



УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ВУЗОВ

**АВТОМАТИКА
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ**



УЧЕБНИКИ
И УЧЕБНЫЕ
ПОСОБИЯ
ДЛЯ ВЫСШИХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

С 213
А 224

АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Допущено Главным управлением высшего и среднего сельскохозяйственного образования Министерства сельского хозяйства СССР в качестве учебного пособия для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений по инженерным специальностям

Библиотека
СамСХИ
ИНВ. №

МОСКВА АГРОПРОМИЗДАТ 1985



ББК 40.7

А 22

УДК 631.171:65.011.56 (075.8)

Авторы: доктор технических наук, чл.-корр. ВАСХНИЛ *И. И. Мартыненко*, кандидаты технических наук *Б. Л. Головинский*, *Р. Д. Проценко*, *Т. Ф. Резниченко*

Рецензенты: доктор техн. наук *В. С. Зарицкий*, канд. техн. наук *Ю. С. Бернер* (ЛСХИ), канд. техн. наук *Н. И. Бохан* (БИМСХ).

Автоматика и автоматизация производственных процессов/И. И. Мартыненко, Б. Л. Головинский, Р. Д. Проценко, Т. Ф. Резниченко.— М.: Агропромиздат, 1985.— 335 с., ил.— (Учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений).

В пособии изложены основы автоматического управления, сведения о современных технических средствах автоматизации и методах анализа линейных непрерывных систем автоматического регулирования при детерминированных воздействиях. Рассмотрены вопросы автоматизации мобильных и стационарных сельскохозяйственных процессов.

Для студентов по специальности: «Механизация сельского хозяйства», «Электрификация сельского хозяйства», «Сельское хозяйство».

А $\frac{3802040100-371}{035(01)-85}$ 50-85 ТП изд-ва «Колос»

ББК 40.7
631.3

© ВО «Агропромиздат», 1985

ВВЕДЕНИЕ

Аграрная политика КПСС, начало современного этапа которой было положено мартовским (1965 г.) Пленумом ЦК КПСС, направлена на увеличение выпуска сельскохозяйственной продукции и сельскохозяйственного сырья для промышленности. Дальнейшее развитие она получила на последующих съездах и пленумах партии.

Особую роль в этом сыграл майский (1982 г.) Пленум ЦК КПСС, на котором была одобрена Продовольственная программа страны на период до 1990 г.

Основным направлением в решении задач, намеченных Продовольственной программой, является всесторонняя интенсификация сельскохозяйственного производства, перевод его на индустриальную основу, полное и эффективное использование всех ресурсов сельскохозяйственного производства. Большое значение в интенсификации сельскохозяйственного производства при переводе его на индустриальную технологию имеет автоматизация производства.

В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по дальнейшему развитию электрификации сельского хозяйства» (1979 г.) намечено осуществить постепенный переход от автоматизации отдельных машин и процессов к автоматизации технологических линий, цехов и целых предприятий сельского хозяйства.

В Долговременной программе мелиорации, повышения эффективности использования мелиорированных земель в целях устойчивого наращивания продовольственного фонда страны, рассмотренной на октябрьском (1984 г.) Пленуме ЦК КПСС, серьезная роль отводится созданию самых современных комплексов и систем машин, средствам автоматизации и телемеханики, а также современным достижениям науки и техники в этой области, развитию автоматизации управления водохозяйственными системами.

Автоматика — отрасль науки и техники, которая исследует и применяет теорию автоматического управления, принципы построения автоматических систем и технические средства для реализации этих систем. Как наука она возникла во второй половине XVIII века, когда появились первые сложные машины — орудия (прядильные, ткацкие станки и др.), которые заменили тяжелый ручной труд и

дали возможность резко поднять его производительность. Тогда же на смену простейшим двигателям (ветряным и гидравлическим) пришли паровые машины, первую из которых изобрел в 1765 году И. И. Ползунов.

По мере развития техники и освобождения человека от тяжелого физического труда функции управления процессами и орудиями труда не только не уменьшались, а, наоборот, все больше расширялись и усложнялись. Во многих случаях человек утратил возможность управлять механизированным производством без специальных дополнительных устройств. Это и обусловило возникновение и развитие автоматического производства.

Автоматизация — высший этап развития машинной техники, на котором работники сельского хозяйства высвобождаются не только от физического труда, но и от функций контроля за машинами, оборудованием, производственными процессами и операциями и управления ими. Автоматизация способствует неограниченному повышению производительности труда, улучшению условий труда людей, сближению труда физического с умственным. Иными словами, автоматизация представляет собой уровень техники нового, самого прогрессивного общества — коммунизма.

Несмотря на относительно длительную историю своего развития, автоматизация достигла наибольших успехов только во второй половине XX столетия. В ряде отраслей народного хозяйства нашей страны автоматизация поднялась на очень высокий уровень. В сельском хозяйстве она начала развиваться сравнительно недавно, но уже показала свою высокую эффективность. Так, комплексная автоматизация приготовления кормов на поточных линиях обеспечивает уменьшение трудовых затрат в 4...5 раз и снижение себестоимости приготовления кормов на 30...50%.

Значительный экономический эффект дает автоматизация процессов в птицеводстве. На многих современных птицефабриках, где полностью механизированы и автоматизированы раздача кормов, водоснабжение, удаление помета, сбор яиц и поддержание режимов микроклимата, затраты труда на производство 1000 яиц составляют 1,5...2,5 ч, что во много раз меньше, нежели на обычных колхозных и совхозных птицефермах.

Большой экономический эффект дает автоматизация процессов в растениеводстве. Например, применение для послекомбайновой обработки зерна комплектных зерноочистительных и зерноочистительно-сушильных пунктов (типа

ЗАВ-10, ЗАВ-20, КЗС-10, КЗС-20 и др.) с поточными технологическими линиями и централизованным автоматическим управлением дает возможность в 2...3 раза снизить затраты труда по сравнению с затратами на обычных электрифицированных, но не автоматизированных токах.

Эффективность автоматизации мобильных сельскохозяйственных агрегатов видна на примере внедрения средств автоматической наводки рабочих органов комбайна «Херсонец-7» на убираемые рядки кукурузы. Рабочая скорость движения агрегата повысилась, потери урожая уменьшились в несколько раз. Экономический эффект составляет более 5 млн. р. в год.

Приведенные примеры показывают целесообразность и необходимость широкого применения автоматизации, что обеспечит значительную экономию затрат труда и средств и даст возможность поднять сельскохозяйственное производство на новый, более высокий уровень технического развития.

Однако применяемые в сельском хозяйстве автоматические системы относятся к классу локальных, которые осуществляют автоматическое управление отдельными установками и процессами, действуют изолированно без связи друг с другом, не обеспечивают оптимального управления технологическими процессами и объектами в целом.

Научно-исследовательские и проектные организации работают над созданием принципиально новых автоматизированных систем управления АСУТП, АСУП и др., в структуру которых вводятся управляющие вычислительные машины (УВМ). Благодаря функционированию УВМ такие системы управляют технологическими процессами и производством в целом в оптимальных режимах и дают возможность значительно уменьшить затраты труда и одновременно увеличить количество и улучшить качество продукции.

Однако при оценке автоматизации следует учитывать не только технико-экономические показатели, но и социальный аспект технического переоснащения сельскохозяйственного производства. При этом существенно улучшаются условия труда тружеников сельского хозяйства, они постепенно приближаются к условиям труда рабочих фабрик и заводов. В этой связи все большее значение приобретает повышение уровня технического образования всех работников сельскохозяйственного производства и в особенности инженерного персонала. Современный инженер сель-

ского хозяйства не может обойтись без знаний основ автоматики и автоматизации процессов сельскохозяйственного производства.

Настоящее пособие окажет помощь студентам факультетов механизации и электрификации сельского хозяйства в овладении знаниями по общим основам автоматики, средствам автоматизации и элементам теории автоматического управления и регулирования. Помещенный в книге материал является теоретической базой для практического изучения реальных автоматических систем, применяемых в сельскохозяйственном производстве.

При написании учебного пособия использован опыт преподавания дисциплины в Украинской сельскохозяйственной академии.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам профессорам *В. С. Зарицкому* и *Н. И. Бохану* и доценту *Ю. С. Бернеру* за ценные замечания, способствовавшие значительному улучшению качества пособия.

Глава 1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Механизация производственных процессов освободила человека от тяжелого труда, требующего затрат физической энергии. Для того чтобы машина выполняла свои функции в соответствии с ее назначением в условиях производства, ее необходимо управлять, то есть осуществлять пуск, остановку, изменять режим работы и выполнять другие операции управления, направленные на выполнение машиной определенного технологического процесса.

Цель управления может быть различной в зависимости от назначения машины, режима ее работы и других факторов, с которыми мы познакомимся в дальнейшем. Управление осуществляется путем воздействия на органы управления, предусмотренные в любой машине или установке. Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1.1. Тепловой двигатель (рис. 1.1, а). Частота вращения вала Ω теплового двигателя зависит от количества подаваемой в цилиндры горючей смеси и от нагрузки на валу двигателя M_n . Количество подаваемой горючей смеси изменяется дроссельной заслонкой D . При открытии дроссельной заслонки на угол α и постоянной нагрузке на валу двигателя устанавливается определенная частота его вращения.

Если цель управления — установить новую частоту вращения вала двигателя, то необходимо изменить положение заслонки. Дроссельная заслонка в тепловом двигателе — орган управления.

Пример 1.2. Система обогрева помещения (рис. 1.1, б). Температура воздуха внутри помещения θ_B зависит от потерь теплоты через ограждения помещения (стены, окна и т. д.) и от количества теплоты q , которую отдает нагреватель в единицу времени. При определенных допущениях можно записать:

$$m \, d\theta_B / dt = q - k_n (\theta_B - \theta_n) s, \quad (1.1)$$

где m — масса воздуха в помещении; c — удельная теплоемкость воздуха; k_n — коэффициент тепловых потерь материала ограждения; θ_n — температура воздуха вне помещения; s — площадь поверхности, через которую происходит потеря теплоты.

В установившемся режиме, когда скорость изменения температуры внутри помещения равна нулю, из уравнения (1.1) найдем интересующую нас зависимость

$$\theta_B = [1/(k_n s)] q + \theta_n, \quad (1.2)$$

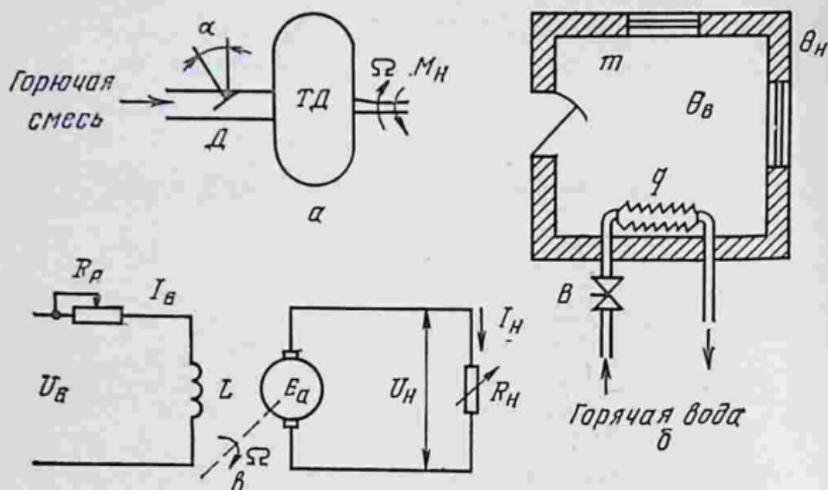


Рис. 1.1. Схемы управления:
 а — тепловым двигателем; б — обогревом помещения; в — генератором постоянного тока.

из которой следует, что при изменении температуры наружного воздуха θ_n необходимо изменить количество теплоты q , чтобы поддерживать температуру θ_n неизменной. Для этой цели предназначен вентиль V , которым изменяют поступление теплоносителя (горячей воды или пара) в нагреватель.

Пример 1.3. Генератор постоянного тока (рис. 1.1, в). Напряжение генератора U_n зависит от тока возбуждения I_B в обмотке возбуждения L , частоты вращения якоря Ω и от сопротивления R_n нагрузки. Если ток возбуждения I_B и сопротивление нагрузки поддерживать неизменными, то напряжение U_n будет оставаться постоянным. При изменении тока нагрузки I_n напряжение U_n также изменится, так как

$$U_n = E_a - I_n R_n, \quad (1.3)$$

где E_a — ЭДС и R_n — внутреннее сопротивление генератора. Для того чтобы напряжение генератора оставалось неизменным, необходимо в соответствии с изменением тока нагрузки I_n изменять ток возбуждения, в результате чего изменится E_a согласно известной зависимости:

$$E_a = k_n c \omega_n \Omega I_B, \quad (1.4)$$

где k_n и c — постоянные коэффициенты, характеризующие соответственно конструкцию и магнитные свойства магнитопровода генератора; ω_n — число витков обмотки возбуждения L генератора.

Ток возбуждения можно изменять перемещением движка реостата R_p . В данном случае цель управления — поддержать неизменным напряжение на нагрузке U_n при помощи воздействия на управляющий орган — реостат R_p . Из уравнения (1.4) видно, что изменять E_a можно также изменением частоты вращения якоря Ω . Для этого необходимо воздействовать на первичный двигатель,

Управление может осуществлять человек или техническое устройство. В первом случае управление называется *ручным*, во втором — *автоматическим*.

Машина или установка, оборудованная техническим управляющим устройством и действующая без непосредственного участия человека, называется *автоматом*. Создание и использование автоматов представляет собой новый этап машинного производства, который называется *автоматизацией*. Автоматизация, как более высокий этап машинного производства, развивается на базе механизации и электрификации сельскохозяйственного производства.

Автомат можно рассматривать как систему, которая состоит из управляемого объекта (УО) и автоматического управляющего устройства (АУУ), взаимодействующих между собой в процессе работы для достижения определенной цели управления.

Управляемым объектом может быть не только отдельная машина, но и набор машин в технологической линии, технологический процесс, цех, производство, которые для правильного выполнения своих функций нуждаются в управляющих воздействиях. Поэтому в более широком смысле установки, в которых управление осуществляется при помощи АУУ, называют системами автоматического управления (САУ).

Для возможности управления УО имеет один или несколько органов управления, при помощи которых можно изменять поступление в УО энергии или вещества, изменяя его состояние в соответствии с предписанным регламентом работы.

Состояние УО может характеризоваться многими показателями или параметрами. Основной показатель, для которого определяется цель управления, в автоматике называется управляемой переменной или *выходной величиной* УО. Выходную величину будем обозначать $y(t)$ независимо от ее физической природы.

Положение управляющего органа или пропорциональное ему количество вводимой в объект энергии (вещества) называют *управляющим воздействием*. Управляющее воздействие называют также управляющей переменной или *входной величиной* объекта. Управляющее воздействие будем обозначать $u(t)$ независимо от его физической природы.

В простейшем случае в САУ выделяют одну входную и одну выходную величину. Такие САУ называют *одномерными* или САУ с одним каналом управления «вход—выход».



Рис. 1.2. Схематическое изображение автоматической системы.

Системы с несколькими входными и выходными величинами называют *многомерными*. Например, в тепловом двигателе увеличение подаваемой горючей смеси увеличивает частоту вращения вала и температуру двигателя; частота вращения вала генератора переменного тока влияет на частоту и напряжение и т. п.

В дальнейшем мы будем рассматривать одномерные САУ как более простые и доступные для изучения основных принципов и свойств САУ.

В процессе работы на управляемый объект действуют внешние и внутренние факторы, которые приводят к изменению управляемой переменной $y(t)$ объекта. Воздействия, нарушающие заданное состояние управляемого объекта, характер и значение которых случайные, называются *возмущениями*. Возмущения в дальнейшем будем обозначать $f(t)$ независимо от их физической природы и характера изменения.

Основным возмущением любого управляемого объекта является *нагрузка*. В зависимости от природы УО нагрузкой может быть момент сопротивления на валу двигателя, создаваемый рабочей машиной, расход вещества, температура среды, электрическое сопротивление и др.

Второстепенные возмущения оказывают менее существенное влияние на выходную величину по сравнению с нагрузкой. К ним относятся, например, трение в подшипниках, вязкость смазки, подсос воздуха в топке, изменение зазора между ротором и статором электрической машины и др.

В системе автоматического управления отклонение управляемой величины от задания преобразуется управляющим устройством в управляющее воздействие на объект через его управляющий орган.

Схематически автоматическую систему можно изобразить в виде управляемого объекта и управляющего устройства, как это показано на рисунке 1.2.

1.2. ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В сельскохозяйственном производстве используется множество машин, установок, предназначенных для выполнения разнообразных функций. Управление машиной направлено на достижение определенной цели, для которой эта машина создана.

Совокупность правил, предписаний или математических зависимостей, определяющих последовательность изменения выходной величины, соответствующее нормальному функционированию объекта, называется *алгоритмом функционирования* (АФ). Он отражает и представляет фактическую цель управления и определяется на основе технологических, экономических и других требований изменения выходной величины объекта в процессе его функционирования.

Рассмотрим основные алгоритмы функционирования.

1. **Стабилизация** — это АФ, при котором выходная величина объекта поддерживается неизменной. САУ, в которых реализуется этот АФ, называются системами стабилизации. В системах стабилизации $y(t) = \text{const}$.

Управляющее устройство, осуществляющее стабилизацию выходной величины объекта, называется *автоматическим регулятором*.

В качестве примера рассмотрим систему стабилизации частоты вращения вала теплового двигателя.

Пример 1.4. Схема установки показана на рисунке 1.3, а. Управляемый объект — двигатель и рабочая машина. Дроссельная заслонка Δ служит органом управления. Управляемая величина объекта — частота

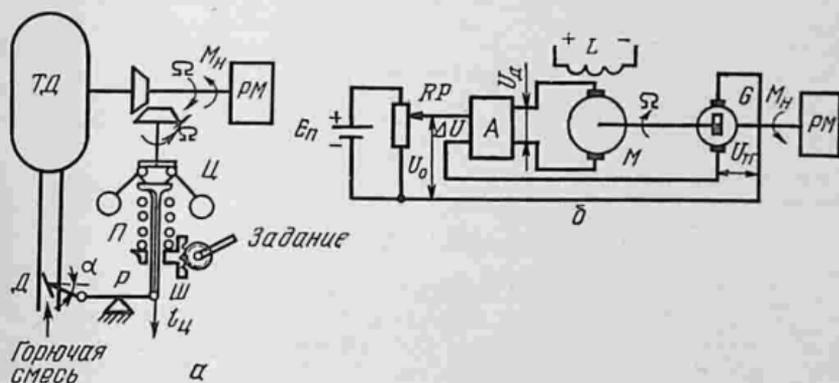


Рис. 1.3. Система стабилизации частоты вращения вала: а — теплового двигателя; б — электрического двигателя.

та вращения вала Ω зависит от угла открытия заслонки и от нагрузки, создаваемой рабочей машиной на вал двигателя.

Автоматическое управляющее устройство (регулятор) состоит из центробежного измерителя частоты вращения вала \mathcal{C} , соединенного через механический редуктор с валом двигателя. Системой рычагов центробежный измеритель \mathcal{C} соединен с дроссельной заслонкой \mathcal{D} .

Система стабилизации частоты вращения работает следующим образом. При повышении частоты вращения вала Ω под действием центробежной силы грузы центробежного измерителя \mathcal{C} расходятся, сжимают пружину \mathcal{P} и перемещают шток $\mathcal{Ш}$ вверх. Через рычаг \mathcal{P} шток передает движение заслонке \mathcal{D} , уменьшая поступление горючей смеси в рабочие цилиндры двигателя. В результате этого частота вала двигателя и рабочей машины уменьшается и устанавливается близкой к первоначальной.

Первоначальная частота вращения задается начальным углом открытия дроссельной заслонки и сжатием пружины центробежного измерителя частоты вращения вала. Для этой цели предусмотрена специальная ручка установки задания.

В качестве второго примера рассмотрим систему стабилизации частоты вращения вала электропривода рабочей машины.

Пример 1.5. Управляемый объект — двигатель постоянного тока M (рис. 1.3, б) с независимым возбуждением и рабочая машина PM . Управляемая величина — частота вращения вала Ω должна поддерживаться постоянной и равной Ω_0 . На УО действуют возмущения, основное из которых — нагрузка на валу M_H со стороны рабочей машины.

В регулирующее устройство входят тахогенератор G , установочный потенциометр RP и усилитель A . Тахогенератор предназначен для измерения частоты вращения вала двигателя. Напряжение на клеммах тахогенератора пропорционально частоте вращения якоря:

$$U_{\text{ТГ}} = k_{\text{ТГ}}\Omega, \quad (1.5)$$

где $k_{\text{ТГ}}$ — коэффициент пропорциональности.

Потенциометр RP выполняет роль задающего устройства, а снимаемое с него напряжение U_0 является задающим. Полярность напряжений U_0 и $U_{\text{ТГ}}$ выбрана так, что результирующее напряжение, которое поступает на усилитель, равно их разности: $\Delta U = U_0 - U_{\text{ТГ}}$. Усилитель A усиливает напряжение ΔU . Усиленное напряжение $U_a = k_y \Delta U$ (где k_y — коэффициент усиления усилителя) подводится к якорию двигателя M .

В установившемся режиме к якорию двигателя подводится напряжение U_a , которое соответствует значению

$$U_a = k_y (U_0 - U_{\text{ТГ}}) = k_y (U_0 - k_{\text{ТГ}}\Omega). \quad (1.6)$$

При отклонении частоты вращения вала от Ω_0 изменяется ΔU и, следовательно, напряжение U_a . Это приводит к изменению частоты вращения якоря, которая стремится к восстановлению прежнего ее значения.

2. Программное управление — это АФ, при котором выходная величина объекта изменяется по заранее преду-

смотренной программе. Системы, реализующие этот АФ, называются программными. Программа может быть задана во времени (временное программное управление) и в пространстве (пространственное программное управление).

Основное отличие систем программного управления от систем стабилизации состоит в том, что в системах программного управления главной задачей является воспроизведение программы управления с заданной точностью.

Программа задается задатчиком, который выдает последовательность команд в соответствии с требуемым АФ объекта в виде $x_0(t)$.

При задании программы во времени в качестве задатчика применяют программное реле времени или часовой механизм, перемещающий задающий потенциометр или другой задатчик регулятора в соответствии с требуемой программой изменения выходной величины $y(t)$ объекта.

Пространственное программное управление используется для движения по определенной траектории в пространстве: например, движение фрезы по заданному контуру в станке с программным управлением. Программа в этом случае может быть задана в виде шаблона, по которому перемещается копир. В станках с числовым программным управлением программа задается в виде чисел, определяющих координаты обработки детали.

Программно задается также время включения и отключения искусственного освещения в теплицах, птичниках, изменение освещенности при создании искусственного «заката» и «рассвета» и т. п.

Систему программного управления можно рассматривать как совокупность системы стабилизации и программного задающего устройства.

3. Следящие системы. АФ следящей системы заключается в том, что выходная величина должна повторять изменение входной величины, причем закон изменения последней заранее неизвестен. Следящая система представляет собой усилитель мощности, и ее основная задача — точно воспроизводить входную величину при наличии возмущений. Наиболее часто встречаются следящие системы для воспроизводства угла, частоты вращения, момента, напряжения, тока и т. п.

Следящую систему можно рассматривать так же, как совокупность системы стабилизации и специального преобразователя, изменяющего задание в зависимости от случайного изменения некоторой величины. Например, в про-

пашных орудиях следящая система используется для управления положением рабочих органов в зависимости от направления рядков растений. Специальное устройство — копир следит за направлением рядков и задает требуемое положение пропашных органов, чтобы они не повреждали растений.

В последнее время в технических системах применяются более сложные (тонкие) АФ, такие как поиск экстремума показателя качества, оптимальное управление, самоприспособление (адаптация).

4. Алгоритм поиска экстремума предполагает отыскание и поддержание выходной переменной УО при изменении состояния объекта и возмущений. Примером может служить теплогенератор, статическая характеристика которого имеет экстремум температуры топочных газов при данном расходе топлива. Для поддержания экстремума температуры необходимо поддерживать расход воздуха и топлива строго постоянными при отсутствии неконтролируемых возмущений. Но в реальных условиях у теплогенератора, как и у любого объекта, существуют неконтролируемые возмущения, которые заранее учесть практически невозможно (например, изменение калорийности топлива, подсосы воздуха и т. п.) и которые вызывают отклонение температуры от ее максимального значения. Под действием возмущения точка экстремума температуры будет смещаться. Чтобы вернуть систему к экстремуму, следует воздействовать на управляющий орган. Один из способов определения направления воздействия основан на определении знака и значения производной dy/du или dy/dt . В точке экстремума скорость изменения выходной величины равна нулю при значении управляющего воздействия $u = u_{\text{опт}}$. Такая система работает как обычная стабилизирующая система, у которой заданием является величина $dy/du = 0$.

5. Алгоритм оптимального управления предполагает достижение наилучших в определенном смысле условий работы УО в переходном режиме при наличии ограничений на входные, выходные величины и переменные состояния объекта. Такими условиями могут быть, например, минимальные затраты энергии, быстроедействие и др.

Показатель эффективности выражается некоторым функционалом от входных и выходных переменных и от времени с учетом ограничений. Примером алгоритма оптимального управления может быть изменение температуры в помещении от одного значения до другого за минимальное время

при ограниченных затратах энергии или изменение температуры при минимальных затратах энергии за ограниченное время.

6. **Алгоритм адаптации** предполагает такое изменение выходных величин УО, при которых сохраняется заданное качество работы объекта. При этом система может изменять свои параметры и структуру. Примером самоприспосабливающейся системы может быть система, обеспечивающая изменение режима работы тракторного агрегата при изменении условий работы: пахоты на неровном рельефе, на почвах с различными механическими свойствами и т. п.

Для выполнения заданного АФ управляемого объекта должны соответствующим образом формироваться и управляющие воздействия.

Правило формирования последовательности управляющих воздействий, обеспечивающих выполнение АФ управляемого объекта с требуемой точностью, называется алгоритмом управления.

7. **Алгоритм управления** зависит как от АФ, так и от динамических свойств УО. Эта связь может быть представлена различными математическими зависимостями. В общем случае

$$u(t) = A[y(t), f(t)], \quad (1.7)$$

где A — оператор, определяющий вид зависимости.

Математическая зависимость, устанавливающая связь между управляющим воздействием и выходной переменной управляемого объекта, называется *законом управления*.

В технике используют различные законы управления, которые реализуются автоматическими управляющими устройствами или регуляторами. В сельскохозяйственном производстве применяются преимущественно регуляторы релейного и непрерывного действия. Здесь ограничимся краткими сведениями о наиболее распространенных законах управления.

Релейный закон управления реализуется регуляторами релейного действия, у которых управляющее воздействие появляется только при достижении управляемой величиной заданного порогового значения. При этом управляющее воздействие принимает определенное фиксированное значение (позицию) в зависимости от того порогового значения, которого достигла выходная величина. График изменения выходной величины и управляющего воздействия

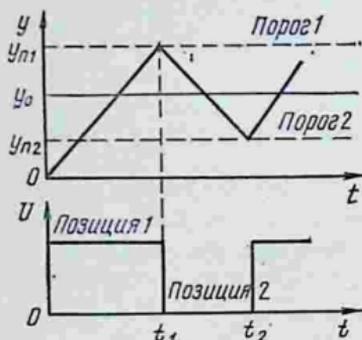


Рис. 1.4. График изменения выходной величины и управляющего воздействия в релейной системе регулирования.

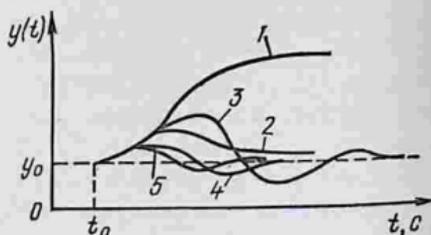


Рис. 1.5. График изменения выходной величины:

1 — без регулирования; 2 — с П-регулятором; 3 — с И-регулятором; 4 — с ПИ-регулятором; 5 — с ПИД-регулятором.

при двухпозиционном регулировании показан на рисунке 1.4.

В линейных регуляторах непрерывного действия управляющее воздействие линейно зависит от отклонения, его интеграла и первой производной во времени. При описании законов обозначим отклонение выходной величины от заданного значения через ε .

Пропорциональный закон (П-закон):

$$u = k_p \varepsilon. \quad (1.8)$$

Постоянную k_p называют коэффициентом передачи регулятора.

Интегральный закон (И-закон):

$$u = k_p / T \int_0^t \varepsilon dt, \quad (1.9)$$

где T имеет размерность времени, и ее называют постоянной интегрирования.

Пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон):

$$u = k_p \left(\varepsilon + 1/T \int_0^t \varepsilon dt \right). \quad (1.10)$$

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон):

$$u = k_p \left[\varepsilon + 1/T_i \int_0^t \varepsilon dt + T_d d\varepsilon/dt \right], \quad (1.11)$$

где постоянные времени $T_{\text{и}}$ и $T_{\text{д}}$ соответственно называют постоянными времени интегрирования и дифференцирования.

Характеры изменения выходной величины объекта при различных законах регулирования значительно отличаются. Для сравнения на рисунке 1.5 показаны графики изменения $y(t)$ при изменении нагрузки $f(t)$ в момент времени t_0 .

1.3. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В основе построения систем автоматического управления лежат общие фундаментальные принципы управления, определяющие, каким образом осуществляется увязка алгоритмов управления с заданием и фактическим функционированием системы, а иногда и с возмущениями, вызвавшими отклонение выходной величины от заданного значения, определяющего цель управления.

В технике используются три основных фундаментальных принципа: разомкнутого управления, компенсации возмущения и управления по отклонению.

1. Принцип разомкнутого управления заключается в том, что алгоритм управления строится только на основе алгоритма функционирования путем выбора законов, определяющих действие управляющего устройства с учетом свойств управляемого объекта.

Здесь не учитывается фактическое значение управляемой величины и действие возмущений. Схема системы автоматического управления по разомкнутому принципу показана на рисунке 1.6.

Алгоритм функционирования может задаваться отдельным устройством — задатчиком алгоритма функционирования (ЗАФ) или заложен в конструкцию блока управления (БУ). Тогда ЗАФ может вообще отсутствовать. По разомкнутому принципу построены многие датчики программы, например часовые программные реле, кулачковые механизмы газораспределения двигателей внутреннего сгорания и др.

2. Принцип компенсации (управление по возмущению) был предложен французским инженером Ж. Понселе в 1830 г. и реализован на практике в 1869 г. русским инженером В. Н. Чиколевым в установке автоматического регулирования горения дуговых ламп. Этот принцип называют принципом Понселе — Чиколева. Сущность его заключается в том, что управляющее устройство формирует управляю-

Библиотека
СамСМИ
ИНВ. №

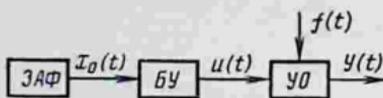


Рис. 1.6. Блок-схема автоматического управления по разности принципу:

ЗАФ — задатчик алгоритма функционирования; БУ — блок управления; УО — управляемый объект.

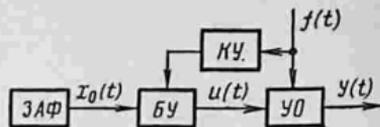


Рис. 1.7. Блок-схема системы автоматического управления по возмущению:

ЗАФ — задатчик алгоритма функционирования; БУ — блок управления; КУ — компенсационное устройство; УО — управляемый объект.

щее воздействие таким образом, чтобы компенсировать действие возмущения на УО. Схематически система управления по возмущению показана на рисунке 1.7.

Примером автоматической системы, работающей по этому принципу, может служить компаундирование генератора постоянного тока, обеспечивающее неизменность напряжения при изменениях тока нагрузки.

Пример 1.6. Компенсация падения напряжения на обмотках якоря генератора при увеличении тока нагрузки достигается с помощью дополнительной обмотки возбуждения (рис. 1.8). Если ЭДС генератора линейно зависит от его потока возбуждения Φ_1 , а уменьшение напряжения вызвано только активным сопротивлением якоря, то для поддержания постоянства заданного напряжения U_n надо изменить ЭДС генератора в функции тока нагрузки по закону $E_a = U_n + I_n R_n$. Падение напряжения компенсируется дополнительной магнитным потоком возбуждения катушки L2, по которой протекает ток I_k , пропорциональный току нагрузки I_n , такой, чтобы $I_n R_n = k \Phi_2$. Значение коэффициента подбирают изменением сопротивления шунта $R_{ш}$.

Этот принцип позволяет компенсировать действие возмущения, которое может быть измерено, причем для каждого вида возмущения необходимо использовать отдельное компенсирующее устройство. Так, в приведенном примере компенсируется только действие тока нагрузки на напряжение

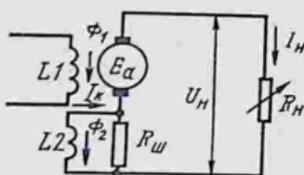


Рис. 1.8. Схема компаундирования генератора постоянного тока как система регулирования напряжения по возмущению.

генератора. Колебания температуры, частота приводного двигателя и ряд других факторов в этой установке не компенсируются, вследствие чего ошибку нельзя свести к нулю даже при идеальном компаундировании.

В 1940 г. Г. В. Щипанов предложил принцип достижения независимости управляемой величины от возмущений, так называемый прин-

цип инвариантности. В 1948 г. В. С. Кулебакин и в 1955 г. Б. Н. Петров показали, как следует строить системы, чтобы в них можно было реализовать принцип инвариантности.

3. Принцип управления по отклонению впервые нашел

промышленное применение в регуляторе уровня воды в котле, предложенном русским техником И. И. Ползуновым (1765 г.), и в центробежном регуляторе частоты вращения вала паровой машины английского механика Дж. Уатта (1784 г.). В связи с этим принцип управления по отклонению носит название принципа Ползунова — Уатта.

Сущность принципа заключается в том, что управляющее воздействие формируется только при отклонении управляемой величины от заданного ее значения. Схематически система автоматического управления по отклонению показана на рисунке 1.9. Алгоритм управления $u(t)$ формируется блоком управления БУ после сравнения заданного алгоритма функционирования блоком ЗАФ и фактического значения выходной величины управляемого объекта. Для этой цели в схему вводится дополнительная связь с выхода управляемого объекта в БУ. Эта связь называется цепью обратной связи, так как по ней передается сигнал в обратном направлении с выхода объекта в блок управления. Цепь обратной связи как бы замыкает контур управления, поэтому такое управление носит название *управления по замкнутому контуру*.

Автоматическое управление в функции отклонения фактического значения выходной величины от ее заданного значения называется автоматическим регулированием.

Рассмотренные ранее системы стабилизации частоты вращения вала теплового двигателя и электродвигателя, показанные на рисунке 1.3, являются замкнутыми системами, в которых использован принцип автоматического управления по отклонению.

Рассмотрим еще один пример замкнутой системы регулирования давления жидкости.

Пример 1.7. Регулируемое давление p_2 (рис. 1.10) действует на мембрану M . Сила давления уравнивается пружиной P . При увеличении давления p_2 мембрана M перемещается и связанный с мембраной шток перемещает клапан K , уменьшая площадь сечения прохода.

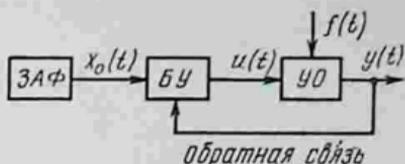


Рис. 1.9. Блок-схема управления по отклонению.

При этом увеличиваются потери давления в клапане и соответственно уменьшается давление p_2 .

Из приведенных примеров видно, что работа системы автоматического управления по отклонению не связана с каким-либо определенным возмущением. Изменение положения регулирующего органа (управляющее воздействие) зависит от отклонения управляемой величины от заданного значения независимо от того, какими причинами оно вызвано. Это одно из основных преимуществ управления по отклонению, обеспечивающих широкое его применение в различных областях техники. Этот принцип действует также в живой природе, экономике, социологии, экологии и т. п.

Преимущества систем управления по отклонению обеспечиваются использованием обратной связи. По своему действию обратная связь делится на несколько видов.

Когда воздействие по цепи обратной связи складывается с задающим, то такая обратная связь называется *положительной*.

Если же воздействие по цепи обратной связи вычитается из задающего воздействия, то обратная связь называется *отрицательной*. Системы автоматического управления, работающие по отклонению, представляют собой системы с отрицательной обратной связью.

Обратная связь, образуемая регулятором по отношению к управляемому объекту, называется *главной*.

Обратные связи, которые могут быть в самом регуляторе, называются *местными*.

Обратная связь может быть *жесткой* и *гибкой*.

Жесткая обратная связь действует в установившемся и переходном режимах, тогда как гибкая обратная связь действует только в переходном режиме.

В зависимости от того, ка-

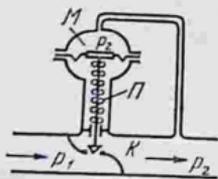


Рис. 1.10. Схема автоматического регулирования давления.

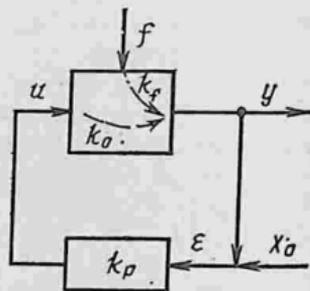


Рис. 1.11. Схема замкнутой системы регулирования.

кой вид обратной связи — жесткая или гибкая используется в системе автоматического регулирования, системы стабилизации делятся на *статические* и *астиатические*. Эти понятия относятся к установившемуся режиму в системе автоматического регулирования.

Рассмотрим общую схему замкнутой системы регулирования с П-регулятором, показанную на рисунке 1.11. Алгоритм управления П-регулятора

$$u = k_p \varepsilon. \quad (1.12)$$

В установившемся режиме

$$y = k_o u - k_f f, \quad (1.13)$$

где k_o — коэффициент передачи объекта по управлению; k_f — коэффициент передачи объекта по возмущению (нагрузке).

Учитывая, что $\varepsilon = x_0 - y$, где x_0 — заданное значение регулируемой величины, y — фактическое значение регулируемой величины, из уравнений (1.12), (1.13) получаем

$$y = [k_o k_p / (1 + k_o k_p)] x_0 - [k_f / (1 + k_o k_p)] f. \quad (1.14)$$

Регулирование, при котором установившееся значение регулируемой величины при постоянном возмущении зависит от значения этого возмущения, называется *статическим*.

Отклонение регулируемой величины от ее значения, установленного заданием, составляет статическую ошибку $\varepsilon_{ст}$.

График зависимости регулируемой величины от нагрузки в установившемся режиме называется характеристикой регулирования.

Крутизна характеристики регулирования называется статизмом. Статизм оценивается коэффициентом статизма в виде

$$\delta = - \partial \varphi / \partial \lambda, \quad (1.15)$$

где $\varphi = \Delta y / y_n$ — относительное изменение регулируемой величины; $\lambda = \Delta f / f_n$ — относительное изменение возмущения (нагрузки); y_n, f_n — номинальное значение выходной величины и нагрузки соответственно.

Для прямолинейной характеристики регулирования, согласно рисунку 1.12, мож-

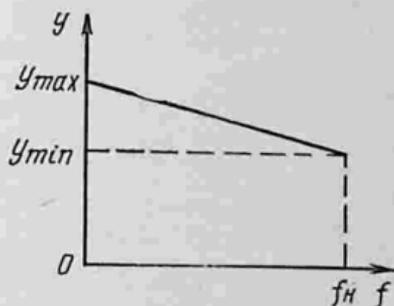


Рис. 1.12. Характеристика статического регулирования.

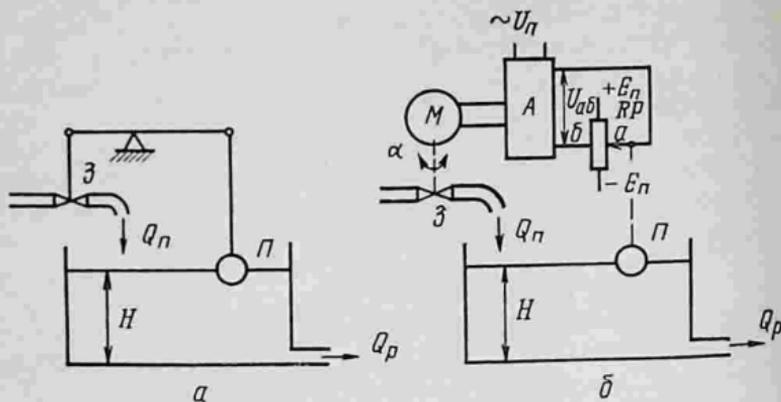


Рис. 1.13. Системы стабилизации уровня:
 а — статическая; б — астатическая.

но принять

$$\varphi_{\max} = (y_{\min} - y_{\max})/y_{\min} \quad \text{и} \quad (1.16)$$

$$\lambda_{\max} = (f_n - f_0)/f_n.$$

Полагая $f_0=0$, получаем

$$\delta = -\varphi_{\max}/\lambda_{\max} = \frac{-(y_{\min} - y_{\max})/y_{\min}}{(f_n - 0)/f_n} = (y_{\max} - y_{\min})/y_{\min}. \quad (1.17)$$

Таким образом, статизм регулирования определяет наибольшую статическую ошибку при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной.

Физическая сущность возникновения статической ошибки состоит в том, что в системах с жесткой обратной связью, которая сохраняет свое действие в установившемся режиме, для компенсации влияния возмущений (нагрузки) необходимо изменить управляющее воздействие. В результате каждому значению возмущения (нагрузки) будет соответствовать свое значение статической ошибки.

Рассмотрим статическую систему стабилизации уровня воды в резервуаре, показанную на рисунке 1.13, а. Поплавок P через систему рычагов соединен с задвижкой Z , которая изменяет приток воды в резервуар. При увеличении расхода воды Q_p уровень H начнет снижаться и поплавок P , опускаясь, будет открывать задвижку Z , компенсируя расход воды ее притоком Q_n . Как только установится равенство $Q_n=Q_p$, уровень воды установится в своем новом значении, но уже отличном от предыдущего. Отклонение уровня воды от заданного значения, вызванное

Классификация систем автоматического управления												
по алгоритму функционирования				по характеру управляемых воздействий		по принципу управления			по наличию ошибки		по закону управления	
Программное управление	Стабилизация	Следящие	Самоприспосабливающиеся	Непрерывные	Дискретные	Разомкнутого управления	Компенсации	по отклонению	Статические	Астатические	непрерывные	
											Пропорциональный	Интегральный
												Релейные

Рис. 1.14. Классификация систем автоматического управления.

изменением расхода (нагрузки), будет составлять статическую ошибку.

Регулирование, при котором установившаяся ошибка при постоянном возмущении (нагрузке) равна нулю, называется *астатическим*. Астатическое регулирование выполняется, если алгоритм управления имеет вид

$$u = k_p \int_0^t \varepsilon dt, \quad (1.18)$$

что соответствует И-закону регулирования. Система приходит в установившееся состояние только при условии

$$\varepsilon = du/dt = 0, \quad (1.19)$$

то есть при $y = x_0$.

Пример астатической системы стабилизации уровня воды приведен на рисунке 1.13, б. В этой системе поплавков P связан тягой с ползунком потенциометра RP . Снимаемое с RP напряжение U_{ab} усиливается магнитным усилителем A и подводится к статору двигателя M . Вал двигателя через редуктор связан с задвижкой Z . При изменении уровня H поплавков в этой схеме перемещает ползунок, при помощи которого в нужную сторону запускается двигатель, управляющий заслонкой Z , регулирующей поступление воды в бак. Двигатель будет вращаться до тех пор, пока уровень воды не установит поплавков в начальное положение, в котором напряжение, подаваемое на статор двигателя, будет равно нулю.

Рассмотренные выше признаки положены в основу классификации систем автоматического управления, которая приводится на рисунке 1.14.

1.4. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Автоматические управляющие устройства (АУУ) и регуляторы состоят из отдельных элементов, которые выполняют определенные функции. Если регулятор конструктивно выполнен в виде отдельного изделия, то в нем можно выделить составные части или детали, выполняющие функции, необходимые и обязательные для АУУ или регулятора.

Основные функциональные элементы АУУ и регулятора следующие: задающий элемент, воспринимающий элемент, элемент сравнения, управляющий элемент, исполнительный элемент. Кроме этих элементов, в более сложных АУУ применяются корректирующие элементы.

Назначение каждого элемента определяется его наименованием.

Задающий элемент (ЗЭ) служит для установки задания регулятору; он вырабатывает эталонную величину x_0 , с которой сравнивается фактическое значение управляемой величины y . ЗЭ задает алгоритм функционирования управляемого объекта.

Воспринимающий (измерительный, чувствительный) элемент (ВЭ) предназначен для получения информации о фактическом значении управляемой (регулируемой) величины объекта в виде сигнала определенной физической природы.

Элемент сравнения (ЭС) служит для сравнения задания $x_0(t)$ и фактического значения управляемой величины $y(t)$; на выходе этого элемента получается результат сравнения в виде $\epsilon = x_0 - y$. Для этого обе сравниваемые величины должны быть одинаковой физической природы.

Управляющий элемент (УЭ) формирует управляющий сигнал согласно принятому алгоритму управления. Так как поступающий на УЭ сигнал обычно имеет малую мощность, то в большинстве случаев он усиливается до мощности, достаточной для приведения в действие исполнительного механизма. При формировании более сложных алгоритмов управления в качестве УЭ могут быть логические элементы и электронные вычислительные машины.

Исполнительный элемент (ИЭ) преобразует управляющий

сигнал в управляющее воздействие $u(t)$ на управляемый объект через его управляющий (регулирующий) орган. Если регулирующий орган объекта требует механического перемещения (задвижка, реостат и т. п.), то ИЭ называют исполнительным механизмом или сервомеханизмом.

Корректирующие элементы (КЭ) улучшают динамические свойства процесса регулирования и вводятся в автоматическое управляющее устройство при обоснованной необходимости.

Каждый функциональный элемент выполняет элементарную функцию, которая заключается в получении, преобразовании и передаче информации в виде сигналов определенной физической природы. Для удобства анализа работы автоматического устройства функциональные элементы представляют устройствами однонаправленного действия, то есть передающими сигнал в одном направлении: со входа на выход. Этим свойством обладает преимущественное большинство реальных элементов автоматики.

В схемах функциональный элемент обозначают прямоугольником, внутри которого записано сокращенное наименование выполняемой функции. Входной и выходной сигналы в общем виде обозначают соответственно x и y (рис. 1.15, а). Исключение составляет элемент сравнения, имеющий два входа в один выход, он обозначается окружностью (рис. 1.15, б).

Схема системы автоматического управления, представленная функциональными элементами и связями между ними, называется *функциональной схемой* системы.

Чтобы составить функциональную схему системы автоматического регулирования, следует выделить функциональные элементы, их входные и выходные величины и представить их условными обозначениями, указав направление передачи сигнала от одного элемента к другому.

Рассмотрим систему стабилизации уровня воды в резервуаре, показанную на рисунке 1.13, б.

Управляемым объектом (УО) системы является резервуар с устройствами подвода и выпуска воды. Количество поступающей в резервуар воды изменяют регулирующим органом — задвижкой З. Входная величина УО — угол

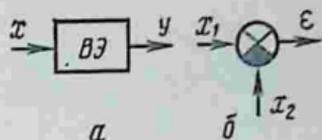


Рис. 1.15. Условные обозначения в функциональных схемах:

а — функционального элемента;
б — элемента сравнения.

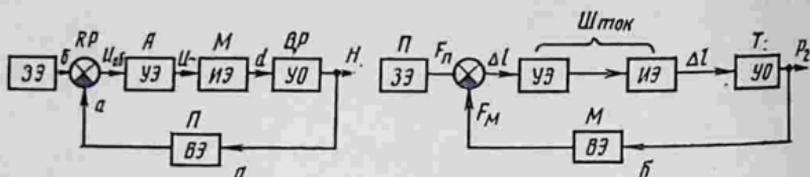


Рис. 1.16. Функциональные схемы:

a — астатической системы стабилизации уровня; *б* — системы стабилизации давления.

поворота задвижки α , а выходная — уровень H . Уровень воды контролируется поплавком Π , связанным тягой с ползунок a потенциометра RP . Поплавок совместно с ползунок a потенциометра составляет ВЭ. Ползунок b потенциометра представляет ЗЭ, установкой которого задается требуемый уровень воды в резервуаре. ЭС служит сам потенциометр RP , к которому подведено постоянное напряжение. На потенциометре сравнивается взаимное положение ползунков a и b . Когда уровень H соответствует заданию, то напряжение между точками a и b потенциометра равно нулю. При отклонении уровня от задания это напряжение будет иметь значение и полярность, зависящие от направления и значения отклонения.

Напряжение $U_{аб}$, снятое с ползунков потенциометра, усиливается магнитным усилителем A , являющимся в данной системе УЭ. Усиленное напряжение подается к двигателю M .

Двигатель M вместе с редуктором (на схеме не показан) представляет собой ИЭ. Выходная величина ИЭ — угол поворота вала α . Функциональная схема системы регулирования уровня показана на рисунке 1.16, *a*.

На функциональной схеме, кроме названий функциональных элементов, указывают конкретные устройства, выполняющие соответствующие функции в системе автоматического регулирования (потенциометр RP , усилитель A , двигатель M и др.), а также конкретные физические величины на входе и выходе каждого функционального элемента системы.

В рассмотренной функциональной схеме астатической системы регулирования уровня воды каждый функциональный элемент явно представлен конкретным устройством или механизмом.

В простых регуляторах прямого действия, изготовляемых в виде одного изделия, функциональные элементы не

всегда представлены так явно, как в предыдущем примере. Для иллюстрации сказанного рассмотрим систему регулирования давления жидкости в трубопроводе с регулятором давления прямого действия. Управляемыми объектами являются вентиль и труба с жидкостью, а регулируемая величина — давление p_2 в трубе после вентиля (рис. 1.10). Регулирующий орган объекта — клапан K . Элементом, воспринимающим давление жидкости, служит мембрана M , а значение регулируемого параметра задается первоначальным сжатием пружины P .

В регуляторе сравниваются две силы: сила, обусловленная давлением жидкости на мембрану F_m , и сила сжатия пружины F_n . При равенстве $F_m = F_n$ устанавливается равновесие, при котором клапан открыт на величину Δl . В регуляторе управляющий и исполнительный элементы представлены штоком, соединяющим мембрану и регулирующий орган. Клапан перемещается за счет энергии давления жидкости в трубопроводе.

Регуляторы, в которых для перемещения регулирующего органа используется энергия регулируемой среды, называются *регуляторами прямого действия*. Функциональная схема системы автоматического регулирования давления с регулятором прямого действия показана на рисунке 1.16, б.

Функциональная схема является первым этапом формализации системы автоматического управления (регулирования), выделяющая только те элементы и связи между ними, которые составляют сущность автоматического управления (регулирования).

1.5. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для описания функциональных элементов и систем автоматического управления и регулирования используют несколько методов в зависимости от того, для каких целей предназначены описания.

При проектировании и эксплуатации систем автоматического управления используют функционально-технологические и принципиальные схемы автоматизации технологических процессов и установок, дополненные словесным описанием. Такое описание достаточно для понимания общего принципа работы автоматической установки и оснащения ее приборами и средствами автоматизации, но не

дает количественных соотношений между входными и выходными величинами элементов и системы в целом.

Для определения количественных значений параметров элементов и систем автоматического управления применяют описание в виде дифференциальных уравнений, передаточных функций, переходных и частотных характеристик. Такое описание не обладает наглядностью, но позволяет получать однозначные обобщенные зависимости между входными и выходными величинами, характеризующими поведение как отдельных элементов, так и всей системы в целом.

Описание элементов и систем математическими методами называют математическими моделями, представленными в виде уравнения или системы уравнений.

1.5.1. Функционально-технологические схемы

Функционально-технологическая схема определяет структуру и характер системы автоматизации технологического процесса, а также оснащение ее приборами и средствами автоматизации. Она представляет совмещенную схему технологического процесса с упрощенным изображением агрегатов, подлежащих автоматизации, и функциональных элементов автоматики, изображенных условными обозначениями и линиями связи между ними.

Технологический объект на такой схеме представляют схематическим изображением основного и вспомогательного

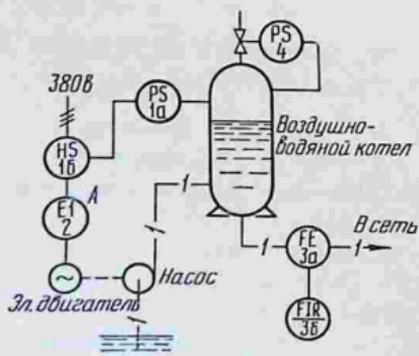


Рис. 1.17. Функционально-технологическая схема автоматической водоподъемной установки.

технологического оборудования вместе со встроенными в него запорными и регулирующими органами на пути прохождения энергии, сырья и других материалов, определяемых особенностями используемой технологии. Технологическое оборудование изображают упрощенно, чтобы можно было получить ясное представление о принципе его работы и взаимодействии со средствами автоматизации.

Трубопроводы жидкости и газа изображают условными обозначениями в соответствии с ГОСТ 3464—63.

На рисунке 1.17 показана функционально-технологическая схема автоматической водоподъемной установки (пневматической безбашенной водокачки). Технологический объект состоит из водяного насоса с электродвигателем, воздушно-водяного котла и системы трубопроводов, по которым подается вода.

Приборы автоматического управления (позиция 1а, 1б), контроля (поз. 2, 3а, 3б), защиты (поз. 4) и линия связи показаны условными обозначениями.

Технические средства автоматизации, включающие в себя устройства получения первичной информации, средства преобразования и обработки информации, средства воздействия на регулирующие или управляющие органы объекта (задвижки, вентили, выключатели и т. п.) и средства представления информации оперативному персоналу, на функционально-технологических схемах показывают условными обозначениями. В настоящее время применяют условные обозначения приборов и средств автоматизации по отраслевому стандарту ОСТ 36—27—77 «Приборы и средства автоматизации. Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов». Основные обозначения приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

1.1. Основные буквенные обозначения измеряемой величины и уточняющие значения первой буквы по ОСТ 36—27—77

Измеряемая величина	Обозначение	Уточнение
Разность, перепад	—	D
Любая электрическая величина	E	—
Расход	F	—
Соотношение, доля	—	F
Размер, положение, перемещение	G	—
Ручное воздействие	H	—
Автоматическое переключение, обегание	—	J
Время, временная программа	K	—
Уровень	L	—
Влажность	M	—
Давление, вакуум	P	—
Интегрирование, суммирование по времени	—	Q
Скорость, частота	S	—
Температура	T	—
Масса	W	—

1.2. Функции, выполняемые прибором, и уточнение функций по ОСТ 36—27—77

Функции	Обозначение	Уточнение
Сигнализация	A	—
Регулирование (управление)	C	—
Чувствительный элемент	E	—
Верхний предел измеряемой величины	—	H
Показание (измерение)	I	—
Станция управления	K	—
Нижний предел измеряемой величины	—	L
Регистрация	R	—
Включение, переключение, отключение, сигнализация	S	—
Дистанционная передача, промежуточное преобразование	T	—
Преобразование, вычислительные функции	Y	—

Буквенные обозначения приборов записывают внутри символа в таком порядке: 1 — измеряемая величина; 2 — уточнение измеряемой величины (при необходимости); 3 — функции, выполняемые прибором; 4 — дополнительные значения функций (при необходимости уточнения).

Функциональные признаки (если их несколько в приборе) располагаются в таком порядке: IRCSA.

Пример построения по ОСТ 36—27—77 условных обозначений приборов для измерения, регистрации и автоматического регулирования температуры показан на рисунке 1.18.

Позиционное обозначение присваивается всем приборам и средствам автоматизации. Место для нанесения позиционного обозначения показано на рисунке 1.18. Позиционные обозначения сохраня-



Рис. 1.18. Пример построения условных обозначений по ОСТ 36—27—77.

ются на всех последующих схемах (принципиальных, схемах соединения), в описательном тексте, спецификациях и заявочных ведомостях.

1.5.2. Математическое описание элементов и систем

Режимы движения автоматических систем.

Математическое описание элементов и систем автоматического управления применяют в тех случаях, когда необходимо изучить систему в процессе ее работы при наличии возмущающих и управляющих воздействий.

Если возмущающие и управляющие воздействия в системе непрерывно изменяются, то система находится в динамическом режиме.

Динамическим называется такой режим, в котором основным состоянием системы является неустановившееся. Неустановившееся состояние характеризуется тем, что действующие на элемент или систему воздействия вызывают в них ряд переходных процессов.

Если на вход системы поступает воздействие, то движение ее складывается из собственного (свободного) движения и из реакции на входное воздействие (вынужденное движение). Переходный процесс представляет собой только собственное (свободное) движение системы, которое зависит от динамических свойств элементов системы и начальных условий.

Собственное движение устойчивой системы с течением времени затухает, и она приходит в установившееся состояние при условии, что воздействия остаются неизменными. Режим, который характеризуется установившимся процессом в элементе или системе, называется *статическим*.

Действующие системы автоматического регулирования находятся в динамическом режиме, поэтому и описание их в динамическом режиме является основным. Статический режим в действующей системе представляет собой в определенной степени идеализацию, которую применяют для описания элемента или системы после окончания переходного процесса.

Описание элементов и систем в статическом режиме. Статический режим — это установившееся состояние равновесия при постоянном воздействии. Установившееся состояние в элементе наступает после окончания переходного процесса, вызванного изменением воздействия.

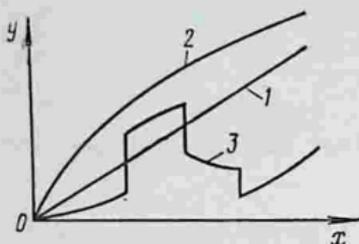


Рис. 1.19. Виды статических характеристик элементов.

Зависимость выходной величины элемента от входной в установившемся состоянии называется *статической характеристикой*. Состояние элемента в статическом режиме описывается статической характеристикой.

Статическую характеристику изображают в виде графика, на котором по оси абсцисс задают входную величину,

а по оси ординат — выходную. Разновидности статических характеристик элементов показаны на рисунке 1.19: 1 — линейная; 2 — нелинейная; 3 — прерывистая.

В большинстве случаев статические характеристики реальных элементов и систем автоматического управления являются нелинейными. В инженерной практике нелинейные характеристики заменяют приближенными линейными методом осреднения или методом малых отклонений, как показано на рисунке 1.20. Процесс замены нелинейной характеристики ее линейным приближением называют *линеаризацией*. Наиболее простая линеаризация — метод осреднения используется в том случае, когда достаточно гладкая характеристика не может быть аппроксимирована аналитической функцией (рис. 1.20, а). Метод малых отклонений основан на замене нелинейной характеристики $y(x)$ в окрестностях точки O с координатами (x_0, y_0) прямой, касательной в этой точке (рис. 1.20, б). Если статическая характеристика описывается аналитической функцией, то линеаризация выполняется путем разложения

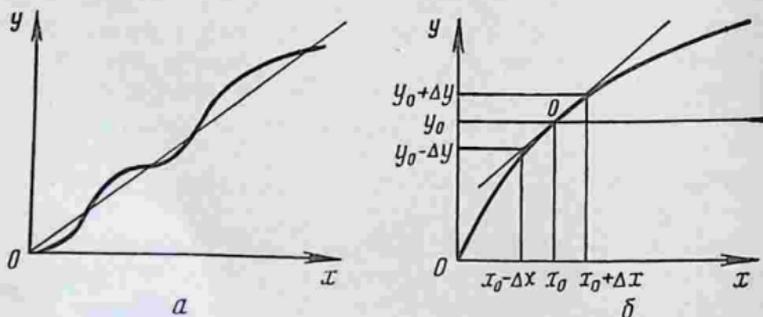


Рис. 1.20. Методы линеаризации статических характеристик: а — осреднения; б — малого приращения.

функций $y(x)$ в ряд Тейлора для выбранной точки разложения. Оставляя в этом разложении только линейную часть, получаем линеаризованную функцию

$$y = y_0 + (dy/dx)_{x_0} \Delta x. \quad (1.20)$$

В отклонениях от равновесного состояния линеаризованная функция имеет вид

$$\Delta y = (dy/dx)_{x_0} \Delta x, \quad (1.21)$$

где $\Delta y = y - y_0$.

Функциональные элементы и системы автоматического управления в статическом режиме характеризуются *коэффициентом передачи*

$$k = dy/dx. \quad (1.22)$$

Из выражений (1.21) и (1.22) получаем

$$k = \Delta y / \Delta x. \quad (1.23)$$

Из последнего выражения вытекает, что коэффициент передачи есть отношение приращения выходной величины в установившемся режиме к приращению входной величины.

Коэффициент передачи некоторых функциональных элементов имеет специальное название, а именно коэффициент передачи первичных преобразований и датчиков называется *чувствительностью* или *коэффициентом чувствительности*, а коэффициент передачи усилителя — *коэффициентом усиления*.

Описание элементов и систем в динамическом режиме. Зависимость выходных величин от входных в динамическом режиме записывается в виде дифференциальных или разностных уравнений, в которых *независимой переменной* является время t .

Математическая модель элемента может быть линейной и нелинейной в зависимости от реакции элемента на входное воздействие. Если реакции элемента на входные воздействия одинаковые по значению, но разные по знаку, идентичны по форме и отличаются только знаками, то такой элемент *линейный* и описывается линейным уравнением. Если же элемент реагирует по-разному на такие входные воздействия, то он *нелинейный* и описывается нелинейным уравнением.

Для упрощения записи линейных уравнений операцию дифференцирования заменяют символом p , а операцию

интегрирования — символом $1/p$:

$$dx/dt = px; \quad d^n x/dt^n = p^n x; \quad \int_0^t x dt = x/p. \quad (1.24)$$

В такой форме записи дифференциальное уравнение элемента

$$a_2 d^2 y/dt^2 + a_1 dy/dt + a_0 y = b_1 dx/dt + b_0 x \quad (1.25)$$

будет иметь вид алгебраического уравнения

$$a_2 p^2 y + a_1 p y + a_0 y = b_1 p x + b_0 x, \quad (1.26)$$

запись которого можно упростить и представить в таком виде:

$$(a_2 p^2 + a_1 p + a_0) y(t) = (b_1 p + b_0) x(t). \quad (1.27)$$

Такая форма записи дифференциального уравнения называется операторной.

Математическую модель функционального элемента называют *звеном* системы автоматического управления.

Под звеном понимают всякую физическую или нефизическую систему $\varphi(x)$, преобразующую входную величину $x(t)$, которая изменяется во времени, в выходную величину $y(t)$, также изменяющуюся во времени.

Звено характеризуется свойствами *линейности* и *стационарности*.

Звено называется *линейным*, если выходная величина $y(t)$ связана со входной величиной $x(t)$ *линейной* зависимостью.

Звено называется *стационарным*, если его реакция не зависит от времени приложения входного воздействия. Звено характеризует только математическую связь между выходной и входной величинами, причем звено передает воздействие только в одном направлении: со входа на выход. Его называют звеном *направленного* действия. Графическое обозначение звена показано на рисунке 1.21.

Звено, описываемое уравнением не выше второго порядка, называется *элементарным*.

Если функциональный элемент или система описываются дифференциальным уравнением более высокого порядка, то его математическая модель может быть представлена несколькими элементарными звеньями.

Переходная функция. Решение дифференциального уравнения, которым описывается звено или система

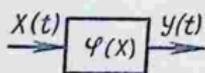


Рис. 1.21. Обозначение динамического звена в схемах.

при заданных начальных условиях, также отображает их динамику. Оно представляет переходный процесс звена или системы во времени. Для сравнения динамических свойств различных элементов рассматривают их переходные процессы при *нулевых* начальных условиях и *типовых* входных воздействиях.

Под начальными условиями понимают значения выходной величины (и всех ее производных) в момент $t=t_0$ при условии, что до этого времени внешние воздействия отсутствовали.

Начальные условия называют нулевыми, если $y(0) = y'(0) = y''(0) = \dots = y^{(n)}(0) = 0$.

В качестве типовых входных воздействий принимают определенные формы воздействий, наиболее удобные с точки зрения их математического описания, практической реализации и описания реакции звена на эти воздействия. В автоматике используют типовые воздействия, описываемые *ступенчатой*, *импульсной* и *гармонической* функциями.

Ступенчатое воздействие описывается единичной ступенчатой функцией вида

$$1(t) = \begin{cases} t & \text{при } t \geq 0, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (1.28)$$

Реакция звена на единичную ступенчатую функцию при нулевых начальных условиях называется *переходной функцией*, которую принято обозначать $h(t)$.

Графическое изображение переходной функции называют *переходной характеристикой* звена. Ступенчатое воздействие и переходные характеристики звеньев показаны на рисунке 1.22.

И м п у л ь с н а я п е р е х о д н а я ф у н к ц и я. Импульсное воздействие описывается дельта-функцией Дирака, являющейся математической идеализацией короткого импульса, площадь которого равна 1 при его длительности, равной 0, и амплитуде, равной бесконечности:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad (1.29)$$

Так как по определению

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, \quad (1.30)$$

то

$$\delta(t) = d1(t)/dt. \quad (1.31)$$

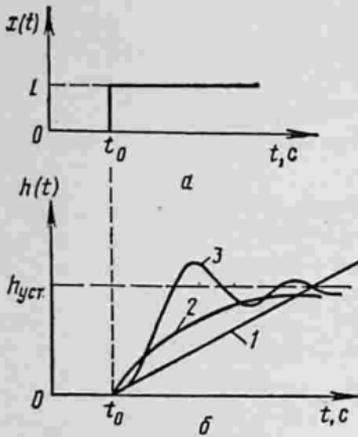


Рис. 1.22. Графики ступенчатого воздействия (а) и возможные переходные характеристики (б).

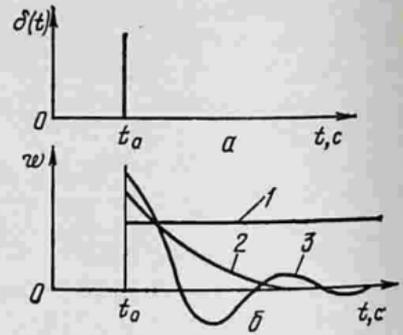


Рис. 1.23. Графики импульсного воздействия (а) и импульсной переходной характеристики (б).

Нормальная реакция звена на импульсную функцию называется импульсной переходной функцией или *весовой функцией*, которую принято обозначать $w(t)$.

Графическое изображение весовой функции называют *импульсной переходной характеристикой* звена (рис. 1.23).

Между переходной и весовой функциями одного и того же звена существует математическая связь, вытекающая из однозначной связи между ступенчатой и импульсной функциями:

$$w(t) = dh(t)/dt = h'(t), \quad (1.32)$$

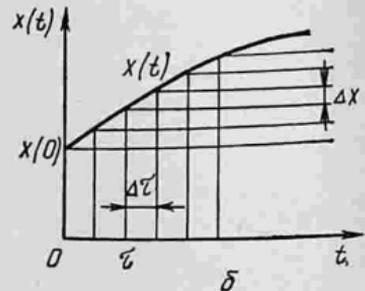
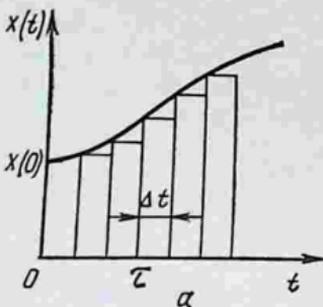


Рис. 1.24. Представление входного воздействия произвольной формы последовательностью импульсов (а) и последовательностью ступенчатых воздействий (б).

$$h(t) = \int_0^{\infty} w(\tau) d\tau. \quad (1.33)$$

Переходная и весовая функции характеризуют динамические свойства звена так же, как и дифференциальное уравнение.

Если к звену приложено воздействие, отличающееся от ступенчатого или импульсного, то его представляют как сумму последовательных ступенчатых или импульсных воздействий на звено (рис. 1.24). Тогда реакцию звена на такое сложное воздействие определяют, пользуясь интегралом Дюамеля:

$$y(t) = \int_0^{\infty} w(\tau) x(t-\tau) d\tau \quad (1.34)$$

или

$$y(t) = x(0)h(t) + \int_0^{\infty} h(\tau) x'(t-\tau) d\tau. \quad (1.35)$$

Реакцию звена находят, пользуясь принципом наложения, как сумму реакций, вызванных импульсными или ступенчатыми воздействиями, подаваемыми на звено друг за другом через промежутки времени, равные Δt .

Переходная и импульсная переходная характеристики относятся к *временным характеристикам* звена.

Временные характеристики звена и системы можно определить аналитическим или экспериментальным путем.

К недостаткам описания звеньев временными характеристиками следует отнести сложность и трудоемкость вычисления временных характеристик систем, описываемых дифференциальными уравнениями высокого порядка.

Передачная функция. Описание элементов и систем автоматического управления существенно упрощается при использовании методов операционного исчисления. Как известно, динамика функциональных элементов и систем автоматического управления описывается дифференциальным уравнением, которое в общем случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = \\ & = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \end{aligned} \quad (1.36)$$

переменная s может быть отождествлена с оператором дифференцирования p .

Выражение

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{P(s)}{Q(s)} \quad (1.41)$$

определяет передаточную функцию системы.

Передаточной функцией называется отношение лапласова изображения выходной величины к лапласову изображению входной величины при нулевых начальных условиях.

Из уравнения передаточной функции следует, что изображение выходной величины имеет вид

$$Y(s) = W(s) X(s). \quad (1.42)$$

Учитывая тождественность оператора дифференцирования p и комплексного переменного s в преобразовании Лапласа, формальное получение передаточной функции по дифференциальному уравнению заключается в замене оператора дифференцирования p комплексным переменным s и функций времени $x(t)$, $y(t)$ их изображениями $X(s)$, $Y(s)$. Например, для звена, описываемого дифференциальным уравнением (1.28), передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0}. \quad (1.43)$$

Многочлен, фигурирующий в знаменателе передаточной функции, называется *характеристическим многочленом* звена или системы, а уравнение вида

$$Q(s) = 0 \quad (1.44)$$

называется *характеристическим уравнением*.

Корни характеристического уравнения называются *полюсами* передаточной функции, а корни многочлена, расположенного в числителе передаточной функции, называются *нулями* передаточной функции.

Обратный переход от изображения $Y(s)$ к оригиналу $y(t)$ выполняется с помощью *обратного* преобразования Лапласа.

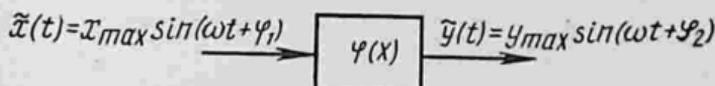


Рис. 1.25. Прохождение гармонического воздействия через линейное звено.

Для многих дробно-рациональных функций получены обратные преобразования Лапласа и сведены в таблицы. Использование таблиц значительно облегчает решение дифференциальных уравнений, представленных в виде уравнения (1.42).

Переход от передаточной функции к дифференциальному уравнению формально выполняется путем замены переменной s на переменную $p=d/dt$, а изображений $Y(s)$, $X(s)$ — их оригиналами $y(t)$, $x(t)$.

Кроме описания элементов и систем временными характеристиками и передаточными функциями, в автоматике используется описание частотными характеристиками при гармоническом входном воздействии. Если в качестве типового входного воздействия используется гармоническая функция, то реакция звена в установившемся режиме также будет гармонической функцией. При прохождении гармонического воздействия через линейное звено в установившемся процессе его частота остается неизменной, но изменяются амплитуда и фаза колебания по отношению к этим же параметрам входного воздействия (рис. 1.25). Изменения амплитуды и фазы зависят как от свойств звена, так и от угловой частоты гармонического входного воздействия.

Отношение амплитуды выходной величины к амплитуде входной величины в зависимости от частоты называют *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ) звена:

$$A(\omega) = y_{\max}/x_{\max}, \quad (1.45)$$

а разность фаз колебаний в зависимости от частоты называют *фазо-частотной характеристикой* (ФЧХ) звена:

$$\varphi(\omega) = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (1.46)$$

Частотные характеристики звена зависят только от его свойств, но не зависят от амплитуды и фазы входных гармонических воздействий.

Для выявления связи между частотными характеристиками и дифференциальным уравнением звена представим входную и выходную величины в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}(t) &= x_{\max} e^{j(\omega t + \varphi_1)}, \\ \bar{y}(t) &= y_{\max} e^{j(\omega t + \varphi_2)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.47)$$

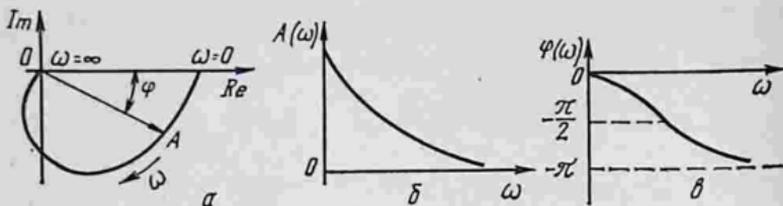


Рис. 1.26. Частотные характеристики:

a — амплитудно-фазовая; *b* — амплитудно-частотная; *в* — фазочастотная.

называют соответственно *модулем* и *аргументом* частотной передаточной функции.

В алгебраической форме функция $W(j\omega)$ может быть представлена так:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega), \quad (1.55)$$

где $U(\omega)$ — проекция вектора на вещественную ось; $V(\omega)$ — проекция вектора на мнимую ось комплексной плоскости.

Годограф вектора частотной передаточной функции $W(j\omega)$ при изменении частоты ω от нуля до бесконечности называют *амплитудно-фазовой характеристикой*.

АФХ можно строить в полярной системе координат по известному модулю $A(\omega)$ и аргументу $\varphi(\omega)$ для каждого значения частоты ω , а также в прямоугольной системе координат.

На комплексной плоскости по оси абсцисс откладывают вещественную часть $U(\omega)$, а по оси ординат — мнимую $V(\omega)$.

На рисунке 1.26 показан один из возможных видов частотных характеристик.

Между частотными характеристиками имеются еще следующие очевидные связи, вытекающие из уравнений (1.52) и (1.55):

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \\ \varphi(\omega) &= \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}, \\ U(\omega) &= A(\omega) \cos \varphi(\omega), \\ V(\omega) &= A(\omega) \sin \varphi(\omega). \end{aligned} \right\} \quad (1.56)$$

Частотные характеристики элементов и систем можно получить экспериментальным и аналитическим путем.

Логарифмические частотные характеристики. Для инженерных расчетов более удобны

амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики, построенные в логарифмическом масштабе. Это удобство заключается в том, что логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) можно складывать графически, а для типовых динамических звеньев можно элементарно просто строить *асимптотические* ЛАЧХ, то есть характеристики в виде ломаных линий из прямолинейных отрезков, к которым асимптотически приближаются действительные ЛАЧХ динамических звеньев.

При построении ЛАЧХ по оси абсцисс откладывают частоту в *логарифмическом масштабе*. За единицу измерения частоты принята логарифмическая единица — *декада*. Декадой называется интервал частот, на котором частота изменяется в 10 раз. Нуль оси абсцисс лежит слева в бесконечности, так как $\lg 0 = -\infty$.

По оси ординат при равномерном масштабе откладывают логарифмическую амплитуду, которую определяют из выражения

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega). \quad (1.57)$$

Единицей измерения $L(\omega)$ принят *децибел* (дБ). Он составляет десятую часть более крупной единицы — *бела*, представляющего собой десятичный логарифм отношения двух мощностей. Так как мощность пропорциональна квадрату амплитуды, то с учетом изложенного

$$10 \lg(P_1/P_2) = 10 \lg(a_1/a_2)^2 = 20 \lg(a_1/a_2), \quad (1.58)$$

где $a_1 = y_{\max}$, $a_2 = x_{\max}$ — соответственно амплитуда выходной и входной величин.

Нуль логарифмической амплитуды соответствует $A(\omega) = 1$. Если $A(\omega) < 1$, то ЛАЧХ находится под осью абсцисс. Ось ординат может пересекать ось абсцисс в любой точке. Эту точку выбирают так, чтобы график охватывал нужный диапазон частот.

Логарифмическую фазо-частотную характеристику (ЛФЧХ) строят в системе координат с такой же осью абсцисс, что и у

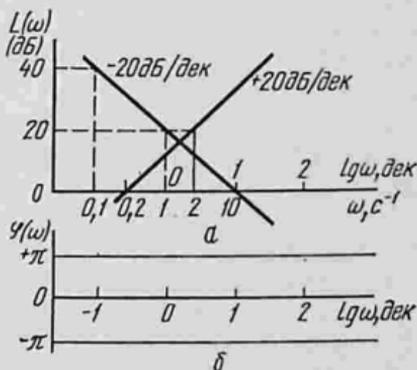


Рис. 1.27. Система координат для изображения логарифмических частотных характеристик: а — ЛАЧХ; б — ЛФЧХ.

ЛАЧХ, а по оси ординат откладывают в линейном масштабе угол $\varphi(\omega)$ в градусах или в радианах. ЛФЧХ строят обычно под ЛАЧХ так, чтобы можно было сопоставить изменение фазы с изменением амплитуды при одинаковых частотах.

Наклон отрезков асимптотической ЛАЧХ определяют в децибелах на декаду (дБ/дек), как показано на рисунке 1.27. Они имеют положительный и отрицательный наклон, кратный 20 дБ/дек.

1.6. ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ

Как отмечено ранее, элементы и системы автоматического регулирования, описываемые дифференциальными уравнениями, могут быть представлены элементарными звеньями. Число типов элементарных звеньев ограничено, и по различным классификационным признакам они объединены в группы.

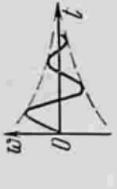
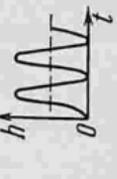
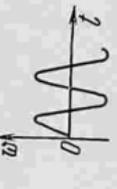
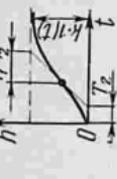
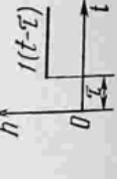
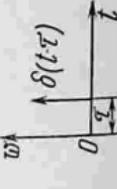
В принятой нами классификации будем рассматривать такие группы: простейшие звенья, звенья первого и второго порядков и трансцендентные звенья. В первой группе рассмотрим безынерционное, интегрирующее и дифференцирующее звенья, во второй — аperiodическое звено первого порядка и колебательное звено, в третьей — звено чистого запаздывания.

Реальное устройство может быть представлено типовым динамическим звеном или комбинацией нескольких звеньев в зависимости от принятых допущений и выбора входной и выходной величин этого устройства. Одно и то же устройство может быть представлено различными типами динамических звеньев в зависимости от степени его идеализации.

Рассмотрим элементарные типовые звенья и определим для каждого из них основные временные и частотные характеристики. Основным описанием звена является дифференциальное уравнение, по которому рассмотренными ранее методами определяют переходную функцию, функцию веса и передаточную функцию, характеризующие динамические свойства звена. Из частотных характеристик рассматриваются амплитудно-фазовая (АФХ), амплитудно-частотная (АЧХ), фазо-частотная (ФЧХ) и логарифмические (ЛАЧХ и ЛФЧХ). Характеристики элементарных звеньев сведены в таблицы 1.3 и 1.4.

1.3. Временные характеристики типовых звеньев

№ п/п	Тип звена	Уравнение звена	Переходная характеристика	Импульсная характеристика	Передаточная функция
1	Безынерционное	$y = kx$			$W(s) = k$
2	Интегрирующее	$y = k \int x dt$			$W(s) = k/s$
3	Дифференцирующее	$y = k dx/dt$			$W(s) = ks$
4	Апериодическое 1-го порядка	$T dy/dt + y = kx$			$W(s) = k/(Ts + 1)$

№ п/п	Тип звена	Уравнение звена	Переходная характеристика	Импульсная характеристика	Передаточная функция
5	Колебательное	$T_0^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi T_0 \frac{dy}{dt} + y = kx$ $\xi < 1$			$W(s) = k / (T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1)$
6	Консервативное	$T_0^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + y = kx$ $\xi = 0$			$W(s) = k / (T_0^2 s^2 + 1)$
7	Аперидическое 2-го порядка	$\xi \geq 1$			$W(s) = k / [(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)]$
8	Запаздывания	$y = x(t - \tau)$			$W(s) = e^{-st}$

1.6.1. Временные характеристики типовых динамических звеньев

Простейшие звенья. К простейшим динамическим звеньям относятся такие звенья, выходная величина которых пропорциональна входной величине, ее интегралу или производной. Эти звенья описываются линейным дифференциальным уравнением вида

$$p^q y(t) = kx(t) \quad (q = -1; 0; 1), \quad (1.59)$$

где k — коэффициент передачи звена.

Безынерционное звено (табл. 1.3, п. 1). Безынерционным (пропорциональным) называют звено, которое как в установившемся, так и в переходном режиме описывается уравнением (1.59) при $q=0$. Уравнение звена имеет вид

$$y(t) = kx(t). \quad (1.60)$$

Предполагается, что реакция звена на входное воздействие происходит мгновенно, без всякой инерции. В действительности таких звеньев нет. Обычно устройство считают безынерционным, если его инерционность значительно меньше (на несколько порядков) инерционности других устройств, которые входят в систему. Примерами устройств, представляющих безынерционные звенья (рис. 1.28), являются редукторная передача (а), рычажная передача (б) в том случае, когда не учитывается масса рычага, потенциометр (в), преобразующий механическое перемещение ползунка в электрическое напряжение, пропорциональное этому перемещению, усилитель постоянного тока (г) и другие.

Переходная функция звена

$$h(t) = k \cdot 1(t). \quad (1.61)$$

Весовая функция

$$w(t) = h'(t) = k\delta(t). \quad (1.62)$$

Передаточная функция звена

$$W(s) = Y(s)/X(s) = k. \quad (1.63)$$

Интегрирующее звено (табл. 1.3, п. 2) Интегрирующее звено — это звено, у которого выходная величина пропорциональна интегралу по времени от вхо-

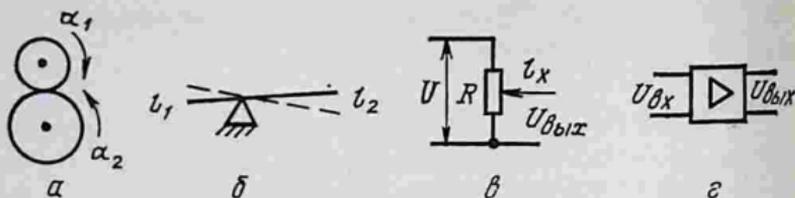


Рис. 1.28. Примеры устройств, представляющих безынерционное звено: *a* — редуктор; *b* — рычаг; *в* — потенциометр; *г* — усилитель.

ной величины:

$$y(t) = k \int_0^{\infty} x(t) dt + y(0), \quad (1.64)$$

или в операторной форме ($q=+1$)

$$y(t) = k \frac{1}{p} x(t), \quad (1.65)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Продифференцировав уравнение (1.65), получим:

$$dy(t)/dt = kx(t). \quad (1.66)$$

Из последнего уравнения видно, что скорость изменения выходной величины интегрирующего звена пропорциональна входной величине.

Примерами реальных элементов (рис. 1.29), которые можно представить интегрирующим звеном, являются резервуар (*a*), двигатель постоянного тока (*б*), электрический конденсатор (*в*), индуктивность (*г*).

Резервуар может быть представлен интегрирующим звеном, если принять уровень жидкости H в качестве выходной величины, а разность расходов жидкости на притоке

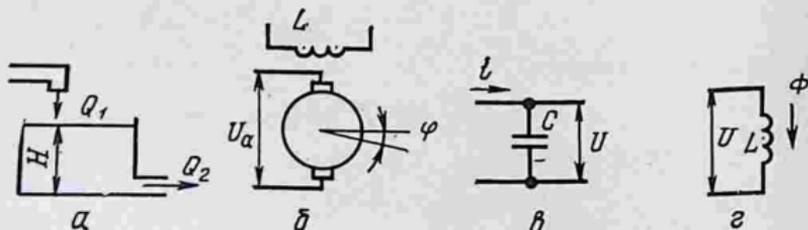


Рис. 1.29. Примеры устройств, представляющих интегрирующее звено: *a* — резервуар; *б* — двигатель постоянного тока; *в* — электрический конденсатор; *г* — катушка индуктивности.

и на стоке ΔQ — в качестве входной величины. Связь между этими величинами имеет вид

$$H = \frac{1}{S} \int_0^t \Delta Q dt + H_0, \quad (1.67)$$

где S — площадь поверхности жидкости в резервуаре.

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (б) описывается уравнением

$$\varphi = k \int_0^t U_a dt + \varphi_0, \quad (1.68)$$

где U_a — входная величина (напряжение на якоре двигателя); φ — выходная величина (угол поворота вала).

Процесс заряда конденсатора током I описывается уравнением

$$U = \frac{1}{C} \int_0^\infty I dt + U_0, \quad (1.69)$$

где C — емкость конденсатора.

Магнитный поток Φ катушки (выходная величина) и приложенное напряжение U (входная величина) на рисунке 1.29, г связаны зависимостью

$$\Phi = \frac{1}{w} \int_0^\infty U dt + \Phi_0, \quad (1.70)$$

где w — число витков катушки.

Переходную функцию звена получим, принимая $x(t) = 1(t)$ при нулевых начальных условиях:

$$h(t) = kt \cdot 1(t). \quad (1.71)$$

Весовая функция звена имеет вид

$$w(t) = k \cdot 1(t). \quad (1.72)$$

Передаточная функция интегрирующего звена

$$W(s) = k/s. \quad (1.73)$$

Дифференцирующее звено (см. табл. 1.3, п. 3). Дифференцирующим называется такое звено, у которого в установившемся режиме выходная величина про

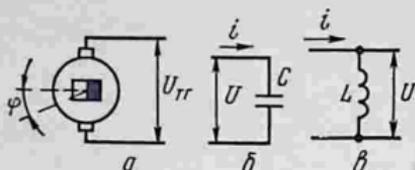


Рис. 1.30. Примеры устройств, представляющих дифференцирующее звено:
a — тахогенератор; *б* — электрический конденсатор; *в* — катушка индуктивности.

порциональна скорости изменения входной величины. Уравнение звена имеет вид

$$y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}, \quad (1.74)$$

или в операторной форме ($q = -1$)

$$y(t) = kpx(t), \quad (1.75)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

На практике не существует такого реального элемента, в котором на выходе точно воспроизводилась бы производная от входного сигнала. Идеализованными примерами дифференциального звена могут служить (рис. 1.30) тахогенератор (*a*), электрический конденсатор (*б*), индуктивность (*в*).

Напряжение тахогенератора зависит от частоты вращения якоря, которая является производной от угла поворота якоря, и может быть представлено зависимостью

$$U_{т.г} = c \, d\Phi/dt, \quad (1.76)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

Если в схеме с конденсатором принять за входную величину напряжение U , а выходную — ток I , то

$$I = C \, dU/dt, \quad (1.77)$$

где C — емкость конденсатора.

Если в схеме с индуктивностью принять за входную величину ток I , а выходную — напряжение самоиндукции на катушке, то

$$U = L \, dI/dt, \quad (1.78)$$

где L — индуктивность.

Переходная функция звена имеет вид

$$h(t) = k\delta(t). \quad (1.79)$$

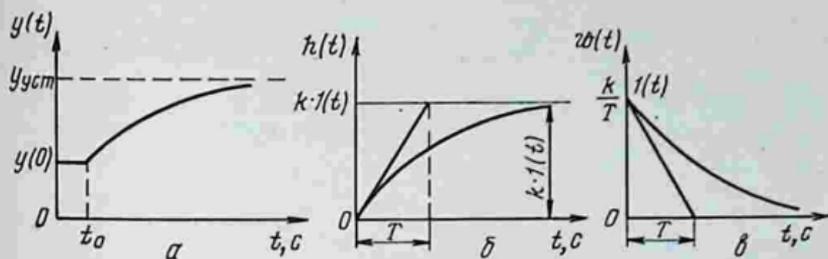


Рис. 1.31. Временные характеристики аperiodического звена: а — разгонная; б — переходная; в — переходная импульсная.

Весовая функция звена имеет вид

$$\omega(t) = k\delta'(t), \quad (1.80)$$

где $\delta'(t)$ — производная от δ -функции или δ -функция второго порядка, графически изображенная в виде двух импульсов второго порядка, интервал между которыми τ стремится к нулю.

Передаточная функция звена записывается в виде

$$W(s) = ks. \quad (1.81)$$

Звенья первого и второго порядка. Аperiodическое (инерционное) звено первого порядка (табл. 1.3, п. 4). Это такое звено, выходная величина которого после подачи на его вход ступенчатого воздействия изменяется *монотонно*, достигая некоторого установившегося значения (рис. 1.31). Уравнение звена имеет вид

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t), \quad (1.82)$$

или в операторной форме

$$(Tp + 1)y(t) = kx(t), \quad (1.83)$$

где T и k — соответственно постоянная времени и коэффициент передачи.

Аperiodическое звено наиболее распространено в системах автоматического регулирования и представляет многие элементы автоматики: управляемые объекты (генераторы, двигатели, нагревательные устройства и т. п.), преобразователи, магнитные усилители и другие устройства, обладающие инерционными свойствами (рис. 1.32).

Примером может служить процесс нагревания жидкости в ванне нагретым телом, если принять температуру нагретого

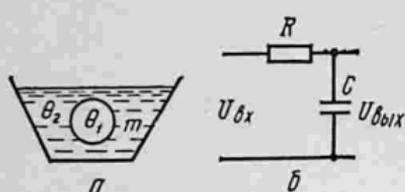


Рис. 1.32. Примеры устройств, представляющих аперидическое звено:

a — теплообменный аппарат (схема);
б — электрическая схема.

того тела θ_1 за входную величину, а температуру жидкости в ванне θ_2 — за выходную (рис. 1.32, *a*).

Согласно закону Ньютона, поток теплоты от более нагретого тела к менее нагретому определяется уравнением

$$q = \alpha (\theta_1 - \theta_2), \quad \theta_1 > \theta_2, \quad (1.84)$$

где α — коэффициент теплообмена.

Скорость изменения температуры пропорциональна тепловому потоку и имеет вид

$$d\theta_2/dt = kq, \quad (1.85)$$

где $k=1/(cm)$; c и m — соответственно теплоемкость и масса жидкости.

Подставив уравнение (1.85) в уравнение (1.84), получим

$$cm/\alpha \cdot d\theta_2/dt + \theta_2 = \theta_1. \quad (1.86)$$

Обозначим $cm/\alpha = T$ и получим стандартное уравнение

$$T d\theta_2/dt + \theta_2 = \theta_1. \quad (1.87)$$

Рассмотрим электрическую цепь с сопротивлением R и конденсатором C (рис. 1.32, *б*), у которой входная величина — напряжение $U_{вх}$, а выходная — напряжение $U_{вых}$.

По закону Кирхгофа

$$U_{вх} = U_R + U_{вых}, \quad (1.88)$$

где U_R — падение напряжения на сопротивлении R .

Учитывая, что $U_R = IR$, $U_{вых} = U_C$ и $I = C dU/dt$, получаем

$$U_{вх} = IR + U_{вых} = RC \frac{dU_{вых}}{dt} + U_{вых}. \quad (1.89)$$

Обозначив $RC = T$, получим уравнение в стандартном виде

$$T dU_{вых}/dt + U_{вых} = U_{вх}. \quad (1.90)$$

Из приведенных примеров видно, что полученные уравнения, связывающие выходную и входную величины, при-

водятся к уравнению аperiodического звена (1.82) при $k=1$.

Решение дифференциального уравнения (1.82) дает изменение выходной величины во времени:

$$y(t) = k(1 - e^{-t/T})x(t) + y(0)e^{-t/T}. \quad (1.91)$$

Переходную функцию получим при единичной ступенчатой функции $x(t)=1(t)$ и при нулевых начальных условиях $y(0)=0$:

$$h(t) = k(1 - e^{-t/T})1(t). \quad (1.92)$$

Весовая функция звена имеет вид

$$\omega(t) = k/T e^{-t/T} 1(t). \quad (1.93)$$

Графики переходной и весовой функций показаны на рисунке 1.31, б, в.

Теоретически переходный процесс в аperiodическом звене длится бесконечно долго. Практически для аperiodического звена под временем переходного процесса понимают промежуток времени, по истечении которого выходная величина достигает 0,95...0,99 от установившегося значения. Уже при $t=3T$ выходная величина аperiodического звена

$$h(3T) = k(1 - e^{-3T/T})1(t) = h_{уст}(1 - e^{-3}) = 0,95h_{уст}, \quad (1.94)$$

где $h_{уст} = k \cdot 1(t)$.

Для определения постоянной времени T находят значение $h(t)$ при $t=T$:

$$h(T) = k(1 - e^{-T/T})1(t) = h_{уст}(1 - e^{-1}) = 0,63h_{уст}. \quad (1.95)$$

Из полученной зависимости определяют постоянную времени аperiodического звена как время, за которое выходная величина, изменяясь от нуля, достигает 0,63 установившегося значения при условии, что на выход звена подано ступенчатое воздействие (рис. 1.33).

Передаточная функция имеет вид

$$W(s) = k/(Ts + 1). \quad (1.96)$$

Колебательное звено (табл. 1.3, п. 5). Звено, у которого выходная величина после подачи на его вход единичного ступенчатого воздействия стремится к установившемуся значению, совершая колебания, называется колебательным.

Колебательное звено описывают дифференциальн

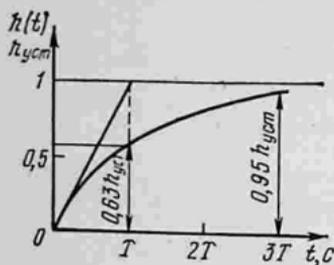


Рис. 1.33. Переходный процесс в аperiodическом звене.

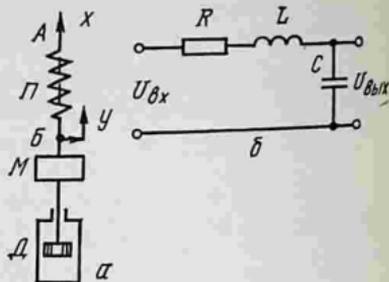


Рис. 1.34. Примеры устройств, представляющих колебательное звено: а — механическая система; б — электрическая схема.

уравнением вида

$$T_0^2 d^2 y / dt^2 + T_1 dy / dt + y = kx \quad (1.97)$$

или в операторной форме

$$(T_0^2 p^2 + T_1 p + 1) y(t) = kx(t). \quad (1.98)$$

Если обозначить $T_1 / (2T_0) = \xi$, то уравнение (1.98) принимает вид

$$(T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1) y(t) = kx(t). \quad (1.99)$$

Коэффициент ξ называют степенью затухания звена. Примерами устройств, которые могут быть представлены колебательным звеном, являются упругая механическая система с существенным влиянием массы (рис. 1.34, а), электрический колебательный контур (рис. 1.34, б) и другие устройства.

В упругой механической системе (рис. 1.34, а) принимают перемещение верхней точки А пружины за входную величину x , а перемещение точки В пружины — за выходную величину y . Уравнение сил, действующих на тело массой m , имеет вид

$$c(x - y) = m d^2 y / dt^2 + d dy / dt, \quad (1.100)$$

где c и d — соответственно коэффициенты пружины и успокоителя.

Обозначив $T_0^2 = m/c$ и $\xi = d / (2\sqrt{cm})$, получают уравнение движения системы

$$T_0^2 d^2 y / dt^2 + 2\xi T_0 dy / dt + y = x. \quad (1.101)$$

В электрической цепи, показанной на рисунке 1.34, б, входной величиной является напряжение $U_{вх}$, а выходной — напряжение на конденсаторе $U_{вых}$. Если цепь ненагруженная, то, согласно закону Кирхгофа,

$$U_{вх} = U_R + U_L + U_{вых}. \quad (1.102)$$

Учитывая, что $U_R = IR$, $U_L = L dI/dt$ и $I = c dU_c/dt$, получают уравнение цепи

$$U_{вх} = U_{вых} + RC dU_{вых}/dt + LC d^2U_{вых}/dt^2, \quad (1.103)$$

которое после введения обозначений

$$T_0 = \sqrt{LC}, \quad \xi = (R/2) \sqrt{L/C}$$

приводится к стандартному виду

$$T_0^2 \frac{d^2U_{вых}}{dt^2} + 2\xi T_0 \frac{dU_{вых}}{dt} + U_{вых} = U_{вх}. \quad (1.104)$$

Уравнения динамики приведенных устройств соответствуют уравнению (1.98) при $k=1$.

Решение уравнения (1.98) в общем виде

$$y(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (1.105)$$

представляет собой колебательную функцию, если корни характеристического уравнения $T_0^2 \lambda^2 + 2\xi T_0 \lambda + 1 = 0$ будут комплексные, то есть

$$\lambda_{1,2} = \frac{-\xi \pm \sqrt{1 - \xi^2}}{T_0} = -\beta \pm j\omega, \quad (1.106)$$

где $\beta = \xi/T_0$ — коэффициент затухания;

$$\omega_1 = \sqrt{1 - \xi^2}/T_0 = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} —$$

собственная частота колебаний звена.

Переходная функция устойчивого колебательного звена имеет вид

$$h(t) = k \left[1 - e^{-\beta t} \left(\frac{\beta}{\omega_1} \sin \omega_1 t + \cos \omega_1 t \right) \right] \cdot 1(t). \quad (1.107)$$

Весовая функция звена имеет вид

$$\omega(t) = \frac{k\omega_0^2}{\omega_1} e^{-\beta t} \sin \omega_1 t \cdot 1(t). \quad (1.108)$$

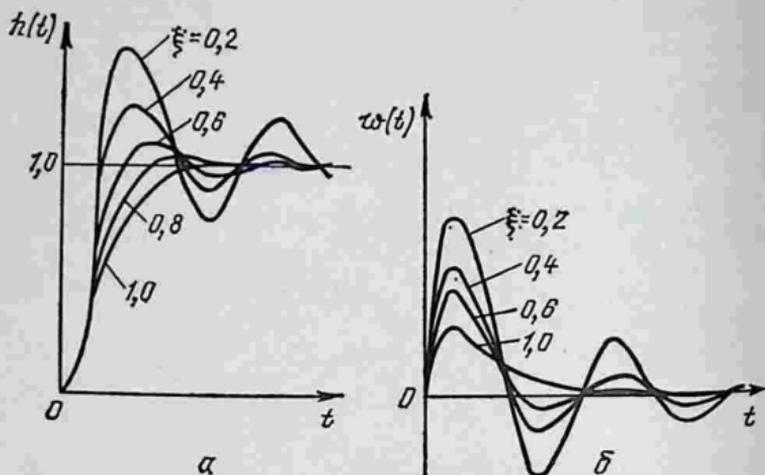


Рис. 1.35. Временные характеристики колебательного звена (для разных значений ξ):
 а — переходная; б — импульсная.

Из приведенных формул видно, что с уменьшением коэффициента затухания β колебательность процесса возрастает, так как $\lim_{\beta \rightarrow 0} e^{-\beta t} = 1$.

Графики переходной и весовой функций для нескольких значений ξ показаны на рисунке 1.35.

Передаточная функция колебательного звена имеет вид

$$W(s) = \frac{k}{T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1} \quad (1.109)$$

Консервативное звено (табл. 1.3, п. 6). Если $\xi=0$, то звено не будет рассеивать энергию и в нем устанавливаются *незатухающие* колебания. Такое звено называют консервативным, а его уравнение имеет вид

$$T_0^2 d^2 y / dt^2 + y = kx \quad (1.110)$$

или

$$(T_0^2 p^2 + 1) y(t) = kx(t). \quad (1.111)$$

Частота установившихся колебаний консервативного звена называется *резонансной*. Она определяется из соотношения

$$\omega_0 = 1/T_0. \quad (1.112)$$

Выражение переходной функции консервативного звена находят из уравнения (1.99) колебательного звена. При $\xi = 0$

$$h(t) = k(1 - \cos \omega_0 t) 1(t). \quad (1.113)$$

Продифференцировав выражение (1.113), определим функцию веса

$$\omega(t) = k\omega_0 \sin \omega_0 t 1(t). \quad (1.114)$$

Передаточная функция консервативного звена имеет вид

$$W(s) = k/(T_0^2 s^2 + 1). \quad (1.115)$$

Апериодическое звено второго порядка. Если степень затухания звена $\xi \gg 1$, то характеристическое уравнение звена имеет отрицательные вещественные корни и такое звено эквивалентно соединению двух апериодических звеньев первого порядка. Его передаточная функция имеет вид

$$W(s) = k/[(T_1' s + 1)(T_2' s + 1)]. \quad (1.116)$$

Постоянные времени первого и второго звеньев первого порядка находят из соотношений

$$T_1' T_2' = T_0^2; \quad T_1' + T_2' = T_1. \quad (1.117)$$

Графики переходной и весовой функций апериодического звена второго порядка показаны в таблице 1.3, п. 7.

Трансцендентные звенья. К трансцендентным относятся звенья, описываемые неалгебраическими передаточными функциями. К этим звеньям принадлежит звено чистого запаздывания, которое имеет большое практическое зна-

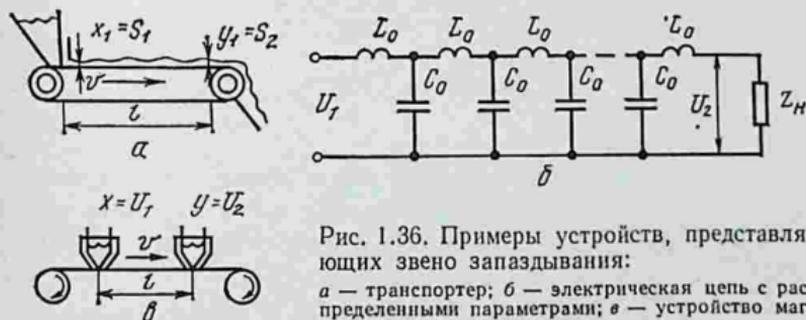


Рис. 1.36. Примеры устройств, представляющих звено запаздывания:

a — транспортер; *б* — электрическая цепь с распределенными параметрами; *в* — устройство магнитной записи и воспроизведения электрических сигналов.

чение. Звено запаздывания описывается уравнением

$$y(t) = x(t - \tau); \quad \tau > 0. \quad (1.118)$$

Звено запаздывания осуществляет операцию сдвига входного воздействия $x(t)$ на время τ назад. Выходная величина равна входной, но сдвинута на время τ .

Примеры устройств, которые можно представить звеном запаздывания, следующие (рис. 1.36): транспортеры (а), электрические цепи без потерь с распределенными параметрами (б), устройство записи и воспроизведения с магнитофонной ленты (в).

При загрузке на транспортер сыпучего материала толщина слоя в конце транспортера будет отставать от толщины слоя в начале транспортера на время $\tau = l/v$, где v — скорость движения транспортерной ленты.

Если на вход линии с распределенными параметрами L_0 и C_0 приложить напряжение U , то в конце линии, нагруженной на согласованное сопротивление $z_n = \sqrt{L_0/C_0}$, будет воспроизводиться входное напряжение, но с запаздыванием на время $\tau = l\sqrt{L_0C_0}$, где l — длина линии.

Переходная функция звена запаздывания

$$h(t) = 1(t - \tau), \quad (1.119)$$

а весовая функция

$$w(t) = \delta(t - \tau). \quad (1.120)$$

Графики этих функций показаны в таблице 1.3, п. 8.

Чтобы найти передаточную функцию звена запаздывания, разложим функцию $x(t - \tau)$ в ряд Тейлора по τ :

$$x(t - \tau) = x(t) - \frac{\tau}{1!} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{\tau^2}{2!} \frac{d^2x(t)}{dt^2} - \frac{\tau^3}{3!} \frac{d^3x(t)}{dt^3} + \dots \quad (1.121)$$

и запишем в операторной форме

$$x(t - \tau) = \left(1 - p\tau + \frac{1}{2!} p^2 \tau^2 - \frac{1}{3!} p^3 \tau^3 + \dots \right) x(t) = e^{-p\tau} x(t). \quad (1.122)$$

С учетом тождественности оператора дифференцирования p и комплексного переменного s на основании уравнения (1.122) передаточная функция звена запаздывания имеет вид

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-s\tau}. \quad (1.123)$$

1.6.2. Частотные характеристики типовых звеньев

Для получения частотных переходных функций типового звена используется его передаточная функция. Графики частотных функций или частотные характеристики звеньев приведены в таблице 1.4.

Частотные характеристики безынерционного звена. С учетом передаточной функции безынерционного звена (1.64) его частотные функции имеют вид

$$\left. \begin{aligned} W(j\omega) = k; \quad U(\omega) = k; \quad V(\omega) = 0, \\ A(\omega) = k; \quad \varphi(\omega) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.124)$$

Из графика АФХ звена (табл. 1.4, п. 1) видно, что она представляет собой вектор, направленный в положительном направлении вещественной оси, и его величина не зависит от частоты.

Модуль вектора равен коэффициенту передачи звена, а его аргумент равен нулю при любой частоте входного воздействия.

ЛАЧХ безынерционного звена определяется выражением

$$L(\omega) = 20 \lg k. \quad (1.125)$$

Она проходит параллельно оси абсцисс на расстоянии $20 \lg k$. ЛФЧХ совпадает с осью абсцисс.

Частотные характеристики интегрирующего звена (табл. 1.4, п. 2). Из передаточной функции звена (1.73) получаем

$$\left. \begin{aligned} W(j\omega) = k/(j\omega) = -jk/\omega = (k/\omega)e^{-j\frac{\pi}{2}}; \\ U(\omega) = 0; \quad V(\omega) = -k/\omega; \\ A(\omega) = k/\omega; \quad \varphi(\omega) = -\pi/2. \end{aligned} \right\} \quad (1.126)$$

Графики этих функций при изменении ω от 0 до ∞ представлены в таблице 1.4, п. 2.

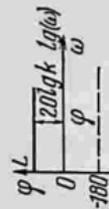
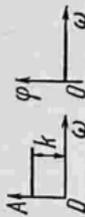
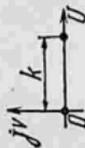
АФХ звена совпадает с отрицательной мнимой осью для всех значений ω ($0 < \omega < \infty$).

Модуль вектора $A(\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ представляет собой гиперболу, и при $\omega = \infty$ он равен 0. Аргумент вектора $\varphi(\omega)$ для всех значений частоты равен $-\pi/2$, то есть колебания выходной величины отстают по фазе от входных на угол $-\pi/2$.

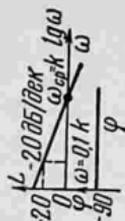
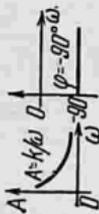
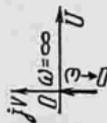
1.4. Частотные характеристики типовых звеньев

№ звена п/п	Тип звена	Частотные характеристики	
		амплитудно-фазовая $\dot{W}(j\omega)$	амплитудная $A(\omega)$ и фазовая $\varphi(\omega)$

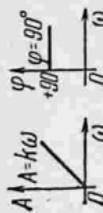
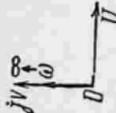
1 Безынерционное



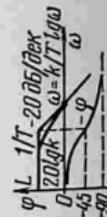
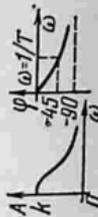
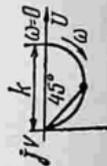
2 Интегрирующее



3 Дифференцирующее



4 Аперийодическое 1-го порядка



Частотные характеристики

№ п/п	Тип звена	амплитудно-фазовая $W(j\omega)$	амплитудная $A(\omega)$ и фазовая $\varphi(\omega)$	логарифмические амплитудная $L(\omega)$ и фазовая $\varphi(\omega)$
5	Колебательное			
6	Консервативное			
7	Апериодическое 2-го порядка			
8	Запаздывания			

Логарифмическая АЧХ

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega \quad (1.127)$$

представляет прямую линию, которая пересекает ось абсцисс в точке $\omega = k$. Наклон характеристики к оси абсцисс равен -20 дБ/дек. Логарифмическая ФЧХ не зависит от частоты и проходит параллельно оси абсцисс на расстоянии $-\pi/2$. Асимптотическая ЛАЧХ интегрирующего звена совпадает с ее действительным значением и строится в виде прямой, пересекающей ось абсцисс в точке $\omega = k$ с наклоном -20 дБ/дек.

Частотные характеристики дифференцирующего звена. Частотные функции дифференцирующего звена, согласно (1.81), имеют вид

$$\left. \begin{aligned} W(j\omega) &= jk\omega = k\omega e^{j\pi/2}; \\ U(\omega) &= 0; \quad V(\omega) = k\omega; \\ A(\omega) &= k\omega; \quad \varphi(\omega) = \pi/2. \end{aligned} \right\} \quad (1.128)$$

Графики этих функций для $0 < \omega < \infty$ приведены в таблице 1.4, п. 3.

АФХ звена представляет собой вектор, совпадающий с положительным направлением мнимой полуоси при всех значениях частоты. Модуль вектора $A(\omega)$ изменяется по линейному закону в зависимости от частоты. График $A(\omega)$ имеет наклон к оси абсцисс $\alpha = \arctg k$. Аргумент вектора $\varphi(\omega)$ для всех значений частоты $0 < \omega < \infty$ равен $\pi/2$, то есть выходная величина опережает по фазе входную величину на угол $\pi/2$.

Логарифмическая АЧХ дифференцирующего звена имеет вид

$$L(\omega) = 20 \lg k + 20 \lg \omega. \quad (1.129)$$

Она представляет собой прямую линию, которая пересекает ось абсцисс в точке $\omega = 1/k$ и имеет наклон в положительном направлении $+20$ дБ/дек.

Логарифмическая ФЧХ дифференцирующего звена не зависит от частоты и проходит параллельно оси абсцисс на расстоянии $+\pi/2$.

Частотные характеристики апериодического звена первого порядка. Заменяя в передаточной функции звена $W(s) = k/(Ts + 1)$ переменную s на $j\omega$, получаем частотную передаточную функцию

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 + j\omega T} = \frac{k(1 - j\omega T)}{1 + \omega^2 T^2}. \quad (1.130)$$

Вещественную и мнимую составляющие вектора АФХ записываем в виде

$$\left. \begin{aligned} U(\omega) &= \frac{k}{1 + \omega^2 T^2}, \\ V(\omega) &= -\frac{k\omega T}{1 + \omega^2 T^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.131)$$

Согласно выражениям (1.56) и (1.131), модуль и аргумент вектора АФХ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \\ \varphi(\omega) &= -\arctg \omega T. \end{aligned} \right\} \quad (1.132)$$

АФХ апериодического звена начинается при $\omega=0$ на положительной вещественной полуоси, так как ее модуль $A(0)=0$ и аргумент $\varphi(0)=0$. При изменении ω от 0 до ∞ годограф звена имеет вид полуокружности, расположенной в IV квадранте комплексной плоскости. При $\omega=\infty$ $A(\omega)=0$ и $\varphi(\infty)=\pi/2$. Центр полуокружности лежит на вещественной полуоси в точке $\omega=k/2$. При частоте $\omega=1/T$ аргумент (фаза) вектора, согласно уравнению (1.133), составляет

$$\varphi(1/T) = -\arctg 1 = -\pi/4, \quad (1.133)$$

а модуль

$$A(1/T) = k/\sqrt{2}. \quad (1.134)$$

Это подтверждает то, что АФХ звена — полуокружность, так как в нее вписывается прямоугольный треугольник с гипотенузой — диаметром полуокружности.

С увеличением частоты от 0 до ∞ амплитуда колебаний на выходе звена уменьшается, а фаза этих колебаний по отношению к колебаниям на входе стремится к $-\pi/2$.

Логарифмические АЧХ и ФЧХ строятся по выражениям

$$\left. \begin{aligned} L(\omega) &= 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}, \\ \varphi(\omega) &= -\arctg \omega T \end{aligned} \right\} \quad (1.135)$$

в логарифмическом масштабе.

Логарифмическая АЧХ на низких частотах, соответствующих $\omega < 1/T$, и на высоких частотах $\omega \gg 1/T$ представляется двумя прямолинейными отрезками: первый описывается равенством $L(\omega) = 20 \lg k$, так как второе слагаемое (1.136) близко к 0, а второй — уравнением $L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega T$, так как при частотах $\omega \gg 1/T$ $\omega^2 T^2 \gg 1$ и можно

положить $20 \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \approx 20 \lg \omega T$. Наклон второго отрезка к оси абсцисс равен -20 дБ/дек.

Если эти отрезки прямых продолжить до их пересечения, то получим асимптотическую ЛАЧХ (рис. 1.37, а), которая описывается двумя уравнениями

$$L(\omega) = \begin{cases} 20 \lg k & \text{при } 0 < \omega T \ll 1 \\ 20 \lg k - 20 \lg \omega T & \text{при } \omega T \gg 1. \end{cases} \quad (1.136)$$

Точка пересечения прямых соответствует частоте, которая называется частотой сопряжения и обозначается ω_c . Для аperiodического звена первого порядка $\omega_c = 1/T$.

Максимальная ошибка асимптотической ЛАЧХ аperiodического звена по отношению к его действительной характеристике на частоте ω_c равна

$$\Delta L(\omega) = -20 \lg \sqrt{2} = -3 \text{ дБ}. \quad (1.137)$$

При изменении коэффициента k ЛАЧХ звена перемещается параллельно самой себе.

Логарифмическая ФЧХ, построенная в полулогарифмическом масштабе ($\lg \omega, \varphi$), по формуле (1.135) может быть аппроксимирована прямой линией на интервале частот $0,1T < \omega < 10T$ с углом наклона $-\pi/4$ и проходящей через

точку с координатами ($\omega T = 1$, $\varphi(\omega) = -\pi/4$). Наибольшая ошибка аппроксимации достигает 6° (рис. 1.37, б). ЛФЧХ не зависит от значения коэффициента k .

Частотные характеристики колебательного звена (табл. 1.4, п. 5). Используя уравнение передаточной функции колебательного звена $W(s) = k / (T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1)$, частотную передаточную функцию записываем в виде

$$W(j\omega) = \frac{k}{(1 - \omega^2 T_0^2) + j\omega 2\xi T_0}. \quad (1.138)$$

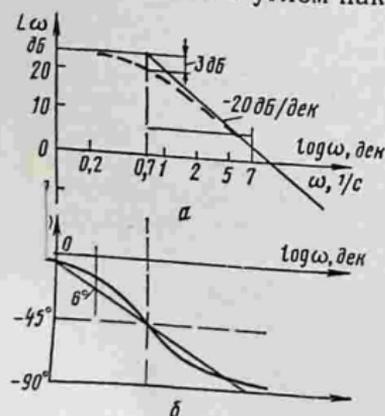


Рис. 1.37. Логарифмические частотные характеристики аperiodического звена: а — ЛАЧХ; б — ЛФЧХ.

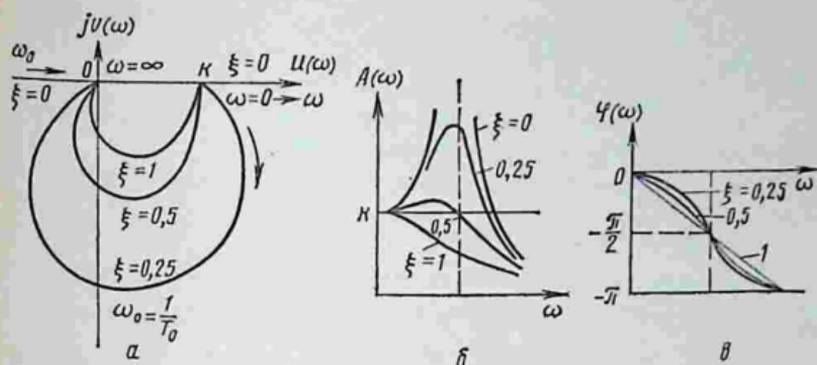


Рис. 1.38. Амплитудно-фазовая (а), амплитудно-частотная (б) и фазо-частотная (в) характеристики колебательного звена для разных значений степени затухания ξ .

Вещественная и мнимая частотные функции звена

$$\left. \begin{aligned} U(\omega) &= \frac{k(1 - \omega^2 T_0^2)}{(1 - \omega^2 T_0^2)^2 + (2\xi\omega T_0)^2}, \\ V(\omega) &= -\frac{2k\xi\omega T_0}{(1 - \omega^2 T_0^2)^2 + (2\xi\omega T_0)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.139)$$

Уравнение АЧХ

$$A(\omega) = k/V \sqrt{(1 - \omega^2 T_0^2)^2 + (2\xi\omega T_0)^2}. \quad (1.140)$$

Уравнение ФЧХ

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2\xi\omega T_0}{1 - \omega^2 T_0^2}. \quad (1.141)$$

Годограф частотной характеристики звена начинается при $\omega=0$ на положительной вещественной полуоси в точке с координатами $k, 0$, проходит два квадранта (IV и III) комплексной плоскости и при $\omega=\infty$ приходит в начало координат $(0, 0)$. При уменьшении степени затухания звена ξ АФХ увеличивается (рис. 1.38, а). АФХ колебательного звена пересекает мнимую ось при $\omega_0=1/T_0$.

Амплитудно-частотная характеристика, построенная по уравнению (1.140) для разных значений степени затухания ξ , имеет максимальную амплитуду на частоте $\omega_m = \omega_0 \sqrt{1 - 2\xi^2}$ тем большую, чем меньше значение ξ (рис. 1.38, б). При уменьшении ξ частота ω_m приближается к резонансной ω_0 .

Колебательное звено, так же как и аperiodическое, вносит отставание по фазе выходной величины во всем диапазо-

не изменения частоты от 0 до ∞ . ФЧХ звена изменяется от нуля до $-\pi$, а при резонансной частоте $\varphi(\omega_0) = -\pi/2$. Скорость изменения фазы существенно зависит от степени затухания звена (рис. 1.38, в): при уменьшении ξ скорость изменения фазы увеличивается.

Логарифмическая АЧХ описывается уравнением

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(1 - \omega^2 T_0^2)^2 + (2\xi \omega T_0)^2}. \quad (1.142)$$

Асимптотическая ЛАЧХ звена описывается двумя уравнениями прямых:

$$L(\omega) = \begin{cases} 20 \lg k & \text{при } 0 < \omega T_0 \ll 1 \\ 20 \lg k - 40 \lg \omega T & \text{при } \omega T_0 \gg 1. \end{cases} \quad (1.143)$$

Прямые имеют частоту сопряжения $\omega_c = 1/T_0$. Но вблизи резонансной частоты характеристика сильно зависит от степени затухания ξ . Поправка к асимптотической ЛАЧХ колебательного звена вблизи ω_c при малых значениях ξ может быть большой и составлять

$$\Delta L(\omega) = 20 \lg \frac{1}{2\xi}. \quad (1.144)$$

Для некоторых значений ξ величины поправки приведены ниже:

ξ	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$\Delta L(\omega)$	0,0	1,94	4,44	7,96	13,98

Максимум поправки наблюдается на частоте ω_m звена, которая при меньших значениях ξ приближается к резонансной частоте ω_0 (рис. 1.39). Для построения точных ЛАЧХ колебательного звена пользуются кривыми поправок к асимптотическим характеристикам.

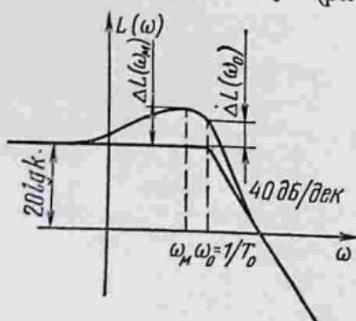


Рис. 1.39. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика колебательного звена имеет максимальную амплитуду на частоте ω_m .

Если степень затухания звена ξ лежит в пределах от 0,4 до 0,7, то реальная ЛАЧХ колебательного звена вблизи сопрягающей частоты отличается от асимптотической не более чем на 3 дБ.

Логарифмические ФЧХ колебательного звена повторяют ФЧХ звена, но в более сжатом виде по оси абсцисс.

Частотные характеристики консервативного звена (табл. 1.4, п. 6). По передаточной функции звена (1.115) находим частотную передаточную функцию заменой s на $j\omega$:

$$W(j\omega) = k/(1 - \omega^2 T_0^2). \quad (1.145)$$

График этой функции при изменении ω от 0 до ∞ имеет вид двух полупрямых: при изменении ω от 0 до $\omega_0 = 1/T_0$ первая полупрямая начинается на вещественной положительной полуоси в точке $\omega = k$ и идет в бесконечность в положительном направлении; вторая полупрямая характеристики начинается в $-\infty$ при $\omega_0 = 1/T_0$ и идет по отрицательной вещественной полуоси в начало координат при $\omega \rightarrow 0$. На частоте $\omega = \omega_0$ АЧХ консервативного звена имеет разрыв, соответствующий бесконечному возрастанию амплитуды, а ФЧХ скачком изменяет фазу от 0 до $-\pi$.

Логарифмическая АЧХ звена имеет разрыв на сопрягающей частоте $\omega_c = 1/T_0$, и на этой же частоте фазовая характеристика имеет скачок фазы от 0 до $-\pi$.

Частотные характеристики звена запаздывания. Частотные функции звена запаздывания имеют вид

$$\left. \begin{aligned} W(j\omega) &= e^{-j\omega\tau} = \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau, \\ U(\omega) &= \cos \omega\tau; \quad V(\omega) = -\sin \omega\tau, \\ A(\omega) &= 1; \quad \varphi(\omega) = -\omega\tau. \end{aligned} \right\} \quad (1.146)$$

Графики частотных функций звена приведены в таблице 1.4, п. 8.

АФХ звена имеет форму окружности с радиусом, равным 1, и центром в начале координат. При увеличении частоты вектор АФХ вращается по часовой стрелке. При частоте $\omega = 0$ вектор находится на вещественной положительной полуоси и вернется в это положение при частоте $\omega = 2\pi/\tau$. При увеличении частоты до ∞ вектор $W(j\omega)$ будет вращаться вокруг начала координат бесконечное число раз.

Звено запаздывания воспроизводит на выходе колебания любой частоты без искажения, но с отставанием по фазе, которое зависит от частоты.

Логарифмическая АЧХ звена

$$L(\omega) = 20 \lg 1 = 0 \quad (1.147)$$

совпадает с осью абсцисс, а логарифмическая ФЧХ строится по формуле (1.146) в полулогарифмическом масштабе.

1.7. СОЕДИНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ

Реальные элементы и системы автоматического управления (регулирования) представляют соединением элементарных звеньев. Существует три типа соединений: последовательное, параллельное и параллельно-встречное (или соединение с обратной связью).

Последовательное соединение звеньев. Последовательным называют такое соединение двух или нескольких звеньев, при котором выходная величина предыдущего звена является входной величиной для последующего (рис. 1.40, а). Если статические характеристики звеньев линейны $\varphi_1 = k_1$, $\varphi_2 = k_2$, ..., $\varphi_n = k_n$, то при последовательном соединении справедливо следующее выражение:

$$y_n = (k_1, k_2, \dots, k_n) x_1 = kx_1, \quad (1.148)$$

где $k = \prod_{i=1}^n k_i$ — коэффициент передачи соединения звеньев.

Статическая характеристика в этом случае будет также линейной, а угол ее наклона к оси абсцисс $\alpha = \arctg k$.

Определение статической характеристики последовательно соединенных звеньев, имеющих нелинейные статические характеристики, более удобно и наглядно выполнять графическим методом.

Передающую функцию последовательного соединения звеньев, передающие функции которых $W_1(s)$, $W_2(s)$, ..., $W_n(s)$, находят из условия, что выходная величина предыдущего звена является входной величиной последующего. Из этого следует

$$Y_1(s) = W_1(s) X_1(s); \quad Y_2(s) = W_2(s) X_2(s) = W_2(s) Y_1(s) \text{ и т. д.} \quad (1.149)$$

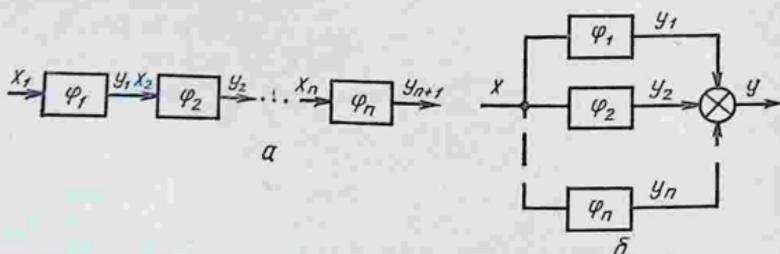


Рис. 1.40. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение звеньев.

и после соответствующих подстановок получают

$$W(s) = \frac{Y_n(s)}{X_1(s)} = W_1(s) W_2(s), \dots, W_n(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s). \quad (1.150)$$

Из последнего выражения следует, что последовательное соединение звеньев эквивалентно звену, передаточная функция которого равна *произведению* передаточных функций последовательно соединенных звеньев.

Частотная передаточная функция последовательного соединения на основании уравнения (1.150) имеет вид

$$W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) \quad (1.151)$$

или

$$W(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)} = e^{j \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)} \prod_{i=1}^n A_i(\omega). \quad (1.152)$$

Из выражения (1.152) вытекает, что при последовательном соединении звеньев их АЧХ перемножаются, а АФХ складываются:

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= \prod_{i=1}^n A_i(\omega), \\ \varphi(\omega) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega). \end{aligned} \right\} \quad (1.153)$$

Если использовать логарифмические частотные характеристики, то для последовательного соединения

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = \sum_{i=1}^n 20 \lg A_i(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega), \quad (1.154)$$

то есть логарифмическая АЧХ последовательного соединения звеньев равна сумме их ЛАЧХ. С этой точки зрения использование логарифмических характеристик значительно упрощает графическое построение ЛАЧХ и ФЧХ последовательного соединения звеньев.

Параллельное соединение звеньев. Параллельным называется такое соединение двух или нескольких звеньев, при котором входная величина всех звеньев одна и та же, а их выходные величины складываются (рис. 1.40, б).

Для построения статической характеристики параллельного соединения звеньев, статические характеристики которых известны, необходимо построить эти характеристики

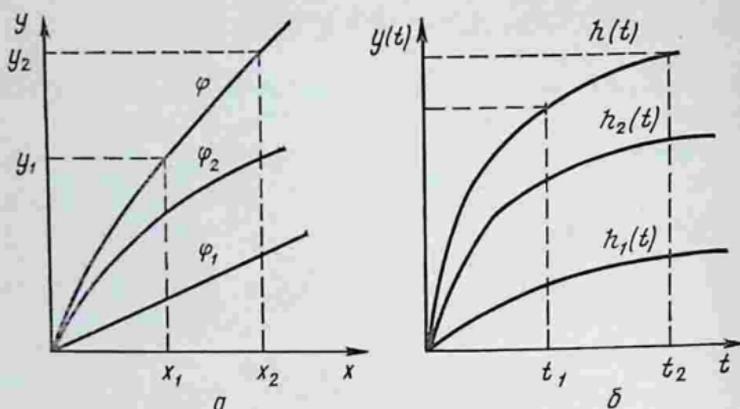


Рис. 1.41. Графическое построение характеристик параллельного соединения звеньев:

a — статических; *б* — переходных.

в одной системе координат и сложить их ординаты для одинаковых значений входной величины (рис. 1.41, *a*).

Переходная функция параллельного соединения

$$h(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t). \quad (1.155)$$

Построение переходной характеристики параллельного соединения заключается в построении переходных характеристик отдельных звеньев на одном графике и суммировании их ординат для одних и тех же значений времени (рис. 1.41, *б*).

Передаточную функцию параллельного соединения звеньев получают, учитывая способ соединения:

$$Y(s) = Y_1(s) + Y_2(s) + \dots + Y_n(s) = W_1(s)X(s) + W_2(s)X(s) + \dots + W_n(s)X(s). \quad (1.156)$$

Передаточная функция соединения

$$W(s) = Y(s)/X(s) = \sum_{i=1}^n W_i(s). \quad (1.157)$$

Из (1.157) следует, что параллельное соединение звеньев эквивалентно одному звену с передаточной функцией, равной сумме передаточных функций, входящих в соединения звеньев.

Частотная переходная функция параллельного соеди-

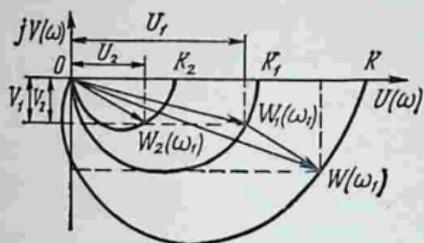


Рис. 1.42. Построение АФХ параллельного соединения.

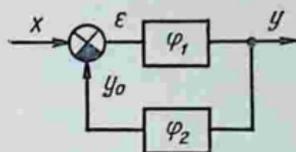


Рис. 1.43. Параллельно-встречное соединение звеньев.

нения имеет вид

$$W(j\omega) = \sum_{i=1}^n W_i(j\omega). \quad (1.158)$$

Так как вектор АФХ параллельного соединения для каждой частоты равен сумме векторов АФХ звеньев, входящих в соединение (рис. 1.42), то проекции вектора соединения на вещественную и мнимую оси соответственно равны сумме проекций отдельных векторов и из этого следует:

$$\left. \begin{aligned} U(\omega) &= \sum_{i=1}^n U_i(\omega), \\ V(\omega) &= \sum_{i=1}^n V_i(\omega), \end{aligned} \right\} \quad (1.159)$$

на основании чего можно записать:

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \\ \varphi(\omega) &= \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.160)$$

Параллельно-встречное соединение звеньев. Параллельно-встречным называют такое соединение двух звеньев, при котором выходная величина одного звена подается обратно на его вход через другое звено (рис. 1.43). Такое соединение называется соединением с обратной связью. Цепь, в которую включено первое звено, передающее воздействие в прямом направлении, называют прямой.

В автоматических устройствах применяется преимущественно отрицательная обратная связь, при которой на вход звена в прямой цепи подается разность от входной величины x и выходной величины y_0 звена обратной связи φ_2 .

Параллельно-встречное соединение в статике описыва-

ется следующими уравнениями

$$\left. \begin{aligned} y &= \varphi_1 e = \varphi_1 (x - y_0), \\ y_0 &= \varphi_2 y, \end{aligned} \right\} \quad (1.161)$$

где φ_1 и φ_2 — статические характеристики звеньев.

Совместное решение уравнений (1.161) дает уравнение статической характеристики соединения:

$$y = \frac{\varphi_1}{1 \pm \varphi_1 \varphi_2} x. \quad (1.162)$$

Если звенья представить их передаточными функциями, а входную и выходную величины их лапласовыми изображениями, то по аналогии с уравнением (1.162) можно записать

$$Y(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_1(s) W_2(s)} X(s). \quad (1.163)$$

Передаточная функция звена, эквивалентного параллельно-встречному соединению двух звеньев, будет иметь вид

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_1(s) W_2(s)}. \quad (1.164)$$

Знак «+» в этой формуле соответствует отрицательной обратной связи.

При единичной обратной связи $W_2(s) = 1$ передаточная функция соединения имеет вид

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm W_1(s)}. \quad (1.165)$$

Частотная передаточная функция параллельно-встречного соединения имеет вид

$$W(j\omega) = \frac{W_1(j\omega)}{1 \pm W_1(j\omega) W_2(j\omega)}. \quad (1.166)$$

Вектор АФХ параллельно-встречного соединения при единичной обратной связи может быть представлен через составляющие:

$$W(j\omega) = \frac{W_1(j\omega)}{1 \pm W_1(j\omega)} = U(\omega) + jV(\omega). \quad (1.167)$$

Если представить частотную передаточную функцию звена также через ее вещественную и мнимую составляю-

щие, то после преобразований получим

$$\begin{aligned}
 W(j\omega) &= \frac{U_1(\omega) + jV_1(\omega)}{1 + U_1(\omega) + jV_1(\omega)} = \\
 &= \frac{[U_1(\omega) + jV_1(\omega)][1 + U_1(\omega) - jV_1(\omega)]}{[1 + U_1(\omega)]^2 + V_1^2(\omega)} = \frac{U_1(\omega) + U_1^2(\omega) + V_1^2(\omega)}{[1 + U_1(\omega)]^2 + V_1^2(\omega)} + \\
 &\quad + j \frac{V_1(\omega)}{[1 + U_1(\omega)]^2 + V_1^2(\omega)}. \quad (1.168)
 \end{aligned}$$

Сопоставив уравнения (1.167) и (1.168), выразим вещественную и мнимую составляющие АФХ соединения через составляющие АФХ звена:

$$U(\omega) = \frac{U_1(\omega) + U_1^2(\omega) + V_1^2(\omega)}{[1 + U_1(\omega)]^2 + V_1^2(\omega)}, \quad (1.169)$$

$$V(\omega) = \frac{V_1(\omega)}{[1 + U_1(\omega)]^2 + V_1^2(\omega)}. \quad (1.170)$$

Модуль вектора АФХ соединения с учетом уравнений (1.169) и (1.170)

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{A_1(\omega)\sqrt{1 + 2U_1(\omega)}}{1 + 2U_1(\omega) + A_1^2(\omega)}. \quad (1.171)$$

Аргумент вектора АФХ соединения с учетом уравнений (1.169) и (1.170)

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)} = \operatorname{arctg} \frac{V_1(\omega)}{U_1(\omega) + A_1^2(\omega)}, \quad (1.172)$$

где $A_1(\omega)$ — модуль вектора АФХ звена.

Так как для частотных функций параллельно-встречного соединения нет простых аналитических выражений связи с частотными функциями входящих в соединение звеньев, то на практике для отыскания вещественной и мнимой составляющих АФХ соединения, имеющих практическое значение, пользуются специальными номограммами.

1.8. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ И ИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Схема системы автоматического управления или регулирования, в которой функциональные элементы представлены типовыми динамическими звеньями, называется *структурной схемой* данной системы.

Структурную схему используют для теоретического исследования системы автоматического управления, так как

она отображает ее динамические свойства. В структурных схемах элементарные динамические звенья чаще всего представляют их передаточными функциями.

На структурных схемах, в которых звенья представлены передаточными функциями, все воздействия следует указывать в виде лапласовых изображений.

Основным условием преобразования структурной схемы в эквивалентную является неизменность динамических характеристик системы.

Теория преобразования структурных схем разработана Б. Н. Петровым. Она основывается на рассмотрении алгебраических уравнений, описывающих схемы передачи сигналов в системе. Здесь рассмотрены наиболее часто встречающиеся преобразования структурных схем путем перемещения точки разветвления (узла) и сумматора. Перенос может осуществляться как в направлении распространения воздействия, так и против направления распространения воздействия.

Перенос узла через звено в направлении распространения воздействия в системе с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)} W_2(s) \quad (1.173)$$

выполняется на основании представления этой передаточной функции в таком виде:

$$W(s) = \frac{W_1(s) W_2(s)}{1 + W_1(s) W_2(s) \frac{1}{W_2(s)}}. \quad (1.174)$$

Передаточная функция представляет параллельно-встречное соединение звеньев с неединичной обратной связью, в котором в прямой цепи включены последовательно два звена с передаточными функциями $W_1(s)$ и $W_2(s)$, а в цепи обратной связи — звено с передаточной функцией $1/[W_2(s)]$.

Перенос узла через звено против распространения воздействия выполнен на основании преобразования передаточной функции исходной системы

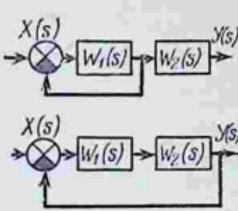
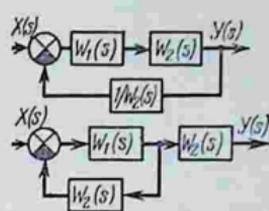
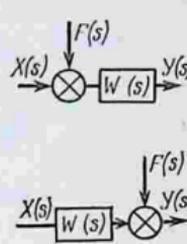
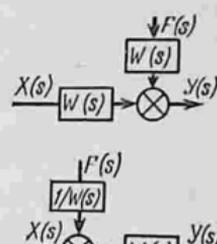
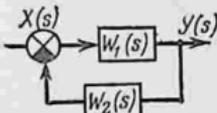
$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_1(s) W_2(s)}{1 + W_1(s) W_2(s)} \quad (1.175)$$

к виду

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s) W_2(s)} W_2(s). \quad (1.176)$$

Исходные и эквивалентные схемы переноса узла через звено приведены в таблице 1.5, п. 1.

1.5. Правила структурных преобразований

№ п/п	Преобразование	Исходная схема	Эквивалентная схема
1	<p>Перенос узла через звено:</p> <p>а) в направлении распространения воздействия</p> <p>б) против направления распространения воздействия</p>		
2	<p>Перенос сумматора через звено:</p> <p>а) в направлении распространения воздействия</p> <p>б) против направления распространения воздействия</p>		
3	<p>Замена соединения с неединичной обратной связью эквивалентным соединением с единичной обратной связью</p>		

Перенос сумматора через звено в направлении распространения воздействия и против распространения воздействия показан в п. 2 (табл. 1.5).

Для исходной схемы изображение выходной величины следующее:

$$Y(s) = [X(s) + F(s)]W(s). \quad (1.177)$$

Изображение выходной величины остается таким же и для эквивалентной схемы, так как, раскрывая скобки уравнения (1.177), получаем

$$Y(s) = X(s)W(s) + F(s)W(s). \quad (1.178)$$

Из этого следует, что при переносе сумматора через звено в направлении распространения воздействия необходимо в цепь воздействия по второму входу суммирующего устройства включить звено с передаточной функцией того звена, через которое выполнен перенос.

При переносе сумматора через звено против распространения воздействия изображение выходного сигнала

$$Y(s) = X(s)W(s) + F(s) \quad (1.179)$$

преобразуется к виду

$$Y(s) = \left[X(s) + \frac{F(s)}{W(s)} \right] W(s), \quad (1.180)$$

которому соответствует эквивалентная схема с перенесенным сумматором.

При переносе сумматора через звено против распространения воздействия следует включить в цепь воздействия по второму входу сумматора звено с передаточной функцией, обратной передаточной функции того звена, через которое выполнен перенос.

Замена соединения с неединичной обратной связью эквивалентным соединением с единичной обратной связью представлена в п. 3 таблицы 1.5. Замена выполняется на основании преобразования передаточной функции соединения с неединичной обратной связью, передаточная функция которого

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)}. \quad (1.181)$$

Умножив числитель и знаменатель уравнения (1.181) на $W_2(s)$, получим эквивалентное уравнение

$$W(s) = \frac{1}{W_2(s)} \frac{W_1(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)}. \quad (1.182)$$

В результате получаем соединение двух звеньев, одно из которых не имеет обратной связи, а второе — с единичной обратной связью. Передаточная функция первого звена обратная передаточной функции звена обратной связи исходной схемы, а передаточная функция звена с единичной связью имеет в прямой цепи последовательное соединение звеньев $W_1(s)$ и $W_2(s)$.

1.9. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Передаточные функции системы составляют по ее структурной схеме. С целью упрощения структурной схемы и приведения ее к виду, удобному для исследования, схему преобразуют, пользуясь правилами преобразования и учитывая виды связей звеньев в структурной схеме. Структурную схему приводят к виду, показанному на рисунке 1.44, *a*, где $W_1(s)$ — передаточная функция управляемого объекта, $W_0(s)$ — передаточная функция воспринимающего элемента и $W_2(s)$ — передаточная функция формирующих управляющее воздействие на управляемый объект. В линейных системах справедлив принцип суперпозиции, то есть независимость каждого воздействия на объект, и влияния всех воздействий суммируются.

Для инженерных расчетов обычно используют передаточную функцию разомкнутой системы и передаточные функции замкнутой системы относительно задающего и возмущающего воздействия.

Передаточная функция разомкнутой системы. При определении передаточной функции разомкнутой системы контур регулирования предполагают разомкнутым около элемента сравнения, как показано на рисунке 1.44, *a* волнистыми линиями.

Передаточная функция разомкнутой системы определяется отношением лапласова изображения $Y_0(s)$ сигнала обратной связи $y_0(t)$ к лапласову изображению $X_0(s)$ задающего воздействия $x_0(t)$ при нулевых начальных условиях:

$$W(s) = \frac{Y_0(s)}{X_0(s)} = W_1(s)W_2(s)W_0(s). \quad (1.183)$$

Передаточная функция $W(s)$ характеризует собственные динамические свойства системы. Она, в частности, используется для получения характеристического многочлена разомкнутой и замкнутой системы.

Передаточная функция замкнутой системы относительно задающего воздействия определяется в предположении, что других внешних воздействий в системе нет, то есть $f(t)=0$.

Передаточная функция замкнутой системы относительно задающего воздействия определяется отношением лапласова изображения $Y(s)$ выходной величины $y(t)$ к лапласову

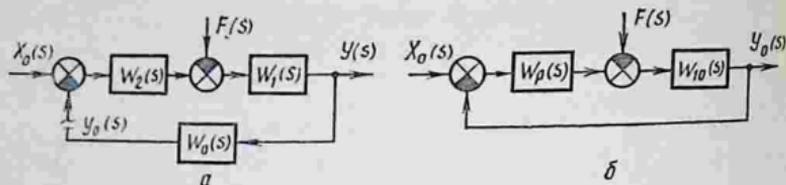


Рис. 1.44. Структурные схемы САУ:

а — замкнутой системы автоматического управления; *б* — в стандартном виде «объект—регулятор».

изображению $X_0(s)$ задающего воздействия $x_0(t)$ при нулевых начальных условиях:

$$W_x(s) = \frac{Y(s)}{X_0(s)} = \frac{W_1(s) W_2(s)}{1 + W_1(s) W_2(s) W_0(s)} = \frac{W_1(s) W_2(s)}{1 + W(s)}. \quad (1.184)$$

Передаточная функция $W_x(s)$ характеризует передачу системой задающего воздействия и его воспроизведение регулируемой величиной.

Передаточная функция замкнутой системы относительно возмущающего воздействия определяется в предположении, что других внешних воздействий в системе нет, то есть $x_0(t) = 0$.

Передаточная функция замкнутой системы относительно возмущающего воздействия определяется отношением лапласова изображения $Y(s)$ выходной величины $y(t)$ к лапласову изображению $F(s)$ возмущения $f(t)$ при нулевых начальных условиях:

$$W_f(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s) W_2(s) W_0(s)} = \frac{W_1(s)}{1 + W(s)}. \quad (1.185)$$

Передаточная функция $W_f(s)$ показывает влияние возмущения $f(t)$ на регулируемую величину $y(t)$. Возмущение отклоняет регулируемую величину от требуемого значения и понижает точность воспроизведения задающего воздействия, оказывая таким образом вредное влияние на процесс регулирования. Степень этого влияния определяется величиной $W_f(s)$: чем ближе эта величина к нулю, тем меньше влияние.

В качестве примера рассмотрим систему автоматического регулирования, передаточные функции элементов структурной схемы которой соответственно равны:

$$W_1(s) = k_1 / (T_1 s + 1); \quad W_2(s) = k_2; \quad W_0(s) = k_0 / (T_0 s + 1).$$

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W(s) = \frac{k_1 k_2 k_0}{(T_1 s + 1)(T_0 s + 1)}.$$

Передаточная функция замкнутой системы относительно задающего воздействия

$$W(s) = \frac{k_1 k_2 (T_0 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_0 s + 1) + k_1 k_2 k_0},$$

относительно возмущения

$$W_f(s) = \frac{k_1 (T_0 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_0 s + 1) + k_1 k_2 k_0}.$$

Рассматривая передаточные функции для приведенного примера, обратим внимание на то, что характеристический многочлен замкнутой системы равен сумме многочленов, расположенных в числителе и в знаменателе передаточной функции разомкнутой системы. Этим свойством пользуются при расчетах, так как определить передаточную функцию разомкнутой системы менее сложно, чем замкнутой.

Если в приведенной схеме системы воспринимающий элемент условно отнести к управляемому объекту, а звенья, формирующие закон регулирования или алгоритм управления, будут составлять регулятор, то структурная схема приводится к стандартному виду «объект — регулятор». Такая структурная схема показана на рисунке 1.44, б, где $W_p(s) = W_2(s)$ — передаточная функция регулятора; $W_{10}(s) = W_1(s)W_0(s)$ — передаточная функция управляемого объекта, куда условно отнесен и воспринимающий элемент. Тогда выходной величиной системы является не сама регулируемая величина $y(t)$, а величина сигнала на выходе воспринимающего элемента $y_0(t)$. Но это не создает существенных трудностей в определении регулируемой величины, так как изображение выходной величины находят из соотношения

$$Y(s) = Z(s) \frac{1}{W_0(s)}, \quad (1.186)$$

где $W_0(s)$ — передаточная функция воспринимающего элемента.

Передаточные функции системы автоматического регулирования используют для получения частотных передаточных функций и построения частотных характеристик соответственно разомкнутой и замкнутой системы.

1.10. СВОЙСТВА УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Управляемые объекты являются теми основными элементами системы автоматического управления и регулирования, в которых при помощи технических средств автоматизации должен осуществляться заданный алгоритм функционирования.

Управляемым объектом может быть машина или набор машин, предназначенных для выполнения технологического процесса, направленного на получение определенной продукции. Под продукцией следует понимать не только готовое изделие или продукт, но и полуфабрикаты, подлежащие дальнейшей переработке, вещество, энергию и т. п. В состав объекта может входить также и внешняя среда, если она оказывает существенное влияние на состояние объекта.

Система отопления помещения (рис. 1.45) состоит из водонагревательного котла, трубопроводов горячей и охлажденной воды, теплообменника и помещения. Температура внутри помещения существенно зависит от температуры наружного воздуха. Управление температурой воздуха внутри помещения осуществляется изменением подачи газа в котел при помощи вентиля B .

Характерная особенность объектов заключается в том, что в них происходит преобразование, передача или накопление энергии или вещества. Подведенная извне энергия или вещество изменяют состояние объекта, которое характеризуется изменением его параметров (температуры, уровня, момента, частоты вращения и т. п.) в зависимости от физических принципов, положенных в основу работы объекта. Для изменения количества подводимой энергии

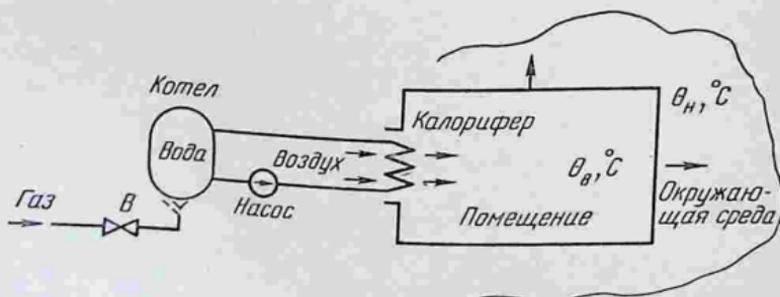


Рис. 1.45. Система отопления помещения как пример объекта, в котором следует учитывать окружающую среду.

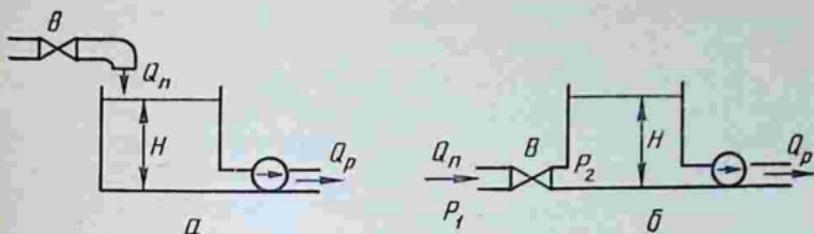


Рис. 1.46. К определению свойств объекта:
 а — без самовыравнивания; б — с самовыравниванием.

или вещества к объекту он должен иметь орган управления или регулирования. Поэтому технические устройства и процессы принадлежат к классу управляемых объектов, если они обладают следующими признаками:

а) в них происходит преобразование, передача или накопление энергии или вещества;

б) они имеют регулирующий орган для изменения количества поступающей в объект энергии или вещества;

в) приток энергии или вещества изменяет состояние объекта, которое характеризуется изменением одного или нескольких параметров, определяющих алгоритм функционирования объекта и составляющих цель управления.

Эти параметры характеризуют качество процесса, и их называют переменными управления или выходными величинами управляемого объекта. Класс управляемых объектов объединяет разнообразные устройства и технологические системы, применяемые в сельскохозяйственном производстве, независимо от принципа действия, конструкции, габаритов, мощности и других показателей.

Воздействие на объект может быть приложено как на стороне поступления энергии или вещества, так и на выходе.

Воздействие на объект может быть управляющим и возмущающим.

Управляющее воздействие порождается операциями управления, которые стремятся приблизить процесс к заданному режиму работы.

Возмущающие воздействия, наоборот, стремятся удалить процесс от заданного значения показателей режима и вывести его из установившегося состояния. Возмущения, как правило, являются случайными воздействиями, порождаемыми внутренними или внешними причинами, основной из которых является нагрузка. Поэтому управляющее

воздействие направлено в сторону компенсации действия возмущений на управляемый объект.

Управляемые объекты обладают определенными свойствами, которые оказывают влияние на эффект управления. Главными из них являются свойство *самовыравнивания* и свойство *запаздывания* реакции объекта на воздействия:

Под самовыравниванием понимают способность объекта самостоятельно приходить в новое состояние равновесия при изменении управляющего или возмущающего воздействия.

Этим свойством обладают не все объекты. Для выяснения свойств объекта рассмотрим два способа подачи воды в резервуар, показанные на рисунке 1.46.

Количество поступающей ежесекундно воды Q_n изменяется вентилем B , а количество вытекающей воды зависит от ее потребления и является величиной случайной. Выходной величиной объекта является уровень воды H . Из приведенных на рисунке схем подачи воды видно, что уровень H будет оставаться неизменным только при $Q_n = Q_p$. Если это равенство нарушается, то вода в резервуаре будет накапливаться или убывать, в зависимости от знака неравенства. Положим, что $Q_n > Q_p$. Тогда в резервуаре ежесекундно будет прибавляться объем воды $\Delta Q = Q_n - Q_p$. Так как начальный объем воды в резервуаре $V_0 = SH_0$ (где S — площадь поверхности воды), то прибавление воды за интервал времени Δt вызовет изменение уровня на ΔH , то есть

$$V_0 + \Delta Q \Delta t = S(H_0 + \Delta H). \quad (1.187)$$

После вычитания из уравнения (1.187) уравнения установившегося режима $V_0 = SH_0$ получим уравнение в отклонениях

$$\Delta Q \Delta t = S \Delta H, \quad (1.188)$$

из которого при $\Delta t \rightarrow 0$ получаем

$$S dH/dt = Q_n - Q_p. \quad (1.189)$$

Из последнего уравнения видно, что скорость изменения уровня воды пропорциональна величине $1/S$. Если $\Delta Q \neq 0 = \text{const}$, то скорость изменения уровня dH/dt определяется геометрическими размерами резервуара: в резервуаре с меньшей площадью S скорость изменения уровня больше, и, наоборот, при тех же условиях в резервуаре с большей

площадью поверхности воды уровень будет изменяться меньше.

Рассматривая уравнение (1.189), заметим, что это уравнение интегрирующего звена, то есть данный объект описывается интегрирующим звеном. Характерным свойством интегрирующего звена является непрерывное изменение во времени выходной величины при наличии входного воздействия. Из этого следует, что при $t \rightarrow \infty$ уровень H в резервуаре будет изменяться и данный объект не придет в равновесное состояние, при котором $H = \text{const}$.

Таким образом, объект, который описывается интегрирующим звеном, не обладает свойством самовыравнивания.

Объекты без самовыравнивания называются *астиатическими*.

Полученные соотношения и сделанные выводы справедливы для резервуара, у которого величина уровня не влияет на приток и выток воды, или в общем случае выходная величина не влияет на управляющее и на возмущающее воздействия.

Рассматривая схему, показанную на рисунке 1.46, б, можно отметить, что с повышением уровня H давление столба воды $p_2 = \rho g H$ (где ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения) будет также увеличиваться. При некотором значении H достигается равенство $p_2 = p_1$ (где p_1 — давление воды на входе в резервуар) и поступление воды в резервуар прекращается. В этом случае устанавливается новое значение H_1 , при котором наступает состояние равновесия. В этом случае говорят, что объект обладает свойством самовыравнивания.

Объекты с самовыравниванием называются *статическими*.

При составлении дифференциального уравнения статического объекта учтем, что Q_n и Q_p зависят от H и в общем случае эта зависимость нелинейна.

Уравнение объекта в установившемся режиме (1.189) запишем в виде

$$S dH_0/dt = Q_{n0} - Q_{p0}. \quad (1.190)$$

Новое состояние объекта, соответствующее изменению притока Q_n или расхода Q_p воды на ΔQ , описывается уравнением

$$S \frac{d(H_0 + \Delta H)}{dt} = Q_{n0} + \Delta Q - Q_{p0}. \quad (1.191)$$

Для линеаризации нелинейных функций применяем разложение в ряд по формуле Тейлора и учтем лишь линейные члены разложения:

$$\left. \begin{aligned} Q_n(H) &\approx Q_{n0} + \left(\frac{dQ_n}{dH}\right)_0 \Delta H + \Delta Q, \\ Q_p(H) &\approx Q_{p0} + \left(\frac{dQ_p}{dH}\right)_0 \Delta H. \end{aligned} \right\} \quad (1.192)$$

Подставим значение $Q_n(H)$, $Q_p(H)$ в уравнение (1.189) и вычтем из него уравнение объекта (1.190). Получим уравнение в отклонениях:

$$S \frac{d\Delta H}{dt} = \left(\frac{dQ_n}{dH}\right)_0 \Delta H - \left(\frac{dQ_p}{dH}\right)_0 \Delta H + \Delta Q, \quad (1.193)$$

или

$$S \frac{d\Delta H}{dt} + \left[\left(\frac{dQ_p}{dH}\right)_0 - \left(\frac{dQ_n}{dH}\right)_0 \right] \Delta H = \Delta Q. \quad (1.194)$$

Для упрощения записи уравнения введем базисные значения переменных H_0 и Q_0 и перейдем к относительным величинам:

$$\varphi = \Delta H/H_0, \quad \mu = \Delta Q/Q_0. \quad (1.195)$$

Подставим значения ΔH и ΔQ из (1.195) в уравнение (1.194):

$$S \frac{H_0}{Q_0} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{H_0}{Q_0} \left[\left(\frac{dQ_p}{dH}\right)_0 - \left(\frac{dQ_n}{dH}\right)_0 \right] \varphi = \mu. \quad (1.196)$$

Обозначим

$$T = S \frac{H_0}{Q_0} \quad (1.197)$$

и

$$\xi = \frac{H_0}{Q_0} \left[\left(\frac{dQ_p}{dH}\right)_0 - \left(\frac{dQ_n}{dH}\right)_0 \right]. \quad (1.198)$$

Тогда уравнение объекта принимает вид

$$T \frac{d\varphi}{dt} \pm \xi \varphi = \mu. \quad (1.199)$$

Уравнение (1.199) описывает объект с самовыравниванием, а коэффициент ξ (1.198) называется коэффициентом самовыравнивания.

При $\xi > 0$ объект обладает положительным самовыравниванием и называется *устойчивым* статическим объектом.

При $\xi < 0$ объект не обладает свойствами самовыравни-

вания и называется *неустойчивым* статическим объектом.

При $\zeta=0$ объект *астатический*.

Выражение (1.198) позволяет определить условия, при которых объект имеет свойство самовыравнивания: если производная $\left(\frac{dQ_p}{dH}\right)_0$ положительная, а $\left(\frac{dQ_n}{dH}\right)_0$ — отрицательная, то $\zeta > 0$. Это значит, что в устойчивом статическом объекте увеличение выходной величины вызывает увеличение потерь энергии или уменьшение притока вещества.

В неустойчивом статическом объекте эти явления носят противоположный характер.

В астатическом объекте $\zeta=0$, если $\frac{dQ_p}{dH} = \frac{dQ_n}{dH}$.

Уравнение объекта в форме (1.199) было получено словацким ученым А. Стодолой в конце XIX века. В настоящее время принята другая форма записи дифференциального уравнения объекта, которая получается, если разделить почленно уравнение (1.199) на $|\zeta|$:

$$T_n \, d\varphi/dt \pm \varphi = k\mu. \quad (1.200)$$

Это уравнение апериодического звена первого порядка.

Объекты с отрицательным самовыравниванием и без самовыравнивания не могут работать без автоматических регуляторов. Поэтому самовыравнивание — одно из важнейших свойств объектов, определяющее эффективность управления.

Механизм самовыравнивания объясняется наличием обратной связи внутри объекта, которая может носить различный физический характер. Если изменение выходной величины объекта вызывает действие внутренних сил, уменьшающих внешнее воздействие аналогично отрицательной обратной связи, то такой объект характеризуется положительным самовыравниванием и является устойчивым статическим объектом. В приведенном примере с увеличением уровня H увеличивается давление столба жидкости p_2 , которое уравнивает давление p_1 . Устойчивыми статическими объектами являются многие машины и системы: например, тепловой двигатель и электрический двигатель с независимым возбуждением относительно частоты вращения вала при изменении задания, водонагреватели и системы отопления помещений относительно температуры при изменении тепловой нагрузки и другие.

Если изменение выходной величины объекта вызывает действия, усиливающие внешние воздействия аналогично положительной обратной связи, то такой объект характеризуется отрицательным самовыравниванием и является неустойчивым статическим объектом. Примером неустойчивого статического объекта может служить двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением. При малых нагрузках момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока. При уменьшении нагрузки ток якоря и, следовательно, ток возбуждения двигателя стремятся к нулю. Но так как обратная ЭДС якоря $E_a = c\omega\Phi$ должна уравновесить напряжение питания двигателя, то частота вращения вала двигателя растет в соответствии с уменьшением потока Φ . Это явление известно под названием «разноса» двигателя с последовательным возбуждением.

Свойство запаздывания проявляется в объекте в том, что выходная величина появляется или достигает установившегося значения не одновременно с началом управляющего или возмущающего воздействия.

Интервал времени от начала подачи воздействия до установления нового значения выходной величины объекта называется временем переходного процесса или временем разгона объекта.

Переходный процесс и время разгона характеризуют инерцию объекта по отношению к воздействию. Инерция объекта обусловлена способностью объекта накапливать энергию или вещество, наличием передаточных каналов и сопротивления в них.

Способность объекта накапливать энергию или вещество называют *аккумулирующей* способностью. Величина, характеризующая аккумулирующую способность объекта, называется его *емкостью*, а отношение емкости объекта к значению выходной величины носит название *коэффициента емкости*.

Емкость резервуара

$$C = \int_0^{H_0} S dH = SH_0, \quad (1.201)$$

а коэффициент емкости

$$c = C/H_0 = S. \quad (1.202)$$

Объекты, имеющие иную физическую природу, могут описываться уравнениями, аналогичными по форме уравнению (1.189).

Например, для поступательного движения уравнение имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = F, \quad (1.203)$$

где m — масса; v — скорость; F — сила;

для вращательного движения

$$J \frac{d\omega}{dt} = M, \quad (1.204)$$

где J — момент инерции; ω — угловая частота; M — момент;

для нагрева и охлаждения тела

$$cm \frac{d\theta}{dt} = q, \quad (1.205)$$

где c — удельная теплоемкость; m — масса; θ — температура; q — тепловой поток.

В уравнениях (1.203)...(1.205) величины, которые стоят перед производной (соответственно m , J и cm), определяют коэффициент емкости объекта.

Если в объекте существует несколько емкостей и переход энергии из одной емкости в другую встречает сопротивление, то такой объект называется *многоемкостным*.

Время разгона астатического объекта определяет время, за которое выходная величина достигнет некоторого заданного значения при постоянной величине воздействия. Выражение для определения времени разгона получаем после интегрирования уравнения (1.189):

$$C = \int_0^T \Delta Q dt = \Delta Q T, \quad (1.206)$$

откуда

$$T = SH_0 / \Delta Q = C / \Delta Q. \quad (1.207)$$

Объект с самовыравниванием описывается аperiodическим звеном, и отклонение выходной величины объекта изменяется во времени по экспоненте, стремясь к пределу:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi = \lim_{t \rightarrow \infty} (1 - e^{-t/T_n}) k_{\mu} = k_{\mu}. \quad (1.208)$$

Коэффициент T_n имеет размерность времени и называется *постоянной времени объекта*, который в уравнении (1.200) определен как

$$T_n = T/|\xi|. \quad (1.209)$$

Постоянная времени статического объекта показывает, за какое время объект достиг бы нового состояния равновесия при ступенчатом воздействии, если бы его выходная величина изменялась с наибольшей для данного переходного процесса скоростью. Наибольшая скорость при $t=0$.

С увеличением постоянной времени длительность переходного процесса пропорционально возрастает. С течением времени выходная величина устойчивого статического объекта не возрастает безгранично, а уже через промежуток времени $t=T_n$ достигает 0,632 величины предельного отклонения, а при $t=3T_n$ практически (на 95%) приходит к новому установившемуся значению.

При $T_n \rightarrow \infty$ выходная величина объекта не изменяется во времени, так как $\lim_{T_n \rightarrow \infty} e^{-t/T_n} = 1$ и $\lim_{T_n \rightarrow \infty} \varphi = k\mu(1-1) = 0$,

а при $T_n=0$ переходный процесс совершается с большей скоростью. В этом случае дифференциальное уравнение (1.200) становится алгебраическим

$$\varphi = k\mu. \quad (1.210)$$

В безынерционном объекте выходная величина пропорциональна входной как в установившемся, так и в переходном режиме. Скорость изменения выходной величины объекта

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\mu}{T_n} e^{-\frac{|-\xi|}{T} t} = k\mu e^{t/T_n} \quad (1.211)$$

и при $t=0$ она имеет наибольшее значение.

При отрицательном коэффициенте самовыравнивания ($\xi < 0$) отклонение выходной величины объекта при ступенчатом воздействии стремится к бесконечности, так как $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{t/T_n} = \infty$.

Для многоемкостного объекта наибольшая скорость изменения выходной величины будет в точке перегиба его переходной характеристики (рис. 1.47). Проведенная в точке перегиба касательная к кривой отсекает на оси аб-

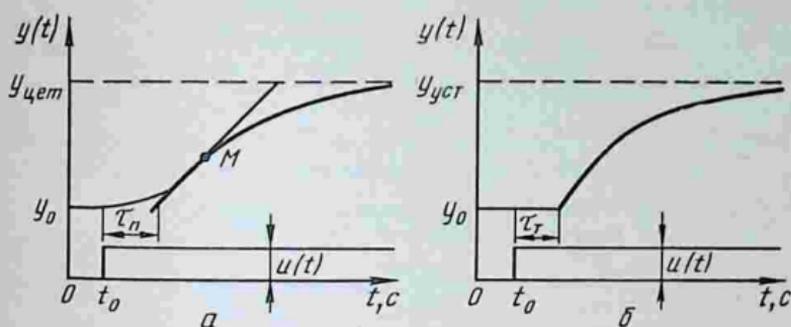


Рис. 1.47. Переходная характеристика:

a — многоемкостного объекта; *б* — одноемкостного объекта с транспортным запаздыванием.

сисс отрезок от начала изменения выходной величины, который условно называют *временем переходного запаздывания* многоемкостного объекта τ_n .

Кроме переходного запаздывания, объект может иметь чистое или транспортное запаздывание в том случае, если в объекте есть передаточный канал для вещества или энергии (транспортёр, трубопровод). Время транспортного запаздывания

$$\tau_r = l/v, \quad (1.212)$$

где l — длина передаточного канала; v — скорость движения вещества.

Полное запаздывание состоит из транспортного и переходного:

$$\tau = \tau_r + \tau_n. \quad (1.213)$$

Определение свойств объекта рассмотрим на примерах астатического и статического объектов, представленных резервуарами с разными способами подачи воды.

Пример 1.8. Резервуар с верхней подачей воды (рис. 1.46, *a*) имеет площадь 5 м^2 и номинальный уровень 4 м . Превышение притока над расходом составляет $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$. Необходимо описать объект дифференциальным уравнением и определить его коэффициенты.

Объект астатический и описывается интегрирующим звеном. Емкость объекта

$$C = SH_0 = 5 \cdot 4 = 20 \text{ м}^3.$$

Время разгона

$$T = C/\Delta Q = 20/0,001 = 20 \cdot 10^3 \text{ с}.$$

Уравнение объекта

$$20 \cdot 10^3 dH/dt = \Delta Q.$$

Пример 1.9. Резервуар с нижней подачей воды имеет $Q_n = \sqrt{5-H}$ и $Q_p = \text{const}$. Площадь резервуара $S = 5 \text{ м}^2$, а номинальный уровень воды в резервуаре $H_0 = 4 \text{ м}$. Номинальный приток воды составляет $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Коэффициент самовыравнивания

$$\xi = \frac{4}{1} \left[0 - \frac{1}{2\sqrt{5-4}} \right] = -2.$$

Объект имеет положительное самовыравнивание.
Постоянная времени объекта

$$T_n = \frac{20 \cdot 10^3}{2} = 10^4 \text{ с}.$$

Коэффициент передачи $k = 1/2 = 0,5$.

Уравнение объекта

$$4 \cdot 10^4 \, d\varphi/dt + \varphi = 0,5\mu,$$

где $\varphi = \Delta H/H_0$ и $\mu = \Delta Q/Q_0$ — относительное изменение уровня и притока соответственно.

Из приведенных примеров видно, что основные свойства объекта определяются из описания объекта дифференциальным уравнением, коэффициенты которого вычислены по характеристикам технических устройств, составляющих объект. Применимы и другие формы математического описания объекта: временными характеристиками, передаточной функцией, частотными характеристиками.

Описание объекта в виде дифференциального уравнения или передаточной функции получают аналитическими методами на основании физических законов, положенных в основу действия установки, машины или процесса, представляющих управляемый объект, и методами обработки разгонных характеристик объекта, получаемых в результате специально поставленного эксперимента.

Аналитические методы получения математической модели объекта в виде дифференциального уравнения или передаточной функции основаны на методе малых отклонений. Применение этого метода рассмотрим на примерах технических устройств и установок, которые применяются в практике.

1. Трубопровод с вентилем, по которому передается жидкость или газ, в этом примере является управляемым объектом с регулирующим органом — клапаном (рис. 1.10). Изменяя проходное сечение вентиля путем перемещения клапана K , изменяют давление p_2 в трубопроводе за вентилем в направлении движения среды по отношению к давлению p_1 перед вентилем.

Уравнение управляемого объекта — трубопровода с вентилем может быть получено при целом ряде допущений и ограничений, связанных с протеканием среды. Если среда несжимаемая жидкость, перепад давления на регулирующем клапане не вызывает кавитации, поток имеет турбулентный характер движения, то уравнение имеет вид

$$p_1 - p_2 = \xi \frac{Q^2}{\rho}, \quad (1.214)$$

где Q — количество жидкости, протекающей в единицу времени; ξ — коэффициент сопротивления вентиля, зависящий от степени его открытия.

Полагая $p_1 = \text{const}$, линеаризуем уравнение (1.214) методом малых отклонений в области установившегося режима с параметрами p_{20} , Q_0 , ξ_0 . Получаем

$$p_1 - (p_{20} + \Delta p_2) = (\xi_0 + \Delta \xi) \frac{(Q_0 + \Delta Q)^2}{\rho}$$

и после соответствующих преобразований имеем

$$p_1 - p_{20} - \Delta p_2 = \frac{1}{\rho} \xi_0 Q_0^2 + \frac{1}{\rho} [2\xi_0 \Delta Q + \xi_0 (\Delta Q)^2 + Q_0^2 \Delta \xi + 2Q_0 \Delta \xi \Delta Q + \Delta \xi (\Delta Q)^2]. \quad (1.215)$$

Исключив из полученного уравнения уравнение установившегося режима $p_1 - p_2 = \xi_0 \frac{Q_0^2}{\rho}$ и члены второго порядка малости, получим

$$-\Delta p_2 = \frac{Q_0^2}{\rho} \Delta \xi + \frac{2\xi_0 Q_0}{\rho} \Delta Q. \quad (1.216)$$

То обстоятельство, что при увеличении открытия вентиля его сопротивление уменьшается, учтем зависимостью

$$\Delta \xi = -c \Delta l, \quad (1.217)$$

где c — конструктивный коэффициент вентиля.

Обозначив $Q_0^2/\rho = k_v$ и $2\xi_0 Q_0/\rho = k_n$, подставим в уравнение (1.216). С учетом зависимости (1.217) получим уравнение объекта в отклонениях:

$$\Delta p_2 = c k_v \Delta l - k_n \Delta Q. \quad (1.218)$$

Из последнего уравнения получаем передаточные функции управляемого объекта:

по управлению ($\Delta Q = 0$)

$$W_0(s) = \frac{P_2(s)}{L(s)} = k_0 \quad (1.219)$$

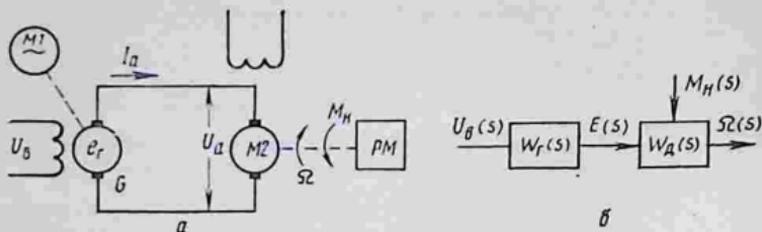


Рис. 1.48. Система «генератор — двигатель» как управляемый объект: а — принципиальная схема; б — структурная схема.

и по возмущению ($\Delta I = 0$)

$$W_r(s) = \frac{P_2(s)}{Q(s)} = k_H. \quad (1.220)$$

2. Система «генератор — двигатель» применяется в электроприводе постоянного тока для изменения частоты вращения вала в широких пределах (рис. 1.48).

Управляемый объект состоит из асинхронного двигателя $M1$, генератора постоянного тока G , двигателя постоянного тока $M2$ и рабочей машины PM . Регулирующим органом объекта можно считать обмотку возбуждения L , которой подводится управляющее напряжение U_B .

Управляемый объект представим двумя звеньями: первое звено описывает генератор постоянного тока с независимым возбуждением, а второе — двигатель постоянного тока и рабочую машину.

Входная величина первого звена есть напряжение, подводимое к обмотке возбуждения генератора, а выходная — электродвижущая сила генератора e_g . Пренебрегая гистерезисом, влиянием насыщения стали машины и другими менее существенными факторами, а также полагая, что в области отклонений от установившегося режима характеристика холостого хода генератора линейна, запишем уравнение генератора:

$$\Delta e_g = \beta \Delta I_B, \quad (1.221)$$

$$\Delta U_B = R_B \Delta I_B + L_B \frac{dI_B}{dt}, \quad (1.222)$$

где $\beta = \text{const}$.

После преобразования и совместного решения уравнений (1.221) и (1.222) получим уравнение звена

$$\Delta U_B = \frac{R_B}{\beta} \Delta e_g + \frac{L_B}{R_B} \frac{d\Delta e_g}{dt}. \quad (1.223)$$

Обозначим $\beta/R_B = k_B$ и $\frac{L_B}{R_B} = T_B$ и приведем уравнение (1.223) к стандартному виду:

$$T_B \frac{d\Delta e_r}{dt} + \Delta e_r = k_B \Delta U_B. \quad (1.224)$$

Передаточная функция звена имеет вид

$$W_r(s) = \frac{E(s)}{U_B(s)} = \frac{k_B}{T_B s + 1}. \quad (1.225)$$

Нагрузкой генератора является двигатель, представляющий второе звено управляемого объекта. Входной величиной второго звена является напряжение на якоре двигателя U_a , а выходной — частота вращения вала двигателя Ω .

Для электрического двигателя с независимым возбуждением при определенных допущениях (неизменный ток возбуждения, отсутствие гистерезиса и насыщения стали машины и другие) уравнения движения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\Omega}{dt} &= M_d - M_n, \\ M_d &= c_M I_a, \\ U_a &= R_d I_a + L_d \frac{dI_a}{dt} + c_e \Omega, \end{aligned} \right\} \quad (1.226)$$

где J — момент инерции вращающихся масс двигателя и рабочей машины; c_M и c_e — конструктивные постоянные; R_d и L_d — сопротивление и индуктивность якоря двигателя; M_d — движущий момент двигателя.

Присоединение якоря двигателя к якору генератора создает дополнительные потери напряжения при прохождении тока I_a , которые учитываются уравнением

$$e_r = U_a + R_r I_a + L_r \frac{dI_a}{dt}. \quad (1.227)$$

С учетом значения U_a из уравнения (1.226) получаем:

$$e_r = R I_a + L \frac{dI_a}{dt} + c_e \Omega, \quad (1.228)$$

где $R = R_r + R_d$, $L = L_r + L_d$ — суммарные значения активных сопротивлений и индуктивностей якоря генератора и якоря двигателя.

Из уравнений (1.226) получаем

$$J \frac{d\Omega}{dt} = c_M I_a - M_n, \quad (1.229)$$

откуда находим

$$\left. \begin{aligned} I_a &= \frac{J}{c_m} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{1}{c_m} M_H, \\ \frac{dI_a}{dt} &= \frac{J}{c_m} \frac{d^2\Omega}{dt^2} + \frac{1}{c_m} \frac{dM_H}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1.230)$$

Подставив значения I_a и dI_a/dt в уравнение (1.227), получим уравнение связи выходной и входной величин звена

$$e_r = \frac{RJ}{c_m} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{R}{c_m} M_H + \frac{LJ}{c_m} \frac{d^2\Omega}{dt^2} + \frac{L}{c_m} \frac{dM_H}{dt} + c_e \Omega. \quad (1.231)$$

После перехода к приращениям переменных $\Delta\Omega$, Δe , ΔM , получим уравнение в стандартной форме:

$$T_\theta T_m \frac{d^2\Delta\Omega}{dt^2} + T_m \frac{d\Delta\Omega}{dt} + \Delta\Omega = k_d \Delta e_r - \frac{R}{c_e c_m} \left(T_\theta \frac{d\Delta M_H}{dt} + \Delta M_H \right), \quad (1.232)$$

где $T_m = \frac{RJ}{c_e c_m}$ — электромеханическая постоянная времени; $T_\theta = L/R$ — электромагнитная постоянная времени; $k_d = 1/c_e$ — коэффициент передачи.

Передаточная функция звена по управляющему воздействию имеет вид (при $\Delta M_H = 0$)

$$W_d(s) = \frac{\Omega(s)}{E(s)} = \frac{k_d}{T_\theta T_m s^2 + T_m s + 1}. \quad (1.233)$$

Передаточная функция звена по возмущению (по нагрузке) имеет вид (при $\Delta e = 0$)

$$W_n(s) = \frac{\Omega(s)}{M_H(s)} = - \frac{k_n (T_\theta s + 1)}{T_\theta T_m s^2 + T_m s + 1}, \quad (1.234)$$

где k_n — коэффициент передачи двигателя по нагрузке.

Передаточная функция управляемого объекта, объединяющая первое и второе звено, имеет вид

$$W(s) = W_r(s) W_d(s) = \frac{k_b k_d}{(T_b s + 1) (T_\theta T_m s^2 + T_m s + 1)}. \quad (1.235)$$

Структурная схема объекта показана на рисунке 1.49. Экспериментальные методы определения свойств объекта сводятся к построению кривой разгона объекта и аппроксимации ее передаточной функцией, связывающей выходную и входную величины.

Экспериментально кривую разгона объекта получают путем воздействия на объект ступенчатым входным воздей-

ствием и регистрацией выходной величины во времени самопишущим прибором или считыванием показаний стрелочного прибора через равные интервалы времени.

По кривой разгона объекта определяют статические и динамические параметры объекта: коэффициент передачи, постоянную времени, время транспортного (чистого) запаздывания. Методику определения рассмотрим на примерах.

Астатические объекты имеют разгонные характеристики, показанные на рисунке 1.50, а. Основным параметром астатического объекта является коэффициент передачи k_a , который определяют графоаналитическим методом, как показано на рисунке:

$$k_a = \Delta y / \Delta t. \quad (1.236)$$

Дифференциальное уравнение объекта записывают в виде

$$dy/dt = k_a u(t), \quad (1.237)$$

где $u(t)$ — входное воздействие.

Передаточная функция астатического объекта

$$W(s) = Y(s)/U(s) = k_a/s. \quad (1.238)$$

Если получена кривая в форме 2 (рис. 1.50, а), то ее спрямляют до пересечения с линией y_0 и отрезок времени от начала входного воздействия до точки пересечения определяет время транспортного запаздывания τ_T . Передаточная функция объекта имеет вид

$$W(s) = \frac{k_a}{s} e^{-s\tau_T}. \quad (1.239)$$

Коэффициент передачи объекта определяют для линейного участка разгонной характеристики.

Объект с самовыравниванием (статический) имеет кривые разгона, показанные на рисунке 1.50, б.

Коэффициент передачи объекта определяют из отношения

$$k = (y_{уст} - y_0)/u, \quad (1.240)$$

где $y_{уст}$, y_0 определяют из графика.

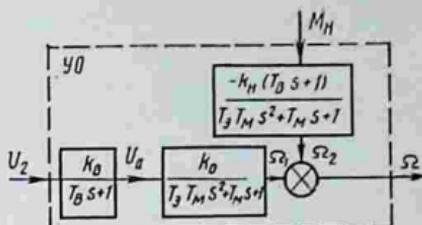


Рис. 1.49. Развернутая структурная схема управляемого объекта «генератор — двигатель».

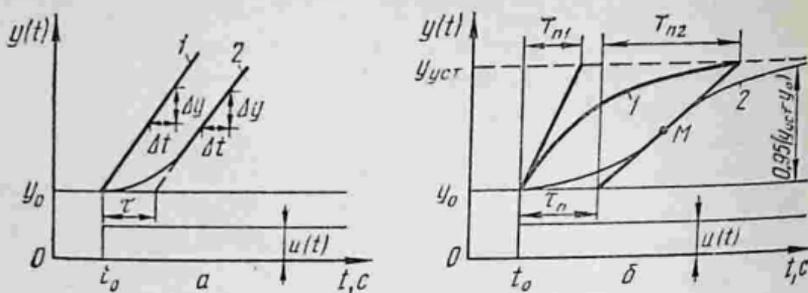


Рис. 1.50. Экспериментальные разгонные характеристики:
a — астатического объекта (объекта без самовыравнивания); *б* — статического объекта (объекта с положительным самовыравниванием).

Постоянную времени T_n находят как проекцию касательной в точке наибольшей скорости изменения выходной величины на ось абсцисс, ограниченной точками пересечения касательной с линиями начального и установившегося значений выходной величины.

Время разгона определяется интервалом времени от начала входного воздействия до того момента, когда выходная величина достигает 0,95 ($y_{уст} - y_0$).

Уравнение объекта с самовыравниванием записывается в виде

$$T_n \frac{dy}{dt} + y = ku, \quad (1.241)$$

а его передаточная функция

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = k/(T_{n1}s + 1). \quad (1.242)$$

Многоемкостный объект (кривая 2, рис. 1.50, *a*) имеет перегиб характеристики и аппроксимируется передаточной функцией одноемкостного объекта с переходным запаздыванием

$$W(s) = [k/(T_{n2}s + 1)] e^{-s\tau_n}, \quad (1.243)$$

где время переходного запаздывания τ_n определяется из графика.

Если кривая разгона начинается не одновременно с подачей входного воздействия, то объект обладает также и транспортным запаздыванием, время которого определяется интервалом от начала входного воздействия до начала изменения выходной величины. В этом случае время полного запаздывания складывается из времени переход-

ного и транспортного запаздывания согласно выражению (1.213).

Реальные объекты, как правило, являются сложными многоемкостными объектами. Если в объекте преобладают свойства инерционного звена в пределах практических значений изменения выходной величины, то он имеет разгонную характеристику, близкую к кривой 2, показанной на рисунке 1.50, а. Для многоемкостных объектов с положительным самовыравниванием характерной разгонной характеристикой является кривая 2, показанная на рисунке 1.50, б.

Аппроксимация динамических характеристик астатических объектов интегрирующим звеном (1.238) или интегрирующим звеном и звеном запаздывания (1.239) и статических объектов с положительным самовыравниванием — аperiodическим звеном первого порядка (1.242) или аperiodическим звеном и звеном запаздывания (1.243) в большинстве случаев является достаточным для практического использования в первом приближении.

Такая аппроксимация значительно упрощает дальнейший анализ системы автоматического регулирования и дает удовлетворительные результаты для оценки основных показателей качества.

Значения коэффициента передачи, постоянной времени и времени запаздывания получают по результатам экспериментального исследования каждого конкретного объекта.

Для описания динамических свойств объектов, рассматриваемых в разделе 4, используются преимущественно описания объектов именно такими передаточными функциями.

Глава 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГСП

Средства автоматизации включают приборы и технические устройства, выполняющие функции получения, передачи и преобразования контрольной информации, формирования командной информации и использования ее для воздействия на технологический процесс.

Для того чтобы экономически и технически рационально решать проблему обеспечения техническими средствами систем контроля, регулирования и управления технологическими процессами различных отраслей народного хозяйства, в стране создана Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).

Все изделия ГСП по функциональному признаку разделены на следующие группы:

получения информации о состоянии процесса;

приема, преобразования и передачи информации по каналам связи;

преобразования, хранения и обработки информации, формирования команд управления, связи с оперативным персоналом;

использования командной информации для воздействия на управляемый объект.

В первую группу устройств входят измерительные преобразователи, нормирующие преобразователи и другие устройства, используемые для контроля состояния процесса.

Ко второй группе относятся устройства для передачи информации на расстояние, такие как устройства телемеханики.

К третьей группе относятся устройства, предназначенные для формирования управляющих сигналов (командной информации), такие как функциональные преобразователи, логические устройства, реле, программные устройства, регуляторы, задатчики, вычислительные устройства и комплексы.

В четвертую группу устройств входят исполнительные устройства — электрические, пневматические и гидравли-

ческие исполнительные механизмы, усилители мощности к ним, а также устройства представления информации.

В сельскохозяйственном производстве используются как средства автоматизации общепромышленного назначения, входящие в ГСП, так и технические средства, применяемые преимущественно в сельском хозяйстве.

2.2. ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

2.2.1. Общая характеристика преобразователей

В основе любой системы автоматического контроля, регулирования и управления лежит информация о состоянии и ходе технологических процессов, протекающих в объектах, о состоянии рабочих веществ и функционировании оборудования. Эту информацию в виде значений отдельных физических величин получают с помощью соответствующих технических устройств, которые в автоматике имеют общее название — измерительные преобразователи (ИП).

В отличие от измерительных приборов, где информация представляется в виде, удобном для непосредственного восприятия оператором — человеком, информация в ИП представляется в виде определенной физической величины, удобной для передачи и дальнейшего преобразования в системе автоматики. Эта величина называется сигналом, и она однозначно связана с контролируемой физической величиной или параметром процесса.

В настоящее время при автоматизации различных процессов в отраслях народного хозяйства необходимо контролировать свыше 2000 различных физических величин и технологических параметров.

Государственная система приборов и средств автоматизации в настоящее время охватывает лишь часть контролируемых величин, которые наиболее часто используются в практике автоматизации. В ГСП все контролируемые величины разбиты на пять групп: теплоэнергетические величины, электроэнергетические величины, механические величины, химический состав и физические свойства.

К теплоэнергетическим величинам относятся температура, давление, перепад давлений, уровень, расход.

2.

Электроэнергетические величины: ток (постоянный, переменный), напряжение (постоянное и переменное), мощность (активная и реактивная), коэффициент мощности, частота, сопротивление изоляции.

Механические величины: линейные и угловые перемещения, угловая скорость, деформация, усилия, крутящие моменты, число изделий, твердость материалов, вибрация, шум, масса.

Химический состав: концентрация, химические свойства, состав.

К величинам, характеризующим физические свойства, относятся влажность, электропроводность, плотность, вязкость, мутность, освещенность и др.

ИП может состоять из одного или нескольких первичных преобразователей. Под первичными преобразователями принято понимать устройства, в которых осуществляется однократное (первичное) преобразование измеряемой физической величины.

В ИП первичные преобразователи соединяются, образуя следующие структурные схемы преобразования:

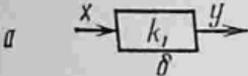
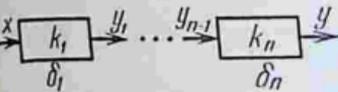
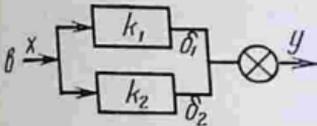
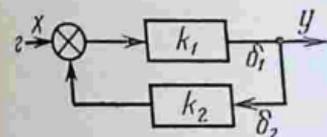
- а) однократного прямого преобразования;
- б) последовательного прямого преобразования;
- в) дифференциальную схему;
- г) схему с обратной связью (компенсационную).

Простейшие ИП состоят из одного преобразователя. При последовательном соединении нескольких первичных преобразователей выходная величина предыдущего преобразователя является входной величиной последующего. Обычно первый первичный преобразователь ИП, непосредственно воспринимающий контролируемую (измеряемую) величину, называется чувствительным элементом ИП, а последний преобразователь, выходная величина которого подается во внешнюю цепь, называется выходным элементом.

ИП с последовательным соединением первичных преобразователей применяются в том случае, когда однократное преобразование не дает удобного для использования выходного сигнала.

Дифференциальная схема применяется тогда, когда изменение контролируемой величины удобно сопоставить (сравнить) с некоторой эталонной величиной, полученной в результате преобразования эталонным преобразователем. Такая схема позволяет получить меньшую погрешность, обусловленную действием различных возмущений.

Структурные схемы ИП

Структурные схемы	Коэффициент преобразования	Погрешность
	$k = k_1$	$\delta = \delta_1$
	$k = \prod_{i=1}^n k_i$	$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i$
	$k = k_1 + k_2$	$\delta = \delta_1 k_1 / (k_1 + k_2) + \delta_2 k_2 / (k_1 + k_2)$
	$k = k_1 / (1 + k_1 k_2)$	$\delta = \delta_1 / (1 + k_1 k_2) - \delta_2 / [1 + 1 / (k_1 k_2)]$

Примечание. x — измеряемая величина; y — выходной сигнал ИП; k_1, k_2 — коэффициенты преобразования ИП и его первичных преобразователей, δ_1, δ_2 — погрешности ИП и его первичных преобразователей.

Схема ИП с обратной связью обладает высокой точностью, универсальностью и малой зависимостью коэффициента преобразования от внешних возмущений.

Структурные схемы ИП приведены в таблице 2.1.

В зависимости от вида выходного сигнала ИП бывают с естественным выходным сигналом и с унифицированным.

Естественный выходной сигнал формируется первичными преобразователями естественным путем и представляет собой перемещение, угол поворота, усилие, интервал времени, напряжение (постоянное и переменное), сопротивление (активное и комплексное), электрическую емкость, частоту и др. ИП с естественным выходным сигналом (термопары, термометры сопротивления, ИП давления, скорости и т. п.) применяются очень широко при автоматизации простых объектов.

Унифицированный сигнал — это сигнал определенной физической природы, изменяющийся в определенных фикс-

сированных пределах независимо от вида измеряемой величины, метода измерения и диапазона ее изменения. Из унифицированных сигналов наибольшее распространение получили электрические сигналы постоянного и переменного тока, напряжения и частоты, а также пневматические сигналы.

Основные виды унифицированных аналоговых сигналов следующие:

электрические сигналы на постоянном токе, мА: 0...5, 0...20, —5...0...5;

электрические сигналы на постоянном напряжении: 0...10 мВ; 0...20 мВ; —10...0...+10 мВ; 0...10 В; 0...1 В; —1...0...+1 В;

электрические сигналы на переменном напряжении, В: 0...2; —1...0...+1;

электрические сигналы переменного тока на частоте, кГц: 4...8; 2...4;

пневматические сигналы: 20...100 кПа.

Унифицированные сигналы получают из естественных. Для получения унифицированных аналоговых сигналов применяются выходные нормирующие преобразователи.

ИП с дискретным выходным сигналом (релейные ИП — реле) имеют на выходе контактную группу, изменяющую свое положение при достижении контролируемой (измеряемой) величиной заданного значения.

Структура ИП показана на рисунке 2.1. Он состоит из первичного преобразователя, непосредственно воспринимающего измеряемую величину, и промежуточных преобразователей, из которых выходной определяет вид аналогового или дискретного сигнала.

В современных системах автоматизации сельскохозяйственного производства необходимо контролировать десятки технологических параметров и физических величин (температуру, влажность, скорость, концентрацию, давление и т. д.). В зависимости от назначения и конкретных условий применения к ИП предъявляются следующие требования:

— однозначность функциональной зависимости выходной величины от входной;

— высокая избирательность (ИП должен реагировать только на изменение той величины, для которой он предназначен);

— направленность действия (отсутствие влияния нагрузки в выходной цепи ИП на режим входной цепи);

— высокая чувствительность;

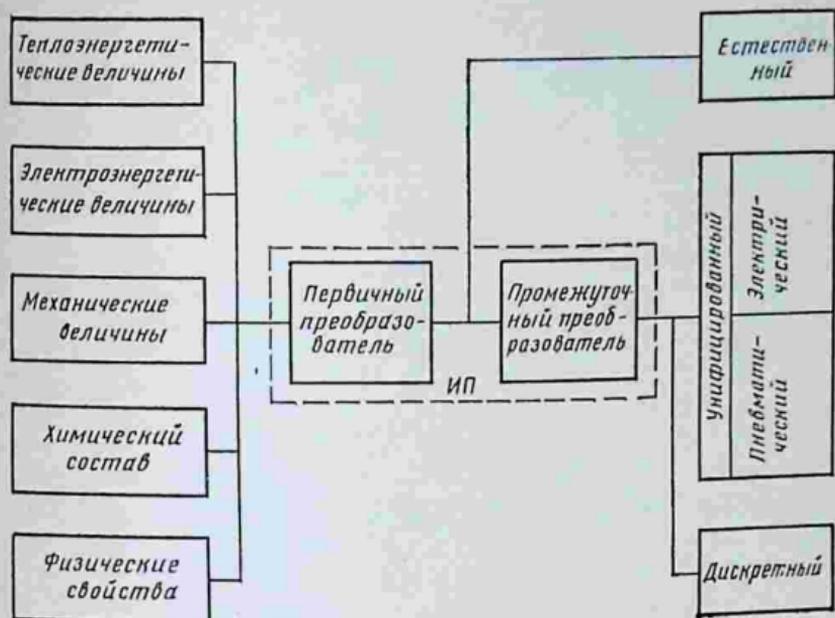


Рис. 2.1. Структура построения ИП.

- стабильность характеристик во времени;
- определенные динамические характеристики;
- высокая перегрузочная способность;
- достаточный уровень надежности;
- удобство монтажа и обслуживания и др.

Специфика контролируемой величины существенно влияет на метод преобразования, используемый в первичном преобразователе.

Типы преобразователей, применяемых в ГСП, можно разделить на шесть групп: механические, электромеханические, тепловые, электрохимические, оптические и электроионизационные.

2.2.2. Механические преобразователи

Механические преобразователи характеризуются преобразованием входных механических величин (давления, усилия, скорости, расхода и др.) в механические выходные сигналы (перемещение, частоту вращения, давление и др.). Чувствительными элементами этой группы преобразователей являются упругие элементы (упругая балочка, мембрана, пружина), поплавки, крыльчатки для

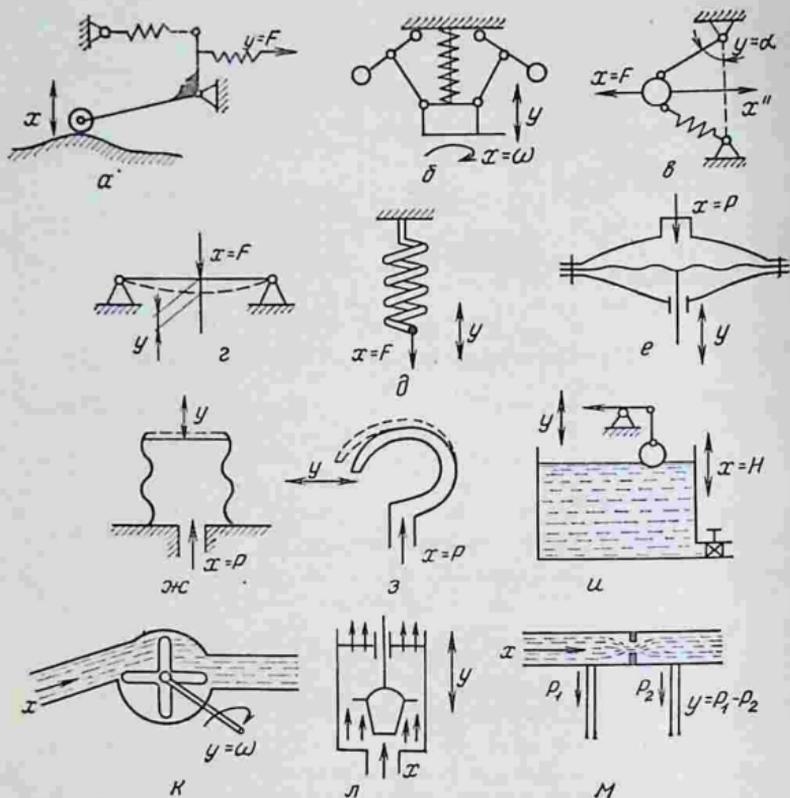


Рис. 2.2. Первичные преобразователи механических величин.

измерения усилий, уровня, скорости газовых потоков и жидкости, дроссельные устройства для измерения расхода невязких жидкостей и газов. Основные виды механических преобразователей показаны на рисунке 2.2.

Отклонения, фиксируемые копиром (рис. 2.2, а), с помощью рычажной передачи преобразуются в усилия F , воспринимаемые последующими элементами автоматической системы. Передаточная функция такого элемента имеет вид

$$W(s) = \frac{k}{(T_1 s^2 + T_2 s + 1)(T_3 s^2 + T_4 s + 1)}. \quad (2.1)$$

При регулировании частоты вращения различных двигателей в качестве чувствительного элемента используют

центробежный преобразователь угловой скорости (рис. 2.2, б), преобразующий частоту вращения двигателя ω в перемещение муфты y . Передаточная функция такого элемента обычно имеет вид

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + T_1 s + 1}. \quad (2.2)$$

На рисунке 2.2, в изображена схема маятникового акселерометра. Угол, на который происходит отклонение подвески груза, зависит от сил инерции.

Момент силы инерции M пропорционален углу α и равен

$$M = ml \, dv/dt, \quad (2.3)$$

где m — масса груза; l — длина подвески; dv/dt — ускорение груза.

В механических преобразователях усилий выходная величина — перемещение. Обычно это деформация упругих балочек (рис. 2.2, з) или пружин (рис. 2.2, д). Зависимость между прогибом балочки y и силой F имеет вид

$$y = \frac{Fl^3}{48EJ}, \quad (2.4)$$

где l — длина балочки; E — модуль упругости материала балочки; J — момент инерции поперечного сечения балочки.

Удлинение пружины y под действием силы F записывается выражением

$$y = \frac{FR^2 l}{GJ_p}, \quad (2.5)$$

где R — радиус витка пружины; l — полная длина стержня пружины; G — модуль сдвига; J_p — полярный момент инерции сечения стержня пружины.

На рисунке 2.2, е, ж, з приведены первичные преобразователи давления. Выходной величиной этих преобразователей является перемещение y . В мембране ИП (рис. 2.2, е) основной элемент — эластичная пластина, которая деформируется пропорционально давлению. В сильфонном преобразователе (рис. 2.2, ж) чувствительным элементом является гофрированный тонкостенный стакан, выполненный из упругого металла. Под действием давления происходит удлинение или укорачивание сильфона.

В преобразователе с трубчатой пружиной чувствительным элементом служит изогнутая тонкостенная упругая трубка овального сечения, которая стремится выпрямиться под действием давления внутри нее.

На рисунке 2.2, *и* показан поплавковый преобразователь уровня. Перемещение конца рычага пропорционально изменению уровня воды в баке.

Преобразователи расхода (рис. 2.2, *к*, *л*, *м*) строятся на различных физических принципах. Скоростные преобразователи расхода (рис. 2.2, *к*) строятся на основе пропорциональности расхода частоте вращения крыльчатки *n*:

$$n = kQ, \quad (2.6)$$

где *Q* — расход жидкости или газа; *k* — передаточный коэффициент.

Скоростные преобразователи могут изготавливаться со спиральной вертушкой, которую устанавливают в любой части трубопровода.

На рисунке 2.2, *л* изображен ротаметр, который преобразует энергию движущегося газа *x* в перемещение поплавка со штоком *y*. Высота подъема поплавка пропорциональна скорости потока газа.

В преобразователе с дроссельной диафрагмой (рис. 2.2, *м*), вставленной в трубопровод, выходная величина — разность давлений в импульсных трубках, размещенных по обе стороны диафрагмы.

Механические первичные преобразователи обладают определенной инерционностью. Постоянная времени механических преобразователей колеблется в пределах от 0,01 до 0,1 с.

2.2.3. Электромеханические преобразователи

Электромеханические первичные преобразователи предназначены для преобразования входных механических величин (давления, усилия, перемещения и др.) в выходные электрические величины (напряжение, ток, сопротивление, индуктивность и др.).

Электромеханические преобразователи делятся на параметрические и генераторные.

В параметрических преобразователях выходная величина — параметр электрической цепи (сопротивление, индуктивность, взаимная индуктивность, электрическая емкость). Для получения выходного сигнала в виде электрического тока или напряжения параметрические преобразователи необходимо включать в соответствующие электрические схемы (мостовые, дифференциальные) и питать от отдельных источников электрической энергии.

Генераторные преобразователи имеют электрический выходной сигнал в виде электрического тока или напряжения, значение которых зависит от значения механической контролируемой величины (пьезоэлектрические преобразователи, тахогенераторы и др.).

По принципу действия электромеханические преобразователи можно разделить на резистивные, электромагнитные, емкостные и тахометрические.

Резистивные ИП. Резистивные ИП наиболее широко распространены и используются для контроля линейных и угловых перемещений, измерения усилий, моментов, ускорений и расхода материалов. По конструктивному исполнению резистивные преобразователи бывают контактного типа, потенциметрические и тензометрические.

Контактные ИП наиболее просты и доступны с точки зрения их применения. Принцип их действия основан на зависимости переходного сопротивления контактов R_k от усилия их нажатия:

$$R_k = R_0 + A_k/F = R_0 + \frac{A_0}{\Delta l}, \quad (2.7)$$

где R_0 — значение сопротивления контактов (столбика); A_k и A_0 — постоянные коэффициенты, значения которых определяются свойствами контактных пар, Ом·Н; F — усилие нажатия, Н; Δl — значение взаимного перемещения контактов вследствие их деформации.

Конструктивно ИП выполняют в виде столбиков, набранных из угольных дисков, или в виде контактных пар. Для изготовления дисков используют электродный уголь с удельным сопротивлением $\rho = 30 \dots 100$ Ом·мм²/м, графит или керамику с графитовым наполнителем. Размеры шайб обычно выбирают из расчета максимально допустимого давления 6,5 МПа и допустимого перегрева:

$$\theta_{уст} = \frac{l^2 R_{max}}{\mu S_{охл}} \leq t_{max} - t_{окр.ср} \quad (2.8)$$

где μ — коэффициент теплоотдачи (0,12...0,15 Вт/м²); $S_{охл}$ — боковая поверхность столбика из шайб; t_{max} — допустимая температура нагрева (180...230°C); $t_{окр.ср}$ — максимальная температура окружающей среды, °C; I — ток в цепи, А

$$I = \frac{U}{R_k + R_{пр}}; \quad (2.9)$$

$R_{пр}$ — сопротивление прибора и соединительных проводов, Ом.

Потенциметрические ИП представляют собой регулируемые проволочные резисторы, которые в

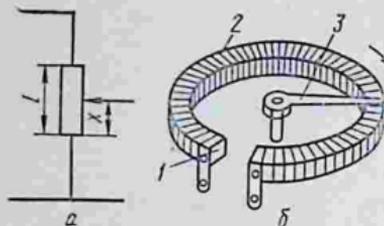


Рис. 2.3. Потенциометрические преобразователи:

a — линейного перемещения; *б* — углового перемещения.

отличие от регулировочных реостатов имеют однозначную функциональную зависимость между значением сопротивления и перемещением. Для линейного потенциометрического ИП (рис. 2.3, *a*) эта функциональная зависимость имеет вид

$$R_x = \frac{R}{l} x = r_0 x, \quad (2.10)$$

где R — сопротивление ИП, Ом; l — полная длина намотки, мм; r_0 — сопротивление, приходящееся на единицу длины намотки, Ом/мм.

Основные элементы потенциометрических ИП — пластмассовый или керамический каркас, обмотка из провода круглого или прямоугольного сечения и скользящий контакт (щетка). Допустимый ток при этом находят из выражения

$$\frac{I^2 R}{\mu S_{\text{охл}}} \leq t_{\text{max}} - t_{\text{окр.ср}} \quad (2.11)$$

Для потенциометрического ИП с линейной характеристикой

$$R_x/R = U_x/U,$$

отсюда

$$U_x = (U/R) R_x = (U/l) x. \quad (2.12)$$

Тогда чувствительность ИП по напряжению

$$k_U = dU_x/dx = U/l, \quad (2.13)$$

а по току

$$k_I = dI_{\text{np}}/dx = U/(R_{\text{np}}l). \quad (2.14)$$

Для ИП с кольцевым каркасом (рис. 2.3, *б*) при равномерном распределении витков по длине дуги каркаса

$$\left. \begin{aligned} U_x &= UR_\alpha/R, \\ U_\alpha &= (U/R) r\rho_0\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

где r — радиус каркаса, м; ρ_0 — сопротивление обмотки, отнесенное к единице длины дуги, на которую намотана обмотка, Ом/(м·рад); α — угол поворота, рад.

Чувствительность такого ИП по напряжению

$$k_U = dU_x/d\alpha = (U/R) r\rho_0. \quad (2.16)$$

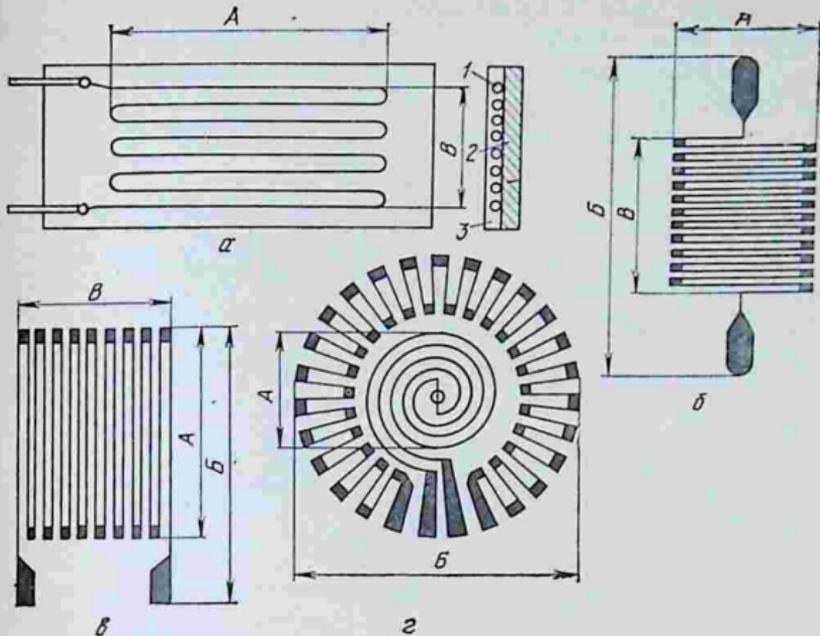


Рис. 2.4. Тензометрические ИП:

a — проволочный; *б* — фольговый короткобазовый прямоугольной формы; *в* — фольговый прямоугольный типовой формы; *г* — фольговый розеточный.

Передаточная функция рассмотренных потенциометрических ИП с линейной характеристикой будет иметь вид

$$W(s) = k. \quad (2.17)$$

Тензометрические ИП получили широкое распространение в последние годы для измерения деформаций, давлений, усилий, перемещений, ускорений и амплитуды упругих колебаний. Принцип действия таких ИП основан на явлении тензоэффекта — изменении их омического сопротивления при упругих деформациях. При этом изменение сопротивления обуславливается изменением геометрических размеров материала при деформациях.

Основной характеристикой тензо-ИП служит тензочувствительность

$$k_{\tau} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = E \frac{\Delta R/R}{\sigma}, \quad (2.18)$$

где R и l — соответственно сопротивление и длина проводника, из которого изготовлен ИП; ΔR и Δl — приращения сопротивления и длины; σ — напряжение в материале; E — модуль упругости.

Тензометрические ИП (рис. 2.4), выпускаемые отечественной промышленностью, бывают трех основных типов:

- проволочные на бумажной или пленочной основе (рис. 2.4, а);
- фольговые прямоугольные (рис. 2.4, б, в) или решетчатые (рис. 2.4, г);
- полупроводниковые.

Для изготовления проволочных (серии ПКБ) и фольговых тензодатчиков (серии 2ФКПЛ, 1ФКТК) используют в основном тензометрический константан ($k_T=2$). Для проволочных может использоваться сплав элинвар ($k_T=3,8$), платиноиридий ($k_T=6$) и другие материалы и сплавы. Тензометрические ИП на пленочной основе серии 2ППКП и 3ППКП имеют коэффициент тензочувствительности в пределах от 10 до 100. Широкое применение находят полупроводниковые тензо-ИП серий КТД, КТЭ, Ю-8, Ю-12, а также ИП серий ДСТБ-С-016, ДСТБ-С-010, ДДТБ-019 и др.

По конструктивному использованию тензо-ИП делятся на наклеиваемые и ненаклеиваемые. Наклеиваемые ИП получили наиболее широкое распространение и представляют собой эластичные изоляционные пластинки, внутри которых помещен на подложке тензочувствительный элемент. ИП прочно наклеивают на поверхность детали (конструкции), что дает возможность воспринять деформации типа «сжатие — растяжение». Для этого используют специальные клеи БФ-2, БФ-4, В-58, ВН-12, клей Котинского, лаки ВЛ-4, ВЛ-7 и др.

Характеристика тензо-ИП носит линейный характер.

Электромагнитные ИП. Благодаря своей простоте и надежности электромагнитные ИП получили довольно широкое распространение в системах автоматики. В зависимости от вида преобразования входной величины электромагнитные ИП можно разделить на четыре группы: индуктивные, трансформаторные, индукционные и магнитоупругие.

Индуктивные ИП используют для измерения усилий и линейных перемещений. Принцип их действия основан на изменении индуктивности ИП под воздействием линейных перемещений подвижной части его магнитной системы. Схема простейшего индуктивного ИП показана на рисунке 2.5. Он состоит из ферромагнитного сердечника, подвижного якоря и обмотки, питающейся от сети переменного тока. Входной величиной такого датчика является величина воздушного зазора $\delta = f(F)$, а вы-

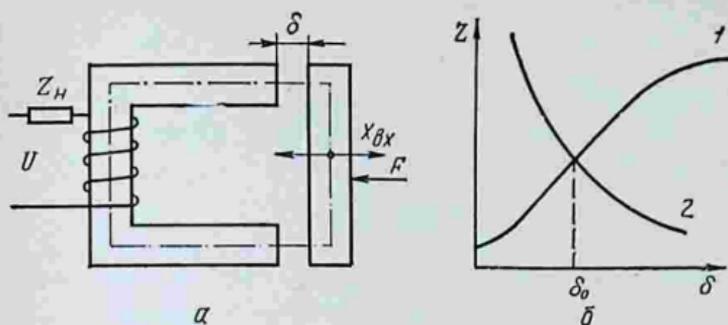


Рис. 2.5. Конструкция (а) и статическая характеристика (б) индуктивного ИП.

ходной ток I_n , который представляет собой функцию индуктивности $I_n = \varphi(L)$. Индуктивность электромагнитной системы определяется в общем случае отношением потоко-сцепления к вызвавшему его току:

$$L = \Sigma \Phi_i W_i / I_n. \quad (2.19)$$

С учетом наличия двух воздушных зазоров индуктивность датчика приближенно составляет

$$L = 2\pi\omega^2 S \cdot 10^{-5} / \delta, \quad (2.20)$$

где ω — число витков катушки; S — площадь поперечного сечения магнитопровода, м^2 , δ — воздушный зазор, м .

Индуктивность L , а следовательно, и полное сопротивление $z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ будут обратно пропорциональны изменению значения воздушного зазора δ . При этом чувствительность ИП по сопротивлению определяется из соотношения

$$k_z = \frac{\Delta z / z}{\Delta \delta / \delta}. \quad (2.21)$$

Отсюда видно, что индуктивные ИП особенно чувствительны при малых изменениях величины (они реагируют на отклонения $\Delta \delta = 0,1 \dots 0,5$ мкм). Статическая характеристика носит линейный характер только в средней своей части, поэтому расчетное (начальное) значение δ_0 должно располагаться в середине прямолинейной части характеристики.

Чувствительность по току при этом определяют из выражения

$$k_I = \frac{dI_n}{d\delta} = \frac{d(U/t)}{d\delta}. \quad (2.22)$$

Если пренебречь активной составляющей сопротивления ИП и амперметра $x_I \gg (R + R_A)$, то с учетом выражения (2.20) получим

$$k_I = \frac{U \cdot 10^5}{4\pi^2 f \omega^2 S}. \quad (2.23)$$

Рассмотренные индуктивные ИП простейшего типа обладают невысокой точностью, наличием нелинейности на характеристике, а также нечувствительностью к изменению знака входной величины. В связи с этим более широко используются трансформаторные и дифференциальные трансформаторные ИП (табл. 2.2). Принцип их действия основан на изменении взаимной индуктивности обмоток при перемещении одной относительно другой или при перемещении якоря.

Для трансформаторных ИП, основанных на перераспределении напряжений при перемещении якоря, выходное напряжение определится из выражения

$$U_2 = U_1 \frac{\omega_2 \delta'' - \delta'}{\omega_1 \delta' + \delta''}. \quad (2.24)$$

Для дифференциальных ИП, основанных на перераспределении магнитных потоков при перемещении якоря, выражение (2.24) принимает вид

$$U_2 = U_1 \frac{\omega_2 G'_n - G''_n}{\omega_1 G'_n + G''_n}, \quad (2.25)$$

где G'_n и G''_n — расчетные значения проводимостей воздушных зазоров при перемещении якоря; $G'_n = \frac{G' G_0}{G' + G_0}$; $G''_n = \frac{G'' G_0}{G'' + G_0}$; G' и G'' — действительные значения проводимостей зазоров; G_0 — значение проводимости воздушного зазора в средней части магнитной цепи (оно не зависит от положения якоря).

В дифференциальных ИП входная величина — смещение якоря (плунжера) относительно его среднего (нейтрального) положения. Выходная величина таких датчиков представляет собой геометрическую разность токов $\Delta I = I_1 - I_2$. При нейтральном положении якоря $I_1 = I_2$ и, следовательно, $\Delta I = 0$. При перемещении якоря относительно среднего положения в одну или другую сторону нарушается значение проводимостей воздушных зазоров G'

2.2. Схемы трансформаторных датчиков

№ п/п	Тип	Схема	Основные соотношения
1	ИП, основанные на перераспределении напряжений при перемещении якоря (а)		$\bar{U}_1 = \bar{U}'_1 + \bar{U}''_1;$ $\bar{U}_2 = \bar{U}'_2 - \bar{U}''_2$ $U'_1/U''_1 = L'/L'' =$ $= \delta''/\delta';$ $U'_2 = U'_1 \omega_2/\omega_1$ $U''_2 = U''_1 \omega_2/\omega_1;$ $U_2 = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} \frac{\delta'' - \delta'}{\delta' + \delta''}$
2	ИП, основанные на перераспределении магнитных потоков при перемещении якоря (б, в)		$\bar{U}_2 = \bar{U}'_2 - \bar{U}''_2;$ $U_2 = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} \frac{G' - G''}{G' + G''};$ $U_2 = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} \frac{\delta'' - \delta'}{\delta' + \delta''};$ $U_2 = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} x/\delta_0;$ $x = \delta'' - \delta_0;$ $\delta_0 = (\delta' + \delta'')/2$
3	ИП, основанные на перераспределении магнитных потоков при перемещении якоря (з)		$U_2 = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} \times$ $\times \frac{G'_n - G''_n}{G'_n + G''_n};$ $G'_n = G' G_0 / (G' +$ $+ G_0);$ $G''_n = G'' G_0 / (G'' +$ $+ G_0)$

и G'' , изменяется сопротивление обмоток z_1 и z_2 , а следовательно, нарушается равенство токов $I_1 \neq I_2$. Вследствие этого на выходе появляется ток ΔI , значение которого зависит от угла отклонения якоря (или хода плунжера), а фаза определяется направлением отклонения якоря (плунжера).

Магнитоупругие ИП конструктивно представляют собой магнитные сердечники той или иной конфигурации с расположенными на них одной или несколькими обмотками. В основу их работы положено свойство ферромагнитных материалов изменять магнитную проницаемость под воздействием упругих деформаций.

Магнитоупругие свойства материалов характеризуются относительной чувствительностью

$$k = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l}, \quad (2.26)$$

где μ — магнитная проницаемость материала, $\mu = \mu_r \mu_0$; μ_r — относительная магнитная проницаемость (Гн/м); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Из магнитоупругих ИП, приведенных на рисунке 2.6, наибольшей чувствительностью обладает ИП с крестообразным расположением обмоток, действие которого основано на различии между продольной и поперечной чувствительностью материала. При воздействии усилий магнитная проводимость такого ИП в вертикальном направлении снижается сильнее, чем в горизонтальном.

Другая разновидность магнитоупругих ИП основана на использовании обратного эффекта Видемана. Основной элемент такого ИП — ферромагнитный сердечник круглого сечения (или в виде трубки), намагничиваемый протекающим через него в продольном направлении током I_1 . При отсутствии деформаций магнитное поле будет симметрично относительно оси сердечника. При воздействии крутящего момента симметрия его магнитной проводимости вдоль оси нарушается и в обмотке, расположенной на сердечнике, наводится ЭДС.

Индукционные ИП относятся к группе генераторных. Принцип действия их основан на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому ЭДС, индуктируемая в катушке, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с катушкой:

$$e = - \omega d\Phi/dt. \quad (2.27)$$

Индукционные датчики применяют для измерения скорости, линейных и угловых перемещений: например, в тахогенераторах, а также в виброметрах и акселерометрах.

Тахогенераторы представляют собой небольшие генераторы постоянного или переменного тока с независимым

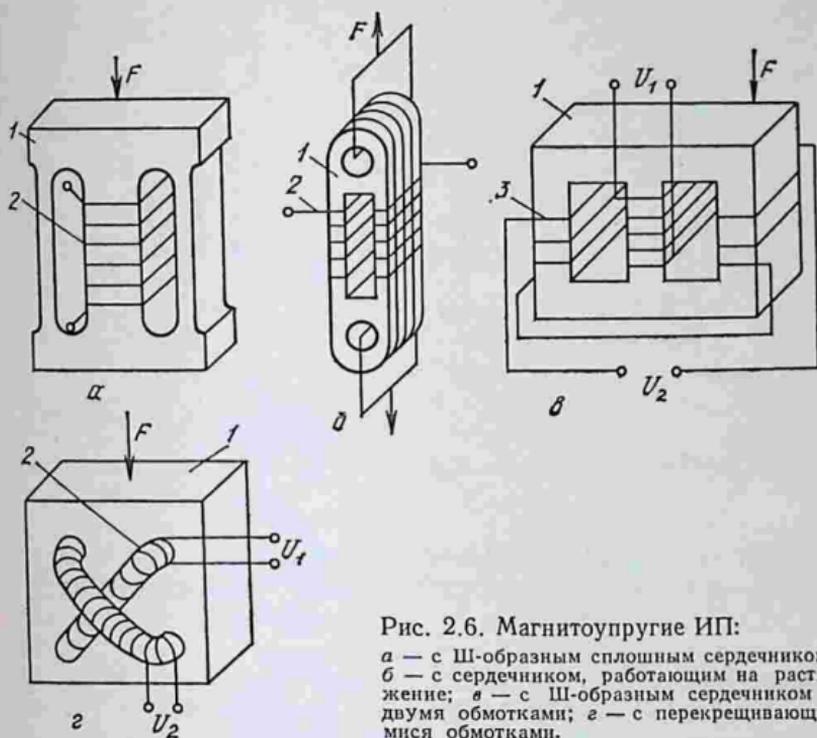


Рис. 2.6. Магнитоупругие ИП:

a — с Ш-образным сплошным сердечником; *б* — с сердечником, работающим на растяжение; *в* — с Ш-образным сердечником и двумя обмотками; *г* — с перекрещивающимися обмотками.

возбуждением или с постоянным магнитом. При использовании тахогенератора постоянного тока о скорости судят по значению ЭДС, которая представляет собой функцию числа оборотов — $e = \varphi(n)$. При использовании тахогенераторов переменного тока лучше использовать зависимость частоты от оборотов $f = \psi(n)$, так как в этом случае исключается влияние непостоянства магнитного потока, что обеспечивает повышение точности измерений.

Для измерений скорости линейных перемещений, амплитуды перемещений и ускорений можно использовать ИП, схема которого приведена на рисунке 2.7. Цилиндрический постоянный магнит 3 создает в кольцевом зазоре 2 постоян-

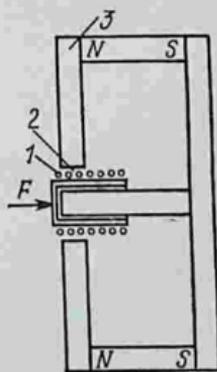


Рис. 2.7. Индукционный ИП измерения скорости линейных перемещений.

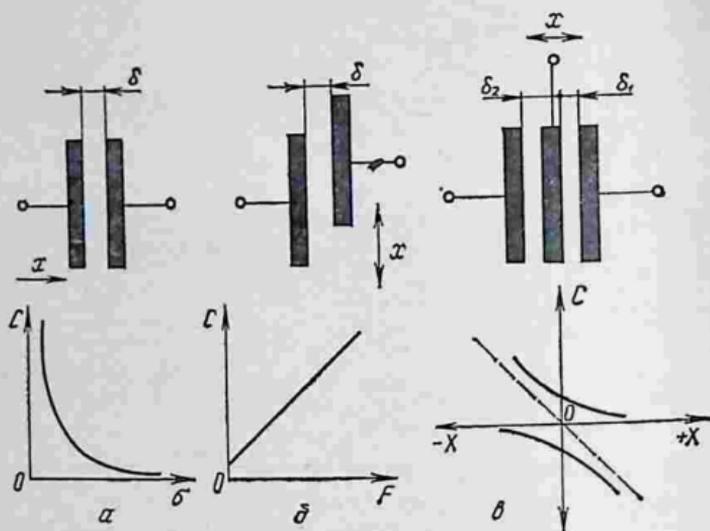


Рис. 2.8. Емкостные ИП с плоскими электродами: а — с переменным зазором; б — с переменной площадью; в — с двумя переменными зазорами.

ное радиальное магнитное поле. Цилиндрическая катушка 1 под действием механических усилий перемещается в воздушном зазоре, пересекает силовые магнитные линии постоянного поля, вследствие чего в ней возникает ЭДС, пропорциональная скорости перемещения $e = \varphi(v)$.

Емкостные и пьезоэлектрические ИП. Принцип действия емкостных ИП основан на использовании зависимости электрической емкости конденсаторов от размеров и взаимного расположения его электродов, а также от диэлектрических свойств среды между ними.

Для двухэлектродного емкостного ИП с плоскими электродами (рис. 2.8, а) электрическая емкость

$$C = \frac{\epsilon S_{\text{эл}}}{\delta}, \quad (2.28)$$

где $S_{\text{эл}}$ — активная площадь электродов; δ — расстояние между электродами; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды между электродами, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Относительное изменение емкости есть функция изменений ϵ , $S_{\text{эл}}$ и δ :

$$\Delta C/C = \varphi(\Delta\epsilon/\epsilon; \Delta S/S; \Delta\delta/\delta). \quad (2.29)$$

Следовательно, емкостные ИП могут быть конструктивно выполнены с изменяющимся расстоянием между электродами, с переменной активной площадью или с изменением свойств среды между электродами.

Для емкостных ИП с плоскими электродами с переменным зазором δ при $\Delta S=0$ и $\Delta \epsilon=0$ чувствительность находят из выражения

$$k = dC/d\delta = \epsilon S_{\text{эл}}/\delta^2. \quad (2.30)$$

Для повышения точности измерения и увеличения чувствительности емкостных ИП обычно используют дифференциальные схемы включения. Такие ИП практически безынерционны и применяются для измерения давлений, ускорений, вибраций и уровней. Для усиления выходного сигнала емкостных ИП в современных устройствах используют усилители.

Пьезоэлектрические ИП используют для измерения параметров быстро изменяющихся во времени величин: усилий, давлений, ориентации рабочих органов машин и т. п. Принцип их действия основан на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, сущность которого заключается в появлении электрических зарядов на гранях кристаллов некоторых веществ (кварца, титаната бария, сегнетовой соли и др.) под воздействием механических усилий.

Конструктивно пьезоэлемент представляет собой пластинку кристалла со строго ориентированными осями. При приложении усилия F_x вдоль электрической оси на гранях кристалла появляется электрический заряд

$$q_x = k_n F_x, \quad (2.31)$$

где k_n — пьезоэлектрический модуль (для кварца $k_n = 2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н).

При приложении усилия F_y вдоль механической оси на гранях появляется электрический заряд

$$q_x = -k_n F_y a/b, \quad (2.32)$$

где a и b — геометрические размеры пластины кристалла.

Промышленность выпускает пьезоэлементы на базе кварца и турмалина типа ТБ-1, ТБКС, НБС-1, ЦТС-19 и др., работающие на изгиб и на сдвиг (рис. 2.9).

Выходное напряжение пьезоэлектрического ИП за-

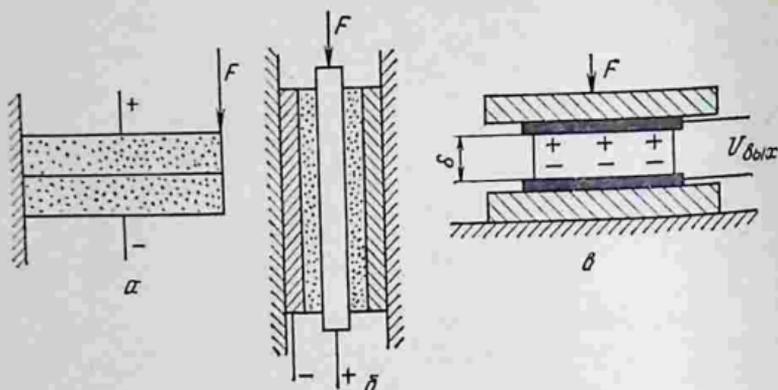


Рис. 2.9. Пьезоэлектрические ИП:

а — ИП, работающий на изгиб; б — ИП, работающий на сдвиг; в — ИП, работающий на растяжение — сжатие.

висит от заряда и геометрических размеров пластинки кристалла.

Для ИП, показанного на рисунке 2.9, а,

$$U_{\text{вых}} = \frac{q_x \delta}{\epsilon S_{ox}}, \quad (2.33)$$

где S_{ox} — площадь электрической грани.

Выходное напряжение пьезоэлемента обычно очень малое. В связи с этим в ИП используются электронные электрометрические усилители с входным сопротивлением порядка $10^{12} \dots 10^{14}$ Ом.

2.2.4. Тепловые преобразователи

Тепловые преобразователи делятся на термоэлектрические (термопары), терморезистивные (термометры сопротивления), термомеханические и манометрические.

Выходной величиной тепловых преобразователей могут быть электрические и неэлектрические величины в зависимости от физического принципа действия преобразователей. Наиболее распространенные термоэлектрические преобразователи — термопары.

Термопары представляют собой разновидность термоэлектрических преобразователей генераторного типа. Принцип действия их основан на возникновении термо-ЭДС на

концах спаев двух разнородных материалов, находящихся в разных температурных режимах.

Конструктивно термопара состоит из двух разнородных, специально подобранных проводников, одни концы которых сварены между собой, а другие подсоединены на вторичный прибор. Рабочий (горячий) спай помещают в защитный кожух и устанавливают в месте контроля температуры. Если температура свободных холодных спаев термопары отличается от температуры горячего спаев, то вследствие термоэлектрического эффекта на электродах возникает термо-ЭДС, пропорциональная разности температур.

Отечественная промышленность выпускает термопары из неблагородных металлов (ТМК, ТХК, ТХА и др.), благородных металлов (ТПП, ТПР и др.), керамических и металлокерамических материалов (прил. 1).

Термопары из благородных металлов получили широкое распространение в технике измерений вследствие того, что обладают высокой точностью и стабильностью. Термоэлектроды термопар ТПП изготавливают из проволоки диаметром 0,3...0,5 мм (один — из чистой платины, а другой — из сплава, содержащего 90% платины и 10% родия).

К техническим термопарам ТПП поставляются компенсационные провода: к платиновому электроду — из сплава 99% меди и 0,4% никеля (в оплетке зеленого цвета), к платинородиевому электроду — из меди (в оплетке красного цвета). Термопары ТПП с этими компенсационными проводами при температуре рабочего спаев 100°C и свободного спаев 0°C развивают термо-ЭДС в пределах $0,64 \pm 0,03$ мВ.

Особый практический интерес представляют термопары ТПР градуировки ПР-30/6, зависимость термо-ЭДС которых от температуры описывается выражением

$$e = \frac{t^2}{197 + (t - 400)^2/55}, \quad (2.34)$$

где t — температура рабочего спаев, °C.

При изменении температуры свободных концов в диапазоне от 0 до 100°C термо-ЭДС термопары ТПР изменится только на 50 мкВ. Для исключения влияния дрейфа температуры свободного спаев термопары в схему измерений вводят автоматическую компенсацию температуры этого спаев (рис. 2.10). Для этого в цепь термопары включают мостовую схему, состоящую из трех постоянных резист

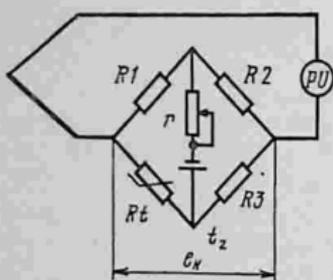


Рис. 2.10. Термопара с термокомпенсацией.

и одного металлического терморезистора, расположенного в непосредственной близости от свободного (холодного) спая. Напряжение питания мостовой схемы и параметры сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и R_t выбирают так, чтобы e_K была равна по значению и противоположна по знаку ЭДС холодного спая.

Для измерения низких температур в диапазоне от -200 до $+350^\circ\text{C}$ в основном используются термопары из неблагородных металлов, среди которых можно выделить термопару хромель-алюмелевую (ТХА). Учитывая то, что в диапазоне температур от 0 до 800°C зависимость термо-ЭДС от температуры для ТХА носит почти линейный характер, их часто используют как ИП автоматических регуляторов температуры. При этом изменение термо-ЭДС составляет примерно $40 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$.

Допустимые отклонения термо-ЭДС некоторых исполнений ТХА от значений, указываемых в градуировочных таблицах, составляет

$$\Delta e = \pm [0,16 + 2 \cdot 10^{-4} (t - 300)]. \quad (2.35)$$

При этом в диапазоне измеряемых температур до 300°C допустимые отклонения практически постоянны и составляют $\pm 0,16 \text{ мВ}$. В практике ТХА комплектуют компенсационными проводами: хромелевый (положительный) в фиолетовой оплетке и алюмелевый (отрицательный) в оплетке черного цвета. Реже применяются компенсационные провода из меди и константана. При этом медную (положительную) жилу в красной оплетке подсоединяют к хромелевому электроду, а константановую (отрицательную) в коричневой оплетке — к алюмелевому электроду.

Термометры сопротивления представляют собой особую группу термодатчиков, в основу действия которых положен принцип изменения сопротивления материалов от температуры. Для изготовления чувствительных элементов ИП используют чистые металлы (платину, медь, никель, железо), обладающие положительными температурными коэффициентами сопротивлений (ТКС).

Наша промышленность выпускает в основном два вида

металлических термометров сопротивления: платиновые ТСП и медные ТСМ (прил. 2).

Термочувствительные элементы (ТЧЭ) на слюдяной основе представляют собой платиновую проволоку диаметром 0,05...0,07 мм, бифилярно намотанную на слюдяную пластинку с зубчатыми краями. Наиболее приемлема конструкция ТЧЭ, в которой платиновые спирали расположены в капиллярных керамических трубках, заполненных порошком безводной окиси алюминия, служащей изолятором.

ТЧЭ для термопреобразователей сопротивления медных представляет собой безындукционную обмотку из медной проволоки диаметром 0,07...0,08 мм, покрытую фторопластовой пленкой. Для защиты от механических воздействий ТЧЭ помещают в тонкостенную металлическую гильзу, которую заполняют керамическим порошком и герметизируют.

Изменение сопротивления проводника из чистой платины при изменении температуры в диапазоне от -200 до 0°C подчиняется следующему закону:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha t + bt^2 + c(t - 100)t^3], \quad (2.36)$$

а при изменении температуры от 0 до $+650^{\circ}\text{C}$ — закону

$$R_t = R_0 [1 + \alpha t + bt^2], \quad (2.37)$$

где R_0 — значение сопротивления при $t = 0^{\circ}\text{C}$; α — температурный коэффициент сопротивления, равный $3,96847 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$; $b = -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}^2$; $c = -4,22 \cdot 10^{-12} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}^4$.

Можно считать, что в рабочей части температур функция $R = f(t)$ носит линейный характер.

Для проводников из меди в диапазоне температур от -50 до $+180^{\circ}\text{C}$ зависимость сопротивления от температуры аппроксимируется линейным законом

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.38)$$

где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

Чувствительность термометров сопротивления ($\text{Om}/^{\circ}\text{C}$)

$$k_{\text{т.с}} = dR_t/dt = \alpha R_0. \quad (2.39)$$

Термометры сопротивления — одни из самых точных ИП температуры (они позволяют измерять температуру с точностью до $0,001^{\circ}\text{C}$).

Основной их недостаток — большие размеры ТЧЭ,

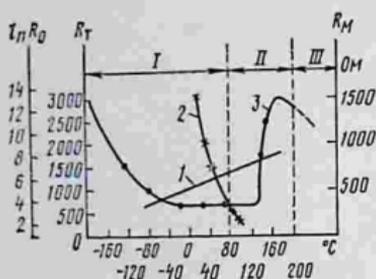


Рис. 2.11. Статические характеристики термометра сопротивления (1), термистора (2) и позистора (3).

шими отрицательными ТКС. Для их изготовления обычно используют порошкообразные смеси окислов марганца, меди, кобальта, никеля и других металлов, спрессованные и спеченные при высокой температуре (прил. 3).

Конструктивно по форме термисторы изготавливают в виде шарика, трубки или диска. Для защиты от воздействия окружающей среды термисторы покрывают слоем лака или жидкого стекла.

Главная характеристика термистора — зависимость сопротивления термистора от температуры — нелинейная (рис. 2.11):

$$R_t = R_0 e^{B/T}, \quad (2.40)$$

где B — постоянный коэффициент; T — температура, K .

В практике находят также применение полупроводниковые терморезистивные ИП с положительным ТКС, называемые позисторами. Материалом для ТЧЭ позисторов служит обычно титанат бария с определенными примесями. Особенность позисторов заключается в том, что их сопротивление при повышении температуры увеличивается только в диапазоне ограниченных значений температуры. Вне этих пределов ТКС позисторов будет отрицательным. При этом в диапазоне положительных значений ТКС выделяется участок характеристики, носящий линейный характер.

Термисторы и позисторы по сравнению с термометрами сопротивления обладают повышенной чувствительностью, меньшей инертностью, но имеют незначительный рабочий диапазон и разброс значений в пределах до 20%.

ИП температуры с механическими воспринимающими

что не дает возможности использовать их при изменении температуры в малых объемах.

В качестве ИП автоматических регуляторов широко используются полупроводниковые терморезисторы (термисторы), воспринимающий элемент которых изготавливается из полупроводниковых материалов, обладающих боль-

органами построены на использовании явления теплового расширения твердых тел, жидкостей и газов.

В основу построения ИП, использующих явление теплового расширения твердых тел, положено изменение линейных размеров рабочего (термометрического) тела при изменении температуры.

Чувствительность всех дилатометрических ИП температуры пропорциональна их длине l и разности коэффициентов температурного расширения рабочей зоны ($\alpha_1 - \alpha_2$). Для повышения точности и чувствительности дилатометрических ИП термометрическое тело изготавливают из материалов с малым коэффициентом линейного расширения (инвар, кварц), а защитные трубки при этом выполняют из алюминия, латуни или стали, которые обладают большим коэффициентом линейного расширения.

На принципе теплового расширения твердых тел основаны также биметаллические ИП. Биметаллическая пластина состоит из двух слоев металлов с различными значениями коэффициентов линейного расширения, сваренных между собой (сплавы марок ТБ-1, ТБ-2 и др.). При увеличении температуры пластина изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения. Чувствительность биметаллической пластины — прогиб ее свободного конца при нагреве на 1°C зависит от размеров пластины и физических свойств материалов, которые определяются обобщенным коэффициентом чувствительности материала

$$M = k_\delta (\alpha_1 - \alpha_2), \quad (2.41)$$

где k_δ — коэффициент, зависящий от соотношения толщины слоев биметаллической пластины δ_1 и δ_2 и модулей упругости E_1 и E_2 .

Точность биметаллических ИП невысокая. В связи с этим их используют только в устройствах защиты.

ИП, основанные на использовании теплового расширения жидкостей, реагируют на изменение объема жидкости в зависимости от температуры. Конструктивно такие ИП состоят из баллончика с капилляром и преобразуют изменение температуры Δt в изменение давления жидкости в капилляре

$$\Delta h = \Delta V / S_{\text{к}}, \quad (2.42)$$

где ΔV — изменение объема жидкости

$$\Delta V = V (\beta - 3\alpha_0) \Delta t; \quad (2.43)$$

β — температурный коэффициент объемного расширения; α_0 — температурный коэффициент линейного расширения материала ампулы и капилляра; S_K — площадь сечения капилляра.

Эти ИП отличаются простотой устройства.

Пределы измерения жидкостных термометров ограничиваются температурами замерзания и кипения рабочей жидкости ИП. Погрешность ИП манометрического типа обычно находится в пределах от 1 до 2,5%.

Датчики, основанные на использовании теплового расширения газов, аналогичны по конструкции датчикам с жидкостным заполнением. Для идеального газа давление в системе при изменении температуры термобаллона определится из соотношения

$$p = \frac{p_0}{T_0} \frac{V + V'}{V/T + V'/T'} , \quad (2.44)$$

где P_0 — давление газа в системе при заполнении при температуре T_0 , К; T — измеряемая температура, К; T' — температура окружающего воздуха, К; V' — объем капилляра и манометрического элемента.

Погрешность этих ИП составляет 1...2,5%. Пределы измерений ограничены температурой сжижения рабочего газа и теплостойкостью материала термобаллона (—269... +550°C).

2.2.5. Электрохимические преобразователи

Электрохимические преобразователи используются для анализа состава и измерения концентрации жидких и газообразных сред. Принцип действия этих устройств основан на изменении параметров среды в результате химических преобразований, вызванных изменением концентрации или состава.

Электрохимические преобразователи делятся на кондуктометрические, потенциометрические и полярографические. Наиболее широко применяются первые два вида преобразователей.

В кондуктометрических преобразователях выходная величина — проводимость среды, которая зависит от ее состава или концентрации. Значение начального сопротивления этих преобразователей может колебаться от единиц ом до нескольких килоом. Питание кондуктометрических преобразователей осуществляется переменным напряжением частотой 50 Гц...10 кГц.

Потенциометрические (гальванические) преобразователи

применяются для определения состава и свойств водных растворов. Принцип действия их основан на зависимости ЭДС, возникающей на электродах, от концентрации ионов электролита. Они применяются при контроле концентрации раствора удобрений в теплицах, концентрации сточных вод и т. п.

2.2.6. Оптические ИП

В оптических ИП используются свойства контролируемых величин влиять на характеристики светового потока, пропускаемого через анализируемую среду.

Первичным преобразователем оптических ИП является фотоэлемент, преобразующий световой поток в выходной электрический сигнал. Коэффициент преобразования фотоэлектрического преобразователя называется чувствительностью. Для фотоэлектрических преобразователей различают интегральную и спектральную чувствительность. Чувствительность фотоэлемента, определенная для света полного спектрального состава, называется интегральной, а чувствительность, определенная для заданной длины волны падающих лучей, называется его спектральной чувствительностью.

Основные характеристики фотоэлектрических преобразователей — статическая (световая), вольт-амперная и частотная.

Световая характеристика — зависимость выходной величины фотоэлектрического преобразователя от светового потока.

Вольт-амперной характеристикой называют зависимость фототока от приложенного напряжения при постоянном значении светового потока. Вольт-амперные характеристики, полученные при нескольких значениях светового потока, представляют собой семейство вольт-амперных характеристик.

Частотная характеристика определяет зависимость фототока от частоты модуляции (прерывания) светового потока. Эта характеристика позволяет судить об инерционности фотоэлементов.

Принцип действия фотоэлектрических преобразователей основан на использовании внутреннего и внешнего фотоэффекта. Внутренний фотоэффект проявляется в перераспределении электронов в веществе под действием светового потока. Фотоэлементы, основанные на внутреннем

фотоэффекте, называются фоторезисторами. Конструктивно фоторезистор представляет собой основание из изоляционного материала, на которое нанесен слой светочувствительного полупроводникового вещества.

Световая характеристика фоторезистора представляет собой зависимость сопротивления от светового потока. Определенная по световой характеристике интегральная чувствительность выражается

$$k_R = dR/(d\Phi). \quad (2.45)$$

Если фоторезистор включен в электрическую цепь, то значение фототока зависит также от приложенного напряжения:

$$I_\Phi = kU\Phi^\alpha, \quad \alpha < 1. \quad (2.46)$$

Применительно к фоторезистору интегральную чувствительность определяют по отношению к 1 В приложенного напряжения и называют удельной чувствительностью:

$$k_I = dI_\Phi/(d\Phi U). \quad (2.47)$$

Фоторезисторы из сернистого свинца имеют чувствительность порядка 500 мкА/(В·лм), а из сернистого кадмия — порядка 1000...6000 мкА/(В·лм).

Внешний фотоэффект проявляется в испускании электронов во внешнее пространство некоторыми веществами под действием светового излучения.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой стеклянный баллон, на внутреннюю часть которого нанесен светочувствительный слой, являющийся катодом. Внутри баллона установлен также второй электрод в виде кольца — анод. Давление внутри баллона не превышает 10^{-4} Па. Под действием падающего света катод испускает электроны, которые при наличии электрического поля перемещаются к аноду, создавая ток внутри фотоэлемента (фототок). Направленное электрическое поле внутри фотоэлемента создается внешним источником напряжения.

Вакуумные фотоэлементы работают в режиме насыщения, когда значение фототока не зависит от значения приложенного напряжения, а зависит только от светового потока. Интегральная чувствительность вакуумных фотоэлементов

$$k = dI_\Phi/(d\Phi). \quad (2.48)$$

Она составляет 80...100 мкА/лм.

Темновой ток фотоэлектрического преобразователя — ток при отсутствии источника света ($\Phi=0$).

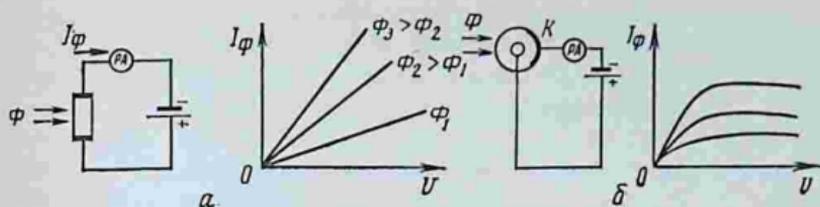


Рис. 2.12. Вольт-амперные характеристики фотоэлементов:
 а — фоторезистора; б — вакуумного фотоэлемента.

Для сравнения на рисунке 2.12 показаны семейства вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей.

К вентильным фотоэлектрическим преобразователям относятся также фотодиоды и фототранзисторы, принцип действия которых основан на вентильном эффекте. Они имеют высокую чувствительность, достигающую до 20 мА/лм у фотодиодов и до 1 А/лм у фототранзисторов.

Оптические ИП, построенные на свойствах контролируемой среды поглощать, рассеивать, преломлять или отражать световые лучи, используются преимущественно для контроля физических свойств растворов и газовых смесей.

Фотоколориметрические ИП основаны на измерении относительного изменения светового потока, прошедшего через контролируемую жидкость, в результате поглощения его жидкостью.

Рефрактометрические ИП используют зависимость между показателями преломления и составом или свойствами жидкости. Они измеряют этот показатель при переходе светового луча из одной среды в другую.

Нефелометрические и турбидиметрические ИП применяют для контроля концентрации взвешенных частиц в прозрачных жидкостях. Частицы рассеивают свет или поглощают его.

Для определения концентрации газов применяют оптико-акустические ИП, работа которых основана на оптико-акустическом эффекте. Суть его заключается в том, что газ, поглощая энергию света, при прерывистом облучении периодически нагревается и охлаждается, в результате чего происходят колебания давления газовой смеси. Колебания давления измеряются и служат мерой концентрации.

Оптические ИП применяются также для контроля механических величин, преобразованных первоначально в линейное или угловое перемещение, а затем фотоэлектрическим преобразователем в электрический сигнал.

В качестве источников света в оптических ИП применяются лампы накаливания, лампы дневного света, светодиоды. Для увеличения световых потоков, подаваемых на контролируемый объект, применяются оптические устройства в виде вогнутых зеркал или линз.

К недостаткам оптических преобразователей и ИП относятся зависимость точности преобразования от влияния внешних факторов и нестабильность характеристик источников света и фотоэлементов.

2.2.7. Электронные и ионизационные преобразователи

В эту группу входят первичные преобразователи и ИП, основанные на различных физических принципах и эффектах (Холла, магнитно-ядерного резонанса, изменения диэлектрической проницаемости и др.).

В сельскохозяйственном производстве важное значение имеет контроль влажности воздуха и твердых веществ (почвы, зерна, хлопка и др.).

В ИП контроля влажности воздуха применяются гигрометры сопротивления как первичные преобразователи влажности. Принцип действия гигрометров сопротивления основан на изменении электрической проводимости гигроскопического слоя некоторых веществ. Гигрометры сопротивления можно разделить на две группы:

— гигрометры, в которых на гигроскопическом слое происходит физическая абсорбция воды (угольные со слоем полиэлектrolита);

— гигрометры, в гигроскопическом слое которых происходит абсорбция воды в растворе электролита (хлористого лития).

К первой группе принадлежат угольные ИП, содержащие слой напыленного угля, который хорошо проводит электричество. Вода, диффундирующая внутрь слоя в отсутствие соли (при отсутствии ионной проводимости электролита), является определенного рода изолятором, вследствие чего снижается проводимость слоя.

Для этих преобразователей проводимость является

функцией влажности или, точнее, влагосодержания. Такие ИП обладают малой инерционностью, но в то же время имеют нестабильную статическую характеристику вследствие появления на активном слое ИП молекул ионогенно-активных солей, ускоряющих процесс его «старения». Эти специфические свойства ограничивают использование угольных преобразователей для измерения влажности в сельском хозяйстве.

В системах контроля и регулирования влажности более широко используются электролитические преобразователи, принцип действия которых состоит в изменении зависимости электролитической проводимости раствора соли, абсорбирующего воду из окружающей среды. Равновесное состояние, обуславливающее концентрацию раствора, устанавливается в зависимости от относительной влажности воздуха.

Зависимость сопротивления гигроскопического слоя хлористо-литиевых ИП от относительной влажности носит приближенно экспоненциальный характер. Конструктивно такие преобразователи представляют собой пластинку из органического стекла, на которую нанесен слой раствора хлористого лития. Слой покрывает поверхность, находящуюся между электродами из напыленного металла в виде гребней.

Пределы измерений хлористо-литиевых преобразователей охватывают обычно несколько диапазонов относительной влажности. При этом пределы сопротивлений ИП подбирают таким образом, чтобы в середине диапазона измеряемой влажности ИП имели одинаковое сопротивление. Соблюдение этого условия позволяет изготавливать ИП из нескольких параллельно соединенных пластин, что, естественно, расширяет диапазон измерений.

Вторая разновидность гигросторного ИП — реостатный датчик, представляющий собой пластину из полистирола с бифилярно намотанными спиралью, покрыты сверху тонким слоем поливинилового спирта, насыщенного неорганическими солями. Спираль изготавливают из сплава серебра и меди. Для улучшения гигроскопических свойств слоя применяются добавки высших спиртов, сахаров пентаэритрита. Обычно гигроскопический слой изменяет сопротивление от 2 до 30 кОм в диапазоне изменения относительной влажности от 40 до 95%.

В последние годы находят применение гигрометры с подогревным ИП (рис. 2.13). Такой гигрометр состоит

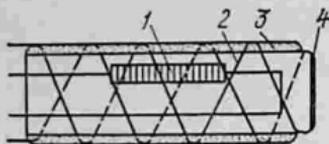


Рис. 2.13. Гигрометр с подогревом.

из термометра сопротивления 1, электродов 2, включенных в электрическую схему, которая питается от сети переменного тока. Термометр помещен в защитный кожух 4, покрытый слоем стеклоткани 3, на которую нанесен слой

раствора хлористого лития.

Специфика работы ИП заключается в поддержании его более высокой температуры по сравнению с температурой окружающей среды. При этом разбавленный раствор хлористого лития, которым пропитан слой стеклоткани, нагревается в результате прохождения тока между электродами, вследствие чего раствор испаряется. По мере повышения концентрации раствора уменьшается его проводимость. Диапазон использования датчика ограничен физико-химическими свойствами хлористого лития в различных температурных режимах. Точность измерения относительной влажности в рабочем диапазоне можно оценить, зная точность измерения температуры точки росы и температуры окружающей среды.

Для контроля влажности твердых и сыпучих веществ широко применяется диэлькометрический преобразователь, в котором используется эффект изменения диэлектрической проницаемости вещества в зависимости от его влажности. Для большинства твердых веществ, являющихся диэлектриками, в сухом состоянии относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2 \dots 10$, а для воды — $\epsilon = 81$. Поэтому даже незначительное изменение влажности вещества заметно влияет на его диэлектрическую проницаемость.

Для сыпучих веществ и жидкостей в качестве ИП применяются плоские и цилиндрические конденсаторы. Изменение влажности материала приводит к изменению емкости конденсатора ИП.

ИП влажности этого типа работают на частотах от 50 Гц до десятков мегагерц.

2.3. УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Управляющие устройства автоматики выполняют функции усиления сигналов, хранения, передачи и обработки информации с целью формирования управляющего сигнала. Управляющие устройства непосредственно

не связаны с объектом: информацию о состоянии объекта они получают от ИП, а сформированный в соответствии с требуемым алгоритмом управления управляющий сигнал подается на исполнительный механизм, который воздействует на управляемый объект.

Для автоматического управления и регулирования несложных объектов, имеющих простые алгоритмы функционирования (стабилизацию, программное управление, слежение), применяют простые управляющие устройства: усилители, реле, логические устройства, регуляторы прямого и косвенного действия, формирующие релейные или непрерывные законы регулирования (П, И, ПИ, ПИД).

Для реализации более сложных алгоритмов функционирования объекта (поиск экстремума показателя качества, оптимальное управление, самоприспособление и др.), осуществления взаимосвязанного регулирования нескольких параметров объекта, многоступенчатой защиты, логических операций при пуске и остановке объекта и т. п. используются более сложные управляющие устройства, которые входят в агрегатные комплексы автоматики, предусмотренные номенклатурой ГСП, и управляющие вычислительные машины.

В качестве управляющих устройств перспективно применять микроконтроллеры и микропроцессорные системы, выполненные в виде больших интегральных схем (БИС) и обладающие рядом технических и эксплуатационных преимуществ.

Здесь будут рассмотрены только простейшие управляющие устройства: усилители, реле и логические элементы, широко используемые при автоматизации сельскохозяйственных объектов.

2.3.1. Усилительные устройства

Усилители как элементы систем автоматического управления предназначены для усиления по мощности сигналов управления (или сигнала ошибки) до уровня необходимого для управления исполнительными механизмами. Усилитель представляет собой устройство, в котором сравнительно маломощным входным сигналом можно управлять передачей большой мощности от источника энергии к нагрузке, то есть исполнительному механизму или другому элементу системы автоматического управления.

Усилительные устройства систем автоматического уп-

равления и регулирования классифицируются по виду энергии первичного источника питания и по типу усиленного (или распределительного) элемента.

По виду используемой энергии усилители делятся на электрические, гидравлические и пневматические. К группе электрических усилителей в зависимости от типа усиленного (управляющего) элемента относятся ламповые, полупроводниковые, магнитные, электромагнитные и электромеханические усилители. Гидравлические и пневматические усилители имеют общие принципы действия и в зависимости от типа усиленного (распределительного) элемента подразделяются на дроссельные и струйные.

Усилительные устройства используются в системах автоматического регулирования как самостоятельные элементы, так и в составе регуляторов и исполнительных механизмов.

К усилителям, используемым в системах автоматического управления и регулирования, предъявляют следующие основные требования:

усилитель должен иметь требуемый коэффициент передачи (усиления) по мощности и другим параметрам;

постоянная времени усилителя, характеризующая его быстродействие, должна быть малой по сравнению с этими же характеристиками других элементов системы;

статическая характеристика усилителя в рабочей зоне изменения выходной и входной величин должна быть линейной;

порог чувствительности усилителя должен быть минимальным и не превышать допустимого значения.

Наряду с этими требованиями существенное значение имеют технологические, эксплуатационные и экономические показатели. Основной показатель усилителя — его коэффициент усиления по мощности

$$k_y = \Delta P_{\text{вых}} / \Delta P_{\text{вх}}, \quad (2.49)$$

где $\Delta P_{\text{вх}}$, $\Delta P_{\text{вых}}$ — приращение мощности на входе и на выходе усилителя.

Наряду с общей функцией усиления по мощности усилительное устройство может выполнять функцию усиления лишь одного из параметров, входящих в выражение мощности, при значении второго параметра, равном нулю или близком к нему.

Входные величины усилителя в зависимости от его типа — это ток и напряжение, скорость перемещения уп-

равляющего элемента и момент сопротивления или расход и давление рабочего тела (в гидравлических и пневматических усилителях). Выходные величины — это ток и напряжение, расход и давление рабочего тела (жидкости, газа) на входе исполнительного механизма.

Электрические усилители. Для различного вида электрических усилителей основными показателями являются коэффициент усиления по напряжению

$$k_U = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} \quad (2.50)$$

и по току

$$k_I = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}}, \quad (2.51)$$

где ΔU , ΔI — соответственно приращения напряжения и тока на выходе и на входе усилителя.

По виду статической характеристики, связывающей выходную и входную величины усилителей, последние подразделяются на линейные и существенно нелинейные устройства.

Существенно нелинейные характеристики имеют усилители релейного типа. Такие характеристики могут иметь также зону нечувствительности, насыщение, гистерезис.

Электронные усилители. В качестве управляющих устройств в электронных усилителях применяются электронные лампы, ионные и полупроводниковые приборы. Электронные усилители имеют высокую чувствительность (большой коэффициент усиления) и обладают способностью усиливать сигналы весьма малой мощности.

В связи с развитием полупроводниковой технологии в устройствах автоматики применяются преимущественно полупроводниковые усилители. Последние обеспечивают высокий КПД при низких напряжениях питания и больших токах, имеют малые габаритные размеры и большой срок службы.

В системах автоматического управления применяются транзисторные и тиристорные усилители. Коэффициент усиления транзисторных и тиристорных усилителей на один каскад имеет следующие значения:

$$\begin{aligned} \text{усиление по напряжению } k_U &\leq 100 \\ \text{усиление по току } k_I &\leq 100 \\ \text{усиление по мощности } k_P &= 10^2 \dots 10^4 \end{aligned}$$

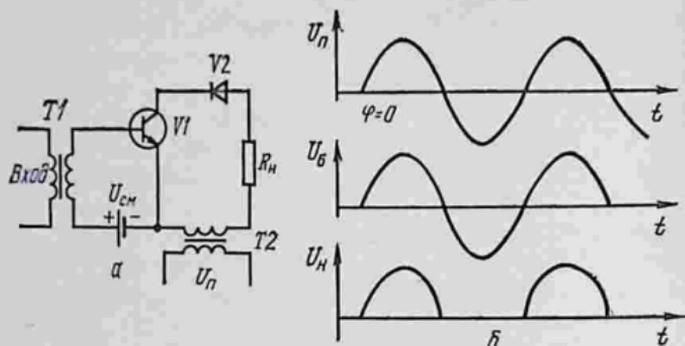


Рис. 2.14. Фазочувствительный усилитель на транзисторе:
 а — схема; б — графики тока.

Максимальная выходная мощность достигает 10 кВт при КПД, равном 96...98%.

Усилители, включенные последовательно, составляют многокаскадное усилительное устройство.

Применяются усилители постоянного и переменного тока.

Усилители переменного тока с выходной мощностью до десятков ватт находят широкое применение в устройствах электроавтоматики в основном для управления двухфазными индукционными электродвигателями. Мощность, потребляемая обмоткой управления двигателя, состоит из активной и реактивной составляющих, причем только активная составляющая мощности совершает полезную работу. Для компенсации реактивной мощности двигателя параллельно или последовательно с управляющей обмоткой включают конденсатор.

В схемах окончательных каскадов транзисторы включают по схеме с общим эмиттером, обеспечивающей максимальное усиление по мощности.

Фазочувствительный усилитель, схема которого показана на рисунке 2.14, а, применяется в релейных регуляторах. Усилитель питается переменным напряжением через трансформатор $T2$. Нагрузка R_n включена в цепь коллектора транзистора $V1$ через диод $V2$. Ток через нагрузку может протекать только в течение половины периода в том случае, когда транзистор открывается током в цепи база — эмиттер, то есть когда входное переменное напряжение совпадает по фазе с напряжением питания. Основным условием работы фазочувствительного

каскада является равенство частоты переменного тока входного сигнала и напряжения питания. Для этого оба напряжения должны быть получены от одного источника. Графики напряжений в цепи базы транзистора и в нагрузке показаны на рисунке 2.14, б.

Значение выходного напряжения усилителя зависит от амплитуды и фазы тока входного сигнала: выходное напряжение пропорционально в определенном диапазоне изменения входного сигнала, за пределами этого диапазона выходное напряжение остается неизменным. Среднее выпрямленное значение напряжения на нагрузке от напряжения входного сигнала определяется выражением

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} U_m \cos \varphi / 2, \quad (2.52)$$

где U_m — амплитуда напряжения питания; φ — начальная фаза сигнала.

При $\varphi = 0$ напряжение на нагрузке имеет наибольшее значение. С увеличением угла сдвига фаз φ напряжение на нагрузке уменьшается, и при $\varphi = \pm 180^\circ$ оно равно нулю.

Если транзистор фазочувствительного усилителя работает в ключевом режиме, то входной сигнал будет переключать транзистор при некоторой начальной амплитуде сигнала и выходное напряжение не будет практически зависеть от амплитуды управляющего сигнала.

Усилители постоянного тока применяются в системах автоматического управления для усиления напряжений и токов малого уровня, получаемых от термоэлектрических датчиков.

Выполненные на основе интегральной технологии усилители постоянного тока называют операционными уси-

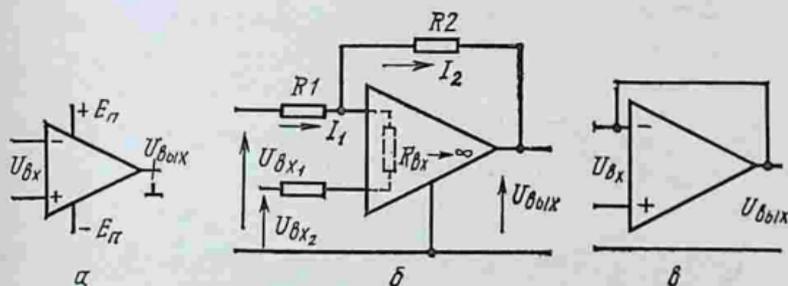


Рис. 2.15. Операционные усилители:

а — обозначение операционного усилителя; б — идеальный операционный усилитель; в — схема повторителя напряжения на операционном усилителе.

лителями. Они содержат несколько каскадов усиления и корректирующие цепи для улучшения их статических и динамических характеристик. Операционные усилители имеют высокую чувствительность, низкий порог чувствительности, малый дрейф напряжения от температуры, высокое быстродействие. Первый каскад операционного усилителя выполнен по дифференциальной схеме. Условное обозначение операционного усилителя показано на рисунке 2.15, а.

Операционный усилитель имеет коэффициент усиления порядка 1000...100 000 и более, а входное сопротивление — до 1000 МОм и более. Выходное сопротивление усилителя малое и равно 1000 Ом и менее. Усилитель имеет дифференциальный вход и усиливает разность напряжений, приложенных к обоим входам. Если увеличение входного напряжения относительно общей точки вызывает уменьшение выходного напряжения, то этот вход называют инвертирующим и на схеме обозначают знаком минус, а второй вход — неинвертирующим и обозначают знаком плюс.

Основное уравнение идеального операционного усилителя получают из схемы включения, показанной на рисунке 2.15, б.

Для идеального усилителя принимают следующие допущения: коэффициент усиления $k \rightarrow \infty$, входное сопротивление $R_{вх} \rightarrow \infty$, выходное сопротивление $R_{вых} \rightarrow 0$.

На основании законов Кирхгофа для идеального операционного усилителя (рис. 2.15, б) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_{вх1} - I_1 R_1 + e_{вх} - U_{вх2} &= 0; \\ U_{вх1} - I_1 R_1 - I_2 R_2 - U_{вых} &= 0. \end{aligned}$$

С учетом того что $I_{вх} = 0$ и $e_{вх} = 0$, получим

$$U_{вых} = -\frac{R_2}{R_1} U_{вх1} + \frac{R_2}{R_1 + 1} U_{вх2}. \quad (2.53)$$

Если $U_{вх2} = 0$, то коэффициент передачи такого усилителя определяется из уравнения (2.53)

$$k_U = -R_2/R_1. \quad (2.54)$$

Такой усилитель называется инвертирующим масштабным. В неидеальном операционном усилителе на значение выходного напряжения влияют напряжение смещения, при котором выходное напряжение равно нулю, значение

входного тока $I_{вх}$ и разность входных токов $\Delta I_{вх}$ при входном напряжении, равном нулю, которые обуславливают погрешность коэффициента усиления от изменения температуры и других внешних факторов. Эту погрешность определяют по формуле

$$\frac{\Delta k_U}{k_U} = \frac{\Delta k/k}{1 + k/k_U} \quad (2.55)$$

Коэффициент передачи неинвертирующего усилителя определяется из уравнения (2.53) при $U_{вх1}=0$:

$$k_U = R_2 / (R_1 + 1) \quad (2.56)$$

Если требуется согласовать высокое внутреннее сопротивление источника сигнала с низким сопротивлением нагрузки, то используют повторитель напряжения, схема которого показана на рисунке 2.15, в.

Коэффициент передачи повторителя $k_U = 1$.

Входное сопротивление

$$R'_{вх} = k R_{вх} \quad (2.57)$$

Выходное сопротивление

$$R'_{вых} = R_{вых} / (1 + k) \quad (2.58)$$

На основе прецизионных операционных усилителей выполняют электронные нормирующие преобразователи для получения унифицированных электрических сигналов постоянного тока ГСП: 0...5 мА, 0...20 мА, 0...10 В.

В тиристорных усилительных устройствах в качестве управляющего элемента используют тиристор. Схема тиристорного усилителя показана на рисунке 2.16, а.

Тиристор может находиться только в двух устойчивых состояниях: включенном и выключенном. Благодаря интенсивности развития лавинного процесса включение тиристора происходит практически мгновенно ($t_{вкл} = 1...5$ мкс), и после этого он остается во включенном состоянии даже при снятии управляющего сигнала. Отключение тиристора осуществляется снятием анодного напряжения. Время отключения тиристора составляет $t_{от} = 5...50$ мкс. Поскольку при питании усилителя переменным током ток в течение каждого полупериода переходит через нуль, то создаются естественные условия для отключения тиристора.

В усилитель входит также схема управления тиристорами. Перевод тиристора из закрытого состояния в открытое осуществляется подачей сигнала на управляющий электрод. При питании усилителя переменным током применяется

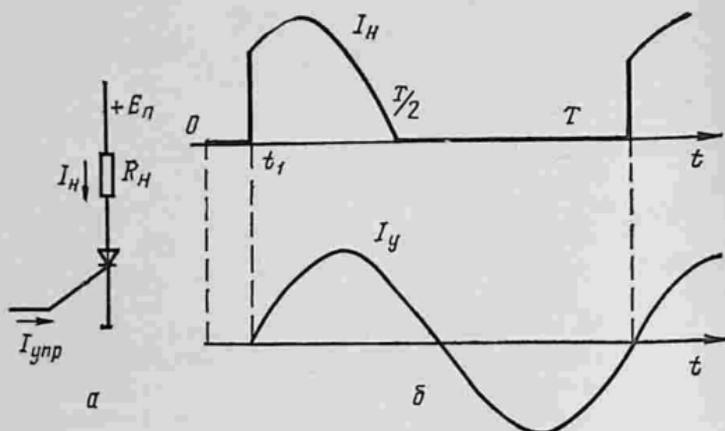


Рис. 2.16. Схема тиристорного усилителя (а) и диаграммы токов (б).

фазовый метод управления, основанный на изменении фазы управляющего сигнала относительно фазы питающего напряжения или на изменении угла (интервала) между фиксированным моментом включения тиристора и моментом его выключения. Диаграммы токов тиристорного усилителя при фазовом управлении показаны на рисунке 2.16, б.

Когда амплитуда управляющего тока I_y достигает определенного значения, тиристор открывается и в нагрузке протекает ток. Среднее за период значение тока

$$I_{cp} = 1/T \int_{t_1}^{T/2} I_n dt. \quad (2.59)$$

При изменении фазы управляющего сигнала в пределах $0 < \alpha < \pi$ (или времени включения в пределах $0 < t_1 < T/2$) напряжение на нагрузке изменяется в пределах от максимального значения до нуля.

В схемах управления применяются фазосдвигающие устройства, одно из которых показано на рисунке 2.17. Фазосдвигающим устройством является RC — мост, где в качестве регулируемого активного сопротивления используется транзистор V . На выходе моста напряжение U_c сдвинуто по фазе относительно напряжения питания $U_{фy}$, причем угол сдвига регулируют измерением напряжения U_y .

Магнитные усилители. Магнитным усилителем (МУ) называется электромагнитный аппарат, предназначенный

для управления относительно большой мощностью переменного тока посредством малой мощности постоянного тока. Управляющий элемент магнитного усилителя — катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником. Принцип действия магнитного усилителя основан на зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных материалов катушки с сердечником при питании переменным током от подмагничивающего действия постоянного поля. Схема магнитного усилителя показана на рисунке 2.18, а.

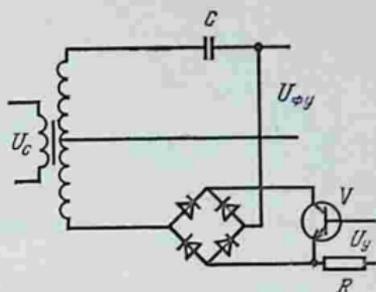


Рис. 2.17. Схема мостового фазосдвигающего устройства.

Магнитный усилитель состоит из двух рабочих катушек ω_1 и ω_2 , намотанных на двух сердечниках I и II из ферромагнитного материала, и катушки управления ω_y , намотанной на стержнях обоих сердечников магнитопровода.

Рабочие катушки соединены таким образом, чтобы их переменные магнитные потоки Φ во внутренних стержнях магнитопровода были направлены навстречу, вследствие чего электродвижущие силы, индуцируемые переменными магнитными потоками Φ в обмотке управления ω_y , будут взаимно компенсироваться.

Входная величина МУ — напряжение U_y или ток I_y в обмотке управления. Выходная величина МУ — переменный ток в сопротивлении нагрузки R_n . Значение этого тока

$$I_n = U/z = U/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (2.60)$$

где $R = R_n + R_w$ — сумма активного сопротивления нагрузки и рабочих катушек МУ; $\omega L = \omega(L_1 + L_2)$ — сумма реактивных сопротивлений рабочих катушек ω_1 и ω_2 МУ.

Индуктивность рабочих обмоток МУ

$$L_1 = L_2 = (\omega^2 S/l) \mu,$$

где ω — число витков катушки; S — площадь сечения сердечника; l — длина средней линии сердечника; μ — коэффициент магнитной проницаемости сердечника.

Протекающий по обмотке управления постоянный ток меняет насыщение магнитопровода, изменяя при этом его динамическую магнитную проницаемость. При увеличении тока управления уменьшается реактивное сопротивление

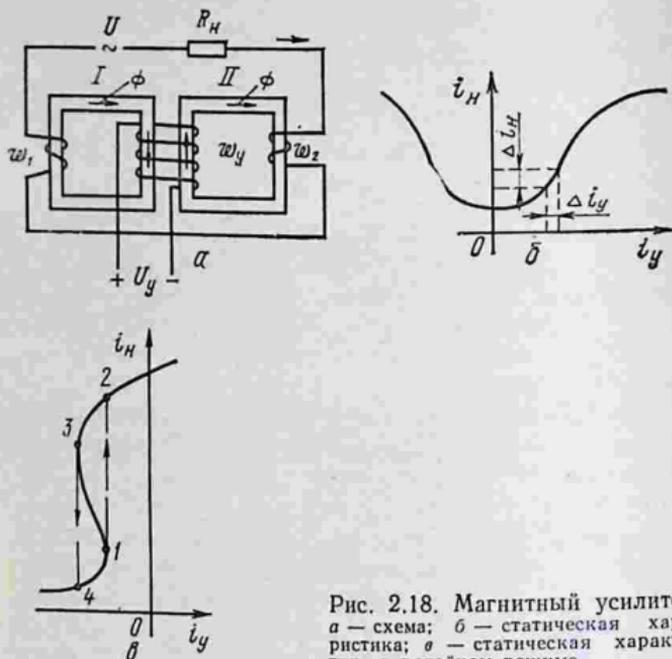


Рис. 2.18. Магнитный усилитель:
 а — схема; б — статическая характеристика; в — статическая характеристика в релейном режиме.

рабочих катушек МУ и увеличивается ток, протекающий через сопротивление нагрузки. Статическая характеристика МУ, представляющая собой зависимость тока нагрузки от тока управления, показана на рисунке 2.18, б.

Коэффициент усиления по току

$$k_I = \Delta I_n / \Delta I_y. \quad (2.61)$$

Коэффициент усиления МУ по мощности

$$k_P = (\Delta I_n / \Delta I_y) (U_n / U_y) = \Delta P_n / \Delta P_y. \quad (2.62)$$

Для получения большего коэффициента усиления следует обеспечить работу МУ на наиболее крутом участке рабочей характеристики. Это достигается смещением характеристики дополнительным подмагничиванием магнитопровода с помощью обмотки смещения. Обмотка смещения намотана на том же сердечнике, что и обмотка управления, и питается от источника постоянного напряжения.

Коэффициент усиления МУ зависит от материала магнитопровода и от частоты переменного тока. Для МУ с магнитопроводом из электротехнической стали коэффициент уси-

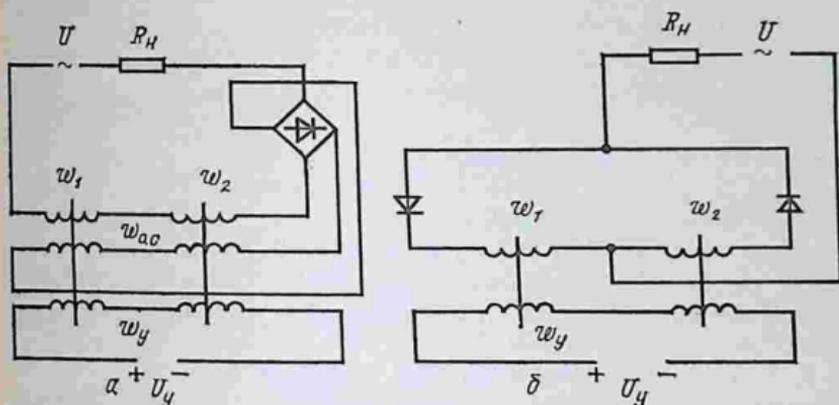


Рис. 2.19. Схемы МУ с внешней (а) и внутренней (б) обратной связью.

ления составляет 50. . .200 при частоте переменного тока 50 Гц и 100. . .800 при частоте 500 Гц. Для МУ с магнитопроводом из пермаллоя коэффициент усиления равен 100. . .1000 при частоте переменного тока 50 Гц и 200. . .2000 при частоте 500 Гц.

Значительно больший коэффициент усиления может быть достигнут в МУ с положительной обратной связью. Коэффициент усиления по мощности у МУ с положительной связью, выполненных на сердечниках из электротехнической стали, при частоте 50 Гц достигают 1000, а на сердечнике из пермаллоя — 3000. . .10 000.

Если обратная связь получается путем использования в МУ отдельной обмотки, то такая обратная связь называется внешней. Она характеризуется коэффициентом обратной связи, который определяют выражением

$$k_{o.c} = w_{o.c.}/w_p, \quad (2.63)$$

где $w_{o.c.}$ — число витков катушки обратной связи; w_p — число витков рабочей обмотки.

Если обратная связь образуется за счет прохождения постоянной составляющей рабочего тока, то она называется внутренней. Схемы обратной связи показаны на рисунке 2.19. Магнитный усилитель, схема которого показана на рисунке, называется однотактным МУ.

Коэффициент усиления МУ с обратной связью

$$k_{i.o.c}^* = k_i \frac{1}{1 \pm k_{o.c}}, \quad (2.64)$$

где k_i — коэффициент усиления МУ без обратной связи.

Знак минус относится к положительной обратной связи. Когда $k_o \geq 1$, то МУ переходит в релейный режим и его рабочая характеристика имеет вид, показанный на рисунке 2.18, в.

При увеличении тока управления рабочий ток в нагрузке изменяется до точки 1 на характеристике и скачком увеличивается до значения в токе 2. При дальнейшем увеличении тока управления рабочий ток увеличивается незначительно. При уменьшении тока управления рабочий ток плавно изменяется до точки 3, а затем скачком изменяется до значения его в точке 4.

К недостаткам обычных МУ следует отнести их малое быстродействие, которое определяется постоянной времени цепи управления

$$T_y = \frac{1}{4f} \frac{R\omega_y^2}{R_y\omega_p^2}, \quad (2.65)$$

частота переменного тока; R , ω_p — активное сопротивление и витков рабочих обмоток; R_y , ω_y — сопротивление и число витков обмотки управления.

Передаточная функция МУ имеет вид

$$W(s) = k/(T_y s + 1). \quad (2.66)$$

Гидравлические и пневматические усилители. В конструктивном отношении гидравлические и пневматические усилители имеют много общего и отличаются только энергоносителем (рабочим телом), в качестве которого в гидравлических усилителях используется жидкость под высоким давлением, а в пневматических — газ.

Гидравлические и пневматические усилители конструктивно выполняются совместно с исполнительными устройствами. Эти усилители обладают рядом существенных преимуществ: большим коэффициентом усиления по мощности, высоким быстродействием, малыми габаритами, малой металлоемкостью на 1 кВт выходной мощности. Недостаток их применения — необходимость использовать специализированные источники питания (гидравлические насосы, компрессоры).

Гидравлические и пневматические усилители предназначены для усиления мощности сигналов, подаваемых на их вход, и преобразование и усиление по мощности потока рабочей жидкости или газа. Усиление мощности осуществляется за счет использования энергии внешних источников. Под воздействием внешних входных сигналов постоянной

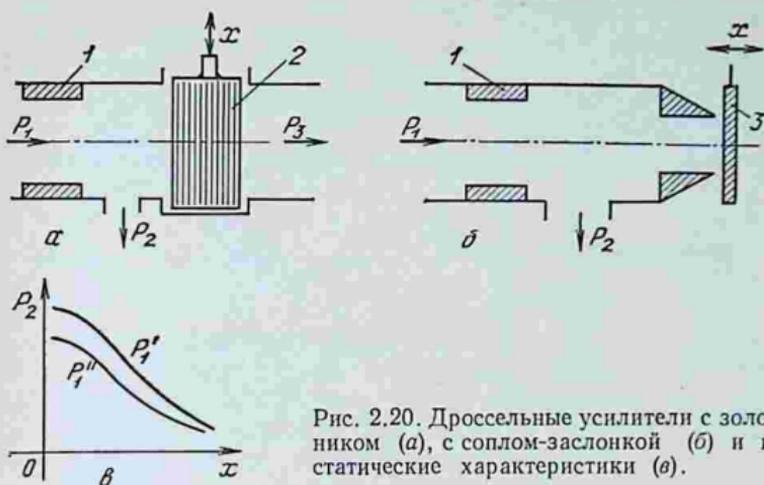


Рис. 2.20. Дроссельные усилители с золотником (а), с соплом-заслонкой (б) и их статические характеристики (в).

мощности эти усилители изменяют мощность потока рабочей жидкости или газа, поступающего с выхода усилителя на вход гидро- или пневмодвигателя, от нуля до некоторой максимальной величины.

Изменение по значению и по направлению линейной или угловой скорости перемещения выходного вала двигателя используется для изменения положения управляющего органа объекта.

По принципу действия усилители делятся на два класса: дроссельные и струйные. Дроссельные усилители делятся на золотниковые и с соплом-заслонкой. Схематическое изображение дроссельных усилителей и их статические характеристики показаны на рисунке 2.20.

Рассмотрим работу дроссельных усилителей. Рабочая жидкость или воздух под постоянным давлением p_1 подается через дроссель 1 и через дроссель, образуемый золотником 2 или заслонкой 3. Площадь сечения второго дросселя изменяют перемещением золотника 2 или заслонки 3.

Давление p_2 , которое устанавливается между дроссели, зависит от величины x и используется для воздействия на поршень или мембрану исполнительного механизма. Статическая характеристика дроссельного усилителя показана на рисунке 2.20, в. Для повышения выходной мощности применяют двухкаскадное включение дроссельных усилителей.

Упрощенная принципиальная схема гидравлического усилителя со струйной трубкой показана на рисунке 2.21, а.

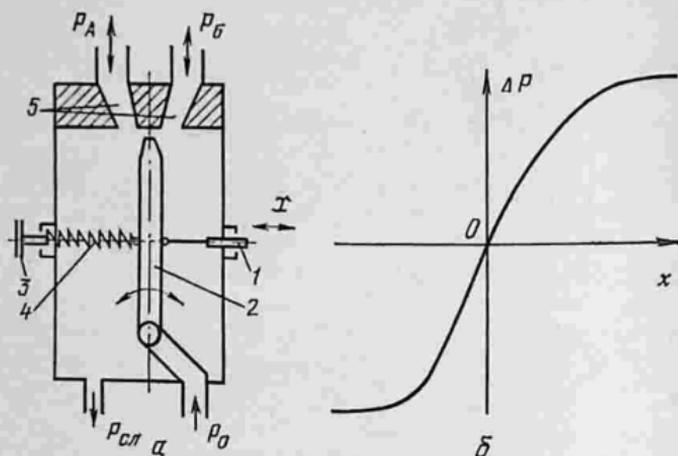


Рис. 2.21. Схема гидравлического усилителя со струйной трубкой (а) и его статическая характеристика (б):

1 — толкатель; 2 — струйная трубка; 3 — винт; 4 — пружина; 5 — приемные сопла.

В корпусе усилителя находится трубка 2, один конец которой выполнен в виде конического насадка. Другой конец трубки закреплен на оси, перпендикулярной плоскости рисунка. От источника питания через ось в струйную трубку подается рабочая жидкость под постоянным давлением P_0 . На струйную трубку опирается с одной стороны толкатель 1, соединенный с датчиком перемещения, а с другой стороны — пружина 4, начальное натяжение которой может быть изменено винтом 3. В автоматических регуляторах пружина 4 может выполнять функции задатчика. Струйная трубка может поворачиваться на небольшие углы. Напротив конического насадка струйной трубки расположены параллельно сопла 5, соединенные трубопроводами с гидравлическим двигателем. Аналогично выполнены и пневматические струйные усилители.

Работа струйного усилителя основана на преобразовании давления жидкости или газа в кинетическую энергию струи, которая перемещением струйной трубки направляется в приемные сопла усилителя и обратно преобразуется в энергию давления. Гидравлический или пневматический механизм преобразует энергию давления в линейное или угловое перемещение выходного вала. Когда конический насадок струйной трубки находится посередине между при-

емными соплами, давление в последних одинаково. По мере смещения струйной трубки давление в одном приемном сопле вырастает, а во втором уменьшается. При смене направления смещения изменяется и давление в приемных соплах усилителя.

Статическая характеристика струйного усилителя показана на рисунке 2.21, б.

2.3.2. Реле

Общая характеристика реле. Реле — это электрический аппарат, в котором при плавном изменении входной (управляющей) величины и достижении ею определенного значения происходит скачкообразное изменение выходной (управляемой) величины.

Функции, выполняемые реле, и их конструкции чрезвычайно разнообразны. В связи с этим и классифицируют реле по ряду различных признаков. Наиболее целесообразно классифицировать реле по роду физической величины, на которую они реагируют. В соответствии с этим различают реле токовые, напряжения, мощности, тепловые, оптические и т. п. При этом следует отметить, что реле может реагировать не только на значение конкретной величины, но и на разность значений (дифференциальные реле), на изменение знака величины (поляризованные реле) или на скорость изменения входной величины.

Реле обычно состоит из трех основных функциональных элементов: воспринимающего, промежуточного и исполнительного. Воспринимающий (первичный элемент) воспринимает контролируемую величину x и преобразует ее в другую физическую величину y (например, в контактных реле — в механическую силу).

Промежуточный элемент (у контактных реле — это обычно пружина) сравнивает значение преобразованной величины с заданным значением и при превышении установленного (заданного) значения передает первичное воздействие на исполнительный элемент.

Исполнительный элемент (у контактных реле — подвижная контактная система) воздействует непосредственно на управляемую цепь, замыкая или размыкая свои контакты.

В ряде конструктивных исполнений реле может быть четвертый элемент — элемент, создающий выдержку времени между моментом времени, когда воспринимающий эле-

мент воспринимает контролируемую величину, и моментом срабатывания исполнительного элемента.

Воспринимающий элемент в зависимости от назначения реле и рода физической величины, на которую он реагирует, может иметь различные исполнения как по принципу действия, так и по устройству. Например, в реле максимального тока или реле напряжения воспринимающий элемент выполнен в виде электромагнита, в реле давления — в виде мембраны или сильфона, в реле уровня — в виде поплавка и т. д. Воспринимающий элемент электрических реле по принципу действия может быть электромагнитной системы, индукционной, тепловой и т. д. В связи с этим различают, например, реле тока электромагнитное, реле тока индукционное и т. п.

Нейтральные электрические реле. В зависимости от способа включения воспринимающего элемента различают реле первичные, вторичные и промежуточные. Первичные реле включаются непосредственно в контролируемую цепь. Вторичные реле включаются в контролируемую цепь через измерительные трансформаторы тока или напряжения. Воспринимающие элементы промежуточных реле включаются в цепь через исполнительные органы первичных или вторичных реле и служат обычно для размножения и (или) усиления сигнала.

По принципу действия исполнительных элементов различают реле контактные и бесконтактные. Контактные реле воздействуют на управляемую цепь путем замыкания или размыкания ее своими контактами. Бесконтактные реле осуществляют управление путем скачкообразного (релейного) изменения параметров своего исполнительного элемента, включенного в управляемую цепь.

В зависимости от области применения (то есть по функциональному признаку) реле делятся на реле защиты, управления, автоматики и связи.

Рассмотрим принцип работы реле с замыкающим контактом (рис. 2.22, а). При отсутствии входного сигнала контакты исполнительного элемента реле разомкнуты и ток в управляемой цепи равен нулю. Значение входной величины, при которой происходит срабатывание реле, называется значением величины срабатывания — $x_{ср}$.

До тех пор, пока $x < x_{ср}$, выходная величина $y = 0$ (или $y = y_{\min}$ для бесконтактных реле). При $x = x_{ср}$ выходная величина скачком изменяется от 0 до y_{\max} (рис. 2.22, б), происходит срабатывание реле (контакт замыкается). Если

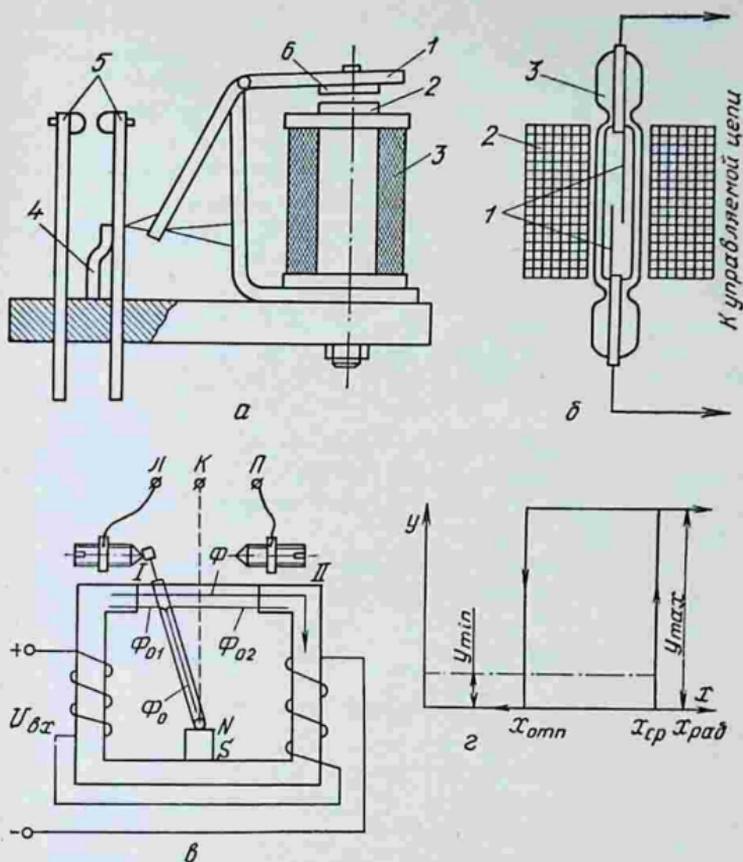


Рис. 2.22. Реле:

a — электромагнитное; *б* — геркон; *в* — поляризованное; *г* — статическая характеристика электромагнитного реле; 1 — подвижный якорь; 2 — неподвижный сердечник; 3 — обмотка электромагнита; 4 — пружина противодействующая; 5 — контакты; 6 — штифт отлипания.

входную величину x уменьшить, то при достижении $x \leq x_0$ произойдет отпускание реле (выходная величина примет нулевое значение — контакты реле разомкнутся).

Значение входной величины, при которой происходит скачкообразное уменьшение выходной величины от y_1 до 0, называется значением величины отпускания.

Заданное значение величины срабатывания или отпускания, на которое отрегулировано реле, называется уставкой по воздействующей величине.

Время с момента подачи сигнала на срабатывание до момента скачкообразного изменения выходной величины называется временем срабатывания. Это время зависит от конструкции реле и значения входного параметра (обычно $t_{ср} = 0,001 \dots 0,25$ с). Чем больше значение входного параметра по сравнению с $x_{ср}$, тем быстрее и надежнее работает реле. Отношение рабочего значения входного параметра к величине срабатывания называется коэффициентом запаса

$$k_з = x_{раб}/x_{ср}. \quad (2.67)$$

Отношение величины отпускания к величине срабатывания называется коэффициентом возврата

$$k_в = x_{отп}/x_{ср} < 1. \quad (2.68)$$

Время с момента подачи сигнала на отключение до момента прекращения воздействия исполнительного элемента на управляемую цепь называется временем отключения или временем отпускания.

Весьма важным параметром, характеризующим усиительные свойства реле, является отношение мощности управления $P_{упр}$ к минимальной мощности входного сигнала $P_{ср}$, при котором происходит срабатывание реле:

$$k_y = P_{упр}/P_{ср}. \quad (2.69)$$

К реле управления и автоматики предъявляются повышенные требования в отношении коммутационной и механической износостойкости. Наиболее слабый элемент контактных реле — контактная система. Исходя из требований износостойкости для реле устанавливаются допустимая частота срабатывания в единицу времени и срок службы (или наработка).

Наиболее широкое распространение получили электромагнитные реле, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитного поля катушки, обтекаемой током, с ферромагнитным якорем. Воспринимающим органом электромагнитных реле является обмотка, а коммутирующим — контакты. По роду входного тока различают реле постоянного и переменного тока. В свою очередь, реле постоянного тока подразделяют на нейтральные электромагнитные и поляризованные реле, работа которых зависит от полярности сигнала.

Электромагнитные реле получили широкое распространение благодаря своей простоте и высоким коммутационным свойствам (сопротивление между разомкнутыми контактно-

ми парам обычно составляет $1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^8$ Ом, а в замкнутом состоянии $1 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ Ом). В конструктивном отношении нейтральные электромагнитные реле могут быть с поворотным или втягивающим якорем, а также безъякорные: ферриды и герконы.

Широкое распространение получили реле серий РПУ-1, РПУ-2, ПЭ, РЭС и др.

Герконы. В последние годы широко начали применяться реле с герметизированными контактами (герконы). При прохождении тока по обмотке реле 2 (рис. 2.22, б) возникает магнитное поле, намагничивающее контакты 1, расположенные внутри стеклянного баллона 3, заполненного инертным газом. При этом контакты 1 замыкают электрическую цепь управления.

Реле на герконах выпускаются с памятью, то есть сохраняющие положение контактов и после прекращения действия управляющего сигнала, и без наличия памяти, обеспечивающие возврат контактов в разомкнутое (исходное) состояние после снятия управляющего сигнала.

В зависимости от потребляемой мощности реле на герконах можно разделить на высокочувствительные (до 100 мВт) и слаботочные (до 50 Вт постоянного тока и 500 В·А переменного тока).

Поляризованное реле в отличие от нейтрального электромагнитного реле постоянного тока имеет дополнительный постоянный магнит, вследствие чего направление перемещения якоря реле зависит от направления тока, протекающего по его обмотке (рис. 2.22, в). Поток Φ_0 , создаваемый постоянным магнитом, проходит через якорь и каждую из полуветвей магнитной цепи. При этом если якорь будет в начальном состоянии находиться в положении 1 (левое положение якоря), то воздушный зазор между левым полюсом сердечника реле и якорем будет меньше, чем между правым полюсом и якорем, $\delta_1 < \delta_2$. В связи с этим поток $\Phi_{01} > \Phi_{02}$. Следовательно, электромагнитная сила, притягивающая якорь реле к левому полюсу сердечника, будет больше электромагнитной силы, притягивающей якорь к правому его полюсу (якорь остается при этом в положении 1).

При подаче напряжения в обмотку поляризованного реле ток, проходящий по ней, создает электромагнитный поток Φ . Его направление определяется направлением тока в обмотке реле (по правилу буравчика). В левом зазоре потоки Φ и Φ_{01} имеют противоположное направление, а в правом Φ и Φ_{02} совпадают по направлению. Следовательно, резуль-

тирующий вектор потока $\Phi + \Phi_{02}$ будет больше $\Phi + \Phi_{01}$ и якорь реле перебросятся в положение II (правое положение).

Отечественная промышленность выпускает поляризованные реле серии РП, допускающие максимальную частоту переключений до 200 в секунду. Они обладают высокой чувствительностью, устойчивостью к перегрузкам и быстродействием (время срабатывания 1,5 . . 2 мс).

2.3.3. Логические элементы

Логическим элементом называется устройство, реализующее простую логическую операцию с сигналами. Под логической операцией понимают связь между сигналами, которые могут принимать только два значения, одно из которых обозначается как «1» (единица), а другое — «0» (нуль).

Сигналы, принимающие только одно из двух названных выше значений, называются логическими переменными.

Источником логических переменных может быть любая физическая система, имеющая два устойчивых состояния (например, замкнутые контакты — разомкнутые контакты, есть напряжение — нет напряжения и т. д.). Одному из состояний приписывается состояние «1», а другому — «0».

Логические элементы служат основой построения более сложных логических схем для решения таких логических задач в устройствах и системах автоматики, как сигнализация, блокировка, защита, управление и т. д.

Входные переменные принято обозначать буквой x (x_1, x_2, \dots), а выходные — буквой y . Функциональная связь между выходными и входными логическими переменными называется логической функцией $y = \varphi(x_1, x_2, \dots)$.

К простейшим логическим операциям (или функциям) относятся логическое отрицание (инверсия), логические сложения и логические умножения. Эти операции имеют сокращенные названия: соответственно НЕ, ИЛИ, И. В алгебраической форме логические функции записываются в следующем виде:

$$\text{функция НЕ: } y = \bar{x} \quad (2.70)$$

$$\text{функция ИЛИ: } y = x_1 \vee x_2 \vee \dots \quad (2.71)$$

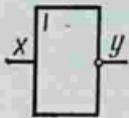
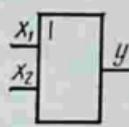
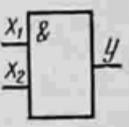
$$\text{функция И: } y = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \quad (2.72)$$

Кроме алгебраической записи логических функций, логические операции представляют в виде таблиц, которые называются таблицами истинности. В таблице устанавлива-

ется соответствие значений выходной переменной определенным значениям входных переменных.

Обозначения логических операций в соответствии с ГОСТ 2.743—72 приведены в таблице 2.3.

2.3. Условные обозначения простейших логических операций

Операция	Алгебраическая формула	Таблицы истинности	Обозначение															
НЕ (инверсия)	$y = \bar{x}$	<table border="1"> <tr> <td>x</td> <td>y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	x	y	0	1	1	0										
x	y																	
0	1																	
1	0																	
ИЛИ (дизъюнкция)	$y = x_1 \vee x_2$ или $(y = x_1 + x_2)$	<table border="1"> <tr> <td>x_1</td> <td>x_2</td> <td>y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	
x_1	x_2	y																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
И (конъюнкция)	$y = x_1 \wedge x_2$ или $(y = x_1 x_2)$	<table border="1"> <tr> <td>x_1</td> <td>x_2</td> <td>y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	
x_1	x_2	y																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

По физическим принципам логические элементы подразделяются на электромеханические (реле), электронные (полупроводниковые), пневматические и др.

Каждой логической операции соответствует определенная электрическая схема или состояние неэлектрического логического элемента (например, пневматического реле)

Входными и выходными сигналами электрических электронных логических элементов, как правило, является электрическое напряжение, а пневматических — давление воздуха.

Электромеханические реле выполняют логические операции в электрических схемах, так как их контакты могут находиться в двух состояниях (замкнутые, разомкнутые). Входными сигналами реле являются напряжения, подаваемые на катушки реле, а выходными — напряжения в цепи, создаваемой контактами реле.

Полупроводниковые логические элементы имеют ряд преимуществ перед релейными: высокое быстродействие,

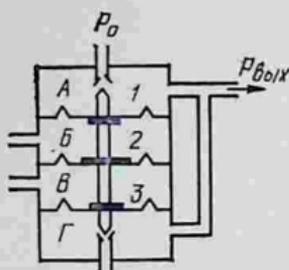


Рис. 2.23. Трехмембранное реле:

1, 2, 3 — мембраны; А, Б, В, Г — камеры.

малый габарит, высокая надежность и др. Их выполняют на диодах, транзисторах или их комбинациях.

Пневматические логические элементы выполнены на базе трехмембранного пневматического реле. Трехмембранное реле (рис. 2.23) состоит из четырех камер (А, Б, В, Г), разделенных гибкими мембранами 1, 2, 3. Мембраны соединены металлическим штоком. Верхний и нижний концы штока служат заслонками питающего и

сбросного сопл. Шток вместе с жесткими центрами мембран представляет собой жесткую мембранную сборку, которая может перемещаться в вертикальном направлении в зависимости от соотношения сил, создаваемых давлением воздуха в камерах на соответствующие мембраны.

При нарушении равновесия сил мембранная сборка перемещается вверх или вниз, открывает одно из сопел и закрывает другое. Если закрывается сбросное сопло и открывается питающее сопло, то давление на выходе примерно равно давлению питания. При обратном перемещении мембранной сборки давление на выходе уменьшается.

Пневматические сигналы подводятся через входные штуцера в камеры Б и В. Если в одной из камер создать предварительно избыточное давление, то пневматические реле выполняют логические операции.

Схемы выполнения простых логических операций различными элементами приведены в таблице 2.4.

Логические элементы характеризуются следующими основными параметрами: номинальными значениями входных и выходных сигналов, соответствующих логической единице («1») и логическому нулю («0»), потребляемой мощностью, быстродействием и др. Номинальные значения входных сигналов — значения сигналов, соответствующих логической «1» и логическому «0», при которых логический элемент переходит из одного устойчивого состояния в другое.

Потребляемая мощность определяется как средняя мощность, отбираемая логическим элементом от источника питания в двух крайних состояниях, соответствующих логическому «0» и логической «1».

Быстродействие логического элемента определяется вре-

2.4. Схемы логических элементов

Операция	Логические элементы		
	электромеханические	полупроводниковые	пневматические
НЕ			
ИЛИ			
И			

менем переключения из одного состояния в другое: t^{01} — время переключения из «0» в «1»; t^{10} — время переключения из «1» в «0».

Логические операции и логические соотношения изучает математическая логика, основы которой были заложены более 100 лет назад английским математиком Дж. Булем (1854).

Основные законы логики:
сочетательный

$$\left. \begin{aligned} (x_1 \vee x_2) \vee x_3 &= x_1 \vee (x_2 \vee x_3) \\ \text{и} \\ (x_1 \wedge x_2) \wedge x_3 &= x_1 \wedge (x_2 \wedge x_3); \end{aligned} \right\} \quad (2.73)$$

переместительный

$$\left. \begin{aligned} x_1 \vee x_2 \vee x_3 &= x_2 \vee x_3 \vee x_1 \\ \text{и} \\ x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 &= x_3 \wedge x_2 \wedge x_1; \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

распределительный

$$\left. \begin{aligned} (x_1 \vee x_2) \wedge x_3 &= x_1 \wedge x_3 \vee x_2 \wedge x_3 \\ \text{и} \\ x_1 \wedge x_2 \vee x_3 &= (x_1 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee x_3); \end{aligned} \right\} \quad (2.75)$$

инверсия

$$\overline{x_1 \vee x_2} = \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \quad (2.76)$$

и

$$\overline{x_1 \wedge x_2} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2. \quad (2.77)$$

Следствия законов алгебры логики:

$$\left. \begin{aligned} 1) x \vee 0 &= x; & 2) x \wedge 0 &= 0; \\ 3) x \vee 1 &= 1; & 4) x \wedge 1 &= x; \\ 5) x \vee x &= x; & 6) x \wedge x &= x; \\ 7) x \vee \bar{x} &= 1; & 8) x \wedge \bar{x} &= 0; \\ 9) x_1 \vee x_1 \wedge x_2 &= x_1; & 10) x_1 \wedge (x_1 \vee x_2) &= x_1; \\ 11) x_1 \vee x_1 \wedge x_2 &= x_1 \vee x_2; & 12) x_1 \vee x_1 \wedge x_2 &= \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.78)$$

Следствия законов алгебры логики используются для минимизации логических функций сложной системы с целью ее упрощения.

Пример 2.1. Сложную схему управления, которая состоит из контактов реле (рис. 2.24, а), необходимо минимизировать (упростить) и представить логическими элементами.

Для формализованной записи контактной схемы введем следующие обозначения контактов реле: разомкнутые контакты реле $P1$, $P2$ и $P3$ обозначим соответственно буквами x_1 , x_2 и x_3 , а замкнутый контакт реле $P1$ — \bar{x}_1 . Тогда схема может быть представлена в виде, показанном на рисунке 2.24, б, а структурная формула, учитывая, что параллельное соединение контактов представляет функцию ИЛИ, а последовательное И, имеет вид

$$y = x_1 \wedge [(x_2 \vee x_3) \wedge x_1 + x_2 \wedge (x_3 \vee \bar{x}_1 \wedge x_2)]. \quad (2.79)$$

На основании законов алгебры логики и их следствий выполним преобразования, раскрыв скобки:

$$y = x_1 \wedge (x_2 \vee x_3) \wedge x_1 + x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 + x_1 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_1 \wedge x_2.$$

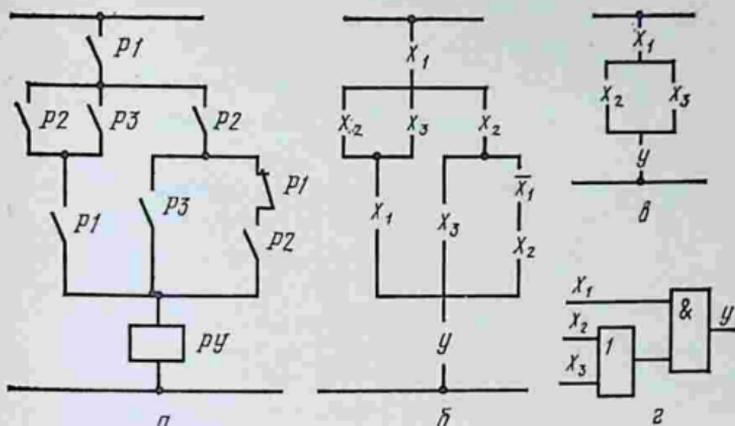


Рис. 2.24. Релейно-контактные схемы управления (к примеру 2.1).

На основании следствий (6) и (8) получим

$$\begin{aligned}
 y &= x_1 \wedge x_2 \vee x_1 \wedge x_3 \vee x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \vee 0 \wedge x_2 = \\
 &= x_1 \wedge x_2 \wedge (1 \vee x_3) \vee x_1 \wedge x_3 = x_1 \wedge (x_2 \vee x_3).
 \end{aligned}
 \tag{2.80}$$

Контактная схема упростилась и имеет вид, показанный на рисунке 2.24, а, а ее логическая схема, согласно формуле (2.80), — на рисунке 2.24, г.

Пример 2.2. Составить логическую схему управления электродвигателем насоса по следующему алгоритму: при заполнении резервуара насос отключается и остается отключенным, пока вода из резервуара расходуется до определенного нижнего уровня; затем электронасос включается и подает воду до полного заполнения резервуара. Далее процесс повторяется.

Для контроля уровня воды в резервуаре установлены два датчика ДВУ и ДНУ. Для контроля работы электронасоса установлен датчик потока ДП. Исполнительным механизмом установки служит магнитный пускатель электронасоса МП. Функционально-технологическая схема установки показана на рисунке 2.25.

Для составления схемы логического управления обозначим датчики ДНУ — x_1 , а ДВУ — x_2 , ДП — x_3 , а магнитный пускатель МП — y . Принимаем: $x_1=0$ (воды в резервуаре нет), $x_1=1$ (вода есть), $x_2=0$ (уровень не достиг ДВУ), $x_2=1$ (уровень достиг ДВУ), $x_3=0$ (электронасос не работает), $x_3=1$ (электронасос работает), $y=0$ (МП отключен) и $y=1$ (МП включен).

Исходя из требуемого алгоритма функционирования установки и принятых обозначений, составляем таблицу состояний (табл. 2.5). Ее заполняют, исходя из рассмотрения всех возможных комбинаций состояния датчиков и требуемого состояния магнитного пускателя.

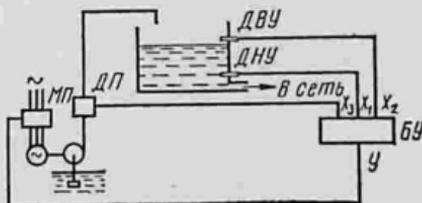


Рис. 2.25. Схема управления насосной установкой (к примеру 2.2)

2.5. Таблица состояний

№ п/п	x_1	x_2	x_3	y	Логическая формула
1	0	0	0	1	$\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3$
2	0	0	1	1	$\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3$
3	0	1	0	0	
4	0	1	1	0	
5	1	0	0	0	
6	1	0	1	1	$x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3$
7	1	1	0	0	
8	1	1	1	0	

Например, если воды в резервуаре нет ($x_1=0$, $x_2=0$) и насос не работает ($x_3=0$), то следует включить МП ($y=1$). МП должен оставаться включенным ($y=1$), если установка работает ($x_3=1$), пока уровень меньше ДВУ ($x_2=0$), что соответствует состояниям 2 и 6.

Во всех остальных случаях МП должен быть отключен ($y=0$).

Каждому состоянию $y=1$ соответствует логическая операция И сигналов датчиков, причем значению 0 соответствует инверсия состояния (\bar{x}_1 , \bar{x}_2 , \bar{x}_3).

Так как в каждом состоянии $y=1$ МП должен быть включен, то это представлено общей функцией ИЛИ:

$$y = (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3) \vee (\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3) \vee (x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3). \quad (2.81)$$

Дальнейшее упрощение выражения (2.81) выполняется на основании законов алгебры логики и из них следует

$$\begin{aligned} y &= \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge (\bar{x}_3 \vee x_3) + x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3 = \\ &= \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge 1 + x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3 = \bar{x}_2 \wedge (\bar{x}_1 \vee x_3). \end{aligned} \quad (2.82)$$

Логическая схема блока управления имеет вид, показанный на рисунке 2.26, а, а выполнение на электромагнитных реле — на рисунке 2.26, б.

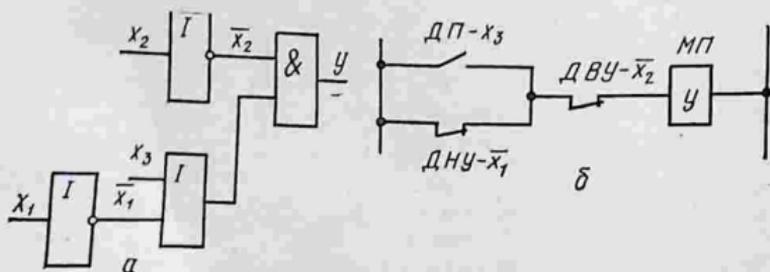


Рис. 2.26. Схема блока управления (к примеру 2.2):
а — логическая; б — на контактных реле.

2.4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

2.4.1. Общие характеристики исполнительных механизмов

Исполнительным механизмом (ИМ) называется устройство автоматики, воздействующее непосредственно или через согласующие элементы на регулирующий орган управляемого объекта. ИМ как часть системы автоматического регулирования предназначен для обработки управляющего сигнала, формируемого управляющими элементами автоматики таким образом, чтобы отклонение регулируемой величины от заданного значения становилось как можно меньше.

К ИМ предъявляют ряд требований, а именно:

- способность развивать необходимое перестановочное усилие или момент, достаточные для перестановки регулирующего органа объекта;

- обеспечивать перестановку регулирующего органа на требуемую величину;

- обеспечивать требуемую скорость и ускорение перемещения регулирующего органа;

- иметь высокие технико-экономические показатели (надежность, стоимость и др.).

ИМ классифицируют по основным признакам: виду энергии, характеру движения выходного органа, виду используемого двигателя и др.

В зависимости от вида энергии, используемой для питания двигателя, ИМ делятся на электрические, пневматические и гидравлические. По виду движения выходного органа ИМ подразделяются на поворотные и прямоходовые. Поворотные ИМ бывают однооборотные и многооборотные. В зависимости от типа двигателя ИМ делятся на электродвигательные, электромагнитные, поршневые и мембранные. В зависимости от скорости движения выходного органа различают ИМ с постоянной скоростью и ИМ, у которых скорость перемещения выходного органа пропорциональна входному сигналу.

В сельскохозяйственном производстве для автоматизации стационарных машин и процессов применяют преимущественно электрические ИМ, а на мобильных машинах — гидравлические.

Основные характеристики ИМ следующие:

- крутящий момент на выходном валу ($H \cdot M$) для поворотных ИМ и усилие на штоке (H) для прямоходовых;
- угол поворота вала для однооборотных или число оборотов вала для многооборотных;
- время полного хода выходного органа от одного крайнего положения к другому.

На работу всей системы автоматического регулирования оказывают влияние такие характеристики, как выбег ИМ, люфт и гистерезис.

Под выбегом понимают перемещение выходного органа ИМ после выключения механизма, работавшего в установившемся режиме. Движущиеся массы работающего ИМ приобретают кинетическую энергию, которая гасится на пути выбега. Выбег влияет на точность и устойчивость САР. Поэтому величина выбега не должна превышать 0,25...1% полного хода выходного органа.

Люфтом ИМ называется свободный ход выходного органа при отсутствии управляющего сигнала. Люфт возникает из-за зазоров в рабочих частях ИМ и износа их контактных поверхностей. Люфт влияет на положение границы устойчивости САР и может быть причиной возникновения в САР автоколебаний. В зависимости от типа ИМ величина люфта ограничивается следующими значениями: 0,2...0,5 мм для прямоходовых; 0,75...1° для однооборотных; до 3° для многооборотных.

Гистерезис (в переводе с греческого языка — опаздывание, отставание) между положением выходного органа и сигналом ИП положения не должен быть более 1,5%.

По своим динамическим свойствам ИМ — интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W(s) = 1/(T_{им}s), \quad (2.83)$$

где $T_{им}$ — время полного перемещения выходного органа ИМ при максимальном входном сигнале.

Для преобразования ИМ в пропорциональное звено, в котором положение выходного органа пропорционально входному сигналу, ИМ охватывают местной жесткой обратной связью.

2.4.2. Электрические исполнительные механизмы

Электрические ИМ делятся на две группы: электродвигательные и электромагнитные. В сельскохозяйственном производстве применяются преимущественно ИМ

с электродвигателями переменного тока. Они относятся к ИМ с постоянной скоростью.

Электродвигательный ИМ (прил. 4) состоит из электродвигателя, редуктора, тормоза и контрольно-пусковой аппаратуры (конечных выключателей, ИП положения выходного органа и т. п.).

В ИМ малой мощности используются двухфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым или полым тонкостенным ротором. Электродвигатель имеет две обмотки статора: одна обмотка управляющая, вторая возбуждающая. Для изменения направления вращения необходимо изменить фазу напряжения в управляющей обмотке.

В мощных ИМ применяется трехфазный электродвигатель. В некоторых ИМ применяются электродвигатели с низкой частотой вращения ротора — (например двигатели с электромагнитной редукцией), имеющие частоту вращения до 60 об/мин. В этих ИМ отсутствует тормоз, так как время пуска и останова их электродвигателей незначительно.

Маркировка электродвигательных исполнительных механизмов имеет следующее обозначение:



Пример маркировки: МЭО-6,3/25-0,25.

Электромагнитные ИМ обеспечивают преобразование электрического сигнала в двухпозиционное перемещение регулирующего органа. Их применяют для двухпозиционного регулирования. Они отличаются большим быстродействием, простой конструкцией и высокой надежностью. Конструктивно электромагнитные ИМ выполняют совместно с регулирующим органом.

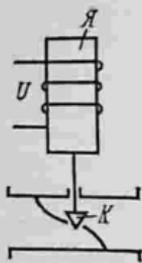


Рис. 2.27. Схема электромагнитного исполнительного механизма.

Для управления потоком жидкости или газа применяют соленоидные клапаны типов СВ, СВВ и др.

В электрических цепях для управления применяют магнитные пускатели и контакторы.

Электромагнит ИМ представляет собой катушку, внутри которой находится подвижный якорь. При подаче напряжения в катушку якорь Я перемещается под действием электромагнитной силы и перемещает связанный с ним регулирующий орган К (рис. 2.27).

Передаточная функция электромагнитного ИМ

$$W(s) = \frac{y(s)}{U(s)} = \frac{k_m}{(T_3 s + 1)(T_1^2 s^2 + T_2 s + 1)}, \quad (2.84)$$

где y — перемещение якоря; $T_3 = L_0/R_0$ — постоянная времени электромагнита; L_0 и R_0 — индуктивность и активное сопротивление катушки, соответствующее начальному положению якоря; $T_1 = \sqrt{\frac{m}{c_n}}$ (m — масса подвижных частей; c_n — жесткость пружины); $T_2 = \frac{k_d}{c_n}$ (k_d — коэффициент демпфирования); $k_m = \frac{2k_0 I_K}{c_n R_0}$ — коэффициент передачи электромагнита (k_0 — коэффициент пропорциональности между силой электромагнита и током I_K в катушке).

Если постоянная времени управляемого объекта значительно больше постоянных времени электромагнитного ИМ (T_3, T_1, T_2), то его передаточная функция может быть представлена безынерционным звеном с передаточной функцией $W(s) = k_m$.

2.4.3. Пневматические и гидравлические исполнительные механизмы

Пневматические и гидравлические ИМ имеют одинаковый принцип действия, основанный на перемещении выходного органа под действием давления газа или жидкости.

Пневматические исполнительные механизмы (ПИМ) воспринимают энергию сжатого воздуха и преобразуют ее в

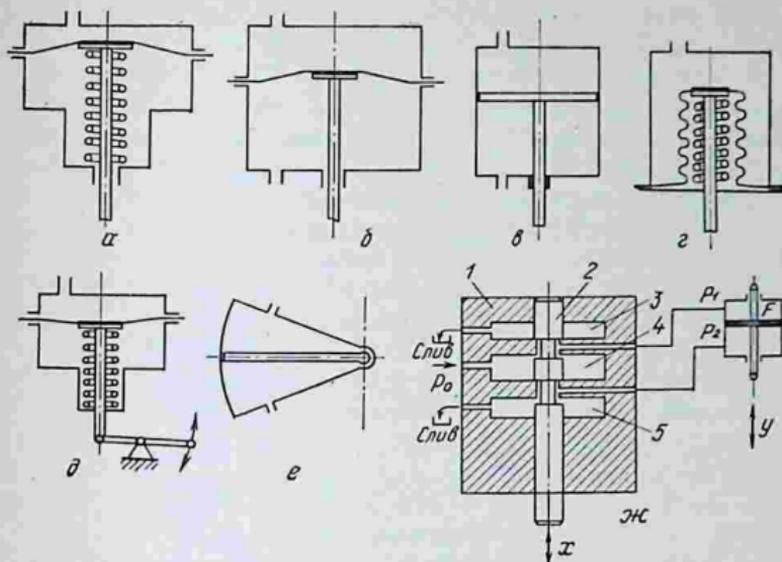


Рис. 2.28. Схемы пневматических и гидравлических исполнительных механизмов:

а — мембранный с пружиной; *б* — мембранный без пружины; *в* — поршневой; *г* — сильфонный; *д* — мембранный поворотный; *е* — лопастный; *ж* — гидравлический ИМ с золотником.

перестановочное усилие выходного штока. Они отличаются простотой, высокой надежностью, малой стоимостью и низкими эксплуатационными расходами.

В зависимости от вида рабочего органа ПИМ делятся на мембранные, поршневые, сильфонные, лопастные. В зависимости от способа возврата штока в исходное состояние ПИМ бывают пружинные и беспружинные.

Схемы основных типов ПИМ показаны на рисунке 2.28. В пружинных ПИМ перестановочное усилие в одном направлении создается за счет действия сжатого воздуха, а в противоположном направлении — силой упругости пружины. В беспружинных ПИМ перестановочное усилие в обоих направлениях создается за счет действия сжатого воздуха.

Поворотные движения рабочего органа (вала) в ПИМ создаются путем механического преобразования поступательного движения штока в угловое (рис. 2.28, *д*). Применяются также лопастные ПИМ (рис. 2.28, *е*).

Наибольшее распространение получили мембранные

ПИМ. Они развивают перестановочное усилие до 40 кН и обеспечивают перемещение выходного органа от 4 до 100 мм.

Для управления регулирующими органами, требующими перемещения штока до 400 мм, используют поршневые ПИМ. Основные элементы поршневого ПИМ — цилиндр и поршень с деталями уплотнения. Поршневые ПИМ развивают перестановочное усилие до 100 кН.

Сильфонные ПИМ применяют при малых (от 1 до 6 мм) перемещениях регулирующего органа.

В лопастных ПИМ первичным силовым элементом является лопасть, помещенная в камеру квадратного сечения. Лопасты имеют угол поворота 60 и 90° и применяются преимущественно в системах двухпозиционного регулирования.

Гидравлические исполнительные механизмы (ГИМ), использующие в качестве рабочего тела жидкость, имеют ряд преимуществ:

- высокое быстродействие (скорость перемещения выходного органа более 100 мм/с);
- большие перестановочные усилия (от 2,4 до 130 кН);
- малые габариты;
- малую массу, приходящуюся на единицу усилия (от 0,006 до 0,5 кг массы на 10 Н силы);
- отсутствие люфтов;
- бесступенчатое регулирование скорости движения;
- допускают большие кратковременные перегрузки.

Наибольшее распространение получили поршневые ГИМ.

Управление ПИМ и ГИМ осуществляется преимущественно при помощи золотниковых устройств.

Золотниковое устройство состоит из цилиндрического золотника 1 (рис. 2.28, ж), который смещается в корпусе 2 на величину x . При этом изменяются проходные площади дроселирующих щелей 3, 4, 5, что приводит к потере давления жидкости, проходящей через регулируемые щели.

Скорость перемещения выходного штока поршня пропорциональна площади поршня и зависит от смещения золотника и перепада давления на поршне. Поскольку активная площадь поршня постоянна, то перепад давления пропорционален усилию на штоке.

Поток через щель при поступлении рабочей жидкости из линии питания в гидроцилиндр равен потоку при выходе из гидроцилиндра на слив. Значение этих потоков определяется выражением

$$Q = vF = \mu bx \sqrt{2\rho \frac{p_0 - \Delta p}{2}}, \quad (2.85)$$

где v — скорость поршня гидроцилиндра; F — активная площадь поршня; b и x — размеры щели, причем x — смещение золотника; μ — коэффициент расхода; ρ — плотность рабочей жидкости.

Зависимость скорости перемещения рабочего органа от смещения золотника при фиксированном перепаде давления называется статической скоростной характеристикой исполнительного механизма. Уравнение скоростной характеристики, полученной из выражения (2.85) при условии $p_c \rightarrow 0$ и $\Delta p = p_1 - p_2 > 0$, имеет вид

$$v = k_x x, \quad (2.86)$$

где k_x — коэффициент усиления ИМ при $\Delta p = \text{const}$, равный

$$k_x = \frac{\mu b}{F} \sqrt{\rho p_0 (1 - \Delta p / p_0)}. \quad (2.87)$$

У поршневых ИМ скорость перемещения рабочего органа пропорциональна входной величине, как это следует из выражения (2.86).

Исполнительные гидравлические поршневые механизмы типа МГП предназначены для управления рабочими органами систем автоматического регулирования.

2.5. РЕГУЛЯТОРЫ

Автоматическое управляющее устройство, работающее по замкнутому циклу и предназначенное для стабилизации какого-либо параметра, называется регулятором.

Автоматический регулятор представляет собой совокупность устройств, присоединенных к управляемому объекту для регулирования его выходной величины. К выходу объекта присоединяется измерительный элемент, контролирующий выходную величину, а к регулирующему органу объекта — исполнительный элемент. При отклонении регулируемого параметра объекта от заданного значения регулятор в соответствии с заложенным в него законом формирует управляющее воздействие на регулирующий орган, чтобы уменьшить отклонение.

Регуляторы классифицируют по следующим признакам: по виду регулируемого параметра, по виду регулирующего воздействия, по роду энергии, по конструктивному выполнению, по закону регулирования.

По виду регулируемого параметра регуляторы делятся на регуляторы температуры, давления, уровня, частоты вращения, напряжения, мощности и др. (прил. 5).

По виду регулирующего воздействия регуляторы подразделяются на регуляторы прямого действия, у которых энергия для перемещения регулирующего органа развивается в результате изменения регулируемого параметра, и регуляторы непрямого действия, использующие энергию постороннего источника.

По роду энергии регуляторы подразделяются на электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные.

Конструктивно только простейшие регуляторы прямого действия могут представлять единое изделие, включающее измерительный и исполнительный элемент, объединенный с регулирующим органом.

В большинстве случаев под регулятором понимают устройство, принимающее сигнал от первичного преобразователя или ИП и формирующее управляющий сигнал, который передается на исполнительный элемент. Такие устройства, согласно терминологии ГСП, называют устройствами «центральной части», так как они непосредственно с управляемым объектом не связаны. Конструктивно устройства «центральной части» регуляторов могут иметь исполнение нескольких типов: аппаратного, приборного, блочного и элементного.

Регуляторы *аппаратного типа* выполнены в виде отдельного устройства, к которому подсоединяются ИП и исполнительное устройство, например регуляторы температуры типа РТ-1, ТУДЭ, ПТР.

В регуляторах *приборного типа* сигнал ИП поступает на вторичный прибор, а с него — в регулятор. Например, автоматический электронный мост типа МСР имеет вторичный реостатный задатчик, с которого снимается сигнал и подается в регулятор.

Регуляторы *блочного типа* состоят из отдельных блоков: измерительного, усилительного, задающего, усилителей мощности и др. Примером может служить комплекс приборов автоматического регулирования постоянного тока типа «Каскад». Блоки имеют нормализованные габариты и могут монтироваться на щите, в шкафу или на пульте.

При *элементном исполнении* регулятор состоит из отдельных универсальных элементов, выполняющих простейшие операции. Из отдельных элементов построена система пневматических регуляторов «Старт» и др.

Закон регулирования, который формирует регулятор, представляет зависимость между регулируемым параметром и положением затвора регулирующего органа. Регуляторы

принято называть соответствен-
но тому закону регулирования,
который они реализуют.

Пропорциональный регуля-
тор (П-регулятор) прямого дей-
ствия, схема которого показана
на рисунке 2.29, регулирует дав-
ление. Воспринимающим (чувст-
вительным) элементом является
мембрана 1, которая через шток
3 связана с регулирующим ор-
ганом — клапаном 4. Пружина 2
служит задатчиком давления.

Обозначим усилие пружины
 $F_{пр} = c\Delta l$, где c — коэффициент жесткости пружины; Δl —
деформация пружины, и усилие мембраны при давлении
на нее жидкости или газа $F_M = S_M \Delta p$, где S_M — эффективная
площадь мембраны.

Усилия F_M и $F_{пр}$ приложены к штоку 3 и направлены в
противоположные стороны. В состоянии равновесия $F_M =$
 $= F_{пр}$ или

$$\Delta p_2 S_M = c \Delta l. \quad (2.88)$$

Из этого уравнения следует, что

$$\Delta l = \frac{S_M}{c} \Delta p_2 = k_p \Delta p_2, \quad (2.89)$$

где k_p — коэффициент передачи регулятора.

Если в качестве сервопривода используется электродви-
гательный или гидравлический исполнительный механизм,
то они охватываются жесткой обратной связью (рис. 2.30, а).
При достаточно большом значении $k_{o.c}$ регулятор в динами-
ческом отношении будет усилительным звеном с передаточ-

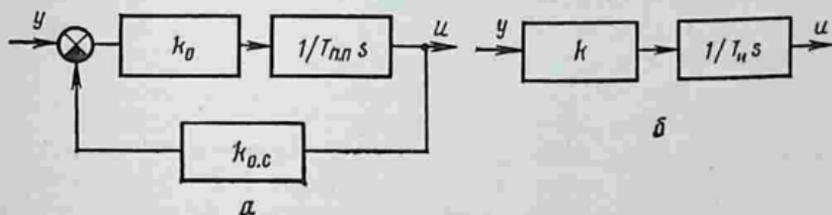


Рис. 2.30. Структурные схемы:
а — П-регулятора; б — И-регулятора.

ной функцией

$$W_p(s) \approx 1/k_{o.c} = k_p. \quad (2.90)$$

Величина $k_{o.c}$ называется пределом пропорциональности D . Если $D > 100\%$, то регулирующий орган перемещается только на часть полного хода при изменении x от минимума до максимума.

Примером П-регулятора непрямого действия может быть регулятор «Кристалл» с электрогидравлическим исполнительным механизмом ГИМ. С выходным валом исполнительного механизма жестко связан сердечник дифференциально трансформаторного преобразователя, выход которого присоединен к одному из выходов регулятора.

Основное достоинство П-регулятора — быстродействие. Его применяют для регулирования объектов без самовыравнивания и в тех случаях, когда в объектах наблюдаются частые отклонения нагрузки. Недостаток П-регулятора — остаточное отклонение регулируемого параметра.

Интегральный регулятор (И-регулятор). В промышленных регуляторах И-закон регулирования получают в том случае, когда структурная схема регулятора составлена из последовательно включенных усилительного и интегрирующего звеньев (рис. 2.30, б).

Интегрирующим звеном обычно служит гидравлический или электродвигательный исполнительный механизм.

В качестве примера И-регулятора можно представить регулятор «Кристалл» с гидравлическим исполнительным механизмом ГИМ, если не будет обратной связи. При отклонении регулируемого параметра y от заданного значения открывается электромагнитный клапан исполнительного механизма ГИМ и вода под давлением перемещает поршень, поворачивая выходной вал регулирующего органа до тех пор, пока отклонение регулируемого параметра от заданного значения не уменьшится до нуля. Когда отклонение равно нулю, электромагнитный клапан ГИМ закрывается и поршень (и, следовательно, вал привода) останавливается в этом положении. Скорость перемещения затвора регулирующего органа зависит от значения $T_{и}$. Чем больше $T_{и}$, тем меньше скорость перемещения регулирующего органа. Если скорость перемещения велика, то даже при незначительном отклонении регулируемого параметра от заданного значения затвор успеет пройти из одного крайнего положения в другое и действие И-регулятора будет аналогично действию релейного регулятора.

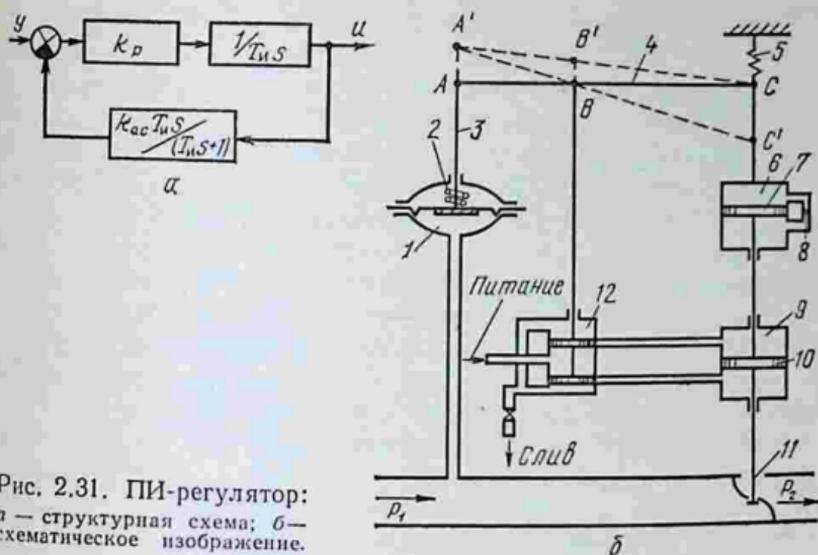


Рис. 2.31. ПИ-регулятор:
 а — структурная схема; б —
 схематическое изображение.

Положительная особенность И-регуляторов заключается в том, что в установившемся режиме значение регулируемого параметра остается постоянным независимо от изменения нагрузки объекта, то есть И-регуляторы являются астатическими. Они допускают значительное изменение нагрузки.

Недостаток И-регуляторов — большое время регулирования, поэтому они неприменимы на объектах без самовыравнивания.

Пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы). В промышленных регуляторах ПИ-закон регулирования достигается введением гибкой обратной связи, охватывающей исполнительный механизм и усилитель регулятора (рис. 2.31, а).

В цепь обратной связи включается реальное дифференцирующее звено (состоящее из дифференцирующего звена $T_I s$ и аperiodического звена $k_{0.c} / (T_I s + 1)$, соединенных последовательно).

Механизм гибкой обратной связи называется изодромом, а сам регулятор — изодромным.

ПИ-регуляторы, как правило, непрямого действия. Схема гидравлического ПИ-регулятора показана на рисунке 2.31, а. Механизм обратной связи, или изодрома, состоит из заполненного маслом цилиндра 6, поршня 7 и пружины 5. Полости цилиндра сообщаются через регулируемый дроссель 8. Поэтому скорость перемещения поршня 7 зависит

от степени открытия дросселя 8. Регулятор регулирует давление p_1 путем изменения степени открытия клапана 11: если давление p_1 увеличивается, то клапан открывается и давление уменьшается. При увеличении давления p_1 мембрана 1 прогибается, преодолевая сопротивление пружины 2, и точка А штока 3 перемещается в А'. Точка В также перемещается в точку В' и перемещает золотниковый механизм гидропривода вверх, открывая доступ жидкости в верхнюю часть цилиндра 9. Поршень 10 перемещается вниз и открывает затвор 11. В это время регулятор работает как П-регулятор. Так как масло в цилиндре 6 не успевает быстро протекать через небольшое отверстие дросселя 8, то вместе с поршнем 7 перемещается в точку С' и конец рычага 4 обратной связи, растягивая пружину 5. Это вызывает обратное перемещение плунжера золотника 12 в его среднее положение, и серводвигатель выключается. Усилие растянутой пружины 5 вызывает перемещение цилиндра 6 вверх со скоростью, зависящей от скорости перетекания масла из нижней полости в верхнюю через дроссель 8. При этом рычаг 4 поворачивается вокруг точки А', поднимает плунжер золотника 12 и вызывает дополнительное перемещение затвора 11 регулирующего клапана вниз, уменьшая давление p_1 . Регулятор действует до тех пор, пока не исчезнет деформация пружины 5. При этом регулируемое давление p_1 возвращается к заданному значению, а затвор 11 занимает новое положение. Время действия обратной связи — время изодрома $T_{из}$ определяется степенью открытия регулируемого дросселя 8. Если дроссель полностью закрыт, то гибкая обратная связь превращается в жесткую ($T_{из} \rightarrow \infty$), а ПИ-регулятор по своему действию становится пропорциональным. Если дроссель полностью открыт, то время изодрома $T_{из} \rightarrow 0$ и ПИ-регулятор становится интегральным. В промежуточных состояниях открытия дросселя он обладает свойствами пропорционального и интегрального регулятора. Время, в течение которого затвор регулирующего органа под действием интегральной составляющей удвоит предварительное перемещение, полученное за счет действия пропорциональной составляющей, называют временем удвоения.

В электронно-гидравлическом регуляторе «Кристалл» гибкая обратная связь для формирования ПИ-закона регулирования образуется при помощи двух пар сильфонов и дифференциально-трансформаторного преобразователя. Механизм гибкой обратной связи показан на рисунке 2.32.

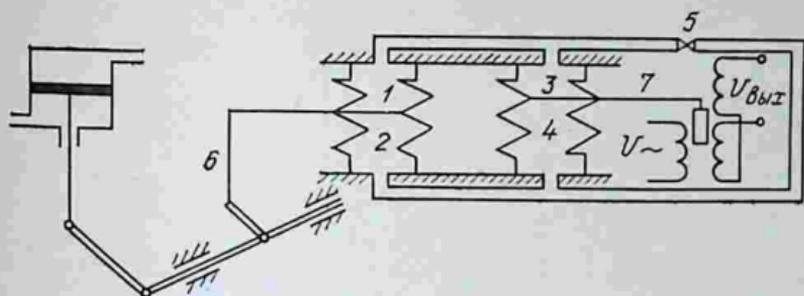


Рис. 2.32. Схема гибкой обратной связи ГИМ.

При перемещении поршня электрогидравлического исполнительного механизма поворачивается вал и через тягу 6 вызывает растяжение одного сильфона и сжатие другого. Например, при движении поршня вниз сильфон 1 будет растягиваться, а сильфон 2 сжиматься. Давление воздуха в сильфоне 2 увеличится, а в сильфоне 1 понизится. Воздух из сильфона 2 будет перетекать в сильфон 4, а из сильфона 3 — в сильфон 1, перемещая промежуточный рычаг 7, связанный с сердечником дифференциально-трансформаторного преобразователя.

Возникающая в сильфонах разность давлений вызывает переток воздуха через регулируемый дроссель 5. Постепенно давление в сильфонах выравнивается, сердечник преобразователя возвращается в среднее положение и сигнал обратной связи становится равным нулю.

Изодромные регуляторы могут применяться как для объектов с самовыравниванием, так и без самовыравнивания в тех случаях, когда необходима большая точность регулирования при больших, но плавных изменениях нагрузки.

Изодромные регуляторы с предварением (ПИД-регуляторы) применяются на объектах, не допускающих статической ошибки, нагрузка которых меняется часто, а также имеется запаздывание. Затвор регулирующего органа ПИД-регулятора перемещается пропорционально отклонению, интегралу и скорости отклонения регулируемого параметра.

ПИД-закон регулирования на практике получают подключением блока предварения к ПИ-регулятору. Блок предварения выдает сигнал пропорциональной скорости изменения регулируемого параметра и включается либо в измерительную, либо в управляющую цепь регулятора.

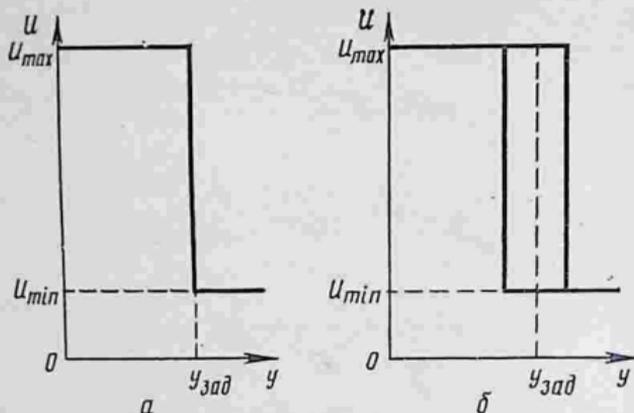


Рис. 2.33. Характеристика идеального (а) и реального (б) двухпозиционного регулятора.

Релейные регуляторы. Релейными называют регуляторы, у которых регулирующий орган перемещается скачком из одного крайнего положения в другое всякий раз, когда регулируемый параметр достигает некоторого определенного значения, называемого пороговым. Регулирующий орган может занимать крайние позиции в пределах своего хода.

Наибольшее распространение получили двух- и трехпозиционные регуляторы. Статические характеристики идеализированного и реального двухпозиционного регулятора показаны на рисунке 2.33.

Реальный регулятор имеет зону нечувствительности 2Δ , которая характеризует величину отклонения порогов срабатывания регулятора от заданного значения регулируемого параметра. В реальных двухпозиционных регуляторах зона нечувствительности является параметром настройки и называется *дифференциалом*.

Двухпозиционные регуляторы применяются для управления объектами с малым запаздыванием и с большой постоянной времени: например, для регулирования уровня воды в резервуарах больших водокачек, для регулирования температуры и влажности в теплицах и животноводческих помещениях. Регулятор поддерживает среднее заданное значение регулируемого параметра, хотя сам параметр изменяется, совершая незатухающие колебания. Амплитуда и период колебаний параметра зависят от зоны нечувствительности регулятора.

Простейшими двухпозиционными регуляторами являются контактные термометры типа ТЭК, dilatометрические электрические терморегуляторы типа ТРДЭ и др.

Контактные термометры имеют два или три контакта, впаянные в стекло капилляра. Чувствительный элемент — ртуть, при нагревании она расширяется и замыкает контакты.

В dilatометрическом терморегуляторе типа ТРДЭ чувствительные элементы — dilatометрическая трубка и стержень, имеющие разные коэффициенты линейного расширения: трубка изготовлена из материала с большим коэффициентом расширения (латунь), чем стержень (инвар). Кинематическая схема регулятора показана на рисунке 2.34.

При снижении температуры трубка 7 укорачивается и стержень 6 поднимается. Конец рычага 4 перемещает подвижный переключающий контакт 3, который замыкает цепь с контактом 1' и размыкает с контактом 1. Винт задания 5 предназначен для установки задания температуры, а винт 2 — для установки дифференциала.

Контактные группы, встроенные в первичные или во вторичные приборы, используются также для позиционного регулирования. Примером могут служить пружинные манометры ЭКМ и МПЧ-4 для измерения и регулирования давления, логометры ЛР, вторичные мосты и потенциометры типа КВП для контроля и регулирования температуры и др. В виде отдельного прибора выполнены электронные регуляторы типов ПТР-2, РТ-2, РТБ-2, МЭТРС-2 и др.

Блок-схема двухпозиционного бесконтактного регулятора температуры РТБ-2 показана на рисунке 2.35.

РТБ работает в комплекте с медным термометром сопротивления. При отклонении температуры от заданного значения на мостовой схеме M возникает напряжение разбаланса, которое поступает на вход усилителя $У$, где оно алгебраически складывается с опорным напряжением блока $БС$, формирующим сигнал дифференциала. Усиленное напряжение поступает на вход фазочувствительного каскада (усилителя) $ФЧК$, который управляет триггером T . Блок управления $БУ$ формирует управляющие сигналы для вклю-

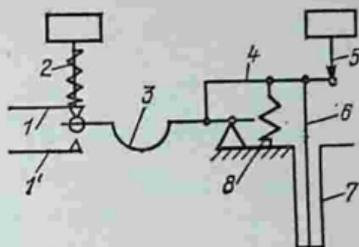


Рис. 2.34. Кинематическая схема терморегулятора типа ТРДЭ.

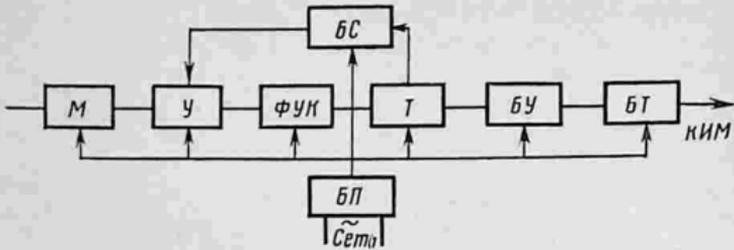


Рис. 2.35. Блок-схема регулятора типа РТБ-2.

чения тиристоров блока *БТ*, к которому присоединяется исполнительный механизм.

Двухпозиционный регулятор типа ПТР-2 имеет аналогичную схему, за исключением того, что в нем триггер *Т* управляет выходным реле, контакты которого выведены в цепи управления исполнительным механизмом.

Регулирующая аппаратура комплекса «Каскад» рассчитана на входные унифицированные сигналы постоянного тока 0...5 и 0...20 мА. В состав системы входят блоки измерительный, суммирования, умножения, деления, извлечения квадратного корня, ограничения, регулирующие блоки, дифференцирования, тиристорный усилитель и блоки управления, защиты, индикации и задатчики.

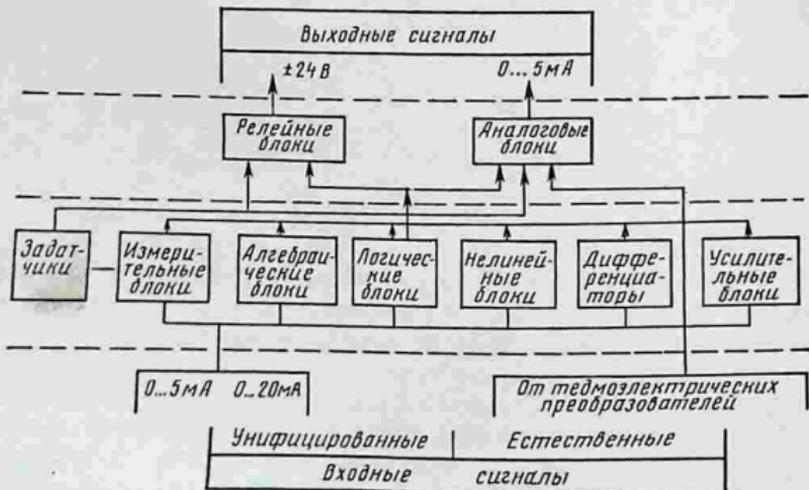


Рис. 2.36. Структура комплекса «Каскад».

Структура комплекса «Каскад» показана на рисунке 2.36.

С более широкими возможностями автоматического регулирования выпускают аналоговый комплекс электрических средств регулирования (АКЭСР).

Путем агрегатирования блоков АКЭСР могут быть построены разнообразные схемы регулирования и управления технологическими процессами, начиная от простейших позиционных регуляторов до самых сложных многоконтурных систем централизованного контроля и управления.

Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА) состоит из пневматических усилителей, реле и других элементов, являющихся аналогами соответствующей электрической и электронной аппаратуры.

Конструктивно отдельные элементы выполнены из квадратных секций (40×40 мм) и снабжены латунными ножками, имеющими унифицированные размеры. Элементы при помощи ножек крепят в коммутационных пластинах (платах) из органического стекла. Связь между элементами осуществляется через отверстия в ножках и платах. Если в регулятор входит несколько плат, то они соединяются между собой гибкими шлангами.

В качестве входных и выходных сигналов элементов УСЭППА используются унифицированные пневматические сигналы 20. . .100 кПа. Давление питания 140 кПа.

На основе элементов УСЭППА построена система автоматических регуляторов «Старт», «Центр» и др.

Глава 3. АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.1. ПРЕДМЕТ АНАЛИЗА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Автоматическая система, предназначенная для управления каким-либо технологическим процессом или агрегатом, должна быть работоспособной, а также обладать свойствами, удерживающими параметры в таких пределах, чтобы не происходило существенных нарушений технологического процесса или работы агрегата.

Работоспособность системы автоматического управления определяется ее устойчивостью. Устойчивость — это способность системы возвращаться в исходное состояние после снятия ограниченных возмущающих или управляющих воздействий на систему.

Свойства автоматической системы, позволяющие удерживать параметры технологических процессов или работы агрегатов в заданных пределах, характеризуют качество работы системы. Конкретные требования к поведению параметров выдвигаются практикой ведения процесса или условиями работы агрегата. Такие требования индивидуальны в каждом конкретном случае. Однако можно назвать ряд общих показателей качества работы системы, которые позволяют почти всегда оценить в ней требования к поведению параметров. Такими показателями являются точность поддержания параметра в установившемся режиме работы системы или при стационарных случайных возмущениях, быстродействие системы, значение максимальных динамических отклонений в системе под действием возмущений. Задачи анализа заключаются в определении устойчивости и показателей качества работы систем автоматического управления. Решать эти задачи можно различными методами.

Экспериментальный метод исследования можно применить при наличии действующих систем. В этом случае устойчивость и показатели качества определяются по изменению выходной величины автоматической системы при подаче на вход типовых сигналов (единичного скачка, кратковременного импульса, гармонического сигнала, стационарного случайного возмущения). Для осуществления этого метода исследования необходима аппаратура, способная

с достаточной степенью точности регистрировать изменения входных и выходных воздействий автоматической системы.

Теоретические методы анализа работы автоматических систем основаны на анализе математической модели, описывающей работу автоматической системы. Математическая модель автоматической системы может быть представлена обыкновенными дифференциальными уравнениями, дифференциальными уравнениями в частных производных, интегральными уравнениями и т. д.

В настоящем пособии будут рассматриваться задачи анализа автоматических систем, математическая модель которых представляет собой линейное обыкновенное дифференциальное уравнение n -го порядка с постоянными коэффициентами

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx(t)}{dt} + b_m x(t), (3.1)$$

где $a_0 \dots a_n$ — постоянные коэффициенты собственного оператора системы; $b_0 \dots b_m$ — постоянные коэффициенты оператора воздействия.

Причем всегда $m \leq n$ [2].

Если ввести алгебраический оператор дифференцирования $p = d/dt$, уравнение (3.1) примет следующий вид:

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) y(t) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) x(t). (3.2)$$

Устойчивость и показатели качества автоматической системы, описываемой уравнением (3.1), можно оценить, анализируя изменения выходной величины во времени, полученные при решении уравнения (3.1), если подставить в правую часть уравнения вместо $x(t)$ различные типовые сигналы.

Уравнения (3.1) можно решить традиционными методами интегрирования обыкновенных дифференцированных уравнений [2], а также при помощи аналоговых и цифровых вычислительных машин [13]. Обычно решение уравнения (3.1) при различных входных сигналах и начальных условиях вызывает определенные трудности. Поэтому в теории систем автоматического управления разработаны более простые методы оценки устойчивости и некоторых показателей качества работы систем, которые будут рассмотрены ниже.

3.2 УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.2.1. Понятие устойчивости. Необходимое условие устойчивости

При приложении к автоматической системе какого-нибудь ограниченного по значению и времени управляющего или возмущающего воздействия (рис. 3.1, а) ее движение может быть различным. Однако условие устойчивости определяет три основных вида движения систем: движение устойчивой системы (рис. 3.1, б), движение неустойчивой системы (рис. 3.1, в) и движение нейтральной системы (системы, находящейся на границе устойчивости) (рис. 3.1, г). Рисунок 3.1 показывает, что устойчивость системы определяется характером ее движения после прекращения действия входного воздействия (при $t > \tau$).

Движение системы в период T характеризует дифференциальное уравнение (3.1) при $x(t) = 0$, то есть однородное уравнение

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = 0. \quad (3.3)$$

Решение этого уравнения с ненулевыми начальными условиями будет характеризовать устойчивость системы. Запишем общее решение уравнения (3.3) [8]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{\lambda_i t} \quad (i = 1, 2, \dots, k, \dots, l, \dots, n), \quad (3.4)$$

где λ_i — корни характеристического уравнения $a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n = 0$; C_i — произвольные постоянные, определяемые начальными условиями системы.

Формула (3.4) показывает, что характер движения автоматической системы зависит от корней характеристического уравнения λ . Корни могут быть вещественными и комплексными. Ве-

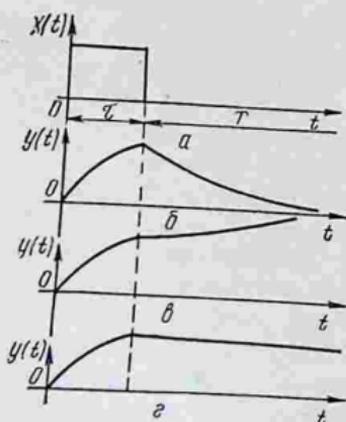


Рис. 3.1. К понятию устойчивости движения автоматических систем.

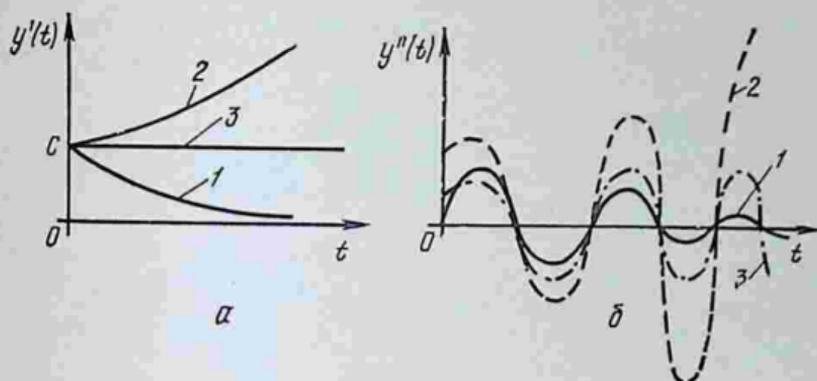


Рис. 3.2. График свободного движения системы: а — при вещественных корнях (1— $\alpha < 0$; 2— $\alpha > 0$; 3— $\alpha = 0$); б — при комплексных корнях (1— $\alpha < 0$; 2— $\alpha > 0$; 3— $\alpha = 0$).

ществленные корни $\lambda_i = \pm\alpha (i = 1, 2, \dots, k)$. Слагаемое формулы (3.4) будет представлять с таким корнем экспоненту

$$y'_i(t) = C_k e^{\alpha t}.$$

Очевидно, что при $s_i = -\alpha$ процесс будет затухать (рис. 3.2, а, кривая 1); при $\lambda_i = \alpha$ процесс будет расходиться (рис. 3.2, а, кривая 2); при $\lambda_i = 0$ процесс не будет изменять своего состояния (рис. 3.2, а, кривая 3). В первом случае система будет устойчивой, во втором — неустойчивой, в третьем случае система будет находиться на границе устойчивости. В характеристическом уравнении при наличии одного нулевого корня будет отсутствовать свободный член ($a_n = 0$).

Комплексные корни $\lambda_i = \pm\alpha \pm j\omega (\lambda_i = k+1, \dots, l)$. Слагаемое формулы (3.4) будет иметь вид

$$y''_i(t) = C_l e^{\alpha t} \sin(\omega_l t + \psi_l).$$

При $\lambda_i = -\alpha \pm j\omega$ процесс будет представлять затухающие колебания (рис. 3.2, б, кривая 1); при $\lambda_j = \alpha \pm j\omega$ колебания будут расходящимися (рис. 3.2, б, кривая 2); при $\lambda_j = \pm j\omega$ колебания будут незатухающими с постоянной амплитудой (рис. 3.2, б, кривая 3). В первом случае система устойчивая, во втором — неустойчивая. В третьем случае, когда имеется пара чисто мнимых корней, система находится на границе устойчивости. Такая граница устойчивости называется колебательной.

Характер свободного движения всей системы будет определяться суммой свободных составляющих формулы (3.4). Причем система будет устойчива только тогда, когда все ве-

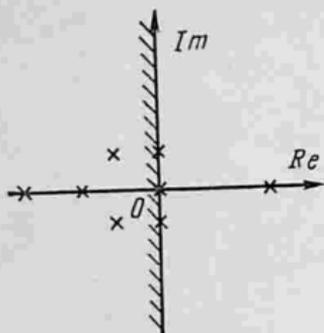


Рис. 3.3. Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

ественные корни отрицательны и все комплексные корни имеют отрицательные вещественные части. Если корни характеристического уравнения нанести в виде точек на комплексную плоскость (рис. 3.3), то устойчивость линейной системы можно характеризовать положением корней.

Линейная система устойчива, если все корни характеристического уравнения лежат слева от мнимой оси. Если хотя бы один корень лежит справа от мнимой оси, система неустойчива. Система будет находиться на границе устойчивости при наличии нулевого корня или пары чисто мнимых корней, которые лежат на мнимой оси.

Показанное выше свойство корней характеристического уравнения используется для установления необходимого условия устойчивости автоматической системы.

Если известны все корни характеристического уравнения $\lambda_1 \dots \lambda_n$, то уравнение может быть представлено в виде

$$a_0 (\lambda - \lambda_1) (\lambda - \lambda_2) \dots (\lambda - \lambda_{n-1}) (\lambda - \lambda_n) = 0. \quad (3.5)$$

В устойчивой системе все вещественные $\lambda_i = -\alpha$, а все комплексные корни $\lambda_i = -\alpha \pm j\omega$, тогда уравнение (3.5) при подстановке значений корней можно записать так:

$$a_0 (\lambda + \alpha_1) (\lambda + \alpha_2) \dots [(\lambda + \alpha_i)^2 + \omega_i^2] \dots (\lambda + \alpha_n) = 0.$$

Очевидно, что при раскрытии скобок в этом уравнении все коэффициенты характеристического уравнения должны быть положительны.

Необходимым условием устойчивости является положительность коэффициентов характеристического уравнения. Таким образом, если в характеристическом уравнении хотя бы один коэффициент отрицательный или равен нулю, система неустойчива.

Для уравнений первого и второго порядка условие положительности коэффициентов является и достаточным признаком, в чем легко убедиться, определив корни этих уравнений.

3.2.2. Критерии устойчивости

Нахождение корней характеристического уравнения при n больше четырех, как уже отмечалось, — задача весьма трудная, поэтому разработан ряд достаточных принципов, позволяющих определить устойчивость автоматической системы, не находя корни характеристического уравнения. Эти принципы называются критериями устойчивости. Есть несколько критериев устойчивости: Рауса, Гурвица, Михайлова, Найквиста и др.

Критерий Рауса (1877 г.). Исходным для определения устойчивости по критерию Рауса является характеристическое уравнение автоматической системы

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0. \quad (3.6)$$

Составим таблицу Рауса:

$$\left\| \begin{array}{cccccccc} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ c_1 & c_3 & c_5 & \dots & c_{2k+1} & \dots & & \\ c_0 & c_2 & c_4 & \dots & c_{2k} & \dots & & \\ b_1 & b_3 & b_5 & \dots & b_{2k+1} & \dots & & \\ b_0 & b_2 & b_4 & \dots & b_{2k} & \dots & & \\ a_1 & a_3 & a_5 & \dots & a_{2k+1} & \dots & & \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & a_{2k} & \dots & & \end{array} \right\|, \quad (3.7)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ — коэффициенты характеристического уравнения.

Число строк матрицы Рауса равно $n+1$.

Коэффициенты b_k и c_k образуются по следующему правилу:

$$\left. \begin{array}{l} b_{2k} = \begin{vmatrix} a_1 & a_{2k+3} \\ a_0 & a_{2k+2} \end{vmatrix}, \quad b_{2k+1} = \begin{vmatrix} b_0 & b_{2k+2} \\ a_1 & a_{2k+3} \end{vmatrix}, \\ c_{2k} = \begin{vmatrix} b_1 & b_{2k+3} \\ b_0 & b_{2k+2} \end{vmatrix}, \quad c_{2k+1} = \begin{vmatrix} c_0 & c_{2k+2} \\ b_1 & b_{2k+3} \end{vmatrix}. \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

После заполнения матрицы (3.7) определяется устойчивость системы. Автоматическая система устойчива, если все элементы первого столбца матрицы положительны.

Пример 3.1. Характеристическое уравнение системы автоматического регулирования

$$s^5 + 3s^4 + 5s^3 + 7s^2 + 2s + 2 = 0. \quad (3.9)$$

Составляем таблицу Рауса:

$$\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ d_0 & d_2 & d_4 & \dots \\ c_1 & c_3 & c_5 & \dots \\ c_0 & c_2 & c_4 & \dots \\ b_1 & b_3 & b_5 & \dots \\ b_0 & b_2 & b_4 & \dots \\ 3 & 7 & 2 & \dots \\ 1 & 5 & 2 & \dots \end{array}$$

В матрице в соответствии с формулами (3.8) находим

$$\begin{aligned} b_0 &= \begin{vmatrix} 3 & 7 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 8; & b_2 &= \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 4; \\ b_4 &= \begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} = 0; & b_1 &= \begin{vmatrix} 8 & 4 \\ 3 & 7 \end{vmatrix} = 44; \\ b_3 &= \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 3 & 2 \end{vmatrix} = 16; & b_5 &= \begin{vmatrix} 8 & 0 \\ 3 & 0 \end{vmatrix} = 0; \\ c_0 &= \begin{vmatrix} 44 & 16 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} = 48; & c_2 &= \begin{vmatrix} 44 & 0 \\ 8 & 0 \end{vmatrix} = 0; \\ c_1 &= \begin{vmatrix} 48 & 0 \\ 44 & 16 \end{vmatrix} = 768; & c_3 &= \begin{vmatrix} 48 & 0 \\ 44 & 0 \end{vmatrix} = 0; \\ d_0 &= \begin{vmatrix} 768 & 0 \\ 48 & 0 \end{vmatrix} = 0 \end{aligned}$$

Подставим вычисленные значения коэффициентов в таблицу Рауса:

$$\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot \\ 768 & 0 & 0 & \cdot \\ 48 & 0 & 0 & \cdot \\ 44 & 16 & 0 & \cdot \\ 8 & 4 & 0 & \cdot \\ 3 & 7 & 2 & \cdot \\ 1 & 5 & 2 & \cdot \end{array}$$

Все элементы первого столбца положительны. Система устойчива.

Критерий Гурвица (1895 г.). Такую же информацию, как и критерий Рауса, об устойчивости системы дает и критерий Гурвица. Эти критерии идентичны. Критерий Рауса имеет алгоритмическую форму проверки устойчивости, критерий Гурвица — замкнутую детерминантную форму.

Для того чтобы все корни характеристического уравнения (3.6) находились слева от мнимой оси и система была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы все диагональные миноры определителя Гурвица Δ_i были положительны при положительных коэффициентах характеристического уравнения.

Определитель Гурвица Δ_n (n -го порядка, где n — по-

рядок дифференциального уравнения)

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n & 0 \end{vmatrix} \quad (3.10)$$

Диагональные миноры указаны пунктирными линиями.

Пример 3.2. Приведем расчет устойчивости автоматической системы по критерию Гурвица, характеристическое уравнение которой имеет вид (3.9).

Составим определитель Гурвица:

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 7 & 2 \end{vmatrix}$$

Вычислим значение диагональных миноров:

$$\Delta_1 = 3 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 7 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 8 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 \\ 1 & 5 & 2 \\ 0 & 3 & 7 \end{vmatrix} = 105 + 6 - 49 - 18 = 44 > 0;$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 & 0 \\ 1 & 5 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 2 \\ 0 & 1 & 5 & 2 \end{vmatrix} = 2 \Delta_3 - 2 \begin{vmatrix} 3 & 7 & 2 \\ 1 & 5 & 2 \\ 0 & 1 & 5 \end{vmatrix} = 88 - 2 \cdot 36 = 16 > 0;$$

$$\Delta_5 = 2\Delta_4 = 32 > 0.$$

Все диагональные миноры положительны, система устойчива.

Примеры показывают, что критерии Рауса и Гурвица почти равноценны. Диагональные миноры в определителе Гурвица равны некоторым членам первого столбца матрицы Рауса, и остальные диагональные миноры могут быть выражены через элементы матрицы (например: $\Delta_4 = c_0/a_1$).

При больших n вычисления получаются проще с использованием критерия Рауса.

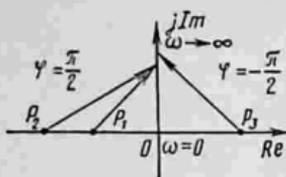


Рис. 3.4. Составляющие характеристического вектора на комплексной плоскости.

Критерий Михайлова (1938 г.).

Определение устойчивости автоматической системы по критерию Михайлова происходит на основе анализа характеристического уравнения (3.6). Пусть известны корни характеристического уравнения $\lambda_1 \dots \dots \lambda_n$. Тогда уравнение можно записать в виде (3.5). Заменим в уравнении (3.5) λ на $j\omega$:

$$D(j\omega) = a_0(j\omega - \lambda_1)(j\omega - \lambda_2) \dots (j\omega - \lambda_n) = 0. \quad (3.11)$$

Каждый из сомножителей характеристического вектора $D(j\omega)$ является комплексным числом и представляет собой вектор, начало которого находится в точке λ_i комплексной плоскости, а конец вектора — на мнимой оси (рис. 3.4). При изменении ω от 0 до ∞ вектор изменяет аргумент (фазу) φ_i , двигаясь своим концом по мнимой оси, на $\pi/2$, если корень слева от мнимой оси, и на $-\pi/2$, если корень справа.

Известно, что при умножении комплексных чисел их аргументы складываются. Тогда изменение аргумента всего характеристического вектора $\arg D(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ будет равно сумме аргументов сомножителей:

$$\arg D(j\omega) = \sum_{i=1}^n \arg(j\omega - \lambda_i), \quad (3.12)$$

где $0 < \omega < \infty$.

Если корень находится в левой полуплоскости (рис. 3.5), то

$$\arg(j\omega - \lambda_i) = \pi/2,$$

в правой

$$\arg(j\omega - \lambda_i) = -\pi/2.$$

Пусть имеется l корней в правой полуплоскости. Тогда в левой $(n-l)$ корней, $\arg D(j\omega)$:

$$\left. \begin{aligned} \arg D(j\omega) &= (n-2l)\pi/2 \\ 0 < \omega < \infty \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

При расположении всех корней в левой полуплоскости, что соответствует устойчивой системе,

$$\left. \begin{aligned} \arg D(j\omega) &= \pi n/2 \\ 0 < \omega < \infty. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

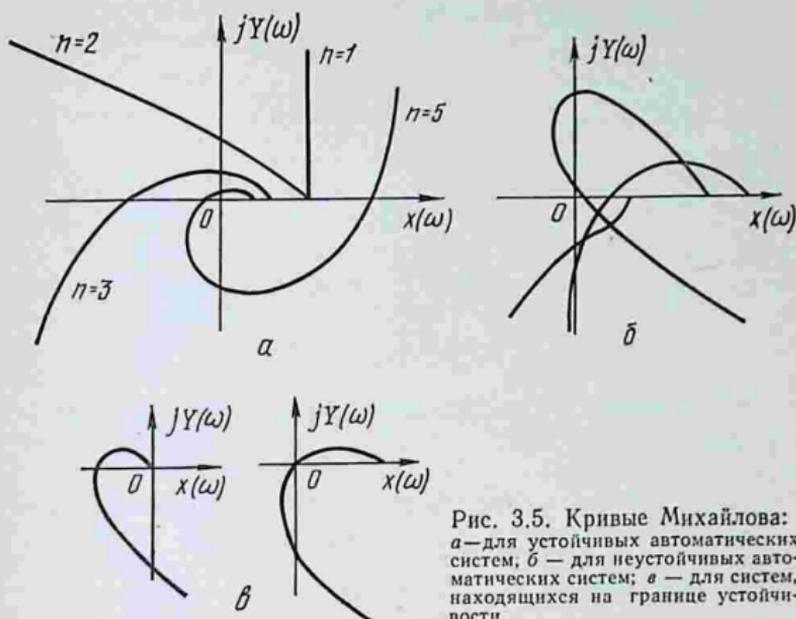


Рис. 3.5. Кривые Михайлова: *a* — для устойчивых автоматических систем; *b* — для неустойчивых автоматических систем; *c* — для систем, находящихся на границе устойчивости.

Очевидно, что аргумент характеристического вектора для устойчивой системы будет возрастать с увеличением ω . Это свойство вектора используется для определения устойчивости автоматической системы.

Представим вектор

$$D(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega), \quad (3.15)$$

где

$$X(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots \quad (3.16)$$

$$Y(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \dots \quad (3.17)$$

Определим значение вещественной и мнимой частей этого вектора при различных значениях ω и построим график функции $D(j\omega)$ на комплексной плоскости (кривая Михайлова). Для устойчивых систем кривая должна начинаться на положительной вещественной оси [см. (3.16), (3.17) при $\omega=0$, $X(0) = a_n$, $Y(0) = 0$] и последовательно обходить n квадрантов плоскости против хода часовой стрелки (рис. 3.5, *a*).

В n -м квадранте кривая должна уходить в бесконечность, так как только в этом случае аргумент характеристического вектора, который своим концом описывает кривую Михайлова, будет монотонно возрастать с увеличением ω и его величина составит $\pi n/2$.

3.1. Расчетные данные к примеру 3.3

ω	$X(\omega)$	$Y(\omega)$
0	1,0	0
0,3	0,3043	0,465
0,5	-0,8125	0,375
1,0	-4,0	-0,3
2,0	17,2	-36,0
10,0	29201	-4980
∞	∞	$-\infty$

На рисунке 3.5, б, показаны кривые Михайлова для неустойчивых систем.

Пример 3.3. Характеристическое уравнение автоматической системы

$$D(\lambda) = 3\lambda^4 + 5\lambda^3 + 8\lambda^2 + 2\lambda + 1 = 0.$$

Заменяем λ на $j\omega$:

$$D(j\omega) = 3\omega^4 - j5\omega^3 - 8\omega^2 + j2\omega + 1 = 0,$$

находим

$$X(\omega) = 1 - 8\omega^2 + 3\omega^4,$$

$$Y(\omega) = 2\omega - 5\omega^3.$$

При различных значениях ω находим значение $X(\omega)$ и $Y(\omega)$ и заносим их в таблицу 3.1.

Строим кривую Михайлова (рис. 3.6).

Кривая начинается на положительной части вещественной оси и последовательно обходит четыре квадранта, поэтому автоматическая система устойчива.

Критерий Найквиста (1932 г.). Исходной при определении устойчивости по критерию Найквиста является передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)}, \quad (3.18)$$

где $P(s)$ и $Q(s)$ — полиномы соответственно m -й и n -й степеней от s ($m \leq n$).

Об устойчивости замкнутой системы в данном случае можно судить по амплитудно-

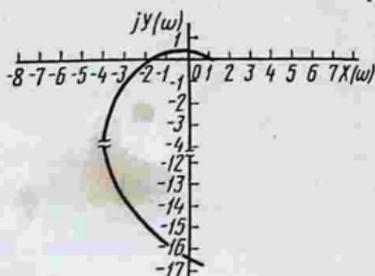


Рис. 3.6. Кривая Михайлова для устойчивой системы ($n=4$).

фазовой частотной характеристике разомкнутой системы.

Рассмотрим функцию

$$1 + W_{\text{раз}}(s) = \frac{Q(s) + P(s)}{Q(s)} = \frac{R(s)}{Q(s)}. \quad (3.19)$$

Числитель этой функции представляет собой характеристическое уравнение замкнутой системы. Степень полиномов $R(s)$ и $Q(s)$ одинакова и равна n .

При определении устойчивости замкнутой автоматической системы могут возникнуть два случая: разомкнутая система устойчива или находится на границе устойчивости и разомкнутая система неустойчива и имеет l корней в правой полуплоскости.

Первый случай. Систему, находящуюся на границе устойчивости, путем искусственного сдвига нулевых корней с последующим предельным переходом можно свести к устойчивой системе [2]. Поэтому рассмотрим условия устойчивости замкнутой системы при устойчивой разомкнутой системе.

При устойчивой разомкнутой системе полином $Q(s)$ в (3.19) имеет корни только в левой полуплоскости, и поэтому

$$\arg Q(j\omega) = \pi n/2 \quad (3.20)$$

в соответствии с критерием Михайлова.

Если потребовать, чтобы замкнутая система была устойчива, то $R(s)$ также должен иметь все корни в левой полуплоскости, а значит,

$$\arg R(j\omega) = \pi n/2.$$

Тогда

$$\arg [1 + W_{\text{раз}}(j\omega)] = \arg R(j\omega) - \arg Q(j\omega) = 0. \quad (3.21)$$

Таким образом, замкнутая система устойчива, если аргумент вектора $[1 + W_{\text{раз}}(j\omega)]$ при изменении ω от 0 до ∞ равен 0. График функции $[1 + W_{\text{раз}}(j\omega)]$ в этом случае не должен охватывать точку с координатами $(0, j 0)$, а график функции (годограф Найквиста) $W_{\text{раз}}(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega)$ не должен охватывать точку с координатами $(-1, j 0)$ (рис. 3.7, а кривая 1). Если годограф Найквиста охватывает точку с координатами $(-1, j 0)$, система неустойчива (рис. 3.7, а, кривая 2).

Второй случай. Система в разомкнутом состоянии неустойчива и полином $Q(s)$ (3.20) имеет l корней в правой полуплоскости.

Тогда

$$\arg Q(j\omega) = (n - 2l) \pi/2.$$

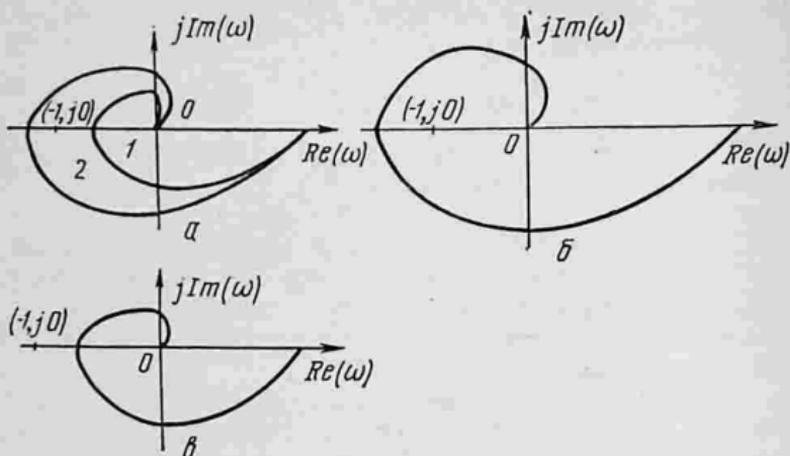


Рис. 3.7. Годограф Найквиста $[W_{\text{раз}}(j\omega)]$ устойчивой системы (1) и неустойчивой (2) при устойчивой разомкнутой системе (а), устойчивой системы при неустойчивой разомкнутой системе (б) и системы, находящейся на границе устойчивости (в).

Если потребовать, чтобы замкнутая система была устойчива, то

$$\arg R(j\omega) = \pi n/2.$$

При этом

$$\arg [1 + W_{\text{раз}}(j\omega)] = \pi n/2 - (n - 2l) \pi/2 = (l/2) 2\pi. \quad (3.22)$$

При $l=0$ получаем условие первого случая как частный случай.

Дадим наиболее общую формулировку критерию Найквиста. Для устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования необходимо и достаточно, чтобы годограф Найквиста при изменении ω от 0 до ∞ охватывал точку с координатами $(-1, j0)$ при движении его против часовой стрелки $l/2$ раз, где l — число корней передаточной функции разомкнутой системы, лежащих в правой полуплоскости. На рисунке 3.7, б изображен годограф Найквиста устойчивой замкнутой системы при наличии в $W_{\text{раз}}$ двух корней в правой полуплоскости.

Пример 3.4. Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\text{раз}}(s) = 50/(3s^3 + 76s^2 + 25s).$$

Разомкнутая система находится на границе устойчивости, так как в знаменателе $W_{\text{раз}}(s)$ имеется один нулевой корень ($s_1=0$) и пара отрицательных вещественных корней ($s_2=-1,5$, $s_3=-23,8$).

3.2. Расчетные данные к примеру 3.4

ω	$Re(\omega)$	$Im(\omega)$
0	-6,1	$-\infty$
1	-0,6	-0,18
2	-0,16	-0,01
2,9	-0,59	0
10	-0,006	+0,002
∞	0	0

Подставляем в $W_{раз}(s)$ вместо $s \rightarrow j\omega$ и разделяем выражение на вещественную и мнимую части:

$$W_{раз}(j\omega) = \frac{50}{(-3j\omega^3 - 76\omega^2 + 25j\omega)} = \frac{-3800}{9\omega^4 + 5620\omega^2 + 625} + j \frac{150\omega^2 - 1250}{9\omega^4 + 5620\omega^2 + 625\omega}$$

Находим нули функции $W_{раз}(j\omega)$. Ноль на вещественной оси [$Re(\omega)=0$] достигается только при $\omega \rightarrow \infty$, $Im(\omega)=0$, когда $\omega \rightarrow \infty$ и $150\omega^2 - 1250 = 0$, то есть при $\omega = 2,9$ л/с.

Задавая различные значения ω , находим значения $Re(\omega)$ и $Im(\omega)$ (табл. 3.2).

Строим годограф Найквиста (рис. 3.8).

Годограф не обходит точку с координатами $(-1, j0)$; значит, замкнутая система устойчива.

Критерий устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам. Критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости системы по логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой системы. Этот метод определения устойчивости системы имеет особую практическую ценность в связи с очень простым построением асимптотических логарифмических частотных характеристик разомкнутой системы.

Передаточная функция разомкнутой системы обычно является произведением элементарных динамических звеньев, асимптотические логарифмические характеристики которых представляют собой ломаные прямые линии.

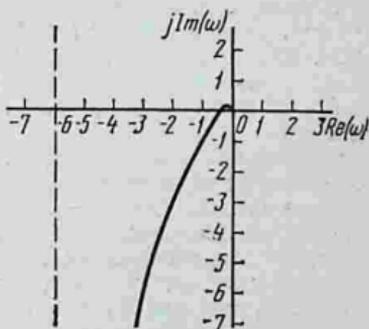


Рис. 3.8. Годограф Найквиста (к примеру 3.4).

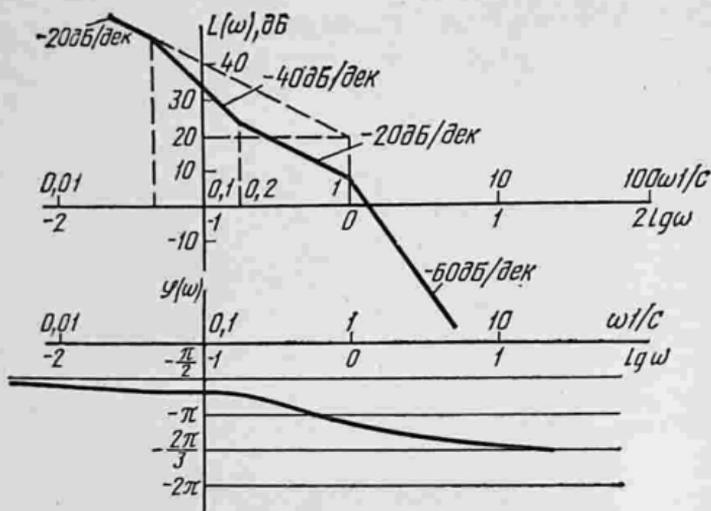


Рис. 3.9. Логарифмические частотные характеристики системы (к примеру 3.5).

Построение асимптотических логарифмических частотных характеристик всей разомкнутой системы заключается в суммировании прямолинейных участков логарифмических характеристик отдельных звеньев.

Процесс построения характеристик лучше всего показать на примере.

Пример 3.5. Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{k(T_1 s + 1)}{s(T_0 s + 1)(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)}.$$

Пусть $k=10$, $T_0=20$ с, $T_1=5$ с, $T=1$ с.

Найдем сопрягающие частоты (рис. 3.9) $\omega_0=0,05$ с $^{-1}$; $\omega_1=0,2$ с $^{-1}$; $\omega=1$ с $^{-1}$. Построение частотной характеристики начинаем в области низких частот. До частоты ω_0 $L(\omega)=20 \lg k/\omega$, которому соответствует прямая с наклоном -20 дБ/дек, проходящая через частоту $\omega=1$ с $^{-1}$ при $L_1=20 \lg k=20$ дБ. При достижении этой прямой первой сопрягающей частоты $\omega_0=0,05$ с $^{-1}$ изменяем наклон прямой. Если сопрягающая частота соответствует постоянной, находящейся в знаменателе, то наклон изменяем на -20 дБ/дек для каждой степени s , если постоянная времени в числителе, то на $+20$ дБ/дек для каждой степени s . В нашем случае T_0 в знаменателе, поэтому угол наклона участка ЛАЧХ до следующей сопрягающей частоты $\omega_1=0,2$ с $^{-1}$ составит -40 дБ/дек.

На участке частот $\omega_1=0,2$ с $^{-1}$ и $\omega=1$ с $^{-1}$ ЛАЧХ имеет наклон -20 дБ/дек, так как T_1 в числителе.

Наконец, после $\omega=1$ с $^{-1}$ наклон ЛАЧХ нужно изменить на -40 дБ/дек, так как T — постоянная времени колебательного звена s^2 . При высоких частотах ЛАЧХ имеет наклон -60 дБ/дек.

Фазочастотную характеристику строим по формуле

$$\varphi(\omega) = -90^\circ - \operatorname{arctg} \omega T_0 + \operatorname{arctg} \omega T_1 - \operatorname{arctg} \frac{2\xi T\omega}{1 - T^2\omega^2}.$$

Об устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам судят, исходя из следующих предпосылок. В соответствии с критерием Найквиста при $\varphi = -180^\circ$ амплитуда $A = Re(\omega)$ должна быть меньше единицы или $L(\omega) = 20 \lg A < 0$. Это условие позволяет легко определить устойчивость по виду логарифмических характеристик разомкнутой системы (рис. 3.10). На рисунке 3.10, а изображены ЛАЧХ и ЛФЧХ устойчивой автоматической системы, на рисунке 3.10, б — неустойчивой. Автоматическая система, рассмотренная в примере, неустойчива (рис. 3.9).

3.2.3. Запасы устойчивости

При проектировании автоматических систем стремятся обеспечить их устойчивость с некоторой гарантией, чтобы изменения параметров системы в процессе ее работы не могли привести к неустойчивости системы. Для этого система должна обладать определенным запасом устойчивости. Запас устойчивости характеризуется удалением параметров системы от границы устойчивости.

Нахождение системы на границе устойчивости можно определить при помощи критериев устойчивости. Например, при наличии в характеристическом уравнении системы двух мнимых корней (система находится на колебательной границе устойчивости) диагональный минор определителя Гурвица $n-1$ -го порядка равен нулю ($\Delta_{n-1} = 0$). При наличии одного нулевого корня $a_n = 0$.

Граница устойчивости по критерию Михайлова характеризуется поведением кривой Михайлова. Если в характеристическом уравнении один нулевой корень, кривая Михайлова выходит из начала координат (рис. 3.5, в). Если система находится на колебательной границе устойчивости, кривая Михайлова проходит через начало координат (рис. 3.5, з).

Значение минора Δ_{n-1} определителя Гурвица может качественно характеризовать удаление системы от границы устойчивости. Такую же характеристику дает удаление кривой Михайлова от начала координат.

Четкую количественную характеристику запаса устойчивости как по амплитуде, так и по фазе дает критерий Найквиста.

В соответствии с критерием Найквиста система находится на границе устойчивости, если годограф Найквиста

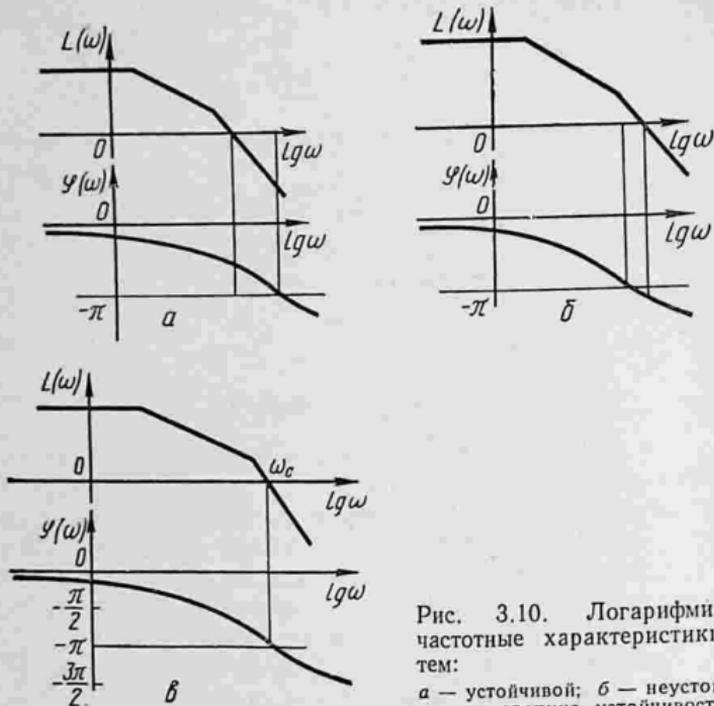


Рис. 3.10. Логарифмические частотные характеристики систем: *a* — устойчивой; *б* — неустойчивой; *в* — на границе устойчивости.

проходит через точку с координатами $(-1, j0)$ (рис. 3.7, *в*). Это колебательная граница устойчивости. При этом в логарифмических частотных характеристиках частота среза ω_c ЛАЧХ совпадает с частотой пересечения ЛФЧХ фазы, равной $-\pi$ (рис. 3.10, *в*).

Запасы устойчивости характеризуются удалением частотных характеристик от критических точек.

На рисунке 3.11 изображен годограф Найквиста устойчивой автоматической системы. Годограф пересекает отрицательную ветвь вещественной оси в точке *A* при $\omega = \omega_n$. Запасом устойчивости по модулю является

$$\beta = \frac{1}{|W_{раз}(j\omega_n)|}. \quad (3.23)$$

Значение модуля АФЧХ разомкнутой системы при постоянной ω_n зависит от коэффициента усиления *k*. Поэтому запас устойчивости по модулю есть запас по усилению:

$$\beta = \frac{k_{пред}}{k},$$

где $k_{пред}$ — значение коэффициента усиления, при котором $|W_{раз}(j\omega) = 1|$ и система находится на границе устойчивости.

Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к выходу автоматической системы за пределы устойчивости. На логарифмических характеристиках запас устойчивости по модулю определяется величиной ΔL (рис. 3.12). На границе устойчивости $\Delta L = 0$ ($\lg |W_{раз}(j\omega_n)| = 0$).

Запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ измеряется по дуге окружности единичного радиуса между отрицательной частью оси $Re(\omega)$ и ближайшей точкой пересечения окружности с годографом Найквиста (рис. 3.11). На логарифмических характеристиках запас устойчивости по фазе есть величина угла между ЛФЧХ и $-\pi$ при $\omega = \omega_c$. Запас по фазе обеспечивает сохранение устойчивости при увеличении запаздывания по фазе в системе и неизменном коэффициенте усиления системы.

Запасы устойчивости оказывают влияние не только на работоспособность системы, но и на качество работы автоматических систем.

В реальных автоматических системах запасы устойчивости по модулю обычно составляют 15...20 дБ, а запас устойчивости по фазе 30...50°.

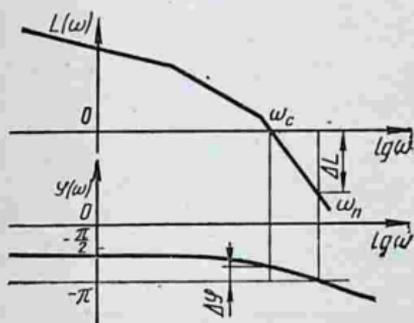


Рис. 3.12. Логарифмические частотные характеристики и запасы устойчивости автоматических систем.

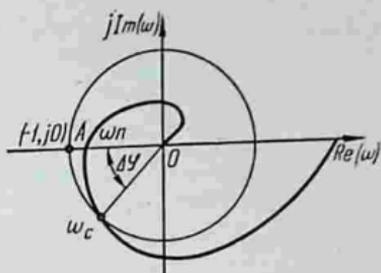


Рис. 3.11. Годограф Найквиста и запасы устойчивости автоматических систем.

3.2.4. Влияние чистого запаздывания на устойчивость автоматических систем

Значительное число объектов управления сельскохозяйственного производства описывается математической моделью, в состав которой входит звено чистого запаздывания. При этом передаточная функция ра-

зомкнутой автоматической системы, состоящая из линейных звеньев, умножается на передаточную функцию запаздывающего звена:

$$W_{\text{раз}}(s) = W_{\text{раз}}^*(s) e^{-s\tau}, \quad (3.24)$$

где τ — время чистого запаздывания; $W_{\text{раз}}^*(s)$ — передаточная функция линейных звеньев.

Подставим в выражение (3.24) $j\omega$ вместо s :

$$W_{\text{раз}}(j\omega) = W_{\text{раз}}^*(j\omega) e^{-j\omega\tau} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (3.25)$$

где $A(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика линейной части системы; $\varphi(\omega) = \varphi_{\text{л}}(\omega) - \omega\tau$ — фазо-частотная характеристика с учетом звена чистого запаздывания.

Звено чистого запаздывания не изменяет амплитуду АФЧХ, а создает дополнительный отрицательный сдвиг по фазе, зависящий от частоты.

Устойчивость автоматической системы с запаздыванием наиболее просто определять по критерию Найквиста. При этом АФЧХ автоматической системы строят следующим образом. Строят обычным образом $W_{\text{раз}}^*(j\omega)$. Затем каждую i -ю точку годографа поворачивают на угол $\Delta\varphi_i = -\omega_i\tau$ по часовой стрелке.

Приведем пример построения АФЧХ системы с запаздыванием и оценки устойчивости системы.

Пример 3.6. Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{5}{2s+1} e^{-0,5s}.$$

Находим

$$W_{\text{раз}}^*(j\omega) = \frac{5}{1+j2\omega} = \frac{5}{1+4\omega^2} - j \frac{10\omega}{1+4\omega^2}.$$

Задавая различные значения ω , строим график $W_{\text{раз}}^*(j\omega)$ (рис. 3.13, кривая 1). Данные расчетов заносим в таблицу 3.3.

При заданных значениях ω находим значения угла, на который необходимо повернуть конец вектора годографа, чтобы учесть чистое запаздывание, и данные заносим в таблицу 3.3. Строим график АФЧХ

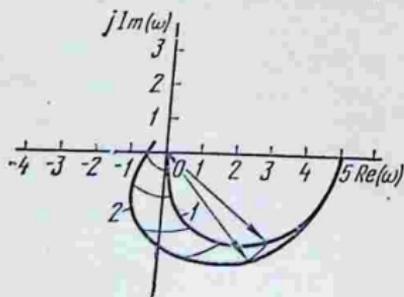


Рис. 3.13. Годограф Найквиста для автоматической системы с запаздыванием.

3.3. Расчетные данные к примеру 3.6

ω	$Re(\omega)$	$Im(\omega)$	$\omega\tau$, рад	$\omega\tau$, град
0	5	0	0	0
0,1	4,8	-0,96	-0,05	-2,86
0,2	4,3	-1,72	-0,10	-5,73
0,3	3,7	-2,2	-0,15	-8,60
0,4	3,05	-2,4	-0,20	-11,46
0,5	2,5	-2,5	-0,25	-14,32
1,0	1,0	-2,0	-0,5	-28,6
2,0	0,3	-1,2	-1,0	-57,3
5,0	0,05	-0,5	-2,5	-143,2
∞		0	$-\infty$	$-\infty$

с учетом запаздывания (рис. 3.13, кривая 2). Очевидно, что система устойчива при наличии звена чистого запаздывания.

Оценку устойчивости систем с запаздыванием можно выполнить с помощью логарифмических частотных характеристик [12].

Иногда необходимо установить значение запаздывания, при котором система находится на границе устойчивости. Это время носит название критического $\tau_{кр}$. В соответствии с рисунком 3.11:

$$\varphi(\omega_c) + \omega_c \tau_{кр} = \pi,$$

откуда

$$\tau_{кр} = \frac{\pi - \varphi(\omega_c)}{\omega_c}.$$

3.2.5. Области устойчивости

Для обеспечения заданных показателей качества системы при изменяющихся внешних возмущениях ряд ее параметров делают регулируемыми. Обычно это передаточные коэффициенты отдельных элементов системы или их постоянные времени. Как было показано в параграфе 3.2.3, изменение параметров может привести к потере устойчивости автоматической системы. Поэтому важно определить пределы допустимых изменений регулируемых параметров. Существуют методы определения пределов изменения одного или двух параметров при неизменных значениях остальных.

При этом в плоскости одного или двух параметров выделяют область устойчивости, то есть область, в которой

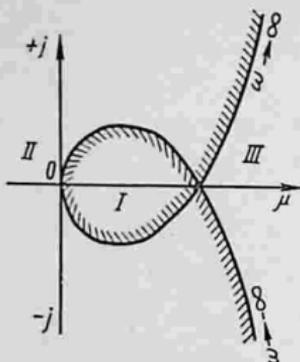


Рис. 3.14. Кривая D -разбиения.

изменение параметров не вызывает нарушения устойчивости системы. Области устойчивости можно строить с помощью любого критерия устойчивости. Наиболее просто области устойчивости можно получить с помощью метода D -разбиения (Неймарк Ю. И., 1948 г.).

В основе метода лежит критерий Михайлова устойчивости автоматических систем. Если система находится на колебательной границе устойчивости, это соответствует равенству нулю характеристического вектора $D(j\omega) = 0$. Пусть параметр μ , который необходимо изменять в процессе работы системы, входит в характеристическое уравнение линейно. Тогда оно может быть приведено к виду

$$D(s) = \mu N(s) + M(s) = 0, \quad (3.26)$$

откуда

$$\mu = -\frac{M(s)}{N(s)}.$$

Для того чтобы выяснить, при каких значениях μ система находится на границе устойчивости, необходимо вместо s подставить $j\omega$ и построить на комплексной плоскости график функции

$$\mu = -\frac{M(j\omega)}{N(j\omega)} = X(\omega) + jY(\omega) \quad (3.27)$$

при значениях частоты $-\infty < \omega < \infty$.

Полученная кривая D -разбиения представляет собой отображение мнимой оси комплексной плоскости корней характеристического уравнения на плоскость параметра μ (рис. 3.14). Поэтому корни с отрицательной вещественной частью должны лежать слева от кривой при изменении ω от $-\infty$ до ∞ , то есть штриховка (рис. 3.3) на кривой должна быть слева при движении по кривой от $\omega \rightarrow -\infty$ до $\omega \rightarrow \infty$.

Кривая D -разбиения делит всю плоскость на несколько областей (например, на рис. 3.14 — три области). В линейных задачах изменяемый параметр μ всегда является вещественным, поэтому практический интерес представляют части областей, лежащие на вещественной оси. Областью

устойчивости будет множество вещественных значений μ , лежащих в области, очерченной кривой, внутрь которой направлена штриховка (рис. 3.14, область 1). Для проверки области устойчивости подставляют в характеристическое уравнение системы одно из значений параметра μ , принадлежащее области, и устойчивость системы с этим значением параметра оценивают по одному из критериев.

Учитывая, что $X(\omega)$ — четная функция, а $Y(\omega)$ — нечетная, расчеты ведут для значений ω от 0 до ∞ и строят график этой функции. График $D(j\omega)$ при значении ω от $-\infty$ до 0 симметричен предыдущему относительно вещественной оси.

Пример 3.7. Характеристическое уравнение автоматической системы имеет вид

$$T_0 T_2^2 s^4 + (T_0 T_1 + T_2^2) s^3 + (T_0 + T_1) s^2 + s + k k_y = 0,$$

где $T_0 = 1$ с; $T_1 = 0,04$ с; $T_2 = 0,06$ с; $k = 5$; k_y — передаточный коэффициент управляющего элемента, подлежащий регулировке.

Определить пределы изменения k_y , при которых автоматическая система будет работать устойчиво.

Подставляем значения коэффициентов в характеристическое уравнение и решаем его относительно k_y :

$$k_y = -0,0007s^4 - 0,0087s^3 - 0,208s^2 - 0,2s.$$

Заменяем s на $j\omega$ и разделяем вещественную и мнимую части:

$$k = -0,0007\omega^4 + 0,0087j\omega^3 + 0,208\omega^2 - 0,2j\omega = \omega^2(0,208 - 0,0007\omega^2) + j\omega(0,0087\omega^2 - 0,2) = X(\omega) + jY(\omega).$$

Подставляем различные значения ω от 0 до ∞ и результаты заносим в таблицу 3.4.

3.4. Расчетные данные к примеру 3.7

ω	$X(\omega)$	$Y(\omega)$
0	0	0
1,0	0,21	-0,19
2,0	0,83	-0,33
3,0	1,85	-0,36
4,0	2,96	-0,24
4,8	4,42	0
10,0	13,8	6,7
15,0	11,36	25,4
16,0	7,60	32,5
17,2	0	40,9
20,0	-32,0	61,6
∞	$-\infty$	∞

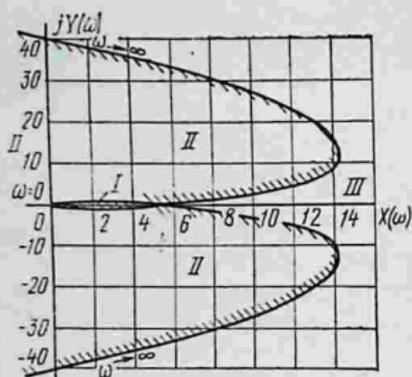


Рис. 3.15. Кривая D -разбиения к примеру 3.7.

Пусть $k_y=1$. Характеристическое уравнение имеет вид

$$0,0036s^4 + 0,043s^3 + 1,04s^2 + s + 5 = 0.$$

Составим определитель Гурвица:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 0,0436 & 1 & 0 & 0 \\ 0,0036 & 1,04 & 5 & 0 \\ 0 & 0,0436 & 1 & 0 \\ 0 & 0,0036 & 1,04 & 5 \end{vmatrix} \cong 0,16 > 0; \Delta_2 = 0,042 > 0$$

Таким образом, область I представляет собой область устойчивости.

Разработан метод построения D -разбиения для двух изменяющихся параметров [12].

3.3. КАЧЕСТВО РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.3.1. Показатели качества

Качество работы автоматической системы определяется рядом ее показателей. В процессе работы автоматическая система должна обладать достаточной точностью воспроизводства задающего воздействия. Она должна достаточно быстро компенсировать воздействие возмущающей входной величины, и при этом ее динамические отклонения должны быть ограничены.

Для определения показателей качества системы обычно проводят анализ реакции системы на различные типовые воздействия (единичный скачок, единичный импульс, гар-

По данным таблицы строим кривую D -разбиения (рис. 3.15). Кривая разделяет плоскость параметра k_y [откладывается по оси $X(\omega)$] на три области. Очевидно, что только для области I штрихи кривой D -разбиения направлены внутрь. Поэтому значения коэффициента k_y , расположенные на отрезке вещественной оси $[0..4,42]$, определяют область устойчивости системы. Значение $k_y=4,42$ соответствует колебательной границе устойчивости, а значение $k_y=0$ — границе устойчивости с нулевым корнем.

Проверим устойчивость системы при одном из значений коэффициента из области устойчи-

моническое воздействие, стационарный случайный процесс).

Точность работы автоматической системы определяется наличием разности между задающим воздействием выходной величины в различных установившихся режимах.

Быстродействие системы и ее динамические отклонения можно получить, используя прямые оценки переходного процесса при единичном ступенчатом воздействии на входе или различные приближенные косвенные оценки качества.

Динамическую точность автоматической системы при воздействии стационарного случайного процесса оценивают с помощью средней квадратической ошибки.

Рассмотрим переходный процесс (рис. 3.16). Быстродействие системы оценивается временем $T_{\text{рег}}$, которое определяется промежутком временной оси от момента приложения воздействия до того момента, когда разница между заданной и выходной величинами во все последующие моменты времени становится меньше некоторой величины Δ . Обычно Δ принимается равной 3...5% от установившегося значения выходной величины $y(\infty)$. Перерегулирование $\sigma\%$ характеризует величину максимального динамического отклонения системы в переходном процессе:

$$\sigma = \frac{y_{\text{max}} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%, \quad (3.28)$$

где y_{max} — максимальное значение регулируемой величины; $y(\infty)$ — установившееся значение выходной величины.

Число полупериодов n за время переходного процесса $T_{\text{рег}}$ является мерой колебательности.

Перерегулирование и колебательность в основном зависят от запаса устойчивости системы и могут служить его косвенными показателями. Чем ближе система к границе устойчивости, тем больше значения σ и n .

Для обеспечения устойчивой и высококачественной работы автоматическая система должна обеспечить заданную требованиями технического процесса точность как в установившемся режиме $\delta(t)$ (рис. 3.16), так и динамическую.

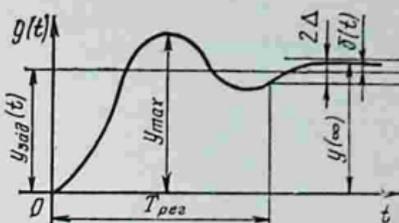


Рис. 3.16. Переходный процесс системы автоматического регулирования.

Рис. 3.17. Структурная схема автоматической системы.



Система должна обладать заданным быстродействием, величина перерегулирования не должна превышать 20%, а число полуколебаний за время регулирования должно быть $n \leq 2 \dots 3$.

Рассмотрим некоторые методы анализа показателей качества работы автоматических систем.

3.3.2. Метод определения точности работы автоматических систем в установившихся режимах

Структура метода. Рассмотрим структурную схему автоматической системы (рис. 3.17). Предположим вначале, что система разомкнута около сравнивающего элемента (рис. 3.17, волнистая линия). Тогда значение выходной величины $y(t)$ запишется выражением

$$y(t) = [W_{AУУ}(p) W_o(p)] \Delta y(t) - W_f(p) f(t), \quad (3.29)$$

где $W_o(p)$ — передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию; $W_{AУУ}(p)$ — передаточная функция автоматического управляющего устройства; $W_f(p)$ — передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию.

Учитывая, что $W_{AУУ}(p) W_o(p) = W_{раз}(p)$ — передаточная функция разомкнутой автоматической системы, (3.29) можно записать так:

$$y(t) = W_{раз}(p) \Delta y(t) - W_f(p) f(t). \quad (3.30)$$

Рассмотрим теперь замкнутую систему. В замкнутой системе значение

$$\Delta y(t) = y_{зад}(t) - y(t). \quad (3.31)$$

Подставим значение $\Delta y(t)$ из (3.31) в (3.30) и определим

значение выходной величины:

$$y(t) = W_{\text{раз}}(p) y_{\text{зад}}(t) - W_{\text{раз}}(p) y(t) - W_f(p) f(t) \quad \text{или}$$

$$y(t) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} y_{\text{зад}}(t) - \frac{W_f(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} f(t). \quad (3.32)$$

Используя выражение (3.30) и учитывая, что $y(t) = y_{\text{зад}}(t) - \Delta y(t)$, получим выражение для ошибки

$$\Delta y(t) = \frac{y_{\text{зад}}(t)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} + \frac{W_f(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} f(t). \quad (3.33)$$

Формула (3.33) показывает, что значение ошибки выходной величины $\Delta y(t)$ состоит из значения ошибки от задающего воздействия $y_{\text{зад}}(t)$ и значения ошибки от возмущающего воздействия $f(t)$.

Если на автоматическую систему действует l возмущающих воздействий, то общее значение ошибки записывается формулой

$$\Delta y(t) = \frac{y_{\text{зад}}(t)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} + \frac{\sum_{k=1}^l W_{f_k}(p) f_k(t)}{1 + W_{\text{раз}}(p)}. \quad (3.34)$$

Значение составляющих ошибки в установившемся режиме определяется выражением (3.34), когда переходные процессы, происходившие под действием возмущающих и управляющих воздействий, давно завершились и можно считать, что движение системы установилось. Это возможно при $t \rightarrow \infty$ или $p \rightarrow 0$ [12].

Таким образом, точность системы в установившемся режиме определяется формулой

$$\Delta y(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{y_{\text{зад}}(t)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} + \lim_{p \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^l W_{f_k}(p) f_k(t)}{1 + W_{\text{раз}}(p)}. \quad (3.35)$$

Предположим, что имеется система автоматического регулирования, у которой есть одно задающее и одно возмущающее воздействия. Рассмотрим возможные характерные случаи определения значений ошибок в установившихся режимах.

Статическая система автоматического регулирования. Передаточная функция разомкнутой статической системы имеет вид

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}. \quad (3.36)$$

В установившемся режиме

$$\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{раз}}(p) = \frac{b_m}{a_n} = k.$$

Поэтому составляющая ошибки от задающего воздействия

$$\Delta y'(t) = \frac{y_{\text{зад}}(t)}{1+k}, \quad (3.37)$$

а составляющая ошибки от возмущающего воздействия

$$\Delta y''(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{W_f(p) f(t)}{1+k}. \quad (3.38)$$

Обычно $\lim_{p \rightarrow 0} W_f(p)$ — коэффициент усиления объекта управления по возмущающему воздействию k_1 . Поэтому общее значение установившейся ошибки автоматической системы составит

$$\Delta y = \Delta y'(t) + \Delta y''(t) = \frac{y_{\text{зад}}(t)}{1+k} + \frac{k_1 f(t)}{1+k}. \quad (3.39)$$

Формула (3.39) показывает, что значение статической установившейся ошибки зависит от общего передаточного коэффициента разомкнутой системы. Увеличение этого коэффициента уменьшает статическую ошибку и улучшает качество регулирования. Однако, как было показано в параграфе 3.2.3, увеличение передаточного коэффициента приводит к ухудшению устойчивости системы и при превышении граничных значений k система оказывается неустойчивой.

Если статическая автоматическая система является системой стабилизации, то $y_{\text{зад}}(t) = y_0 = \text{const}$. В этом случае заданное значение регулируемой величины можно брать за начало отсчета ($y_0 = 0$). Составляющая ошибки от задающего воздействия $\Delta y'(t) = 0$ и общее значение ошибки будут определяться только возмущающим воздействием системы:

$$\Delta y(t) = \frac{k_1}{1+k} f(t). \quad (3.40)$$

Астатическая система автоматического регулирования.
Передаточная функция разомкнутой астатической системы имеет вид

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{p(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n)}. \quad (3.41)$$

В установившемся режиме

$$\lim_{p \rightarrow 0} W_{\text{раз}}(p) = b_m/0 = \infty. \quad (3.42)$$

Поэтому в астатических системах автоматического регулирования статическая установившаяся ошибка от задающего и возмущающего воздействия равна нулю.

Если в астатической системе действует возмущение, которое приложено до интегрирующего звена, то появится устоявшаяся статическая ошибка. В этом случае действующее на объект возмущение будет проходить через интегрирующее звено. Поэтому

$$\Delta y''(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{W_0(p) \frac{k_n}{p} f_1(t)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} = \frac{k_0 k_n f_1(t)}{1 + k}, \quad (3.43)$$

где k_0 — передаточный коэффициент объекта управления; k_n — передаточный коэффициент интегрирующего звена; $f_1(t)$ — возмущение, приложенное до интегрирующего звена; k — общий передаточный коэффициент разомкнутой системы $k = b_m/a_{n-1}$.

Обычно такие ошибки в системе возникают при ошибках чувствительного элемента автоматической системы.

Полученные формулы для расчета ошибок автоматических систем позволяют легко находить значения ошибок при постоянных во времени значениях возмущающего или задающего воздействия.

Если эти воздействия являются функциями времени, причем $y_{\text{зад}}(t)$ и $f(t)$ могут иметь произвольную форму, но должны быть достаточно гладкими, точность автоматической системы можно определить при помощи коэффициентов ошибок [8]. При этом о качестве работы системы будет получена дополнительная информация в виде коэффициентов ошибок (добротность системы по скорости, ускорению и т. д.).

Пример 3.8. Передаточная функция разомкнутой автоматической системы стабилизации температуры в помещении имеет вид

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{653p + 384}{0,02p^4 - 0,54p^3 + 9p^2 + 90p + 10}.$$

Номинальное значение температуры в помещении 20°C. Передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию

$$W_f(p) = 2/(p+1).$$

Возмущающее воздействие — температура окружающей среды действует непосредственно на объект управления и имеет постоянное

значение

$$\dot{f}(t) = \dot{f}_0 = \text{const} = 20^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C} = 12^\circ\text{C}.$$

Определить значение статической установившейся ошибки автоматической системы.

Решение. Учитывая, что это система стабилизации и возмущающее воздействие имеет постоянное значение, определяем значение ошибки по формуле (3.40):

$$\Delta y = \frac{k_1}{1+k} \dot{f}(t),$$

где $k_1 = 2$; $k = 384/10 = 38,4$,

или

$$\Delta y(t) = \frac{2 \cdot 12^\circ\text{C}}{39,4} = 0,61^\circ\text{C}.$$

3.3.3. Методы расчета динамических показателей качества регулирования автоматических систем

Динамические показатели качества (время регулирования $T_{\text{пер}}$, перерегулирование σ и колебательность n) определяют путем анализа переходного процесса автоматической системы.

Получение кривой переходного процесса автоматической системы — задача весьма сложная. Решение динамических уравнений выше третьего порядка вызывает значительные затруднения. Применяют ряд приближенных методов, позволяющих получить кривую переходного процесса. Рассмотрим один из них — метод трапеций.

Построение переходного процесса с использованием этого метода основано на замене истинной вещественной частотной характеристики замкнутой автоматической системы $P(\omega)$ ломаной по возможности с небольшим числом отрезков.

Реакция автоматической системы на скачкообразное управляющее или возмущающее воздействие может быть найдена с помощью частотных характеристик системы [16]:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega, \quad (3.44)$$

где $P(\omega)$ — вещественная частотная характеристика замкнутой автоматической системы по задающему или возмущающему воздействию.

Интегрирование выражения (3.44) представляет большие трудности. Поэтому интеграл вычисляют приближенно,

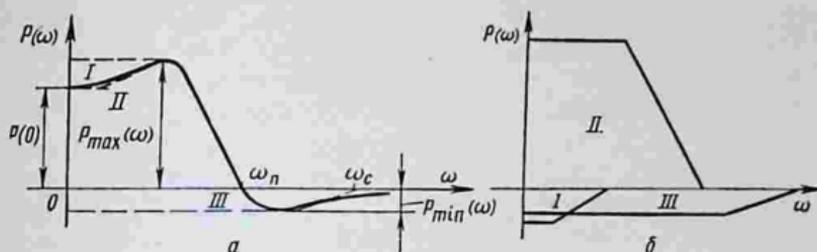


Рис. 3.18. Вещественная частотная характеристика $P(\omega)$ (а) и трапеции, аппроксимирующие вещественную частотную характеристику (б).

аппроксимируя $P(\omega)$ несколькими трапецидальными характеристиками [12].

При замене вещественной частотной характеристики $P(\omega)$ (рис. 3.18, а) рядом трапеций площадь всех трапеций должна приблизительно равняться площади вещественной частотной характеристики. Сумма высот прямоугольных трапеций должна равняться $P(0)$ (рис. 3.18, б).

Для построения переходного процесса используется понятие единичной трапецидальной вещественной характеристики (рис. 3.19). У этой трапеции высота $P(0)=1$, а частота среза $\omega_n=1$. Прямоугольные единичные трапеции отличаются друг от друга только значениями частоты излома ω_a или коэффициентом наклона трапеции

$$\chi = \omega_a / \omega_n. \quad (3.45)$$

Очевидно, что значение χ может находиться между 0 и 1 ($0 \leq \chi \leq 1$). Для единичных трапеций с различными значениями χ составлены таблицы $h(\bar{t})$ -функций — переходных процессов, если вещественная частотная характеристика является единичной трапецией [2], [12] и т. д.

Переходный процесс $h(\bar{t})$, соответствующий единичной трапецидальной характеристике, имеет безразмерное время t и единичную высоту $h(\infty)$.

Кривую переходного процесса для реальной трапеции с высотой $P_i(0)$ и частотой среза ω_{ni} получают следующим образом.

1. Находят значение χ реальной трапеции по формуле (3.45).

2. По таблицам $h(\bar{t})$ -функций выписывают значения переходного

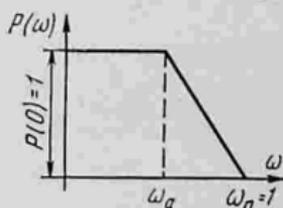


Рис. 3.19. Единичная трапеция.

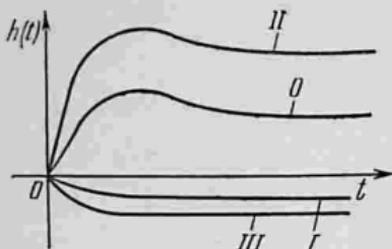


Рис. 3.20. Построение кривой переходного процесса.

тают отрицательными. Время переходного процесса для реальной трапеции определяют по формуле

$$t = \bar{t} \omega_n.$$

Полученные переходные процессы для каждой реальной трапеции, из которых состоит вещественная частотная характеристика, наносят на график (рис. 3.20, кривые I, II и III).

Кривую переходного процесса всей системы получают путем суммирования ординат переходных процессов каждой трапеции (рис. 3.20, кривая 0). Установившееся значение выходной величины системы должно равняться $P(0)$.

По кривой переходного процесса всей системы определяют показатели качества переходного процесса — время регулирования, перерегулирование и колебательность.

Пример 3.9. На рисунке 3.21, а показана вещественная частотная характеристика автоматической системы. Ее можно аппроксимировать с достаточной степенью точности тремя трапециями. Эти трапеции изображены на рисунке 3.21, б.

Каждая трапеция характеризуется следующими параметрами: $P_I(0) = -0,31$, $\omega_{nI} = 1,5 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{aI} = 0,5 \text{ с}^{-1}$, $P_{II}(0) = 1,51$, $\omega_{nII} = 4,7 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{aII} = 2,4 \text{ с}^{-1}$, $P_{III}(0) = -0,2$, $\omega_{nIII} = 7,3 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{aIII} = 5,7 \text{ с}^{-1}$, заметим, что $\sum_{i=1}^3 P_i(0) = 1,51 - 0,31 - 0,2 = 1$.

Для построения переходного процесса определим значение χ для каждой трапеции:

$$\chi_I = 0,5/1,5 = 0,333; \chi_{II} = 2,4/4,7 = 0,51; \\ \chi_{III} = 5,7/7,3 = 0,78.$$

По таблице $\bar{h}(\bar{t})$ -функций для значений коэффициентов наклона, близких к расчетным, определяем параметры переходного процесса

3.5. Расчетные данные к примеру 3.9

Время t	Трапедия I		Трапедия II		Трапедия III	
	единичная $\chi=0,35$	реальная $\omega_{пI}=1,5 \text{ с}^{-1}$ $P_I(0)=-0,31$	единичная $\chi=0,5$	реальная $\omega_{пII}=4,7 \text{ с}^{-1}$ $P_{II}(0)=1,51$	единичная $\chi=0,8$	реальная $\omega_{пIII}=7,3 \text{ с}^{-1}$ $P_{III}(0)=-0,2$
	$h_1(t)$	t	$h_2(t)$	t	$h_3(t)$	t
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	0,006	0,130	0,096	0,043	0,115	0,027
0,6	0,255	0,400	0,283	0,128	0,338	0,082
1,2	0,493	0,800	0,545	0,255	0,644	0,165
1,8	0,700	1,200	0,769	0,383	0,891	0,246
2,4	0,866	1,600	0,940	0,511	1,062	0,328
3,0	0,986	2,000	1,061	0,640	1,154	0,411
3,6	1,062	2,400	1,124	0,767	1,174	0,494
4,2	1,098	2,800	1,143	0,894	1,141	0,575
4,8	1,104	3,200	1,129	1,020	1,077	0,658
6,0	1,069	4,000	1,051	1,280	0,949	0,821
7,0	1,033	4,670	0,992	1,490	0,911	0,960
8,0	1,011	5,320	0,966	1,700	0,943	1,095
9,0	1,006	6,010	0,968	1,110	1,006	1,230
10,0	1,005	6,667	0,982	2,122	1,049	1,370
11,0	1,002	7,340	0,998	2,345	1,015	1,510
15,0	0,986	10,000	1,005	3,200	1,003	2,060
20,0	1,001	13,300	0,995	4,260	0,991	2,740
30,0	0,999	20,000	1,003	6,390	0,999	4,110

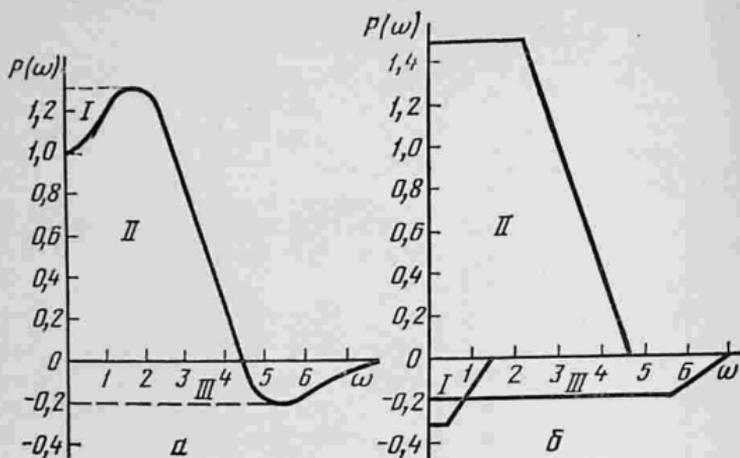


Рис. 3.21. Вещественная частотная характеристика (а) и трапеции, построенные на ней (б) (к примеру 3.9).

единичных трапеций и заносим их в таблицу 3.5. Принимаем $\chi_I = 0,35$, $\chi_{II} = 0,5$, $\chi_{III} = 0,8$.

По данным таблицы строим кривые переходных процессов для каждой трапеции (рис. 3.22, кривые 1, 2 и 3).

Суммируя значение ординат всех трех кривых, получаем значение переходного процесса всей системы (рис. 3.22, кривая 0). Анализ кривой переходного процесса показывает, что автоматическая система имеет время регулирования $T_{\text{рег}} = 2,9$ с. Перерегулирование $\sigma = 34\%$ колебательность $n \approx 1,5$.

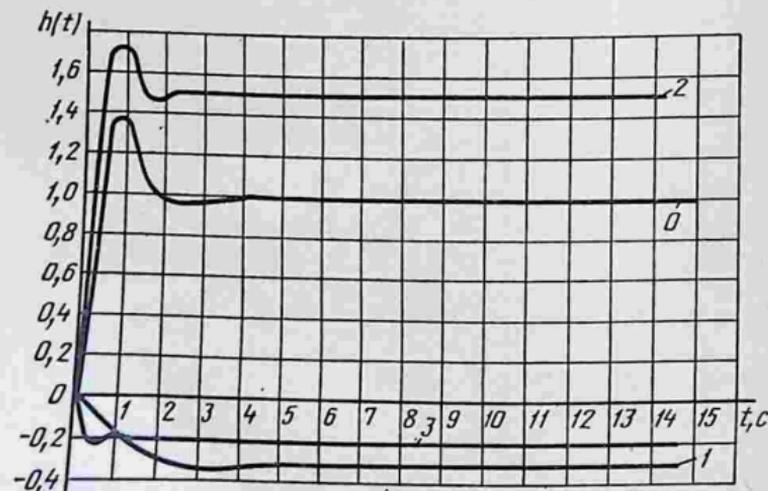


Рис. 3.22. Построение переходного процесса (к примеру 3.9).

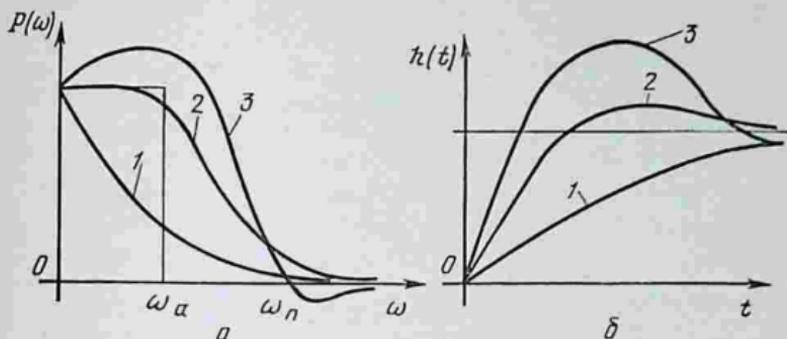


Рис. 3.23. Возможные виды вещественных частотных характеристик (а) и соответствующий им характер изменения переходного процесса (б).

Некоторые показатели качества регулирования автоматических систем можно определить приближенно без построения кривой переходного процесса по виду вещественной частотной характеристики $P(\omega)$ замкнутой автоматической системы (рис. 3.18). На рисунке ω_n — частота, которая является границей положительных значений ординат вещественной характеристики, ω_c — частота, после которой значения ординат вещественной характеристики меньше $0,2 P(0)$. Если значения отрицательных $P(\omega)$ будут меньше $0,2 P(0)$, то анализ показателей качества можно вести по виду кривой $P(\omega)$ до $\omega = \omega_c$. Это объясняется тем, что конечные значения ординат вещественной частотной характеристики оказывают влияние только на начальную часть переходного процесса, до момента, когда наблюдается максимальное отклонение регулируемой величины. $P_{\max}(\omega)$ — максимальное значение вещественной частотной характеристики, а $P_{\min}(\omega)$ — ее минимальное значение.

Различают три основных вида вещественной частотной характеристики (рис. 3.23, а).

Первый вид вещественной характеристики (рис. 3.23, а, кривая 1) отличается тем, что максимальное значение $P(\omega)$ достигается при $\omega = 0$. Переходный процесс в этом случае характеризуется монотонностью и отсутствием перерегулирования (рис. 3.23, б, кривая 1). Время регулирования для монотонных процессов $t_p \geq 4\pi/\omega_n$.

Второй вид вещественной частотной характеристики имеет значение $P(\omega)$, не превышающее $P(0)$, однако существует множество значений $P(\omega) = P(0)$ (рис. 3.23, а, кривая 2). Такие $P(\omega)$ могут быть приближенно заменены одной трапецией. В этом случае переходный процесс имеет

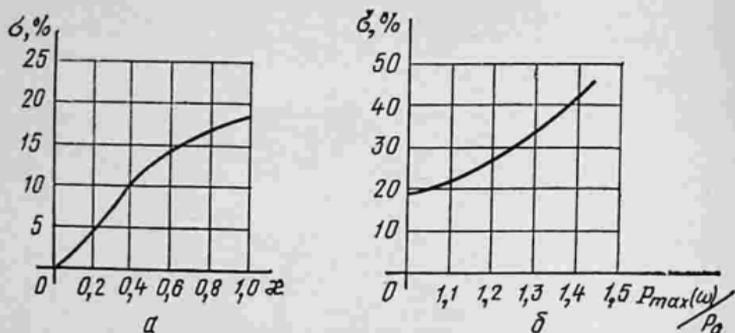


Рис. 3.24. Зависимость перерегулирования от параметров вещественных частотных характеристик.

вид, показанный на рисунке 3.23, б, кривая 2, причем перерегулирование для таких процессов не превышает 18%. Зависимость между значением перерегулирования и χ аппроксимирующей трапеции показана на рисунке 3.24, а [2].

Время регулирования заключается в интервале

$$\pi/\omega_n < t_{\text{рег}} < 4\pi/\omega_n.$$

Характерным для третьего вида $P(\omega)$ является наличие максимальных значений $P(\omega)$, превышающих $P(0)$ (рис. 3.23, а, кривая 3). Переходный процесс характеризуется большими значениями перерегулирования, превышающими 20%. Для наиболее часто встречающихся систем зависимость между величиной перерегулирования и отношением $P_{\max}(\omega)/P(0)$ показана на рисунке 3.24, б [2].

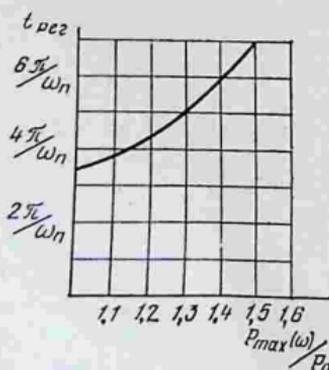


Рис. 3.25. Зависимость времени регулирования от отношения $P_{\max}(\omega)/P(0)$.

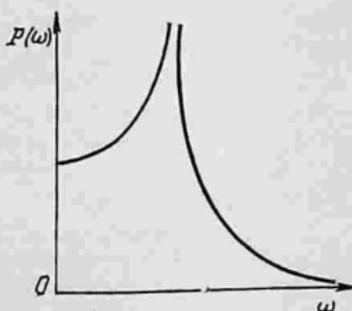


Рис. 3.26. Вид $P(\omega)$ при нахождении системы на колебательной границе устойчивости.

Время затухания переходного процесса $t_{\text{рег}}$ зависит от значения $\omega_{\text{п}}$ и отношения $P_{\text{max}}(\omega)/P(0)$ (рис. 3.25) [2].

Колебательность за время регулирования $T_{\text{рег}}$ определяется также пиком вещественной характеристики. С его ростом по отношению к $P(0)$ увеличивается и колебательность переходного процесса. В частности, если вещественная частотная характеристика может быть аппроксимирована одной трапецией (рис. 3.23, а, кривая 2), колебательность переходного процесса составляет не более 2...3 полупериодов. Когда пик вещественной частотной характеристики имеет бесконечное значение (рис. 3.26), переходный процесс вообще не устанавливается, так как система находится на колебательной границе устойчивости.

Есть и другие методы оценки динамических показателей качества автоматических систем, в частности метод корневого годографа [2], нормированных диаграмм [8] и т. д.

3.4. ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.4.1. Понятие о нелинейных системах. Виды нелинейностей

Нелинейными называются автоматические системы, динамика движения которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Нелинейности дифференциальных уравнений, которые мы будем рассматривать, обусловлены нелинейной статической характери-

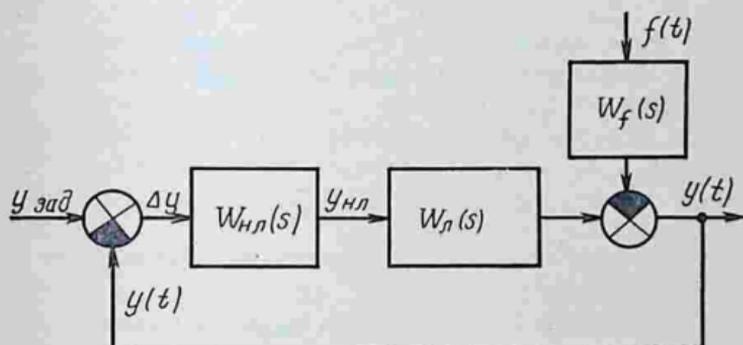


Рис. 3.27. Структурная схема нелинейной системы:

$W_{\text{л}}(s)$ — передаточная функция линейных элементов системы; $W_f(s)$ — передаточная функция линейного объекта управления по возмущающему воздействию; $W_{\text{нл}}(s)$ — передаточная функция нелинейного элемента.

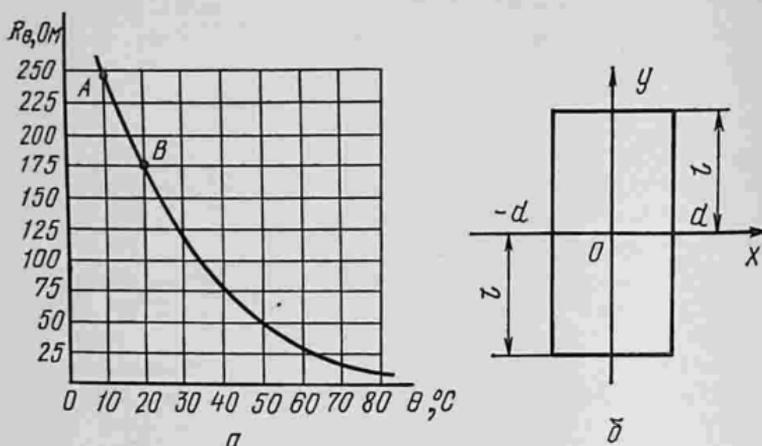


Рис. 3.28. Статические характеристики нелинейных элементов: а — термистора; б — реле.

стикой элементов системы. Если хотя бы одно звено системы имеет нелинейную статическую характеристику, то вся автоматическая система является нелинейной.

В данном пособии будет рассматриваться класс нелинейных систем автоматического управления, который можно представить в виде последовательного соединения двух частей автоматической системы: линейной и нелинейной. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 3.27. Причем нелинейный элемент является безынерционным звеном с нелинейной статической характеристикой. Такой узкий класс нелинейных систем имеет весьма широкое распространение при автоматизации многих процессов, в том числе и процессов сельскохозяйственного производства.

Почти все реальные элементы автоматических систем нелинейны, и лишь приближенно мы можем считать их линейными. Так, нелинейна статическая характеристика термистора, потенциометрического и индуктивного преобразователей перемещений, всех объектов управления усилительных элементов и т. д.

Нелинейности можно разделить на две основные группы: гладкие несущественные и существенные. К первой группе относятся такие нелинейности, на которых при малом диапазоне изменения аргумента можно выбрать участки, близкие к линейным, и заменить их линейными участками. На рисунке 3.28, а изображена статическая характеристика

термистора. На рабочем участке температур от 10 до 20°C кривая может быть заменена линейным отрезком *AB*, причем эта замена почти не изменит динамики автоматической системы. Поэтому динамические расчеты таких систем ведут как для линейных.

Существенные нелинейности обычно являются разрывными или неоднозначными функциями или функциями, имеющими изломы. Примером такой функции может служить статическая характеристика поляризованного двухпозиционного реле (рис. 3.28, б). Преобразование любого входного воздействия для такой характеристики всегда нелинейно.

Нелинейности второй группы весьма разнообразны. Основные виды таких нелинейностей приведены в таблице 3.6, в которой указаны наиболее часто встречающиеся названия нелинейностей, их математическая запись и примеры реальных звеньев, встречающихся в автоматических системах. Указанные в таблице 3.6 примеры звеньев ни в коей мере не претендуют на полноту. Такие нелинейные статические характеристики могут иметь элементы и другой физической природы.

Нелинейные автоматические системы характеризуются более сложными и разнообразными динамическими процессами по сравнению с линейными. Характер движения нелинейных систем зависит от начальных условий. В нелинейных системах возможен без каких-либо внешних возмущений новый по сравнению с линейными системами вид установившегося движения — автоколебания, то есть устойчивые колебания с определенной амплитудой и частотой, зависящей от конструктивных особенностей системы. При подаче на вход нелинейной системы периодического возмущения в ней могут наблюдаться особые случаи резонанса. Резонанс в нелинейной системе может происходить на частоте, равной доле частоты входного воздействия. Возможен и ряд других особенностей движения нелинейных систем.

Вопрос об устойчивости в нелинейных системах более сложный, чем в линейных. Нелинейная система может быть устойчива в малом (при незначительных начальных возмущениях) и неустойчива в большом (если начальные условия превышают некоторые определенные граничные значения). Нелинейная система может иметь область устойчивости равновесного состояния с постоянным значением регулируемой величины и быть асимптотически устойчи-

3.6. Основные виды нелинейностей второй группы

Позиция	Название нелинейности	Вид статической характеристики	$y = f(x)$	Примеры реальных звеньев
1	Зона насыщения		$y = \frac{l}{d} x \quad x \leq d$ $y = l \quad x > d$ $y = -l \quad x < -d$	Электрические усилители
2	Зона нечувствительности		$y = \xi(x+d) \quad x < -d$ $y = 0 \quad x \leq d$ $y = \xi(x-d) \quad x > d$	Механические усилители
3	Зона нечувствительности и зона насыщения		$y = -l \quad x < -h$ $y = \frac{l}{h-d}(x+d) \quad h < x < -d$ $y = 0 \quad x \leq d$ $y = \frac{l}{h-d}(x-d) \quad d < x < h$ $y = l \quad x > h$	Гидравлические и пневматические усилители
4	Идеальное двухпозиционное реле		$y = l \quad x > 0$ $y = -l \quad x < 0$	Идеализованная характеристика двухпозиционных электрических приборов

Позиция	Название нелинейности	Вид статической характеристики	$y = f(x)$	Примеры реальных звеньев
5	Идеальное реле с зоной нечувствительности		$y = -1 \quad x < -d$ $y = 0 \quad x \leq d$ $y = 1 \quad x > d$	Идеализованная характеристика трехпозиционных электромагнитных приборов
6	Двухпозиционное реле		$y = 1 \quad x > d \quad \left. \vphantom{y = 1} \right\} x'_t > 0$ $y = -1 \quad x < -d \quad \left. \vphantom{y = -1} \right\} x'_t > 0$ $y = 1 \quad x > -d \quad \left. \vphantom{y = 1} \right\} x'_t < 0$ $y = -1 \quad x < -d \quad \left. \vphantom{y = -1} \right\} x'_t < 0$	Реле. Реальные двухпозиционные переключающие элементы
7	Трехпозиционное реле		$y = 1 \quad x < h \quad \left. \vphantom{y = 1} \right\} x'_t > 0$ $y = 0 \quad -d < x < h \quad \left. \vphantom{y = 0} \right\} x'_t > 0$ $y = -1 \quad x < -d \quad \left. \vphantom{y = -1} \right\} x'_t > 0$ $y = 1 \quad x > d \quad \left. \vphantom{y = 1} \right\} x'_t < 0$ $y = 0 \quad -h < x < d \quad \left. \vphantom{y = 0} \right\} x'_t < 0$ $y = -1 \quad x < -h \quad \left. \vphantom{y = -1} \right\} x'_t < 0$	Реальные трехпозиционные переключающие элементы
8	Люфт, зазор или сухое трение		$y = \xi \quad (x - d) \quad x'_t > 0$ $y = \xi \quad (x + d) \quad x'_t < 0$	Различные механические передачи с зазорами, люфтами и сухим трением

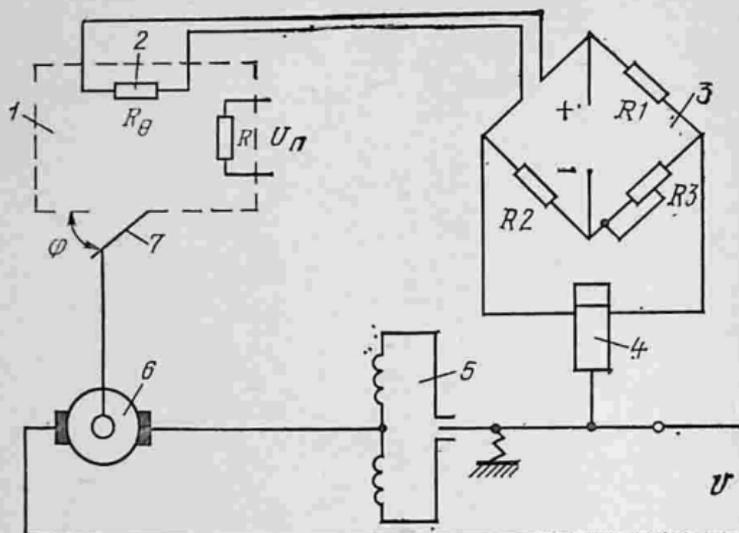


Рис. 3.29. Принципиальная схема системы автоматического регулирования температуры печи.

вой. Она может иметь одну или несколько областей устойчивых автоколебаний. Нелинейная система неустойчива в малом и имеет устойчивые автоколебания в большом. Наконец, нелинейные системы могут иметь и области неустойчивости системы.

Поведение нелинейных автоматических систем описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Общих методов решения этих уравнений нет. Поэтому для анализа работы нелинейных автоматических систем при их разработке и проектировании используют некоторые частные способы решения нелинейных уравнений (например фазового портрета, гармонической линеаризации, второй метод Ляпунова, абсолютной устойчивости В. М. Попова, метод припасовывания, статистической линеаризации и др.).

Мы ограничимся рассмотрением методов гармонической линеаризации и припасовывания.

Прежде чем рассматривать эти методы, покажем на примере, как нужно подходить к составлению уравнений движения нелинейной системы.

На рисунке 3.29 приведена принципиальная схема нелинейной автоматической системы регулирования температуры печи. Система состоит из объекта управления — печи

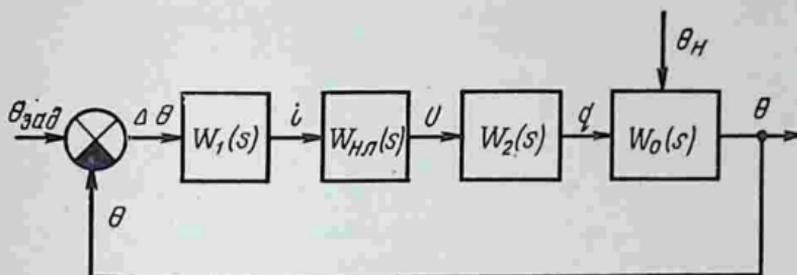


Рис. 3.30. Структурная схема системы автоматического регулирования температуры печи.

1, воспринимающего элемента — терморезистора 2, сравнивающего элемента — мостовой схемы 3, управляющего элемента — поляризованного реле 4, исполнительного элемента — серводвигателя 6 с обмотками возбуждения 5 и регулирующего органа — заслонки 7.

В зависимости от изменения температуры в печи (входной величины объекта управления) изменяется сопротивление терморезистора 2 и изменяется сопротивление плеч моста 3. Это изменение вызывает появление тока в диагонали моста. В зависимости от полярности тока происходит замыкание того или иного контакта поляризованного реле 4 и включается одна из обмоток возбуждения 5 серводвигателя 6, который открывает или закрывает заслонку отверстия в печи для подачи потока воздуха.

Нелинейным элементом является поляризованное реле, статическая характеристика которого может быть представлена одним из графиков: 4, 5, 6 или 7 позиций таблицы 3.6.

На рисунке 3.30 изображена структурная схема автоматической системы регулирования температуры печи. В схеме приняты следующие обозначения:

1) $W_1(s)$ — передаточная функция терморезистора и измерительного моста; $W_1(s) = k_1$ — безынерционное звено;

2) $W_{н.л.}(s)$ — передаточная функция нелинейного звена. Статическая характеристика этого звена является функцией тока i ; $u = F(i)$;

3) $W_2(s)$ — передаточная функция исполнительного элемента (серводвигателя); $W_2(s) = k_2/s$ — интегрирующее звено;

4) $W_0(s)$ — передаточная функция объекта управления; $W_0(s) = k_0/(T_0s + 1)$ — инерционное звено первого порядка.

Для того чтобы составить дифференциальное уравнение автоматической системы, необходимо найти эквивалентную передаточную функцию всех линейных звеньев системы $W_{\Sigma}(s)$. Очевидно, что

$$W_{\Sigma}(s) = \frac{u(s)}{i(s)} = W_1(s) W_2(s) W_0(s) = \frac{k_0 k_1 k_2}{s(T_0 s + 1)}. \quad (3.44)$$

Причем входным воздействием для линейной части будет являться напряжение на обмотках серводвигателя, а выходным — сила тока на выходе мостовой схемы. Значение выходной величины автоматической системы (температуры печи) пропорционально силе тока на выходе мостовой схемы:

$$\theta(t) = i(t)/k_1.$$

В соответствии с выражением (3.44) дифференциальное уравнение движения автоматической системы таково:

$$T_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{di(t)}{dt} = -k_0 k_1 k_2 u(t), \quad (3.45)$$

где функция $u(t)$ представляет собой нелинейную функцию выходной величины $i(t)$, то есть

$$T_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{di(t)}{dt} = -k_0 k_1 k_2 F[i(t)]. \quad (3.46)$$

Это нелинейное дифференциальное уравнение, так как $F[i(t)]$ — нелинейная функция.

Учитывая, что рассмотренные в таблице 3.6 существенные нелинейности на отдельных участках имеют линейные характеристики (кусочно-линейная функция), уравнение движения нелинейной автоматической системы может быть записано в каждом конкретном случае системой линейных дифференциальных уравнений.

Пусть $u = F(i)$ есть статическая характеристика, соответствующая позиции 6 таблицы 3.6. Эта характеристика реального двухпозиционного реле имеет четыре линейных однозначных участка, на которых функция $F(i)$ принимает значение либо l , либо $-l$.

$$\left. \begin{array}{l} 1) \ i > d, \quad u = l; \\ 2) \ i < -d, \quad u = -l; \\ 3) \ -d < i < d, \quad u = l, \quad di/dt < 0; \\ 4) \ -d < i < d, \quad u = -l, \quad di/dt > 0. \end{array} \right\} \quad (3.47)$$

Учитывая соотношения (3.47), уравнение (3.46) можно представить в виде следующей системы линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 T_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{di(t)}{dt} &= -k_0 k_1 k_2 l, \quad i > d; \\
 T_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{di(t)}{dt} &= k_0 k_1 k_2 l, \quad i < -d; \\
 T_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{di(t)}{dt} &= -k_0 k_1 k_2 l, \quad -d < i < d, \quad \frac{di}{dt} < 0; \\
 T_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{di(t)}{dt} &= k_0 k_1 k_2 l, \quad -d < i < d, \quad \frac{di}{dt} > 0.
 \end{aligned} \right\} (3.48)$$

Расчетные методы анализа движения автоматической системы используют запись уравнений в форме (3.46) и (3.48). Рассмотрим методы анализа.

3.4.2. Метод гармонической линеаризации

Метод гармонической линеаризации для исследования автоматических систем рационально применять только в том случае, когда в установившемся процессе система совершает автоколебания. Это приближенный метод исследований работы автоматических систем. Однако сопоставление расчетов и экспериментальных данных убеждает в приемлемости этого метода для многих видов автоматических систем.

Основы метода гармонического баланса заложены в работах Крылова Н. М. и Боголюбова Н. Н.

Сущность метода заключается в следующем. Если на вход нелинейного элемента подать синусоидальное возмущение, то на выходе тоже будет периодически изменяющаяся величина (рис. 3.31). Разложим выходную величину в ряд Фурье и возьмем только первую гармонику разложения, как показано на рисунке, которая изменяется с тем же периодом колебаний, что и входная, и имеет постоянную амплитуду A . Причем амплитуда выходной величины не зависит от амплитуды входной величины. Связь между входной величиной $x(t) = a \sin \omega t$ и выходной $y(t) = A \sin \omega t$ является уже линейной и представляет собой прямую $y = kx$, у которой значение k зависит от амплитуды входной величины:

$$y = F(x) \cong (A/a)x. \quad (3.49)$$

Амплитуда входной величины a определяет угол наклона линейной статической характеристики, заменяющей не-

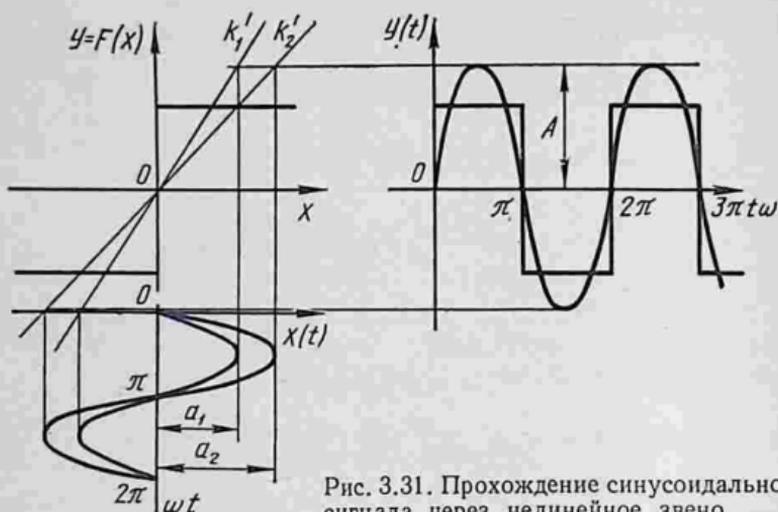


Рис. 3.31. Прохождение синусоидального сигнала через нелинейное звено.

линейное звено (рис. 3.31, прямые k'_1 и k'_2). Такая замена нелинейного звена линейным называется гармонической линеаризацией, а коэффициент $k=A/a$ называется коэффициентом гармонической линеаризации.

При гармонической линеаризации дифференциальное уравнение системы (3.46) приводится к гармонически линеаризованному

$$T_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{di(t)}{dt} = -k_0 k_1 k_2 k i(t). \quad (3.50)$$

Это уравнение хотя и является линейным, однако сохраняет основные свойства нелинейного уравнения, так как k зависит от амплитуды a .

Когда же правомочна такая линеаризация? В реальных системах нелинейные звенья всегда включаются в систему последовательно с линейными. Обычно линейная часть подавляет входные величины с высокими частотами и является фильтром низких частот. В случае, когда подавляются все частоты выше первой, метод гармонической линеаризации вполне правомочен.

Рассмотрим математический аппарат метода гармонической линеаризации.

При разложении выходной величины в ряд Фурье получим

$$y(t) = y_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} (a_{\nu} \sin \nu \omega t + b_{\nu} \cos \nu \omega t), \quad (3.51)$$

где y_0 , a_v и b_v определяются формулами коэффициентов ряда Фурье:

$$y_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(a \sin \omega t) d\omega t; \quad (3.52)$$

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(a \sin \omega t) \sin v\omega t d\omega t; \quad (3.53)$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(a \sin \omega t) \cos v\omega t d\omega t; \quad (3.54)$$

y_0 — среднее значение выходного сигнала. Для любой нечетной характеристики, то есть для всех характеристик таблицы 3.6, $y_0 = 0$ (рис. 3.31).

Метод гармонической линеаризации предполагает, что значение выходной величины $y(t)$ для нечетных характеристик в соответствии с формулой (3.51) должно равняться следующему выражению:

$$y(t) = a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega t. \quad (3.55)$$

Учитывая, что входная величина $x = a \sin \omega t$, найдем соотношение между входной и выходной величинами:

$$\sin \omega t = x/a; \quad \cos \omega t = (dx/dt)/(a\omega).$$

Тогда из (3.55)

$$y(t) = \frac{a_1}{a} x + \frac{b_1}{a\omega} \frac{dx}{dt}. \quad (3.56)$$

Пусть $\frac{a_1}{a} = q$, $\frac{b_1}{a} = q'$, тогда

$$y(t) = qx + \frac{q'}{\omega} \frac{dx}{dt}, \quad (3.57)$$

где

$$q = \frac{a_1}{a} = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(a \sin \omega t) \sin \omega t d\omega t, \quad (3.58)$$

$$q' = \frac{b_1}{a} = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(a \sin \omega t) \cos \omega t d\omega t. \quad (3.59)$$

Найдем значение передаточной функции для нелинейного звена. Для этого возьмем преобразование Лапласа от обеих частей выражения (3.57) при нулевых начальных условиях и запишем отношение изображений выходной и входной величин:

$$W_{н. л.}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = q + \frac{q'}{\omega} s. \quad (3.60)$$

Используя соотношения (3.60), (3.58) и (3.59), можно получить значения передаточной функции для любой нечетной нелинейной характеристики.

Пример 3.10. Определить передаточную функцию для идеальной релейной характеристики (табл. 3.6, поз. 4):

$$q = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(a \sin \omega t) \sin \omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi a} \int_0^{\pi} l \sin \omega t \, d\omega t + \frac{1}{\pi a} \int_{\pi}^{2\pi} (-l) \sin \omega t \times \\ \times d\omega t = \frac{1}{\pi a} \left(-l \cos \omega t \int_0^{\pi} t l \cos \omega t \int_{\pi}^{2\pi} \right) = \frac{4l}{\pi a}, \\ q' = \frac{1}{\pi a} \int_0^{\pi} l \cos \omega t \, d\omega t - \frac{1}{\pi a} \int_{\pi}^{2\pi} l \cos \omega t \, d\omega t = \frac{l}{\pi a} \left(\sin \omega t \int_0^{\pi} -\sin \omega t \int_{\pi}^{2\pi} \right) = 0.$$

Передаточная функция звена

$$W_{н.л}(s) = 4l/(\pi a).$$

Значение q' указывает на наличие сдвига по фазе между входной и выходной величинами. Очевидно, что сдвиг по фазе может наблюдаться только у неоднозначных характеристик. Поэтому у однозначных характеристик $q' = 0$.

В таблице 3.7 приведены значения гармонических коэффициентов усиления q и q' для всех восьми характеристик таблицы 3.6.

Амплитудно-фазочастотная характеристика нелинейного звена определяется также подстановкой в передаточную функцию $j\omega$ вместо s :

$$W_{н.л}(j\omega) = q + jq', \quad (3.61)$$

где $W_{н.л}(j\omega)$ называется комплексным гармоническим коэффициентом усиления.

Коэффициенты q и q' не зависят от ω , а зависят только от амплитуды входных колебаний a .

Полученные выше количественные характеристики линейных звеньев позволяют получить расчетные методы анализа работы автоматических систем.

Для получения расчетного метода предположим, что в установившемся режиме автоматическая система имеет автоколебания и они равны $x = a \sin \omega t$ на входе нелинейного звена. Это значит, что линейная часть является фильтром низких частот.

Рассмотрим структурную схему автоматической системы (рис. 3.30). Так как $W_{п.л}(s)$ линеаризовано, то считают всю систему линейной и находящейся на колебательной границе устойчивости. Причем амплитуда и частота колебаний

3.7. Гармонические коэффициенты усиления

Название нелинейности	q	q'
Зона насыщения	$q = \frac{2l}{\pi a} \left(\arcsin \frac{d}{a} + \frac{d}{a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} \right)$ при $a > d$	$q' = 0$
Зона нечувствительности	$q = \zeta - \frac{2\zeta}{\pi} \left(\arcsin \frac{d}{a} + \frac{d}{a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} \right)$	$q' = 0$
Зона нечувствительности и зона насыщения	$q = \frac{2l}{(h-d)\pi} \left(\arcsin \frac{h}{a} - \arcsin \frac{d}{a} - \frac{d}{a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} + \frac{h}{a} \sqrt{1 - \frac{h^2}{a^2}} \right)$ при $a > h$	$q' = 0$
Идеальное двухпозиционное реле	$q = \frac{4l}{\pi a}$	$q' = 0$
Идеальное реле с зоной нечувствительности	$q = \frac{4l}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}}$ при $a > d$	$q' = 0$
Двухпозиционное реле	$q = \frac{4l}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}}$ при $a > d$	$q' = -\frac{4ld}{\pi a^2}$
Трехпозиционное реле	$q = \frac{2l}{\pi a} \left(\sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{a^2}} \right)$ при $a > h$	$q' = -\frac{2ld}{\pi a} \times \left(1 - \frac{d}{h} \right)$

Название нелинейности	q	q'
Люфт, зазор, или сухое трение	$q = \frac{\zeta}{\pi a} \left(\frac{\pi}{a} + \arcsin \left(1 - \frac{2d}{a} \right) + \right.$ $\left. + 2 \left(1 - \frac{2d}{a} \right) \sqrt{\frac{d}{a} \left(1 - \frac{d}{a} \right)} \right)$ <p style="text-align: center;">при $a > d$</p>	$q' = -\frac{4\zeta d}{\pi a} \times$ $\times \left(1 - \frac{d}{a} \right)$

на границе соответствуют амплитуде и частоте автоколебаний системы.

Необходимо, используя критерий устойчивости для линейных систем, определить амплитуду и частоту автоколебаний системы. Существует ряд способов определения параметров автоколебаний автоматических систем. Рассмотрим два из них.

Первый способ. Рассмотрим характеристическое уравнение автоматической системы

$$1 + W_{\text{раз}}(s) = Q(s) + R(s) \left(q + \frac{q'}{\omega} s \right), \quad (3.62)$$

где $Q(s)$ и $R(s)$ — полиномы от s соответственно в знаменателе и числителе передаточной функции линейной части автоматической системы.

Подставим в формулу (3.62) $j\omega$ вместо s и приравняем (3.62) нулю:

$$Q(j\omega) + R(j\omega)(q + jq') = 0. \quad (3.63)$$

Разделим вещественную и мнимую части выражения (3.63):

$$X(\omega, a) + jY(\omega, a) = 0.$$

Запишем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} X(\omega, a) &= 0; \\ Y(\omega, a) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.64)$$

Значения частоты ω и амплитуды a , которые удовлетворяют этим уравнениям, и будут искомыми параметрами автоколебаний системы. Если в результате решения окажется, что либо частота, либо амплитуда величина отрицательная или мнимая, то следует считать, что периодическое

решение отсутствует и, следовательно, в системе нет автоколебаний.

При наличии положительных вещественных значений частоты и амплитуды, удовлетворяющих уравнениям (3.64), необходимо проверить устойчивость этого периодического решения.

Для устойчивости периодического решения необходимо и достаточно, чтобы удовлетворялось следующее соотношение [2]:

$$\left(\frac{\partial X(\omega, a)}{\partial a} \frac{\partial Y(\omega, a)}{\partial \omega} \right) - \left(\frac{\partial Y(\omega, a)}{\partial a} \frac{\partial X(\omega, a)}{\partial \omega} \right) > 0. \quad (3.65)$$

Второй способ (способ Л. С. Гольдфарба). Исходным является условие критерия Найквиста нахождения линейной автоматической системы на границе устойчивости

$$W_{\pi}(j\omega) W_{\text{н.л.}}(j\omega) = -1, \quad (3.66)$$

откуда

$$W_{\pi}(j\omega) = - \frac{1}{W_{\text{н.л.}}(j\omega)}, \quad (3.67)$$

где $W_{\pi}(j\omega)$ зависит только от ω , а $W_{\text{н.л.}}(j\omega)$ зависит только от a .

Решение уравнения (3.67) обычно находят графическим путем (рис. 3.32). Строят амплитудно-фазочастотную характеристику линейной части системы на комплексной плоскости [рис. 3.41, кривая $W_{\pi}(j\omega)$]. Строят при различных амплитудах кривую отрицательной обратной АФЧХ нелинейной части [рис. 3.32, кривая $-\frac{1}{W_{\text{н.л.}}(j\omega)}$]. Значения параметров периодического решения находят в точке пересечения этих кривых. Причем значение частоты автоколебаний определяется как значение частоты $W_{\pi}(j\omega)$ точки пересечения, а значение амплитуды — как значение амплитуды $-\frac{1}{W_{\text{н.л.}}(j\omega)}$ в точке пересечения. Если кривые не пересекаются, то периодическое решение отсутствует и автоколебаний в системе нет.

Проверка устойчивости периодического решения в этом случае определяется по следующему правилу.

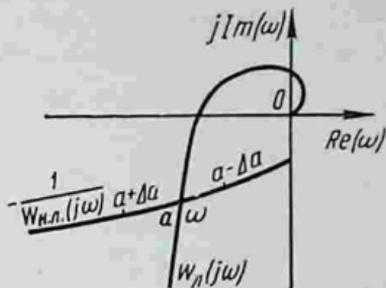


Рис. 3.32. К расчету автоколебаний по способу Л. С. Гольдфарба.

Для устойчивого периодического решения необходимо и достаточно, чтобы годограф линейной части $W_{\pi}(j\omega)$ охватывал точку на годографе $-\frac{1}{W_{\pi, \pi}(j\omega)}$ с отрицательным приращением амплитуды Δa и не охватывал точку с положительным приращением Δa (рис. 3.32).

Пример 3.11. Исследуем параметры автоколебаний системы регулирования температуры печи, изображенной на рисунках 3.29 (принципиальная схема) и 3.30 (структурная схема). Релейная характеристика нелинейного элемента соответствует позиции 6 таблицы 3.6. Примем следующие значения постоянных параметров элементов системы:

$T_0=10$ с, $k_0=10$ град/град, $k_1=0,25$ А/град, $k_2=0,02$ рад/(В·с), $l=100$ В, $d=0,5$ А.

Задачу решим двумя способами и сопоставим их результаты.

После подстановки числовых значений коэффициентов уравнение (3.46) примет вид

$$10 \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{di}{dt} = -0,05 F(i).$$

Первый способ. Уравнение (3.62) запишем так:

$$10s^2 + s + 0,05 \left(q + \frac{q'}{\omega} s \right) = 0, \quad (a)$$

где

$$q = \frac{4l}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} = \frac{400}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{0,25}{a^2}}; \quad q' = -\frac{4ld}{\pi a^2} = -\frac{200}{\pi a^2}.$$

Подставим $j\omega$ вместо s и значения q и q' в уравнение (a):

$$\frac{20}{\pi a} \sqrt{a^2 - 0,25} - 10\omega^2 + j \left(\omega - \frac{10}{\pi a^2} \right) = 0,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} X(\omega, a) &= \frac{20}{\pi a^2} \sqrt{a^2 - 0,25} - 10\omega^2 = 0; \\ Y(\omega, a) &= \omega - \frac{10}{\pi a^2} = 0. \end{aligned} \right\}$$

Из второго уравнения $\omega = \frac{10}{\pi a^2}$. Подставим это значение в первое уравнение

$$a^6 - 0,25a^4 - 250 = 0.$$

Пусть $\alpha = a^2$, тогда $\alpha^3 - 0,25\alpha^2 - 250 = 0$. Заменой $\alpha = z - 0,25/3$ уравнение приводится к виду

$$z^3 - 3 \cdot 0,05z - 2 \cdot 125 = 0.$$

Корни этого уравнения в соответствии с формулой Кардана

$$z_1 = u + v, \quad z_2 = \varepsilon_1 u + \varepsilon_2 v, \quad z_3 = \varepsilon_2 u + \varepsilon_1 v,$$

где

$$u = \sqrt[3]{-\beta + \sqrt{\beta^2 - \gamma^3}}, \quad v = \sqrt[3]{-\beta - \sqrt{\beta^2 - \gamma^3}},$$

$$\varepsilon_{1,2} = -\frac{1}{2} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \beta = -125, \quad \gamma = -0,05.$$

Так как значения корней z_2 и z_3 — комплексные, мы их рассматривать не будем.

$$z_1 = u + v \cong 6,3, \quad \alpha \cong 6,22,$$

откуда

$$a = \sqrt{6,22} \cong 2,48A,$$

$$\omega = \frac{10}{\pi a^2} \cong 0,51 \text{ с}^{-1}.$$

Период автоколебаний $T = \frac{2\pi}{\omega} = 12,3$ с. Проверим, устойчивы ли эти колебания:

$$\frac{\partial X}{\partial a} = -\frac{20}{\pi a^3} \left(\frac{a^2 + 0,5}{\sqrt{a^2 - 0,25}} \right) = -1,1; \quad \frac{\partial Y}{\partial \omega} = 1;$$

$$\frac{\partial X}{\partial \omega} = -20\omega = -10,2; \quad \frac{\partial Y}{\partial a} = \frac{20}{\pi a^3} \cong 0,41;$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial a} \frac{\partial X}{\partial \omega} \right) - \left(\frac{\partial Y}{\partial a} \frac{\partial Y}{\partial \omega} \right) = 3,1 > 0.$$

Автоколебания устойчивы.

Второй способ. Передаточная функция линейной части системы

$$W_{\text{л}}(s) = \frac{-0,05}{10s^2 + s},$$

нелинейной

$$W_{\text{н.л}}(s) = q + \frac{q'}{\omega} s = \frac{127 \sqrt{a^2 - 0,25}}{a^2} - \frac{63,6}{a^2 \omega} s.$$

Подставим значение $W_{\text{л}}(s)$ и $W_{\text{н.л}}(s)$ в выражение (3.67) и заменим s на $j\omega$:

$$-\frac{0,5}{100\omega^2 + 1} - j \frac{0,05}{100\omega^3 + \omega} = -\frac{\sqrt{a^2 - 0,25}}{127} - j 0,004.$$

Найдем значения вещественной и мнимой частей $W_{\text{л}}(j\omega)$ при различных ω (табл. 3.8).

3.8. Таблица расчета вещественной и мнимой составляющих частотной характеристики линейной части

ω	$Re(\omega)$	$Im(\omega)$	ω	$Re(\omega)$	$Im(\omega)$
0	-0,5	$-\infty$	0,5	-0,02	-0,004
0,01	-0,5	-5,0	1,0	-0,005	-0,0005
0,1	-0,25	-0,25	2,0	-0,001	-0,0001
0,2	-0,1	-0,05	∞	0	0

При разных значениях a получим следующие координаты частотной характеристики нелинейной части:

a	0,5	1	2	3	4
$R_{н.л}(a)$	0	-0,007	-0,015	-0,023	-0,031
a	5	10	50	63	
$R_{н.л}(a)$	-0,037	-0,08	-0,4	-0,5	

Значение

$$Im_{н.л}(a) = -0,004 = \text{const.}$$

По данным таблиц строим графики функции $W_{л}(j\omega)$ и $\frac{1}{W_{н.л}(j\omega)}$ (рис. 3.33). Точка пересечения этих кривых получилась при значении частоты, равном $\omega = 0,5, \text{c}^{-1}$. Значение амплитуды $a = 2,5 \text{ A}$.

Полученные автоколебания устойчивы, так как годограф $W_{л}(j\omega)$ охватывает значения амплитуд меньше, чем амплитуда автоколебаний.

Кроме приведенных расчетов, необходимо еще убедиться в том, что принятые нами предположения о возможности замены процесса на выходе одной гармоникой при разложении его в ряд Фурье оправданы и что выходная величина системы будет изменяться по синусоидальному закону. Для этого нужно построить амплитудно-частотную характеристику линейной части системы:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{0,25\omega^2 + 0,0025}}{100\omega^3 + \omega}$$

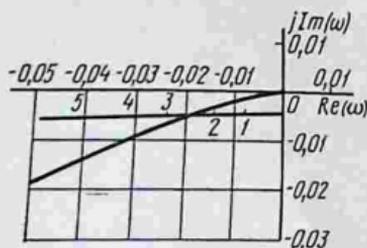


Рис. 3.33. К примеру определения автоколебаний по способу Л. С. Гольдфарба.

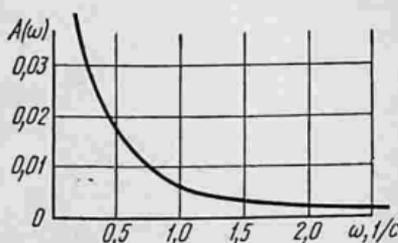


Рис. 3.34. Амплитудно-частотные характеристики линейной части системы (к примеру 3.11).

Подставляя различные значения ω от 0 до ∞ , получим:

ω	0	0,5	1,0	1,5	2,0	∞
$A(\omega)$	∞	0,02	0,005	0,003	0,0012	0

Построим по данным таблицы график АЧХ (рис. 3.34). Как видно из рисунка и таблицы, при $\omega=1,5 \text{ с}^{-1}$ значение амплитуды примерно на порядок меньше, чем при частоте автоколебаний $\omega=0,5 \text{ с}^{-1}$. Поэтому все частоты, кроме первой, не будут проходить через линейную часть автоматической системы. Таким образом, автоколебания будут близки к синусоидальным. Амплитуда колебаний температуры печи $a=10^\circ$, период колебаний $T \cong 12 \text{ с}$.

3.4.3. Метод приспособывания

При анализе нелинейных систем автоматического управления методом приспособывания следует рассматривать уравнения движения системы в форме (3.48). Каждое уравнение системы уравнений (3.48) представляет собой линейное дифференциальное уравнение, для которого существуют известные методы нахождения общего решения.

Идея метода приспособывания очень проста и заключается в следующем. По начальным условиям состояния автоматической системы определяем, на каком участке находится система и каким дифференциальным уравнением (3.48) она описывается. Решаем это уравнение при начальных условиях, соответствующих начальному состоянию автоматической системы. С помощью найденного решения определяем время пребывания системы в области действия рассматриваемого дифференциального уравнения. Именно это время система будет двигаться в соответствии с выбранным дифференциальным уравнением и по окончании этого времени дойдет до границы следующего участка, движение автоматической системы в котором описывается каким-либо другим линейным уравнением системы уравнений (3.48). Конечное состояние автоматической системы на первом выбранном участке является ее начальным состоянием на следующем участке. Решаем дифференциальное уравнение второго участка при начальных условиях, соответствующих конечному состоянию системы на первом участке. Решение является законом движения системы во времени на втором участке. Затем продолжаем анализ работы системы на всех участках поочередно до тех пор, пока автоматическая система не примет одно из установившихся состояний, или до тех пор, пока не убедимся в том, что движение системы неустойчивое.

Общие математические принципы анализа работы автоматических систем мы излагать не будем. Они изложены в специальной литературе [2] для релейных автоматических систем. В данном случае рассмотрим применение этого метода на примере.

Пример 3.12. Проанализируем движение автоматической системы регулирования температуры в печи. Все исходные данные примера соответствуют примеру при анализе автоколебаний методом гармонической линеаризации. Релейная характеристика нелинейного элемента соответствует позиции 5 таблицы 3.6. При начальном состоянии системы температура в печи $\theta(0) = 50^\circ\text{C}$, $\frac{d\theta(0)}{dt} = \theta'_t(0) = 0$.

Установленное задатчиком значение температуры соответствует 45°C . Между силой тока на входе нелинейного элемента и температурой печи существует взаимно однозначное соответствие $\theta = d/k$.

Система уравнений для описания изменения температуры печи следующая:

$$10 \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{d\theta(t)}{dt} = -5, \quad \theta > 47^\circ\text{C}; \quad (1)$$

$$10 \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{d\theta(t)}{dt} = 0, \quad 43^\circ\text{C} < \theta < 47^\circ\text{C}; \quad (2)$$

$$10 \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{d\theta(t)}{dt} = 5, \quad 43^\circ\text{C} > \theta. \quad (3)$$

Начальное значение температуры $\theta = 50^\circ\text{C}$. При таких начальных условиях система находится на участке действия уравнения (1).

Решаем это уравнение. Корни характеристического уравнения равны $s_1 = 0$; $s_2 = -0,1$. Тогда общее решение однородного уравнения $\theta(t) = C_1 + C_2 e^{-0,1t}$. Частное решение $\theta(t) = -5t$. Общее решение уравнения (1) можно записать так:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= C_1 + C_2 e^{-0,1t} - 5t, \\ \frac{d\theta(t)}{dt} &= -0,1C_2 e^{-0,1t} - 5. \end{aligned} \quad (1')$$

Используя начальные условия $\theta(0) = 50$ и $\theta'_t(0) = 0$, найдем $C_2 = -50$ и $C_1 = 100$.

Решение уравнения с учетом начальных условий

$$\theta(t) = 100 - 5e^{-0,1t} - 5t, \quad \text{а} \quad \frac{d\theta(t)}{dt} = 5e^{-0,1t} - 5.$$

Время действия уравнения первого участка определяем из условия достижения температуры системы 47°C , откуда

$$50e^{-0,1t} = 53 - 5t.$$

Это трансцендентное уравнение, решение которого находим графическим способом. На графике функций $y = 5e^{-0,1t}$ и $y' = 53 - 5t$ находим точку их пересечения (рис. 3.35, а). Абсцисса этой точки является искомым временем $t_1 = 4$ с.

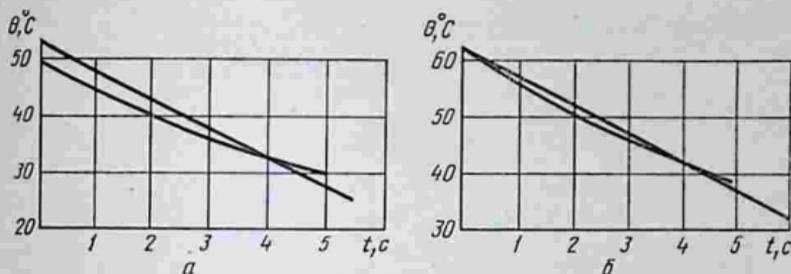


Рис. 3.35. Решение трансцендентного уравнения (к примеру 3.12): а — участок 1; б — участок 3.

Находим состояние автоматической системы при $t_1=4$ с:

$$\theta(4) = 47 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \frac{d\theta(4)}{dt} = -1,65.$$

Строим часть кривой переходного процесса для участка 1 по формуле $\theta(t) = 100 - 5e^{-0,1t} - 5t$ при изменении времени $0 \leq t \leq 4$ с (рис. 3.36).

Значения температуры и ее производной при $t_1=4$ с являются начальными значениями состояния автоматической системы на втором участке, которому соответствует дифференциальное уравнение (2). Это уравнение однородное. Его решение

$$\theta(t) = C_3 + C_4 e^{-0,1t} \quad (2') \quad \text{и} \quad \frac{d\theta(t)}{dt} = 0,1C_4 e^{-0,1t},$$

с учетом начальных условий

$$\theta(t) = 30,5 + 16,5e^{-0,1t},$$

где $\theta(t)$ достигает значения 43°C [границы второго участка за $t_2=2,8$ с, причем $\theta'_t(2,8) = -1,2$].

Строим часть кривой переходного процесса на втором участке (рис. 3.36).

Решение уравнения (3) на третьем участке имеет вид

$$\theta(t) = C_5 + C_6 e^{-0,1t} + 5t \quad (3'), \quad \text{а} \quad \frac{d\theta(t)}{dt} = -0,1C_6 e^{-0,1t} + 5.$$

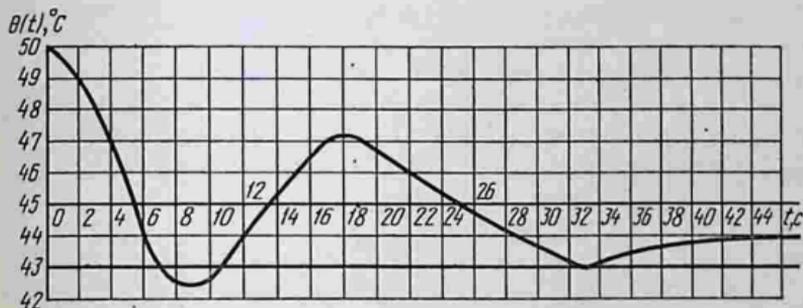


Рис. 3.36. Кривая переходного процесса (к примеру 3.12).

3.9. Расчетные данные к примеру 3.12

Уча- сток	Формула движения системы	Время в зоне, с	Начальные условия
1	$\theta(t) = 100 - 5e^{-0,1t} - 5t$	4,0	$\theta(0) = 50^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = 0$
2	$\theta(t) = 30,5 + 16,5e^{-0,1t}$	2,8	$\theta(0) = 47^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = -1,65$
3	$\theta(t) = -19 + 62e^{-0,1t} + 5t$	4,0	$\theta(0) = 43^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = -1,2$
2'	$\theta(t) = 51,5 - 8,5e^{-0,1t}$	6,3	$\theta(0) = 43^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = 0,85$
1'	$\theta(t) = 101,6 - 54,6e^{-0,1t} - 5t$	2,0	$\theta(0) = 47^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = 0,46$
2''	$\theta(t) = 41,6 + 5,4e^{-0,1t}$	13,5	$\theta(0) = 47^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = -0,54$
3'	$\theta(t) = -8,4 + 51,4e^{-0,1t} + 5t$	0,5	$\theta(0) = 43^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = -0,14$
2'''	$\theta(t) = 44,1 - 1,1e^{-0,1t}$	∞	$\theta(0) = 43^\circ\text{C}, \theta'_t(0) = 0,11$

Подставив начальные условия, получим

$$\theta(t) = -19 + 62e^{-0,1t} + 5t.$$

Уравнение для определения времени движения выходной величины системы по третьему участку запишется

$$62e^{-0,1t} = 62 - 5t.$$

Графическое решение этого уравнения (рис. 3.35, б) показывает, что время $t_3 = 4$ с, а

$$\theta'_t(4) = 0,85.$$

И снова рассматриваем движение системы на втором участке (участок 2'). Продолжаем расчеты до тех пор, пока $\theta(t)$ не будет выходить за пределы зоны нечувствительности. Все данные расчетов сведем в таблицу 3.9.

Кривая переходного процесса, соответствующая таблице, показана на рисунке 3.36.

Метод припасовывания является точным методом анализа динамики нелинейных систем. Однако он может применяться в тех случаях, когда порядок дифференциального уравнения линейной части не превышает четырех.

Использование приближенных методов анализа, построенных на методе припасовывания, позволяет решать дифференциальные уравнения практически любых порядков [13].

Глава 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Автоматизация технологических объектов в сельскохозяйственном производстве осуществляется путем внедрения систем контроля, управления и регулирования на базе технических средств автоматизации общепромышленного и отраслевого назначения.

Технические средства автоматизации обеспечивают получение информации о состоянии управляемого объекта, формирование управляющих воздействий на управляемый объект, передачу информации оперативному персоналу и в смежные или вышестоящие системы управления.

В зависимости от назначения и цели функционирования, а также от уровня и объема автоматизации система управления состоит из соответствующего набора технических средств. В системах автоматического контроля используются приборы измерения параметров процесса и устройства технологической и аварийной сигнализации. Управляет процессом оперативный персонал.

В автоматических системах применяются автоматические регуляторы и устройства логического управления, выполняющие функции контроля и управления объектом без участия оперативного персонала. Человек лишь включает автоматическую систему в работу и контролирует ее исправность.

В зависимости от степени централизации (сосредоточения) управления системы контроля и управления могут быть локальными и централизованными. Локальные системы обеспечивают управление отдельными машинами и установками в непосредственной близости от места их установки и без связи с работой смежных машин и установок. Локальные системы измеряют и стабилизируют технологические параметры, сигнализируют об отклонениях контролируемых параметров от заданных значений, управляют процессом по жесткой логической или временной программе.

Система централизованного контроля и управления объединяет ряд установок с целью реализации многоконтурного, взаимосвязанного или каскадного регулирования, оптимизации процессов, логических операций при пуске, остановке объекта, и оперативном управлении технологи-

ческими процессами. Контроль, автоматическое управление и регулирование осуществляются с центрального пункта управления.

Дальнейшим развитием централизованных систем контроля и управления являются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

АСУ ТП — это человеко-машинная система управления, обеспечивающая централизованный сбор и обработку информации о состоянии объекта, необходимой для оптимизации управления в соответствии с принятым критерием путем выбора соответствующих управляющих воздействий. АСУ ТП обеспечивает также вышестоящие системы управления оперативной и достоверной технико-экономической информацией. В сложных технологических объектах с большим количеством информации АСУ ТП комплектуют управляющими вычислительными машинами.

В сельскохозяйственном производстве технологические машинные процессы можно разделить на две группы: стационарные и мобильные. Внутри каждой группы процессы классифицируют по различным признакам: технологическим, техническим, по алгоритмам функционирования, по алгоритмам управления и др.

Структура системы автоматического контроля, управления и регулирования технологического объекта приводится на функционально-технологической схеме автоматизации.

4.1. АВТОМАТИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ УСТАНОВОК И ПРОЦЕССОВ

При производстве сельскохозяйственной продукции широко применяются стационарные машины и установки, выполняющие отдельные технологические операции и процессы. Стационарные установки используются для создания необходимых условий при выращивании растений в закрытом грунте, при послеуборочной обработке зерна, заготовке кