзной республики, объединение, предприятие), финансирующее работы по созданию АСУ ТП, формирующее требования к создаваемой системе, принимающее участие в проведении этих работ и отвечающее за внедрение и использование АСУ ТП;

основной исполнитель (головной разработчик, генпроектировщик) — юридическое лицо, выполняющее весь комплекс научно-исследовательских, опытно-конструкторских и проектных работ по договору с заказчиком и несущее ответственность за научно-технический уровень разработки и ее соответствие техническому заданию на создание АСУ ТП;

исполнитель (соисполнитель) — юридическое лицо (организация, предприятие), выполняющее проектные, конструкторские, строительно-монтажные, наладочные и другие порученные ему работы по договору с заказчиком или основным исполнителем.

Состав участников и распределение работ между ними зависят от степени разработки АСУ ТП: впервые создается (оригинальная), построена на основе новых технических решений или повторно применяется на основе принятых ранее проектных решений для аналогичных АСУ ТП. Конкретный состав участников и состав работ определяются в техническом задании.

При подготовке к созданию АСУ ТП обосновывают предложения по разработке АСУ ТП. В этот период осуществляется первая стадия работ, предусмотренная ГОСТом, — исследование и обоснование создания АСУ ТП. Разрабатываемые предложения должны определять основные функции АСУ ТП, технические требования к ним и ожидаемые технико-экономические результаты создания АСУ ТП. Выходными документами первой стадии являются технико-экономическое обоснование (ТЭО), заявка на создание АСУ ТП. Технико-экономическое обоснование составляется в соответствии с ГОСТом и ОРММ-3 АСУ ТП. Заявка на создание АСУ ТП должна содержать исходные технические требования к системе в объеме, определенном ОРММ-3 АСУ ТП. ТЭО на АСУ ТП и заявка составляются заказчиком либо по его поручению основным исполнителем системы.

На второй стадии выполняется техническое задание

(ТЗ). При этом предусматривается проведение научно-исследовательских работ (НИР) на основе исходных технических требований, которые содержатся в заявке на создание АСУ ТП. По результатам НИР осуществляется предварительная разработка проектных решений, включающая разработку вариантов функциональной структуры АСУ ТП, а также вариантов структур по видам обеспечений с учетом их сравнительной технико-экономической оценки. На этом этапе производится выбор типовых проектных решений по видам обеспечения АСУ ТП.

Разработка проектов оригинальных АСУ ТП осуществляется по стадиям: технический проект, рабочая документация. При создании простых АСУ ТП со значительным объемом применяемых типовых проектных решений стадии «Технический проект» и «Рабочая документация» объединяют в одну «Технорабочий проект». Двухстадийное проектирование с выпуском технического проекта и рабочей документации выполняется для вновь разрабатываемых АСУ ТП, проектирование повторно реализуемых АСУ ТП — в одну стадию с выпуском технорабочего проекта.

На третьей стадии — «Ввод в действие» — выполняется комплекс работ по подготовке объекта к внедрению АСУ ТП (строительно-монтажные работы, комплектация системы, организационно-технические мероприятия и т. д.) и разрабатываются следующие документы:

- план-график проведения работ по внедрению;

- приказы по проведению работ (о готовности объекта к проведению строительно-монтажных и наладочных работ, о порядке проведения наладочных работ, о проведении опытной эксплуатации, о вводе в промышленную эксплуатацию и др.);

- акты завершения работ (строительных, по модернизации оборудования, готовности объекта к проведению монтажных работ, монтажных, по монтажу технических средств, приемки работ по наладке технических средств, приемки общего программного обеспечения, приемки работ при проведении испытаний на работоспособность, готовности системы к комплексной наладке, передачи АСУ ТП в опытную эксплуатацию, приемки АСУ ТП в промышленную эксплуатацию, сдачи АСУ ТП ведомственной комиссии и др.);

- программы работ (предварительных испытаний, опытной эксплуатации, приемо-сдаточных испытаний и др.);

- протокол согласования отклонений технических решений, принятых при разработке АСУ ТП.

При подготовке объекта к внедрению АСУ ТП заказчик создает специальное подразделение по техническому обслуживанию АСУ ТП, укомплектованное штатом оперативного персонала, которое отвечает за работы по внедрению АСУ ТП, и в дальнейшем, после ввода системы, осуществляет ее эксплуата-

цию. Заказчик проводит обучение персонала АСУ ТП по программам, разработанным основным исполнителем. До начала наладки АСУ ТП выполняются необходимые организационно-технические мероприятия по подготовке объекта к внедрению.

На стадии «Ввод в действие» дорабатываются инструкции по эксплуатации АСУ ТП. После ввода в действие ОРММ-3 предусматривается четвертая стадия — анализ функционирования системы в течение планового года производственной деятельности. На этой стадии производится сбор объективных и систематизированных данных, характеризующих результаты функционирования, показателей качества и надежности АСУ ТП, определяется реальный технико-экономический эффект от использования ее в промышленной эксплуатации.

При выполнении работ по анализу функционирования составляется отчет по научно-исследовательским работам, включающий результаты проведенных исследований и рекомендации по развитию и совершенствованию АСУ ТП (рекомендации могут быть оформлены в виде отдельного документа, представляющего собой заполненную стандартную анкету).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите недостатки существующей технологии работ по созданию АСУ ТП.
2. Что называют системой автоматизации проектных работ (САПР)?
3. Какие используются принципы автоматизации разработки технической структуры АСУ ТП?
4. В чем суть индустриальных методов создания программного обеспечения АСУ ТП?
5. Как осуществляется автоматизация процедур разработки подсистем цифрового управления?
6. Что относится к типовым проектным решениям (ТПР) АСУ ТП? Какие ТПР относятся к простым типовым решениям, а какие — к комбинированным?
7. Что должно входить в состав комплекса документации на любую типовую разработку и какие основные требования к их оформлению?
8. Какой существует порядок выполнения работ по созданию АСУ ТП на предприятиях и какими нормативными документами он регламентируется?
9. Какие существуют стадии разработок и внедрения АСУ ТП на предприятии, определяемые ОРММ-3 и ГОСТом?

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АСУ ТП ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

§ 18.1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Целесообразность автоматизации технологических процессов определяется расчетом экономической эффективности, который производится по технико-экономическим показателям предприятия в расчетном году. Достоверность определения экономического эффекта во многом зависит от методики его расчета и правильности выявленных внутрипроизводственных резервов (увеличение производительности оборудования, уменьшение потерь, энергозатрат и др.), реализация которых возможна с помощью автоматизации.

Расчет экономического эффекта в процессе создания автоматизации выполняется на стадии проектирования, стадии внедрения (по результатам приемо-сдаточных испытаний) и стадии функционирования автоматизации (расчет фактической экономической эффективности).

Основным методическим материалом для расчета экономического эффекта от автоматизации является Отраслевая методика оценки экономической эффективности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в пищевой промышленности РДМ 18-12-81, разработанная на основе Методики (основных положений) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений № 48/16/13/3 и соответствующих отраслевых методических указаний.

При определении экономического эффекта обязательным условием является сопоставимость всех показателей. Необходимо учитывать, что от начала внедрения автоматизации до ее полного использования проходит до трех лет. Чем быстрее получен экономический эффект, тем больше его ценность. Поэтому учитывают фактор времени путем приведения затрат на автоматизацию за время t_1 и экономический эффект, полученный за время t_2 к одному моменту времени с помощью некоторой функции

$$\alpha_t = (1 + E_n)^t, \quad (18.1)$$

где α_t — коэффициент приведения; E_n — норматив приведения (типовой методикой рекомендуется принимать $E_n=0,1$); t — число лет, отделяющих затраты от начала расчетного года.

Затраты и результаты, получаемые до начала расчетного года, умножаются на коэффициент приведения (α_t), а после начала расчетного года делятся на этот коэффициент.

В расчетах годового экономического эффекта используется единый народнохозяйственный нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, равный 0,15, а для решения вопроса об экономической целесообразности разработки на стадии проектирования автоматизации — 0,44.

Составляющие годовой экономии определяются по отдельным технологическим участкам производства для локальных систем автоматизации и отдельным подсистемам (комплексам задач) АСУ ТП, величина экономии от снижения себестоимости за вычетом эксплуатационных затрат и прирост прибыли от увеличения в целом по всей системе — путем суммирования по отдельным задачам.

В соответствии с действующей методикой расчет экономического эффекта проводят по следующей схеме.

Определение годового объема выпуска продукции. Объем производства продукции после внедрения АСУ ТП определяется по формуле

$$A_2 = \sum_{i=1}^n A_{1i} (\gamma_i + 1), \quad (18.2)$$

где A_{1i} — годовой объем производства i -го вида продукции в расчетном году до автоматизации в натуральных единицах; n — число видов продукции; γ_i — коэффициент увеличения выпуска i -го вида продукции за счет АСУ ТП, доли единицы.

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^m R_{ji} \mathcal{E}_{упр}, \quad (18.3)$$

где R_{ji} — величина j -го резерва увеличения выпуска i -го вида продукции, доли единицы; $\mathcal{E}_{упр}$ — коэффициент эффективности управления системы; m — число видов резерва.

Определение экономии за счет снижения себестоимости продукции. Себестоимость единицы продукции после внедрения АСУ ТП

$$C_2 = C_1 - \mathcal{E}_{год} / A_2, \quad (18.4)$$

где C_1 — себестоимость единицы продукции (средневзвешенная) в расчетном году до внедрения АСУ ТП, руб.; $\mathcal{E}_{год}$ — годовая экономия от снижения себестоимости продукции за вычетом текущих затрат, связанных с внедрением АСУ ТП,

$$\mathcal{E}_{год} = \sum_{j=1}^n C_j - C_{экс}. \quad (18.5)$$

где C_i — величина экономии по отдельным статьям затрат себестоимости, руб.; $C_{экс}$ — величина текущих затрат, связанных с издержками на эксплуатацию системы, руб.

Для определения C_i рассчитывают изменения отдельных статей затрат:

а) экономия условно-постоянных расходов

$$C_{yn} = \sum_{i=1}^n \gamma_i (K_{ц} C_{цi} + K_{об} C_{обi} + K_{об} C_{обi}), \quad (18.6)$$

где $K_{ц}$, $K_{об}$, $K_{об}$ — коэффициенты, характеризующие постоянную часть цеховых, общезаводских расходов и расходов на содержание и эксплуатацию оборудования, доли единицы; $C_{цi}$ — сумма цеховых расходов в себестоимости годового выпуска продукции i -го вида в расчетном году без учета влияния автоматизации, руб.; $C_{обi}$ — сумма общезаводских расходов в себестоимости годового выпуска продукции i -го вида в расчетном году без учета влияния автоматизации, руб.; $C_{обi}$ — сумма расходов на содержание и эксплуатацию оборудования для выпуска продукции i -го вида в расчетном году без учета влияния автоматизации, руб.;

б) экономия от сокращения расхода сырья на производство продукции

$$C_c = \sum_{i=1}^n A_{ci} (\gamma_i + 1) R_{ci} \varepsilon_{ynp} U_{ci}, \quad (18.7)$$

где A_{ci} — годовой объем перерабатываемого сырья для производства продукции i -го вида в расчетном году без учета влияния АСУ ТП, натуральные единицы; R_{ci} — величина резерва увеличения выхода готовой продукции из единицы основного вида сырья для производства продукции i -го вида, доли единицы; U_{ci} — оптовая цена единицы сырья для производства продукции i -го вида;

в) экономия от снижения затрат на топливо и энергию для технологических нужд (C_t , $C_э$) определяется также по сырью и материалам по выражению, аналогичному формуле (18.7);

г) экономия по фонду заработной платы с отчислениями на социальное страхование

$$C_z = C_{зм} + C_{з.о} + C_{з.св}, \quad (18.8)$$

где $C_{зм}$ — экономия по фонду заработной платы за счет высвобождения обслуживающего персонала, руб.; $C_{з.о}$ — условная экономия, образующаяся за счет опережающих темпов роста производительности труда, руб.; $C_{з.св}$ — экономия от сокращения доплат за сверхурочные работы, руб.

Экономия по фонду заработной платы

$$C_{зм} = Z_n (1 + \eta_1) (1 + \eta_2), \quad (18.9)$$

где Z_n — годовой фонд основной заработной платы всего высвобожденного персонала, руб.; η_1 — коэффициент, характеризующий отношение величины дополнительной заработной платы к основной заработной плате, доли еди-

ницы; η_2 — коэффициент, характеризующий отношение величины на социальное страхование к сумме основной и дополнительной заработной платы, доли единицы.

Условная экономия по фонду заработной платы

$$C_{з.о} = ЗУ(1 + K_3), \quad (18.10)$$

где $З$ — годового фонда заработной платы производственных рабочих в расчетном году, руб.; K_3 — коэффициент соотношения темпов прироста средней заработной платы и темпов прироста производительности труда.

Экономия от сокращения доплат за сверхурочные работы $C_{з.св}$ в формуле (18.8) образуется в результате повышения ритмичности производства за счет внедрения АСУ ТП. Таким образом, суммируя составляющие затрат, рассчитанные по пунктам а—г, получают величину экономии по статьям затрат C_i формулы (18.5).

Определение текущих затрат ($C_{экс}$), связанных с внедрением АСУ ТП. Текущие затраты, связанные с издержками на эксплуатацию системы,

$$C_{экс} = C_{ам} + C_{рем} + C_3 + C_{з.п} + C_{пр}, \quad (18.11)$$

где $C_{ам}$ — амортизационные отчисления на технические средства АСУ ТП; $C_{рем}$ — затраты на текущие и планово-предупредительные ремонты вновь вводимых технических средств; C_3 — затраты на электроэнергию, потребляемую системой; $C_{з.п}$ — затраты на заработную плату персонала, обслуживающего АСУ ТП; $C_{пр}$ — прочие затраты.

Составляющие текущих затрат формулы (18.11) определяются в следующем порядке:

а) амортизационные отчисления, исходя из первоначальной стоимости основных фондов и утвержденных норм амортизации, дифференцированных по видам основных фондов,

$$C_{ам} = \sum_{k=1}^n \frac{a_k K_{дк}}{100}, \quad (18.12)$$

где a_k — норма амортизационных отчислений на k -й вид основных производственных фондов, %; $K_{дк}$ — полная стоимость основных производственных фондов k -го вида, руб.; n — число видов основных фондов;

б) затраты ($C_{рем}$) на текущий ремонт и обслуживание оборудования АСУ ТП рассчитываются по действующим нормативам;

в) затраты (C_3) на дополнительную потребляемую электроэнергию в связи с внедрением АСУ ТП

$$C_3 = \sum_{l=1}^n (N_l T_l K_{Нl} K_{Тl}) C_3, \quad (18.13)$$

где N_l — установившаяся мощность l -го электродвигателя, кВт; T_l — годового фонда рабочего времени l -го электродвигателя, ч; $K_{Нl}$ — коэффициент исполь-

зования i -го электродвигателя по мощности; $K_{\tau i}$ — коэффициент экстенсивной нагрузки i -го вида оборудования (по времени); C_3 — цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб.; n — число единиц установленного оборудования;

г) расходы по заработной плате дополнительного персонала, вводимого для эксплуатации АСУ ТП, включают основную и дополнительную заработную плату, а также отчисления в фонд социального страхования и определяются по формуле (18.9);

д) для расчета прочие расходы ($C_{пр}$) на создание и внедрение АСУ ТП принимают в следующих размерах: стоимость носителей информации 1—2% стоимости технических средств; затраты на содержание помещений 2,0—2,5% стоимости зданий; стоимость услуг сторонних организаций 0,25—0,5% стоимости ЭВМ.

Определение прибыли из источников, не связанных с издержками производства. Улучшение отдельных технико-экономических показателей за счет внедрения АСУ ТП позволяет предприятию получить дополнительную прибыль из источников, не связанных с издержками производства. К ним относятся сокращение непроизводительных расходов и производство продукции повышенного качества. Тогда общая величина прибыли от разработки и внедрения АСУ ТП

$$\Delta \Pi = \Pi_{\text{нп}} + \Pi_{\text{к}}; \quad (18.14)$$

$$\Pi_{\text{нп}} = H \Delta y_{\text{нп}}, \quad (18.15)$$

где H — величина непроизводительных расходов по базовому варианту, руб., а прибыль от производства продукции повышенного качества

$$\Pi_{\text{к}} = \sum_{i=1}^n (C'_i + C''_i) R_{ki} (\gamma_i + 1) \Delta y_{\text{нп}}, \quad (18.16)$$

где C'_i и C''_i — стоимость i -го вида продукции разных сортов по оптово-отпускным ценам, руб.; R_{ki} — резерв увеличения выпуска продукции повышенного качества, натуральные единицы.

Расчет единовременных вложений на создание и внедрение АСУ ТП. Единовременные вложения на создание АСУ ТП

$$K = \Delta K_{\text{нр}} + \Delta K_{\text{д}} \pm \Delta K_{\text{в}} \pm \Delta K_{\text{о}} \pm \Delta K_{\text{ос}}, \quad (18.17)$$

где $\Delta K_{\text{нр}}$ — затраты на НИОКР с учетом фактора времени, руб.; $\Delta K_{\text{д}}$ — капитальные вложения на создание основных фондов с учетом фактора времени, руб.; $\Delta K_{\text{в}}$ — изменение стоимости действующих основных производственных фондов, вызванное внедрением АСУ ТП, руб.; $\Delta K_{\text{о}}$ — изменение стоимости оборотных производственных фондов, руб.; $\Delta K_{\text{ос}}$ — убыток (со знаком плюс) или прибыль (со знаком минус) от производства и реализации продукции в период освоения АСУ ТП, предшествовавший расчетному году, руб.

Расчет годового экономического эффекта. Годовой экономический эффект от разработки и внедрения АСУ ТП при выпус-

ке одной и той же продукции при переработке сырья одинакового качества

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = (\mathcal{Z}_1 - \mathcal{Z}_2) A_2, \quad (18.18)$$

где A_2 — годовой объем производства продукции с учетом внедрения АСУ ТП, натуральные единицы; $\mathcal{Z}_1$ и $\mathcal{Z}_2$ — приведенные затраты единицы продукции по базовому варианту и с применением АСУ ТП, руб.

$$\begin{aligned} \mathcal{Z}_1 &= C_1 + E_n K_1; \\ \mathcal{Z}_2 &= C_2 + E_n K_2, \end{aligned} \quad (18.19)$$

где C_1, C_2 — себестоимость производства единицы продукции по базовому варианту и с учетом внедрения АСУ ТП, руб.; K_1, K_2 — удельные единовременные вложения по базовому варианту и при внедрении АСУ ТП с учетом фактора времени, руб.; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Определение расчетного коэффициента экономической эффективности капитальных вложений. Расчетный коэффициент сравнительной экономической эффективности (E_p) характеризует величину экономии от увеличения объема производства, снижения себестоимости и улучшения качества продукции, получаемую на каждый рубль дополнительных единовременных затрат на АСУ ТП,

$$E_p = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}} + \Delta\Pi}{\Delta K}, \quad (18.20)$$

где ΔK — дополнительные капитальные вложения на разработку и внедрение АСУ ТП с учетом фактора времени, руб.

Создание АСУ ТП является экономически целесообразным, если расчетный коэффициент (E_p) экономической эффективности оказывается равным или больше нормативного.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений на внедрение АСУ ТП. Этот показатель определяют по формуле

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_{\text{год}} + \Delta\Pi}. \quad (18.21)$$

Фактический экономический эффект также определяют по описанной методике. Отличие состоит лишь в методике получения численных оценок экономических показателей, достигнутых в результате автоматизации.

§ 18.2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕЗЕРВОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСУ ТП

Перечень основных источников экономической эффективности АСУ ТП (экономия производственных ресурсов, улучшение

качества продукции, повышение производительности труда) формируется на основе анализа и оценки производственных потерь, резервов и потенциала технологического объекта автоматизации (ТОА).

Под резервом эффективности АСУ ТП понимают приращение натуральных показателей производства, которые могут быть получены за счет автоматизации. Таким образом, резервы — это разность между фактическим, лучшим базового, и базовым значениями показателя. Тогда потери — это разность между базовым и фактическим, худшим базового, значениями показателя. А потенциал представляет собой приращение значения показателя, связанное с уменьшением потерь и улучшением использования резервов.

Для анализа и оценки производственных потерь, резервов и потенциала ТОА (элементов ТОА) используется соответствующая система показателей. Конкретная номенклатура показателей устанавливается в зависимости от особенностей производства, вида технологического процесса как объекта управления и наличия исходной информации.

Для проведения работы по наиболее успешной мобилизации резервов производства важное значение приобретают их систематизация и классификация. При этом учитывают, что между многими видами резервов производства трудно провести четкое разграничение и их классификация может иметь только условный характер. Однако, несмотря на условность, классификация необходима, так как облегчает анализ производственных возможностей предприятия и помогает выявить и использовать разные виды резервов производства.

Как известно, производственный процесс образуется в результате соединения трех основных элементов: труда, орудий и предметов труда. В соответствии с этим все производственные резервы можно разделить на три вида: сам труд — резервы рабочего времени; средства труда — резервы использования оборудования; предметы труда — резервы материалов.

Потери и резервы в области труда связаны в основном с потерями рабочего времени из-за несовершенства организации трудового процесса и рядом других причин. Потери и резервы в использовании средств труда в основном вызваны неритмичным ведением технологического процесса, несовершенством работы технологического оборудования, несоблюдением норм технологического регламента.

К предметам труда относятся сырье, материалы, топливо, электроэнергия, т. е. то, на что воздействует человек. Потери и резервы в использовании предметов труда вызваны в основном несоблюдением норм технологического регламента, низкой точностью дозирования материальных ресурсов, увеличением

продолжительности производственного цикла и другими факторами. Анализ и оценка производственных потерь, резервов и потенциала ТОА (элементов ТОА) для формирования эффективных задач АСУ ТП осуществляются поэтапно.

На первом этапе проводится анализ основных технико-экономических и обобщающих показателей, характеризующих работу ТОА в целом: выпуск продукции, затраты на рубль товарной продукции, балансовая прибыль, убытки, рентабельность, фондоотдача, производительность труда, численность промышленно-производственного персонала.

На втором этапе осуществляется анализ частных показателей: выпуск продукции в единицу времени, выход готовой продукции из единицы сырья, удельный расход сырья и энерго-ресурсов, трудоемкость изготовления продукции и численность, удельный вес высшего сорта в общем объеме продукции. На этом этапе для оценки потерь, резервов и потенциала ТОА наряду с другими применяется статистический метод определения средних и среднепрогрессивных значений показателя.

На третьем этапе проводится анализ факторов, вызвавших отклонение частных показателей. Установив влияние факторов на тот или иной частный показатель, ставят задачу о возможной реализации потенциала управления с помощью АСУ ТП.

На четвертом этапе комплексного анализа осуществляется оценка производственной деятельности объекта, разрабатываются мероприятия по устранению «узких мест» между отдельными цехами и участками, а также производится выбор целесообразных средств автоматизации и объемов капитальных вложений, обеспечивающих наиболее эффективное использование резервов и снижение потерь производства.

Как указывалось, на втором этапе анализа и выявления потенциала ТОА применяют статистический метод. Для его применения необходимо наличие представительных выборок статистических данных, обеспечивающих условия сопоставимости и другие признаки. Вычисление статистических характеристик выборок должно сопровождаться оценками их точности: вычислением стандартных отклонений, построением доверительных интервалов и т. п. После определения потенциала ТОА находят потенциал управления, т. е. ту часть потерь и резервов, которая может быть реализована при автоматизации управления. С этой целью определяют фактические численные оценки экономического эффекта.

Для определения фактического экономического эффекта основой являются данные производственных испытаний, а расчет выполняется по методике, изложенной в § 18.1. Во время производственных испытаний фиксируют необходимые параметры технологических процессов (расходы, давления, температуры,

концентрации и др.) в режиме ручного управления и в режиме с включенной автоматической системой. Продолжительность T указанных режимов выбирают так, чтобы с заданной степенью вероятности можно было утверждать, что различие между средними значениями представительных показателей в ручном и автоматическом режимах неслучайно.

Для получения достоверных данных необходимо правильно выбрать продолжительность T режима ручного и автоматического управления. Для этого используют формулу, связывающую различие между математическими ожиданиями двух выборок Δ с нормированным параметром t :

$$t = \sqrt{\frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2}} \cdot \frac{\Delta}{\delta}, \quad (18.22)$$

где N_1, N_2 — число независимых опытов в первой и второй выборках; δ — дисперсия, рассчитанная по $N_1 + N_2$ точкам обеих выборок, причем принимается $N_1 = N_2 = N$.

Для приведения непрерывного процесса к дискретному можно воспользоваться формулой

$$N = T/t_{\text{сп}}, \quad (18.23)$$

где $t_{\text{сп}}$ — время спада автокорреляционной функции соответствующего непрерывного процесса.

Тогда формула (18.22) принимает вид

$$t = \sqrt{\frac{T}{2t_{\text{сп}}}} \cdot \frac{\Delta}{\delta}, \quad (18.24)$$

откуда

$$T = 2t_{\text{сп}} \frac{t^2 \delta^2}{\Delta^2}. \quad (18.25)$$

Величина t , являющаяся параметром распределения Стьюдента, нормирована в зависимости от заданной вероятности P (или уровня значимости $\alpha = 1 - P$) и числа точек N (или числа степеней свободы).

Вместо величин Δ и δ иногда удобнее пользоваться величинами $\sigma = \Delta/\bar{B}$ и $S = \sigma/\bar{B}$, где $\bar{B}$ — среднее значение того представительного показателя, по которому определяется экономическая эффективность системы.

Как известно, условия протекания технологического процесса могут изменяться с течением времени, например, из-за изменения состава поступающего сырья, образования нагара и т. п. Поэтому режимы ручного и автоматического управления следует проводить не непрерывно, один за другим, а по рандомизированным во времени периодам. Продолжительность каж-

дого периода r обычно принимают равной смене или суткам, $r=r_p=r_a$. Порядок чередования режимов автоматического r_a и ручного r_p определяется с помощью таблицы случайных чисел. Очевидно, что число чередований режимов автоматического и ручного не может быть более $2T/r-1$.

В некоторых случаях для вычисления фактического экономического эффекта от автоматизации технологического процесса могут использоваться статистические характеристики качества регулирования. Как правило, это возможно тогда, когда экономический эффект достигается в результате более точной стабилизации заданного режима. В соответствии с этим экономическая эффективность автоматизации определяется через некоторый параметр, который характеризует качество регулирования величины X :

$$\eta = \sqrt{D_x^p/D_x^a} = \delta_x^p/\delta_x^a, \quad (18.26)$$

где D_x^p и D_x^a — средние значения представительного показателя, характеризующего отклонение регулируемой величины; индексы (p) и (a) означают принадлежность к объекту до и после автоматизации.

Величины δ_x^p и δ_x^a могут либо определяться экспериментально, либо вычисляться. В последнем случае используются известные из динамики автоматических систем соотношения для вычисления дисперсий регулируемой величины через спектральную плотность случайного возмущения и передаточные функции объекта управления.

Для получения численных оценок экономического эффекта $\mathcal{E}$ на основе использования параметра η необходимо располагать зависимостью

$$\mathcal{E} = f(\eta), \quad (18.27)$$

которая связывает качество регулирования с достигаемым экономическим эффектом в денежном выражении.

§ 18.3. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ АСУ ТП

В качестве технологического объекта автоматизации принимается продуктивное отделение сахарорафинадного производства. ТЭО выполняется в соответствии с ГОСТ 24.202—80 и методическими материалами, изложенными в § 18.1 и 18.2. Составление ТЭО производится по следующей схеме.

Анализ потенциала (потерь и резервов) производства. Потери и резервы производства определяются для технологического процесса продуктового отделения и завода в целом, улучшение показателей работы которых будет обеспечено внедрением разрабатываемой АСУ ТП.

Для получения достоверных результатов исследований обязательным требованием к исходной информации является ее однородность. С этой целью из генеральной выборки анализируемого года исключаются значения как нехарактерные для анализируемого показателя, так и относящиеся к периоду функционирования ТОО в нехарактерном режиме (период капитального ремонта технологического оборудования, заключительный и пусковой периоды производства и др.). Выявление и оценка величин потерь выполняются сопоставлением фактических затрат соответствующих показателей с плановым заданием (нормами расхода), резервов — сравнением среднепрогрессивных значений с плановыми (нормами).

Проведенные исследования показали, что на заводе имеются потери и неиспользованные резервы по увеличению объема производства, снижению потерь сахара, снижению расхода тепла и трудовых затрат. Пользуясь данными табл. 18.1, определим величины потерь, резервов и потенциала по выпуску продукции. При плане 814 т сахара в сутки величина потерь (т. е. недода-но к плану)

$$\Delta U^{\text{п}} = 814,0 - 770,7 = 43,3 \text{ т};$$

величина резервов

$$\Delta U^{\text{р}} = 868 - 814 = 54 \text{ т};$$

величина потенциала

$$\Delta U^{\text{пр}} = 43,3 + 54 = 97,3 \text{ т или } \frac{97,3}{825,9} \cdot 100 = 11,8\%.$$

Величина потерь, резервов и потенциала производства по остальным показателям определяется аналогично приведенному для выпуска продукции. Тогда величина потерь в производстве (сверхнормативный расход) соответственно составила: по расходу тепла 0,05%, по технологическим потерям сахара 0,07%.

Величина резерва соответственно составила: по расходу тепла 0,30%, по технологическим потерям сахара 0,13%, по сокращению трудовых затрат — три человека в смену. Величина потенциала составила: по расходу тепла 0,35%, по технологическим потерям сахара 0,20%, по сокращению трудовых затрат — 12 человек.

Потенциальные источники экономии могут быть реализованы за счет сокращения диапазона колебаний показателей и приближения их значений к оптимальным. Определение ожидаемой экономии основано на выделении из общих колебаний той части, которая может быть устранена за счет автоматизации: выбор оптимального включения в работу вакуум-аппаратов,

18.1. Показатели выпуска продукции

Номер п/п	Суточные (Y_i)	Ниже плановых (Y_{ij})	Выше плановых (Y_{ih})	Номер п/п	Суточные (Y_i)	Ниже плановых (Y_{ij})	Выше плановых (Y_{ih})
1	936	—	936	18	853	—	853
2	848	—	848	19	892	—	892
3	851	—	851	20	847	—	847
4	960	—	960	21	827	—	827
5	953	—	953	22	815	—	815
6	875	—	875	23	756	756	—
7	856	—	856	24	829	—	829
8	802	802	—	25	802	802	—
9	731	731	—	26	748	748	—
10	719	719	—	27	810	810	—
11	806	806	—	28	742	742	—
12	751	751	—	29	818	—	818
13	788	788	—	30	863	—	863
14	807	807	—	Всего	24777	10020	14757
15	855	—	855	Число	30	13	17
16	879	—	879	значений			
17	758	758	—	Среднее	825,9	770,7	868,0
				значение			

проведение уваривания при оптимальной скорости роста кристаллов, повышение выхода кристаллической массы в утфеле, снижение средней температуры утфеля, сокращение продолжительности активного цикла уваривания, улучшение качества утфеля, согласование производительности всех технологических участков отделения.

Взаимосвязь функций и задач создаваемой АСУ ТП с источниками экономии. Данную взаимосвязь можно представить в виде следующей таблицы.

Функции и задачи

Источник экономии

Информационная функция АСУ ТП

Оперативное получение информации и возможность объективной оценки сложившейся производственной ситуации

Управление материальными потоками I, II и III продукта

Повышение производительности на 0,5%, сокращение технологических потерь сахара на 0,05% к массе сырья, расхода тепла на 0,05% к массе сырья за счет стабилизации технологических параметров, минимизации времени переходных процессов вывода производительности на уровень возникшего ограничения, поддержания значений расходов, обеспечивающих рациональный режим работы объекта управления

Управление процессом уваривания утфеля, включая вспомогательные операции

Оперативное планирование работы вакуум-аппаратов

Сокращение технологических потерь сахара на 0,05%, трудовых затрат на четыре человека, повышение производительности на 0,25% за счет устранения водных раскочек и, следовательно, уменьшения количества воды, улучшения качественных показателей утфеля, увеличения коэффициента ритмичности и автоматизации всех операций (кроме закладки пудры) на участке. Сокращение расхода тепла на 0,10%, повышение производительности оборудования на 0,25%, сокращение технологических потерь сахара на 0,02%, сокращение трудовых затрат на четыре человека за счет оптимального графика работы вакуум-аппаратов и синхронизации работы оборудования участка кристаллизации.

Ожидаемые результаты от внедрения АСУ ТП. В результате внедрения системы ожидается улучшение следующих показателей: повышение производительности оборудования на 1%; снижение технологических потерь сахара на 0,12%; снижение расхода тепла на 0,15%; сокращение трудовых затрат на 12 человек.

Расчет показателей экономической эффективности. Для расчета показателей экономической эффективности используются следующие исходные данные (табл. 18.2).

18.2. Исходные данные для расчета

Показатели	Условное обозначение	Величина показателей в расчетном ... т.
Выпуск сахара-рафинада, т	A	130000
Выход рафинада из сырья, %	B	98,3
Объем сырья для переработки, т	O ₁	133570
Себестоимость 1 т сахара-рафинада, руб.	C	618,7
Цеховые расходы, тыс. руб.	Ц	602
Общезаводские расходы, тыс. руб.	O	789
Расходы на эксплуатацию и обслуживание оборудования, тыс. руб.	P	2147,2
Среднемесячная заработная плата одного рабочего, руб.	З _p	152,8
Численность ППП, человек	Ч	960
Основные производственные фонды, тыс. руб.	Ф	17138
Удельный расход тепла, Гкал		0,57
Стоимость 1 Гкал тепла, руб.	Ц _т	11,78
Стоимость 1 т сырья, руб.	Ц _с	480
Оптовая цена 1 т сахара-рафинада, руб.	Ц _p	656

Внедрение АСУ ТП увеличит выпуск сахара на величину A :

$$A = 130\,000 \cdot 1,0 \cdot 0,01 = 1300 \text{ т.}$$

Выпуск сахара после внедрения системы

$$A_1 = 130\,000 + 1300 = 131\,300 \text{ т.}$$

Объем сырья для переработки

$$O_1 = \frac{131\,300 \cdot 100}{98,3} = 133\,570 \text{ т.}$$

Экономия накладных расходов

$$Э_n = (602,0 + 789,0 + 2147,2) \cdot 0,7 \cdot 1,0 \cdot 0,01 = 24,8 \text{ тыс. руб.}$$

Экономия сырья от снижения технологических потерь сахара (неучтенных)

$$Э_c = 480,0 \cdot 133\,570 \cdot 0,12 \cdot 0,01 = 76,9 \text{ тыс. руб.}$$

Экономия от снижения расхода тепла

$$Э_r = 11,78 \cdot 131\,300 \cdot 0,57 \cdot 0,15 \cdot 0,01 = 1,3 \text{ тыс. руб.}$$

Экономия фонда заработной платы за счет сокращения численности

$$Э_з = 152,8 \cdot 12 \cdot 12 \cdot 1,14 = 25,1 \text{ тыс. руб.}$$

В связи с внедрением АСУ ТП основные фонды завода увеличатся на 120 тыс. руб. Затраты на текущий ремонт составляют 10% стоимости вновь вводимого оборудования:

$$Э_r = 120 \cdot 10 \cdot 0,01 = 12 \text{ тыс. руб.}$$

Данные расчета затрат на амортизацию приведены в табл. 18.3.

18.3. Расчет затрат на амортизацию

Виды оборудования	Сметная стоимость, тыс. руб.	Нормы амортизационных отчислений, %	Величина отчислений, тыс. руб.
Вычислительная техника	105	12,0	12,6
Материалы и электроконструкции	5	13,4	0,7
Аппаратура контроля и управления	10	15,5	1,6
Итого	120		14,9

Дополнительные затраты составят:

$$З_d = 14,9 + 12,0 = 26,9 \text{ тыс. руб.}$$

Дополнительная прибыль от снижения себестоимости и увеличения выпуска продукции:

$$Э_{\text{год}} = 24,8 + 76,9 + 1,3 + 25,1 - 26,9 = 101,2 \text{ тыс. руб.}$$

$$\Pi = (656,0 - 618,7) \cdot 1300 = 48,5 \text{ тыс. руб.}$$

Приведение дополнительных капитальных затрат к году внедрения:

	K_n'	K_d'		K_n'	K_d'
1984 г.	45	—	1986 г.	40	75
1985 г.	40	—	1987 г.	35	45

$$K_{пр} = 45(1 + 0,1)^4 + 40(1 + 0,1)^3 + 40(1 + 0,1)^2 + 35(1 + 0,1) = 206 \text{ тыс. руб.};$$

$$K_d = 75(1 + 0,1)^2 + 45(1 + 0,1) = 140,2 \text{ тыс. руб.}$$

Себестоимость 1 т сахара-рафинада после внедрения АСУ ТП:

$$C_1 = 618,7 - \frac{101\,200}{131\,300} = 617,93 \text{ руб.}$$

Удельные капитальные вложения:
до внедрения АСУ ТП

$$K_{уд} = \frac{17\,138\,000}{130\,000} = 131,83 \text{ руб.};$$

после внедрения АСУ ТП

$$K_{уд} = \frac{17\,138\,000 + 140\,200 + 206\,000}{131\,300} = 133,16 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект

$$\mathcal{E}_g = (618,7 + 0,15 \cdot 131,83) - (617,93 + 0,15 \cdot 133,16) \cdot 131\,300 = 76,2 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости АСУ ТП

$$T = \frac{140\,200 + 206\,000}{101\,200 + 48\,500} = 2,3 \text{ года.}$$

Коэффициент эффективности капитальных затрат

$$E_p = \frac{101\,200 + 48\,500}{140\,200 + 206\,000} = 0,44 \text{ руб./руб.}$$

Рост производительности труда

$$П_{\tau} = 130\,000/960 = 135,4 \text{ т};$$

$$П_{\tau} = 131\,300/948 = 138,5 \text{ т};$$

$$П_{\tau} = \frac{138,5 - 135,4}{135,4} \cdot 100 = 2,3\%.$$

Условное высвобождение численности

$$У_{усл} = \frac{131\,300}{135,4} - 960 = 10 \text{ человек.}$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие методические материалы используются для расчета экономического эффекта от автоматизации?
2. На каких двух стадиях создания АСУ ТП выполняется расчет экономического эффекта?
3. С какой целью вводится коэффициент приведения и как он используется в определении годового экономического эффекта?
4. Перечислите основные экономические показатели, предусмотренные методикой расчета экономического эффекта.
5. Назовите основные источники производственных резервов эффективности АСУ ТП.
6. Перечислите основные этапы анализа и оценки производственных потерь, резервов и потенциала технологических объектов автоматизации.
7. Что понимается под резервом эффективности АСУ ТП?
8. Сформулируйте понятия потерь и потенциала производства при определении эффективности АСУ ТП.
9. Что является основой для определения фактического экономического эффекта АСУ ТП?
10. Как определяется продолжительность T режимов ручного и автоматического при проведении производственных испытаний?
11. Какое требование предъявляется к исходной информации для расчета технико-экономического обоснования АСУ ТП?
12. Как выбираются значения показателей из генеральной выборки анализируемого года для получения достоверных результатов?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на наличие книг, в которых рассматриваются вопросы автоматизации технологических процессов, эта отрасль знаний развивается чрезвычайно динамично и требуются постоянное обновление материала и освещение современного состояния проблем автоматизации. Содержание данного учебника построено на материале разработок и опыте эксплуатации систем автоматизации, выполненных на современном научно-техническом уровне и получивших широкое распространение в отрасли. Это позволяет решить задачу приближения обучения к практике, промышленному производству. Молодой специалист, придя на производство, встретит знакомые решения, а полученные знания по развитию АСУ ТП позволят ему решать перспективные задачи.

В учебнике использованы действующие нормативные материалы, последние достижения науки и техники в области автоматизации технологических процессов. В нем нашли отражение возможные прогрессивные пути развития АСУ ТП в отрасли. В учебнике использованы межведомственные и ведомственные материалы, чем он отличается от уже изданной учебной литературы.

Говоря о нерешенных вопросах, существующих научных направлениях, имеющихся гипотезах в перспективном развитии автоматизации технологических процессов отрасли, следует иметь в виду, что непрерывно повышающаяся интенсификация технологических процессов, переход к технологическим агрегатам большой единичной мощности, совершенствование организационной структуры промышленности порождают принципиально новые задачи управления, что отражается на разработке и внедрении систем автоматизации.

Эти проблемы рассматриваются в двух аспектах: развитие локальных систем автоматического управления агрегатами и участками пищевых производств и развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами пищевых производств.

Локальными системами автоматизации охвачены основные и вспомогательные технологические процессы на многих предприятиях сахарной, масло-жировой, хлебопекарной, мельнично-элеваторной, консервной, пивоваренной, кондитерской, табачной и других подотраслей пищевой промышленности.

Большинство функционирующих систем — это децентрализованные системы регулирования, защиты, сигнализации, программного и логического управления. Наиболее массовыми являются одноконтурные стабилизирующие системы, составляющие до 75% общего числа систем. Из регулирующих параметров незначительную часть составляют параметры качества полу-продуктов и готовой продукции.

Для повышения эффективности функционирования систем автоматизации создаются специальные приборы контроля состава и свойств продуктов и полупродуктов.

В процессе разработки и освоения в промышленности локальных систем автоматизации выявляются возможные пути их совершенствования. Дополнительные требования к системам автоматизации возникают в связи с повышением роли социально-экономических факторов, таких как защита окружающей среды (проблемы экологии), экономия энергетических ресурсов, повышение качества и безопасности труда.

Наиболее эффективные направления совершенствования локальных систем автоматизации — разработка алгоритма управления, наиболее полно учитывающего особенности технологического процесса, и использование более совершенных и надежных средств автоматизации. Работы в области совершенствования алгоритмов управления выделяются в три группы различного направления:

группа алгоритмов, в которых учитываются расчетные параметры технологического процесса, а также вспомогательные параметры для улучшения динамических свойств каналов регулирования;

группа алгоритмов, основанных на изменении структуры управляющего устройства и параметров его настройки;

группа алгоритмов, обеспечивающих расчет управляющих воздействий при неполной информации о технологическом процессе.

Реализация указанных алгоритмов традиционными аналоговыми средствами автоматизации затруднена, а в некоторых случаях невозможна без перехода на цифровую технику. Таким образом, развитие локальных систем автоматизации в пищевой промышленности возможно только при условии широкого использования нового поколения технических средств автоматизации, основанных на использовании микропроцессоров (микроконтроллеров).

При использовании цифровых контроллеров для выполнения функций локальных систем автоматизации нижнего уровня АСУ ТП меняется не только техническая структура АСУ ТП, но и ее идеология. Распределение вычислительных функций между локальными и центральными вычислителями, использование магистрального канала связи существенно повышают надежность системы, позволяют увеличить число оптимизационных и стратегических задач, решаемых на верхнем уровне.

На предприятиях пищевой промышленности осуществляется переход автоматизации технологических процессов на более высокий уровень — от локальных систем, выполненных на традиционных технических средствах, к автоматизированным и автоматическим системам управления с применением микропроцессорной и вычислительной техники.

АСУ ТП разрабатываются и внедряются на предприятиях по переработке сахарной свеклы, семян масличных культур, зерна, плодовоовощных культур, зерна и картофеля на спирт, ячменя на пиво, табачного листа и др. В большинстве разработанных АСУ ТП в качестве объекта управления выступает основной технологический процесс производства продукта в целом.

Достижения в области микроэлектроники и организации вычислительного процесса привели к созданию микропроцессорной техники, обладающей рядом преимуществ перед вычислительной техникой других поколений. Эти преимущества значительно улучшили технико-экономические показатели создаваемых АСУ ТП и позволили разработать для отрасли долгосрочную программу по созданию в ведущих подотраслях предприятий технологических комплексов с высоким уровнем автоматизации.

В связи с появлением нового поколения управляющей вычислительной техники на базе микропроцессоров наметилась тенденция создания распределенных АСУ ТП. В этом направлении АСУ ТП наиболее широкого применения включают системы автоматического регулирования, базирующиеся на микропроцессорных контроллерах, интерактивную* систему представления информации, основанную на дисплеях, систему оптимизации и технико-экономических расчетов, реализуемую управляющей ми-ни (микро)-ЭВМ универсального назначения.

Для реализации задач нижнего уровня используются микропроцессорные УВК и микроконтроллеры. Микроконтроллер включает аппаратные и программные средства для обмена информацией, устройства отображения информации по месту, клавиатуру для ввода цифровых данных, выбор функциональных клавиш стандартных функций типа вывода аварийных сообще-

* Диалоговую, в которой пользователь осуществляет обмен текстовыми командами и ответами во время ее работы.

ний, перевод в режим ручного управления. Операционную систему и программы выполнения стандартных функций микроконтроллера размещают в ПЗУ с возможностью перегрузки из центральной ЭВМ.

Использование цифровых микроконтроллеров повышает уровень координации и интеграции управления в пределах всего предприятия благодаря цифровой трассе данных, передача информации по которой между микроконтроллерами участков и агрегатов и центральной машиной осуществляется с помощью специальных микроконтроллеров.

Разработка микроконтроллеров является одним из основных направлений отечественного регуляторостроения. Программируемые устройства автоматизации с «компьютерной» организацией, предназначенные для автоматического регулирования технологических процессов и именуемые регулирующими логическими микропроцессорными контроллерами, становятся одним из базовых элементов перспективных технических средств АСУ ТП.

«Компьютерная» организация микропроцессорных контроллеров обеспечивает его универсальность, благодаря которой контроллер одного и того же типа может использоваться на разных объектах с разными свойствами, заменяя при этом традиционную аналоговую систему приборов, насчитывающую более двух десятков изделий разнообразного назначения. Настройка контроллера на конкретные задачи регулирования осуществляется программным путем с помощью клавишного пульта оператора, на котором отображается информация о выбранных алгоритмах управления, коэффициентах статической и динамической настройки и величинах технологических параметров.

Основные информационно-вычислительные функции систем реализуются пакетами программных модулей, настраиваемыми на условия конкретного применения с помощью управляющих файлов без корректировки, что соответствует прогрессивным решениям. Тенденции развития функциональной структуры АСУ ТП определяют направление совершенствования математического и программного обеспечения.

Принципы организации обмена информацией в распределенной системе определяются ее конкретной технической реализацией. Однако во всех случаях программное обеспечение должно обладать возможностью резервирования контроллеров, передачи управления центральной машине, перезаписи программ и данных из центральной машины, корректировки параметров и др.

Организационная структура систем сохраняется такой же, как и в централизованных системах, на принципах которых построены головные образцы АСУ ТП пищевых производств. В то

же время функции системы становятся более «интеллектуальными». Центральная машина обеспечивает возможность решения следующих задач линейного, нелинейного и целочисленного программирования: расчет балансов потока массы и энергии; идентификация в реальном времени статических и динамических характеристик процесса; адаптация алгоритмов управления; долгосрочное хранение данных о процессе и принятых решениях по управлению им. Кроме того, на центральной машине должно осуществляться программирование для локальных микроЭВМ.

Ориентировочный перечень функций перспективных АСУ ТП приведен ниже.

Функции	Объекты
Нижний уровень	
Взаимосвязанное оптимальное регулирование с элементами логики	Установки с непрерывным технологическим процессом ректификации, дистилляции, экстрагирования, нагрева, охлаждения, пастеризации, выпаривания и др.
Программное логическое управление	Установки с непрерывно-дискретным технологическим процессом варки, брожения, стерилизации и др.
Логическое управление	Установки и агрегаты транспортирования сыпучих продуктов, штучных изделий
Контроль комплексных показателей	Приемка сырья, лаборатория теххимконтроля
Верхний уровень	
Анализ производственных ситуаций	Основной технологический процесс производства
Оптимизация процесса в статике	То же
Многокритериальное управление	»

Проблемы развития пищевых производств как объектов АСУ ТП требуют учета особенностей большинства подотраслей:

изменение технологических показателей качества сырья в зависимости от сроков его хранения и транспортировки, района произрастания и погодных условий;

изменение технологических показателей качества топлива и вспомогательных материалов;

повышенный износ технологического оборудования вследствие непрерывного и интенсивного режима его работы;

необходимость роста производительности труда как самого существенного резерва расширения производства.

Большинство указанных особенностей пищевых производств требуют оперативной корректировки технологического регла-

мента процесса в зависимости от показателей качества сырья, вспомогательных материалов и состояния оборудования. Это повышает требования к применяемым АСУ ТП и обуславливает необходимость реализовать определенную совокупность функций сбора и обработки информации, контроля и управления.

Учитывая функции, специфические для каждого технологического процесса, и функции общего характера, алгоритмическое и программное обеспечение систем разрабатывается таким образом, чтобы обеспечить максимальную унификацию решений, т. е. однотипность программной реализации совпадающих в разных пищевых производствах функций. К таким унифицированным комплексам алгоритмов и программ относятся комплекс расчета ТЭП, комплекс обслуживания оператора-технолога при запросах на ввод и вывод информации из вычислительной машины и др.

Расширение задач связи с системами (АСУ) высшего уровня должно привести к созданию качественно новой формы АСУ — организационно-технологических систем, обеспечивающих интегрированную обработку технологической и экономической информации с использованием единой базы данных, и принятию оперативных и стратегических решений на основе информации, получаемой непосредственно с технологических участков.

Для реализации существующих научных направлений автоматизации пищевых процессов необходимо решить ряд научных и организационно-технических задач. Важнейшей научной задачей при использовании цифровых регуляторов (микроконтроллеров) является исследование алгоритмов управления на модели объекта. Это направление осуществляется, в частности, на цифро-аналоговом комплексе, где выбор программных модулей позволяет комплектовать алгоритмы управления разной сложности в сжатые сроки.

Сложные задачи предстоит решить в области метрологического обеспечения средств и систем управления. При этом нормативные документы, определяющие требования к точности контроля и управления, нуждаются в научном обосновании.

Трудоемкость программного обеспечения микроЭВМ и микроконтроллеров является определяющим фактором при постановке задачи автоматизации программирования. К тому же большие масштабы тиражирования систем автоматизации делают актуальным автоматизацию проектирования.

К вопросам организационно-технического характера относятся создание промышленной базы для производства средств автоматизации и монтажа систем, подготовка и переподготовка кадров для эксплуатации систем, установление единой в отрасли методики проведения работ по созданию и внедрению авто-

матических и автоматизированных систем управления технологическими процессами.

В общей задаче подготовки инженера в области автоматизации рассматриваются два направления: подготовка специалистов по автоматизации технологических процессов и подготовка специалистов других профилей (технологов, механиков, энергетиков, экономистов). Теперь невозможно решить задачи автоматического управления технологическими процессами только специалистами по автоматизации. В этом процессе должны участвовать и технолог, и механики, и другие специалисты. Основные задачи, которые решают разные специалисты, сводятся к следующему:

- формулирование технологических требований к системе автоматизации, что отражается в разработке функциональной схемы автоматизации (выделение управляемого объекта, структура системы автоматизации, перечень и допустимые диапазоны изменения технологических параметров, места установки датчиков и регулирующих органов, аппаратурное решение системы автоматизации и т. д.);

- выбор числа и места установки основных постов управления;
- разработка алгоритмов обработки информации и решение основных задач по сбору, предварительной обработке и хранению нужной информации, контролю за состоянием технологического оборудования, по подготовке и представлению данных сменному инженерно-техническому персоналу и др.;

- получение некоторых обобщенных показателей, характеризующих работу управляемого объекта, а именно расчет оперативных плановых заданий, режимов работы оборудования, расчеты оперативных значений технико-экономических показателей, анализы производственных ситуаций и др.;

- выработка стратегии управления, т. е. постановка задач оптимизации и методов их решения, выбор метода управления отдельными параметрами, включая непосредственное цифровое и супервизорное управление, стабилизация материальных потоков и т. д.;

- изучение статических и динамических свойств управляемого объекта, разработка математических моделей применительно к различным задачам управления;

- выполнение непосредственно функций управления процессами, агрегатами, участками, цехами, производствами, предприятиями, объединениями (на уровне оператора, диспетчера, руководителя предприятия и т. д.).

Дальнейшее развитие автоматизации в пищевой промышленности осуществляется в направлении создания и совершенствования как систем управления технологическими процессами, так и систем организационно-экономического назначения.

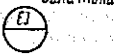
ПРИЛОЖЕНИЯ

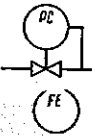
Приложение 1

Условные обозначения приборов и средств автоматизации в схемах автоматизации технологических процессов (ГОСТ 21.404—85)

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Первичный измерительный преобразователь (датчик), устанавливаемый по месту		Исполнительный механизм, открывающий регулирующий орган при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала	
базовое обозначение		Исполнительный механизм, закрывающий регулирующий орган при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала	
допускаемое обозначение		Исполнительный механизм, который при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала оставляет регулирующий орган в неизменном положении	
Прибор, устанавливаемый на щите, пульте		Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом	
базовое обозначение		Прибор для измерения температуры показывающий регистрирующий с позиционным регулятором, установленный на щите	
допускаемое обозначение		Регулятор температуры бесшкальный, установленный по месту	
Отборное устройство без постоянно подключенного прибора (служит для эпизодического подключения приборов во время наладки, снятия характеристик и т. п.)		Прибор для измерения температуры бесшкальный с контак-	
Исполнительный механизм. Общее обозначение. Положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала не показывается			

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
ным устройством, установленный по месту		ным устройством и сигнализацией верхнего уровня, установленный по месту	
Регулятор температуры пропорционально-интегральный, установленный на щите		Прибор для измерения уровня бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту	
Комплект для измерения температуры показывающий регистрирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите		Регулятор-сигнализатор уровня	
Прибор для измерения давления показывающий, установленный по месту		Прибор для измерения уровня показывающий с сигнальным устройством, установленный на щите	
Прибор для измерения перепада давления показывающий, установленный по месту		Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения плотности, установленный по месту	
Прибор для измерения давления бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту		Прибор для измерения плотности бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту	
Прибор для измерения давления показывающий регистрирующий, установленный на щите		Прибор для измерения размеров показывающий, установленный по месту	
Прибор для измерения давления с контактным устройством, установленный по месту		Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения влажности, установленный по месту	
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения уровня, установленный по месту		Прибор контроля наличия факела в печи с контактным устройством, установленными на щите	
Прибор для измерения уровня показывающий, установленный по месту		Прибор для управления процессом по временной программе, установленный на щите	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Преобразователь сигнала термо-ЭДС, термопреобразователя сопротивления в сигнал постоянного тока, установленный на щите		казывающий, установленный на щите	
Преобразователь сигнала (выходной — пневматический, выходной — электрический), установленный на щите		Регулирующий орган	
Преобразователь сигнала (входной — электрический, выходной — пневматический), установленный на щите		Линия связи	
Вычислительное устройство, выполняющее функцию умножения, установленное на щите		Пересечение линий связи без соединения друг с другом	
Вычислительное устройство, выполняющее функцию алгебраического суммирования разнородных величин, установленное на щите		Пересечение линий связи с соединением между собой	
Вычислительное устройство, выполняющее функцию деления сигналов, установленное на щите		Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения температуры, установленный по месту	
Прибор селектирования большего или меньшего сигнала, установленный на щите		Прибор для измерения температуры показывающий, установленный по месту	
Устройство, выполняющее усиление сигнала по мощности, установленное на щите		Прибор для измерения температуры показывающий, установленный на щите	
Электродвигатель		Прибор для измерения температуры бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту	
Прибор для измерения любой электрической величины по		Прибор для измерения температуры регистрирующий, установленный на щите	
		Прибор для измерения температуры с автоматическим обеспечивающим устройством, регистрирующий, установленный на щите	
			

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Прибор для измерения давления показывающий с контактным устройством, установленный по месту		Прибор для измерения расхода показывающий со счетной приставкой, установленный на щите	
Прибор для измерения давления показывающий регистрирующий с позиционным регулирующим устройством, установленный на щите		Прибор для измерения влажности, регистрирующий, установленный на щите	
Регулятор давления прямого действия		Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода, установленный по месту	
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода, установленный по месту		Вторичный прибор газоанализатора (показывающий и регистрирующий), установленный на щите	
Прибор для измерения расхода бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту		Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения частоты вращения привода, установленный по месту	
Прибор для измерения соотношения расходов регистрирующий, установленный на щите		Прибор для измерения частоты вращения привода показывающий и регистрирующий, установленный на щите	
Прибор для измерения расхода показывающий, установленный по месту		Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения вязкости, установленный по месту	
Прибор для измерения расхода интегрирующий, установленный по месту		Прибор для измерения вязкости показывающий, установленный по месту	
Прибор для измерения расхода интегрирующий с устройством для выдачи сигнала после прохождения заданного количества вещества, установленный по месту		Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения массы про-	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
дукта, установленный по месту		Задатчик управления мощный (маломощный), кнопка управления, ключ управления, установленные на щите	
Прибор для измерения массы продукта показывающий с контактным устройством, установленный на щите		Кнопка со встроенной лампочкой, ключ управления с подсветкой, установленные на щите	
Вычислительное устройство, выполняющее функцию ограничения сигнала по максимуму, установленное на щите		Переключатель электрических цепей измерения, переключатель для газовых (воздушных) линий, пневмотумблер, ключ управления, предназначенный для выбора цепей управления, установленные на щите	
Вычислительное устройство, выполняющее функцию ограничения сигнала по минимуму, установленное на щите		Надписи, расшифровывающие конкретную измеряемую величину, располагаются либо рядом с прибором, либо в виде таблицы на поле чертежа	 
Вычислительное устройство, выполняющее функцию извлечения квадратного корня, установленное на щите		Лампа сигнальная (табло)	
Вычислительное устройство, выполняющее логические операции (умножение — «И», сложение — «ИЛИ», отрицание — «НЕ», запрет — «НЕТ») установленное на щите	   	Сирена электрическая (пневматическая)	
Байпасная панель дистанционного управления, установленная на щите			

* Возле прибора регулирующего справа, вне графического обозначения, наносятся буквенные обозначения закона регулирования: пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД), позиционный (Пз).

** Буквы Н и L, нанесенные справа, вне графического обозначения, означают соответственно сигнализацию (блокировку) верхнего и нижнего уровней.

Буквенные обозначения измеряемых величин (ГОСТ 21.404-85)

Обозначение	Измеряемая величина		Функция, выполняемая прибором		
	Основное значение первой буквы	Дополнительное значение, уточняющее значение первой буквы	Отображение информации	Формирование выходного сигнала	Дополнительное значение
A	+	—	Сигнализация	—	—
B	+	—		—	—
C	+	—		Регулирование, управление	—
D	Плотность	Разность, перепад	—	—	—
E	Любая электрическая величина	—	+	—	—
F	Расход	Соотношение, доля, дробь	—	—	—
G	Размер, положение, перемещение	—	+	—	—
H	Ручное воздействие	—	—	—	Верхний предел измеряемой величины
I	+	—	Показание	—	
J	+	Автоматическое переключение, обегание		—	
K	Время, временная программа	—	—	+	—
L	Уровень	—	—	—	Нижний предел измеряемой величины
M	Влажность	—	—	—	
N	+	—	—	—	
O	+	—	—	—	—
P	Давление (вакуум)	—	—	—	—
Q	Величина, характеризующая состояние: состав, кон-	Интегрирование, суммирование по времени	—	+	—

Обозначение	Измеряемая величина		Функция, выполняемая прибором		
	Основное значение первой буквы	Дополнительное значение, уточняющее значение первой буквы	Отображение информации	Формирование выходного сигнала	Дополнительное значение
R	центрация и т. п.	—	Регистрация	—	—
S	Радиоактивность	—	—	Включение, отключение, переключение	—
T	Скорость, частота	—	—	+	—
U	Температура	—	—	—	—
V	Несколько разнородных измеряемых величин	—	—	—	—
W	Вязкость	—	+	—	—
X	Масса	—	—	—	—
Y	Нерекомендуемая резервная буква	—	—	—	—
Z	+	—	—	+	—
	+	—	—	+	—

Примечание. Буквенные обозначения, отмеченные знаком «+», являются резервными, а отмеченные знаком «—» не используются.

Приложение 3

Рекомендации по составлению блок-схем алгоритмов

Настоящие рекомендации составлены на основе анализа большого числа блок-схем.

Основные конструкции. Блок-схемы следует составлять из пяти конструкций, принятых в структурном программировании (рис. П.1). Каждая конструкция должна иметь только один вход и один выход. В конструкциях выбора (рис. П.1, б, д) по одной из ветвей обрабатывающий блок может отсутствовать. Если в конструкции (см. рис. П.1, д) все или некоторые исходы приводятся на других листах, адресация этих исходов производится в соответствии с ГОСТ 19.002—80. Если число исходов три, то конструкция может изображаться в соответствии с рис. П.2.

Оформление цикла (рис. П.3). Если тело цикла не содержит разветвлений либо сложных расчетов, которые должны выполняться в строго определенном порядке, то цикл можно изобразить с помощью одного символа «процесс», не детализируя организацию цикла. В этом случае внутри символа или в комментарии должны быть указаны начальное и конечное значения параметра цикла, а также шаг его изменения.

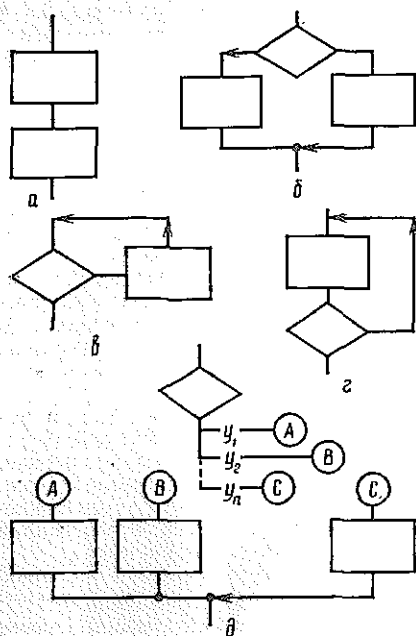


Рис. П.1. Основные конструкции структурного программирования:

a — последовательность; *б* — IF THEN ELSE (выбор из двух возможностей); *в* — DO WHILE (повторение, пока условно истинно); *г* — DO UNTIL (повторение, пока условно ложно); *д* — CASE, $n > 3$ (разветвление и соединение)

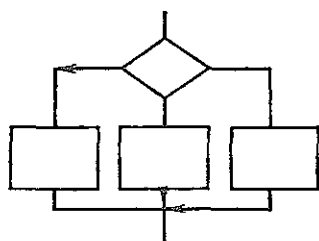


Рис. П.2. Конструкции «выбор» при трех исходах

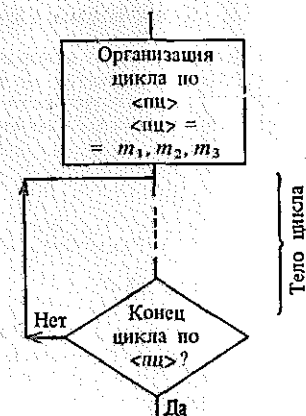


Рис. П.3. Пример оформления цикла:

$\langle \text{пц} \rangle$ — параметр цикла; m_1 — начальное значение параметра; m_2 — конечное значение параметра; m_3 — шаг цикла

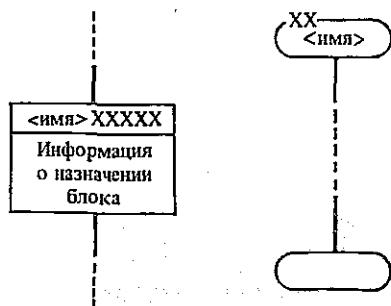


Рис. П.4. Пример детализации алгоритма:
 $\langle \text{имя} \rangle$ — имя детализируемого блока

XXX XX — координата детализирующей блок-схемы
 координата или номер первого блока детализации
 номер листа, на котором приведена детализация

Если тело цикла должно быть детализировано, то цикл изображается в виде конструкций DO WHILE или DO UNTIL. В последнем случае действия, записанные в теле цикла, выполняются по крайней мере один раз. Начало и конец каждого из вложенных циклов указываются отдельно.

Детализация алгоритма. Следует избегать многочисленных детальных блок-схем со многими переходами со страницы на страницу. Блок-схема должна быть укрупненной, отражающей основную логику алгоритма, и по возможности располагаться на одной странице. При необходимости расшифровывать отдельные блоки укрупненной схемы используется блок детализации. На рис. П4 приведен пример детализации алгоритма с помощью символа «Процесс». Могут также использоваться символы «Решение», «Модификация», «Ввод-вывод», «Пуск-останов».

При изображении сложных алгоритмов может использоваться символ «Параллельные действия». Но поскольку в большинстве случаев применяемая вычислительная техника не допускает одновременного выполнения операций, то рекомендуется дополнительно указать (в блок-схеме или текстовой части), в какой последовательности выполнять параллельные ветви в этом случае.

Требования к выполнению отдельных символов блок-схемы. Вход и выход в символ «Пуск-останов» должен производиться по вертикальной оси.

Вход в символ «Решение» производится только через одну из вершин символа. Каждый исход из символа должен сопровождаться условием решения (да, нет, =, <, > и т. п.). Если условий не больше трех, условие представляется над каждой выходящей линией или справа от нее. Все основные символы, кроме символа «Решение», могут иметь только один выход.

При разрыве линии потока, соединяющей символы блок-схемы на одной странице, используется символ «Соединитель» , внутри которого приводится идентификатор соединителя в виде буквы, цифры либо буквы и цифры, но не номера соединяемых символов.

«Межстраничный соединитель»  используется, если линия потока соединяет символы, расположенные на разных листах. Символ можно поворачивать, но при этом всегда в верхней строке указывается номер листа, а в нижней — координата или порядковый номер символа, к которому (от которого) направлена линия потока. Места соединения линий обозначаются точкой.

Приложение 4

Языки программирования и система трансляции* для ЭВМ

Фортран. Одним из наиболее «популярных» языков вообще и для СПО АСУ ТП в частности остается Фортран. Это язык высокого уровня — первый транслятор появился в 1957 г. К 1966 г. он сформировался как научно-ориентированный язык программирования и в 1966 г. был разработан стандарт Фортрана. Во всем мире в разработку ПО на Фортране вложены огромные средства, имеются обширные библиотеки разного назначения для этого языка. Уже многие годы ни одно ОПО для ЭВМ не считается полноценным, если в нем отсутствует транслятор с Фортрана.

Для очень многих программистов всех поколений — от специалистов со стажем до прошедших после вуза — Фортран — «родной язык» программи-

* Системы, обеспечивающие преобразование программ на некотором языке программирования в программы на другом языке, в определенном смысле эквивалентны исходным.

рования. К достоинствам Фортрана следует отнести сравнительную (с другими языками) простоту основных идей — простые управляющие структуры, небольшое число типов данных, удобный ввод — вывод. В целом для программирования чисто вычислительных задач, т. е. прямого счета с простой логикой, средств Фортрана вполне достаточно.

К сожалению, достоинства Фортрана при усложнении задач переходят в его недостатки. Главные из них — невозможность структурного кодирования ввиду недостаточной «мощности» управляющих средств языка, а также слабая защищенность от мелких ошибок и описок. Последнее связано с наличием в идеологии языка так называемых правил умолчания.

Простые переменные могут не описываться программистом заранее, они автоматически включаются в память программы по мере их появления в выполняемых операторах программы. Любая описка в обозначении переменной приводит к труднопредсказуемым последствиям. Например, необходимо получить произведение двух чисел, причем значение одному из сомножителей присвоено отдельно в начале программы. Эти два фрагмента могут выглядеть следующим образом:

$A8=5$

..... промежуточные действия
..... программы

$C=*AB$

Здесь * — знак умножения, принятый во многих языках, в том числе и в Фортране.

Требуемое произведение должно получиться в C , величина AB уже была как-то определена, но в начале программы малозаметная описка — должно быть $AB=5$. Поскольку величина AB фактически не определена, результат в C также непредсказуем. Зато в программе появилась новая переменная $A8$, которая никак больше не используется. О подобных и некоторых других ошибках, которые «не вылавливает» Фортран, имеется многочисленная литература.

Другой подобный же недостаток связан с ограниченными средствами для описания данных со сложной структурой. Средства, которые предоставляет Фортран для этой цели, во-первых, достаточно неудобны, а во-вторых, в сильной степени «предрасположены» к трудновыявляемым ошибкам. Стандартный Фортран (так называемый Фортран 66 или близкий к нему Фортран IV) не имеет средств работы с текстовыми данными. Все эти недостатки незначительно затрудняют написание программ, но сильно усложняют их отладку и тестирование*. Более того, описки типа рассмотренной выше не всегда выявляются при предварительном автономном тестировании программ, но способны задержать комплексную отладку СПО в целом на многие недели, когда тестируемая система в непредсказуемые моменты времени вдруг начинает давать непонятные сбои.

Следует отметить, что Фортран при известной квалификации программиста тем не менее позволяет разрабатывать надежное СПО. Пример этому — первое поколение АСУ ТП в пищевой промышленности. Главное средство для этого — программирование отдельных небольших модулей — подпрограмм, которые легко можно тщательно оттестировать. Из таких модулей komponуются функционально более сложные, но тоже короткие (в смысле длины текста) подпрограммы и так иерархически, с учетом требований структурного программирования, разрабатываются весьма сложные программы и СПО в целом.

Частично недостатки Фортрана устранены в более поздней его модифи-

* Применение тестов; тест — испытательная программа или процедура действий для проверки правильности какой-либо программы или устройства.

кации — Фортране 77. В частности, добавлены структурный условный оператор, средства работы со строками текста и др. Благодаря этому Фортран до сих пор применяется в СПО АСУ ТП.

Паскаль. Радикальным образом, большинство недостатков Фортрана и некоторых других языков устранены в Паскале. Этот язык появился существенно позже Фортрана — первый транслятор заработал в 1970 г. Паскаль был задуман его автором Н. Виртом как язык, пригодный для обучения программированию как некоторой систематической дисциплине. Непосредственными предшественниками этого языка были Алгол 60 и Алгол W, идеи которых он развивает. Однако возможности Паскаля на практике оказались существенно выше, чем это предполагал его автор.

Это объясняется несколькими обстоятельствами. Паскаль имеет весьма развитые средства для описания данных. Данные могут быть представлены в виде достаточно сложных иерархических структур, набора множеств, связанных списков и т. п. Более того, программист имеет возможность вводить свои типы данных. Например, можно описать данное типа «клапан», «агрегат», «чан» и т. п. Данному типу «клапан» можно поставить в соответствие данное типа «состояние», которое может иметь значения «открыт», «закрыт» и т. д.

Очевидно, такие средства делают программу легко читаемой и удобной в отладке. Паскаль разрабатывался с учетом требования научить начинающего программиста структурным методам разработки программ. Поэтому его управляющие структуры максимально приспособлены для этих методов и удобны для понимания и освоения. Кроме того, любые объекты Паскаля (простая переменная, подпрограмма и т. д.) перед применением должны быть описаны в специальных разделах программы. Это исключает возможности ошибок, подобных приведенной выше для Фортрана, хотя и удлиняет текст программы за счет подробных описаний. Наконец, Паскаль имеет более строгие синтаксические правила, которые, хотя и усложняют написание программы, существенно дисциплинируют стиль программирования и облегчают отладку.

Наиболее существенным недостатком Паскаля является, по-видимому, «жесткость» описаний интерфейсов с подпрограммами. Идейно это вытекает из требования подробно описать все объекты. Но на практике это свойство языка заметно затрудняет создание библиотеки из более или менее универсальных подпрограмм.

Конкретные реализации языка в большинстве существующих трансляторов имеют средства для обхода указанного ограничения. Вообще ряд трансляторов с Паскаля имеют лучшие (по сравнению, например, с трансляторами с Фортрана) характеристики в смысле качества готовых программ. Например, на ЭВМ класса СМ-4 функционально одна и та же программа на Паскале получается в 1,5÷2 раза лучше по быстродействию и в 1,2÷1,7 раза меньше по памяти по сравнению с Фортраном. По имеющемуся опыту, разработка СПО крупного АСУ ТП на Паскале (с учетом комплексной отладки системы на объекте) потребовала в 2,5÷3 раза меньше трудовых затрат по сравнению с ее реализацией на Фортране.

Паскаль достаточно прост в освоении. Малоквалифицированному программисту писать на нем «плохие» программы труднее, чем на других языках. Особенности этого языка как бы «выпячивают» неудачные, в смысле стиля программирования, решения. Программы на Паскале легко отглаживать и модифицировать.

PL/M. По мере широкого распространения микроЭВМ получили развитие языки программирования, ориентированные на их возможности. Типичный пример такого языка — PL/M. Этот язык применяется на микроЭВМ СМ-1800, а его модификация PL/M-86 — на СМ-1810.

Язык PL/M был разработан в 1972 г. как язык системного программирования для 8-битовых микропроцессоров. Родоначальником PL/M был язык

для написания компиляторов XPL, в свою очередь происходящий от Алгола и очень мощного и сложного языка PL/I, который, начиная с шестидесятых годов, получил распространение на больших ЭВМ общего назначения, в частности на ЭВМ серии ЕС.

Однако сходство PL/M с PL/I чисто внешнее. Идейно PL/M ближе к Алголу-60 и Паскалю. Так же, как и в них, все объекты программы должны быть заранее описаны. В PL/M имеются хорошие управляющие структуры. Хотя в этом смысле он несколько уступает Паскалю, на удобстве программирования это сказывается незначительно. Однако в смысле описания данных PL/M существенно слабее Паскаля, а кое в чем уступает в этом плане и Фортрану. Кроме того, в PL/M практически отсутствуют встроенные средства ввода — вывода.

Ограниченные возможности языка естественно вытекают из желания его разработчиков получать эффективные программы на микроЭВМ с малым объемом памяти. Действительно, транслятор с PL/M обеспечивает высокое качество программ, а исполняющая система PL/M достаточно компактна в смысле памяти.

В сочетании с МОС-РВ программы на PL/M достаточно эффективно реализуют такие функции, как работа с УСО, логическое управление, регулирование на уровне ПИД-законов и т. п. Для микроЭВМ, как правило, этого достаточно и в этом смысле PL/M как язык полностью соответствует своему назначению. Если же на микроЭВМ класса СМ-1800 хотят реализовать, например, сложную в вычислительном плане оптимизационную задачу, то как язык PL/M, так и аппаратура микроЭВМ для этого малопригодны.

PL-11. По назначению он близок к PL/M, но является языком более низкого уровня. Средства PL-11 ориентированы на возможности и систему команд ЭВМ класса СМ-4, для которых он специально разработан. В этом смысле PL-11 близок к Ассемблеру. Хотя писать на нем удобнее, чем на Ассемблере, а программы получаются весьма эффективные, слабость многих средств языка не способствовали его распространению. Очевидно PL-11 — это альтернатива скорее Ассемблеру, чем языкам высокого уровня.

Алгол-60. Язык Алгол-60 почти современник Фортрана и в определенном смысле рассматривался его авторами как альтернатива Фортрану. Идеи Алгола нашли развитие во многих языках. Но они же, в частности Паскаль, но существо вытеснили Алгол-60 и его модификации.

Чтобы избежать путаницы, сделаем одно разъяснение. С 1963 по 1968 г. международная группа видных математиков разработала очень мощный и богатый новыми идеями язык, названный Алгол-68. С Алголом-60 он имеет гораздо меньше общего, чем например, с Паскалем или PL/M. К сожалению, за 20 лет трансляторы с Алгола-68 для мини-ЭВМ так и не появились. Этот язык применяется только на больших ЭВМ.

Кобол. Язык Кобол также современник Фортрана и Алгола-60, но создавался он для нескольких иных целей: экономических и бухгалтерских задач. В этих целях он достаточно широко применяется и в настоящее время, в частности в АСУП. Создатели языка стремились, насколько это возможно, приблизить Кобол к обычному разговорному языку. Поэтому текст программ на Коболе обычно очень громоздкий и трудночитаемый (в смысле понимания сути программируемого алгоритма). По этой же причине трансляторы с Кобола и его исполняющие системы, как правило, имеют большой объем, полученные программы малоэффективны — медленно работают, требуют большого объема памяти.

Из-за этого при разработке СПО АСУ ТП Кобол практически не применяется. Необходимо отметить, что Кобол допускает более низкую квалификацию программистов, чем большинство других языков. Первоначально считалось даже, что им могут пользоваться неподготовленные люди — реально это, конечно, не так. С другой стороны, в составе СПО АСУ ТП можно

выделить класс задач, подобных по своей сути бухгалтерским, т. е. без сложных алгоритмов и вычислений. Исходя из этого, при появлении хороших трансляторов Кобол, возможно, получит некоторое применение в СПО АСУ ТП.

Модуля-2. Все рассмотренные выше языки — в первую очередь Фортран, Алгол, Паскаль, в меньшей степени PL/M, PL-11, Кобол — принято считать языками общего назначения. Практика создания ПО для систем реального времени показала, что от языка их написания нужно существенно больше выразительных возможностей. Например, желательно, чтобы часть или все связи между задачами решались средствами языка, а не путем обращений к ОС.

Один из таких языков — Модуля-2 — разработан автором Паскаля Н. Виртом в конце семидесятых годов. Этот язык — развитие Паскаля как в смысле устранения некоторых его недостатков, так и в плане включения ряда средств, характерных для ОС, а не для языка.

Ада. Другой подобный язык — Ада — был впервые описан в 1980 г. Он тоже базируется на Паскале, но в нем учтены многие идеи таких мощных языков как PL/I и Алгол-68. В определенном смысле Ада мощнее Модулы-2, но существенно сложнее и, как следствие, очевидно, потребует более громоздкой системы трансляции. Оба эти языка весьма перспективны и, вероятно, найдут широкое применение.

СИ. Из перспективных языков программирования следует отметить также СИ — язык системного программирования в ОС UNIX. Это очень лаконичный и компактный язык, близкий по своим возможностям к Паскалю и отчасти к Модулю-2.

Пролог. В заключение упомянем еще одну группу языков, заметно отличающуюся по своим идеям от всех, описанных выше. Это языки программирования систем искусственного интеллекта. Пример такого языка — Пролог. Это, как правило, весьма сложные по структуре языки. Например, программа на Прологе — это совокупность записанных по определенным правилам аксиом, а результат работы программы — доказанная теорема. В других языках принципы близкие: как правило, программируется то, что требуется сделать (найти, доказать), а выбор алгоритмов встроен в язык или в исполняющую систему. Это направление развития языков считается перспективным для ЭВМ пятого поколения.

Рекомендации по выбору языков программирования. Важный момент при разработке СПО АСУ ТП — определение, какая часть СПО должна быть написана на Ассемблере, а какая — на языках высокого уровня и сколько их целесообразно применять.

На второй вопрос ответ простой — число языков должно быть минимальным — в идеале один. На практике так получается не всегда. Для обоснованного решения необходимо знать тонкости работы исполняющей системы каждого языка, совместимость реализаций языков по интерфейсам, а также дополнительные трудовые затраты при применении «неудобного» для данной задачи языка.

В качестве примера укажем, что СПО нескольких АСУ ТП, реализованных на СМ-1800 (в одно-, двух- и трехмашинных вариантах) написано на 70÷80% на PL/M и на 20÷30% на Фортране-80 (модификации Фортрана-77 для СМ-1800). При этом на Фортране программировались чисто вычислительные подпрограммы.

Что касается Ассемблера, то здесь положение сложнее. В принципе программы на Ассемблере наиболее эффективны и компактны, но требуют очень больших трудовых затрат на разработку (на порядок и больше по сравнению с применением языков высокого уровня). Кроме того, комплексная отладка систем, написанных на Ассемблере, чрезвычайно усложнена. Поэтому желательно использовать Ассемблер в минимальном объеме.

На Ассемблере в СПО АСУ ТП необходимо писать те фрагменты прог-

рамм, которые нельзя реализовать на языках высокого уровня. Это, например, обработка прерываний, сложный ввод — вывод на уровне детальной работы с устройством, некоторые «нестатные» обращения к ОС.

При наличии в ОПО таких языков, как PL/M или PL-11, лучше по возможности применять их. В приведенном выше примере для CM-1800 благодаря использованию PL/M на Ассемблере пришлось написать только порядка 1% СПО.

Иногда оказывается целесообразным написать на Ассемблере некоторые часто выполняемые, так называемые «критические» фрагменты программ. В целом опыт многих АСУ ТП пищевых производств показал, что подпрограммы Ассемблера составляют не более 15%, а в среднем порядка 5% общего объема СПО.

Выбор того или иного языка всегда ограничен несколькими обстоятельствами. Это — наличие транслятора с данного языка на используемой ЭВМ, имеющиеся заделы на данном языке (пусть даже для других ОС) и возможность их адаптации для данной АСУ ТП.

Весьма важным обстоятельством является качество транслятора. К программам, входящим в СПО АСУ ТП, предъявляются весьма жесткие требования в смысле времени работы и занимаемой памяти. Если при программировании на Ассемблере эти показатели целиком определяются искусством программиста, то в программах на языках высокого уровня это в значительной мере зависит и от особенностей генерируемого транслятором объектного кода. Большую роль играет также качество исполняющей системы данного языка, особенно в смысле объема занимаемой памяти.

Определенную роль играет также имеющийся опыт программистов. Необходимо, однако, отметить, что квалифицированный специалист, свободно владеющий двумя или более языками программирования, легко освоит и новый язык и особенности его транслятора. Все указанные выше обстоятельства являются в определенной степени «внешними» по отношению к языку программирования. Не менее важными являются свойства самого языка, как средства разработки ПО.

Одно из важнейших свойств в этом смысле — поддержка структурности программы и данных. Структурное программирование — один из методов, улучшающих программы и повышающих их надежность. Оно служит для организации проектирования программ и процесса кодирования таким образом, чтобы предотвратить большинство логических ошибок и обнаружить те, которые допущены.

Как технология структурное программирование включает три главные составляющие: проектирование системы ПО сверху вниз; модульное программирование; структурное кодирование. Возможность реализации двух последних составляющих на практике очень сильно зависит от выбора языка. Не менее важными являются возможности языка в смысле поддержки структур данных, требуемых условиями задачи. Для некоторых задач АСУ ТП (например, представления информации) актуальна способность языка поддерживать обработку текстов. Наконец, существенна способность языка поддерживать, по возможности надежно, сложные интерфейсы для взаимодействия с ОС, с базой данных, для межзадачного обмена.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Автоматизация технологических процессов пищевых производств / Под ред. Е. Б. Карпина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Агропромиздат, 1985. — 536 с.
- Автоматизация технологических процессов легкой промышленности / Под ред. Л. Н. Плужникова. — М.: Высшая школа, 1984. — 398 с.
- Автоматическое управление в химической промышленности / Под ред. Е. Г. Дудникова. — М.: Химия, 1987. — 388 с.
- Балакирев В. С., Володин В. М., Цирлин А. М. Оптимальное управление процессами химической технологии. — М.: Химия, 1978. — 384 с.
- Балашов Е. П., Григорьев В. Л., Петров Г. А. Микро- и мини-ЭВМ. — Л.: Энергоиздат, 1984. — 376 с.
- Балашов Е. П., Пузаков Д. В. Проектирование информационно-управляющих систем. — М.: Радио и связь, 1987. — 256 с.
- Банди Б. Методы оптимизации. — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.
- Голант А. И., Альперович Л. С., Васиш В. М. Системы цифрового управления в химической промышленности. — М.: Химия, 1985. — 256 с.
- Диго С. М. Проектирование баз данных. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 216 с.
- Жуковский Э. И., Скорописов Ю. И. Совершенствование складских систем. — Киев: Техніка, 1984. — 142 с.
- Изерман Р. Цифровые системы управления. — М.: Мир, 1984. — 541 с.
- Королев Л. Н. Развитие ЭВМ и их математического обеспечения. — М.: Знание, 1984.
- Ладанюк А. П., Перепечаенко В. Г. Оперативное управление технологическими процессами в пищевой промышленности. — Киев: Урожай, 1987. — 160 с.
- Останчук Н. В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств. — Киев: Вища школа, 1981. — 304 с.
- Платонов П. Н., Павлов А. И., Сычук Л. М. Автоматика и автоматизация консервного производства. — Киев: Вища школа, 1981. — 263 с.
- Рей У. Методы управления технологическими процессами. — М.: Мир, 1983. — 368 с.
- Справочник проектировщика автоматизированных систем управления технологическими процессами / Под ред. Г. Л. Смилянського. — М.: Машиностроение, 1983. — 527 с.
- Стефани Е. П. Основы построения АСУ ТП. — М.: Энергия, 1982. — 352 с.
- Трегуб В. Г. Автоматизация периодических процессов в пищевой промышленности. — Киев: Техніка, 1982. — 160 с.
- Трегуб В. Г., Ладанюк А. П. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации пищевых производств. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 352 с.

- Фридман М., Ивенс Л. Проектирование систем с микрокомпьютерами. — М.: Мир, 1986. — 405 с.
- Ханенко В. Н. Информационные системы. — Л.: Машиностроение, 1988. — 127 с.
- Цирлин А. М. Оптимальное управление технологическими процессами. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 400 с.
- Янг С. Алгоритмические языки реального времени. — М.: Мир, 1985. — 400 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Автоматизация проектирования (САПР) 326, 384
 - производства 7
- Автоматизированные системы управления (АСУ) 10
 - — — предприятием 12
 - — — технологическими процессами 8, 189
 - — интегрированные 213
 - — отраслевые 14
 - — распределенные 12, 202
 - — централизованные 201
- Автоматизированный технологический комплекс (АТК) 11
- Автоматические системы управления 10, 232
- Алгоритм 28, 33
 - модуль 19, 44, 191, 207
- Аналого-цифровой преобразователь 218, 241
- Аппроксимация 60, 291
- Арифметика плавающая 224
- АСЭАК 330

Б

- Безотказность 366
- Белмана принцип оптимальности 265
- Библиотека программных модулей 321, 389
 - стандартных вычислительных функций 315
- Буферная емкость регулирования уровня 102

В

- Величины регулируемые 67
- Вероятность безотказной работы (ВБР) 367
- Версия программы 307
- Воздействия возмущающие
 - контролируемые 68
 - неконтролируемые 68
 - управляющие 68

Г

- Граф-модели (сети Петри) 249

Д

- Демпфер, объем 85
- Дискретная информация 207
 - система управления 141
 - технология 140
- Документация рабочая АСУ ТП 398
- Долговечность 366
- Драйвер 219

Ж

- Живучесть АСУ ТП 202

З

- Задание техническое на АСУ ТП 397

И

- Идентификация 53, 72
 - методы 59

Иерархия 14, 54, 198
Интерпретатор программный 297
Интерфейс 221

К

Канал многомерного объекта управления 60
— с большим запаздыванием 233
Колонна ректификационная 90
Комплекс приборно-аналитический 332
Коррекция автоматических систем 123, 125
Корреляционная функция 63
Косвенные вычисления 228
Котельникова теорема 208
Критерий управления 9, 112, 193, 266

М

Магистрально-модульные многопроцессорные измерительно-управляющие системы 208
Матрица Бристоля 115
— смежности, достижимости 283
Метод декомпозиции 276
— «золотого сечения» 254
— линейного, нелинейного, динамического программирования 263—264
Модуль 19, 28, 388

Н

Надежностно-функциональные схемы (НФС) 368
Надежность 366
Нейтрализатор, регулирование уровня 102
НЦУ 236

О

Обработка сигналов датчиков: интегрирование 224

контроль на допустимые границы 225
масштабирование 224
усреднение 222
фильтрация 220

Объект управления 30, 53
— детерминированный, стохастический 56
— с самовыравниванием, устойчивый, неустойчивый 56
— — технологический 10, 30
ОЗУ-резидентные 216
Операционная система (ОС) программного обеспечения 294
Оптимизирующие статические и динамические режимы 252
ОРММ-3 АСУ ТП 396

П

Пакет программных модулей 216
Пакеты программ стандартные 216
Параметры 30, 31, 67
— динамические 72, 73
— настроек регуляторов 82
Пастеризаторы и стерилизаторы 173
Передаточная функция 72
Подогреватели пароконтактные 173
— трубчатые 172
Подсистемы АСУ ТП сахарного завода 335
Проект АСУ ТП технический 398
Проектирование АСУ ТП 398
Процесс технологический, структура 30

Р

Рассиропник мелассы, регулирование концентрации 106—110
Ремонтопригодность 366

С

Система управления базой данных (СУБД) 216

Система адаптивная 145, 272
 — самонастраивающаяся 146
 — экстремального управления 253
 Системы автоматического регулирования многосвязные 136
 Системы многомашинные и многопроцессорные 203
 Сигнализация производственная 34
 — технологическая 34
 Солодорастильный ящик регулирования температуры 93
 Структура мажоритарная 369
 Сушилка макаронных изделий, выбор каналов регулирования 117
 Схема автоматизации 23, 156
 — — гидрогенизации 183
 — — дистилляции 181
 — — диффузии 179
 — — дрожжеращения 185
 — — пастеризатора 173
 — — рушально-вещного и прессового отделений 160
 — — склада бестарного хранения муки 163
 — — фасовки наливного маргарина 169
 — — холодильно-компрессорных станций 176
 — — экстракции 177
 — — элеваторов 165, 348

Т

Тестирование 314
 Техника микропроцессорная 189
 Технология дискретная 140
 Тракт 23
 ТЭП расчет 228

У

Управление автоматическое, полуавтоматическое, ручное 10
 Устройство связи с объектом (УСО) 217—219

Ф

Функции АСУ ТП 11
 — перспективные 417, 418
 — управляющие 232
 Функция автокорреляционная 63
 — взаимокорреляционная 63
 — корреляционная 63
 — нормированная 65

Я

Языки программирования 296, 428

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	3
От автора	5
Введение	7
§ 1. Общие сведения о локальных системах автоматизации и автоматизированных системах управления	7
§ 2. Современный уровень и перспективы развития автоматизации процессов пищевой промышленности	14
§ 3. Использование вычислительной техники в системах автоматизации технологических процессов	18
1 раздел	
ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	22
Глава 1. Функции локальных систем автоматизации технологических процессов	22
§ 1.1. Общие сведения	22
§ 1.2. Автоматический контроль и сигнализация	30
§ 1.3. Автоматическое регулирование	36
§ 1.4. Автоматический пуск и остановка оборудования	43
§ 1.5. Автоматическая защита	47
Глава 2. Технологические процессы как объекты управления	53
§ 2.1. Свойства технологических объектов управления и подготовка их к автоматизации	53
§ 2.2. Методы исследования процессов как объектов управления	58
§ 2.3. Выбор входных и управляющих воздействий объекта, анализ возмущений	67
§ 2.4. Математические модели технологических процессов для выбора и обоснования систем автоматического управления	71
Глава 3. Типовые схемы автоматического регулирования технологических параметров	77
§ 3.1. Рекомендации по выбору и реализации законов регулирования	77
§ 3.2. Автоматическое регулирование расхода	83
§ 3.3. Автоматическое регулирование давления	89
§ 3.4. Автоматическое регулирование температуры	92
§ 3.5. Автоматическое регулирование уровня	98
§ 3.6. Автоматическое регулирование состава (концентрации) продуктов	104
Глава 4. Автоматизация непрерывных технологических процессов	111
§ 4.1. Разработка систем автоматизации с использованием математических моделей технологических процессов	111

§ 4.2. Методы повышения качества регулирования технологических процессов	118
§ 4.3. Оптимальное управление динамическими объектами	127
§ 4.4. Построение схем автоматизации многосвязных объектов	133
Глава 5. Автоматизация периодических (дискретных) технологических процессов	140
§ 5.1. Специфика периодических процессов как объектов управления. Использование моделей для разработки схем автоматизации	140
§ 5.2. Автоматизация периодических процессов с использованием адаптивных систем управления и регуляторов переменной структуры	145
§ 5.3. Особенности реализации систем автоматизации периодических процессов средствами вычислительной техники	153
Глава 6. Схемы автоматизации типовых технологических процессов	155
§ 6.1. Общие сведения	155
§ 6.2. Схемы автоматизации механических и гидромеханических процессов	159
§ 6.3. Схемы автоматизации тепловых процессов	172
§ 6.4. Схемы автоматизации процессов массообмена	177
§ 6.5. Схемы автоматизации химических и биохимических процессов	183
ИЗДАНИЕ	
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	189
Глава 7. Функции и структура автоматизированных систем управления технологическими процессами	189
§ 7.1. Общие сведения о функциях и критериях управления АСУ ТП	189
§ 7.2. Многоуровневые системы управления на базе микропроцессорной техники	198
§ 7.3. Многопроцессорные вычислительные системы управления	203
Глава 8. Задачи и алгоритмы обработки информации в АСУ ТП	207
§ 8.1. Функции и алгоритмы первичной обработки информации в АСУ ТП	207
§ 8.2. Первичная информация в АСУ ТП, понятие о базах данных	213
§ 8.3. Алгоритмы расчета косвенных показателей, виды обработок сигналов измерений контролируемых параметров объекта управления	217
§ 8.4. Подсистема расчета технико-экономических показателей	228
Глава 9. Реализация управляющих функций в АСУ ТП	232
§ 9.1. Системы управления с применением ЭВМ	232
§ 9.2. Непосредственное цифровое управление материальным потоком	236
§ 9.3. Супервизорное управление ректификацией в колонных аппаратах	241
§ 9.4. Системы логического управления	247
Глава 10. Задачи и алгоритмы оптимального управления непрерывными технологическими процессами	252
§ 10.1. Алгоритмы оптимизации статических режимов в системах экстремального управления с использованием математических моделей	252
§ 10.2. Алгоритмы статической оптимизации процесса ректификации	256
§ 10.3. Система экстремального управления процессом II сатурации свекловичного сока	259

Глава 11. Задачи и алгоритмы оптимального управления периодическими (дискретными) технологическими процессами . . .	261
§ 11.1. Особенности оптимизации периодических (дискретных) процессов . . .	261
§ 11.2. Алгоритмы оптимального размещения зерна (семян) в элеваторе . . .	265
§ 11.3. Системы оптимального управления с эталонной моделью . . .	269
Глава 12. Задачи и алгоритмы оптимального управления технологическими комплексами . . .	276
§ 12.1. Общая постановка и методы декомпозиции задач оптимального управления сложным технологическим комплексом . . .	276
§ 12.2. Выбор метода декомпозиции в зависимости от структуры технологического комплекса и задач управления . . .	281
§ 12.3. Задачи и алгоритмы оптимизации работы последовательно и параллельно включенных объектов . . .	287
Глава 13. Программное обеспечение АСУ ТП . . .	293
§ 13.1. Состав и структура программного обеспечения, его объем и качество . . .	293
§ 13.2. Мультипрограммный режим работы ЭВМ . . .	301
§ 13.3. Надежность программного обеспечения и способы ее повышения . . .	307
Глава 14. Унификация математического и программного обеспечения АСУ ТП . . .	314
§ 14.1. Индустриальные направления разработки программного обеспечения. Создание отраслевой библиотеки программных модулей . . .	314
§ 14.2. Унифицированные программные средства контроля процессов . . .	322
§ 14.3. Унифицированные программные средства для исследования систем управления . . .	326

III раздел

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ . . .	330

Глава 15. Системы автоматизации на предприятиях пищевой промышленности . . .	330
§ 15.1. Автоматизированные системы экспресс-анализа качества продукции растениеводства . . .	330
§ 15.2. Автоматизация предприятий, перерабатывающих сахарную свеклу . . .	333
§ 15.3. Автоматизация предприятий, перерабатывающих семена масличных культур . . .	340
§ 15.4. Автоматизация мукомольного производства . . .	346
§ 15.5. Автоматизация хлебопекарного производства . . .	350
§ 15.6. Автоматизация предприятий, перерабатывающих плодоовощные культуры . . .	354
§ 15.7. Автоматизация производства пива . . .	357
§ 15.8. Автоматизация переработки табачного листа . . .	361
Глава 16. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами . . .	366
§ 16.1. Оценка и расчет надежности АСУ ТП . . .	366
§ 16.2. Повышение надежности программных и технических средств . . .	374
§ 16.3. Методы повышения надежности АСУ ТП . . .	377

Глава 17. Основные направления развития работ по созданию АСУ ТП	383
§ 17.1. Повышение эффективности разработок АСУ ТП	383
§ 17.2. Типизация проектных решений в области АСУ ТП	393
§ 17.3. Организация работ по созданию АСУ ТП	396
Глава 18. Техничко-экономическая эффективность АСУ ТП пищевых производств	400
§ 18.1. Методика определения экономической эффективности автома- тизации	400
§ 18.2. Методика определения производственных резервов эффектив- ности АСУ ТП	405
§ 18.3. Составление технико-экономического обоснования АСУ ТП . .	409
Заключение	416
Приложения	423
Список рекомендуемой литературы	437
Предметный указатель	439

Учебное пособие

Соколов Владимир Андреевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Учебник для вузов

Зав. редакцией *Л. М. Богатая*

Художественный редактор *В. А. Чуракова*

Технический редактор *В. А. Боброва*

Корректор *Л. Н. Лещева*

ИБ № 6169

Сдано в набор 06.08.90. Подписано к печати 20.03.91. Формат 60X
X88^{1/16}. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Литературная. Печать
офсетная. Усл. печ. л. 27,44. Усл. кр.-отт. 27,44. Уч.-изд. л. 29,42.
Изд. № 375. Тираж 4500 экз. Заказ № 722. Цена 1 р. 90 к.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807,
ГСП-6, Москва, Б-78, ул. Садовая-Спасская, 18.

Московская типография № 8 Государственного комитета СССР по
печати, 101898, Москва, Хохловский пер., 7.

ВО «АГРОПРОМИЗДАТ»

ВЫПУСТИТ В 1991 г.

учебник для вузов:

В. Г. Трегуб, А. П. Ладанюк, Л. Н. Плужников. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации в пищевой промышленности. — 25 л. — 1 р. 30 к.

Изложены основы инженерно-технического и организационного обеспечения этапов внедрения средств и систем автоматизации в производство. Описаны методы проектирования, монтажа и наладки систем контроля и управления, как локальных, так и с ЭВМ.

Для студентов, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

Заказ на книгу можно сделать в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу.

ВО «АГРОПРОМИЗДАТ»

ВЫПУСТИТ В 1991 г.

учебник для вузов:

И. К. Петров, Е. М. Раковская, А. В. Казаков и др. Автоматика и автоматизация пищевых производств. — 16 л. — 95 к.

Рассмотрены технические средства автоматизации, необходимые для построения систем автоматического управления и регулирования любого уровня, основы метрологии и теории надежности применительно к средствам автоматизации. Освещены вопросы анализа, синтеза и построения автоматических систем регулирования и управления, а также требования к разработке и оформлению технической документации, входящей в проекты автоматизации производственных процессов.

Для студентов инженерных специальностей.

Заказ на книгу можно сделать в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу.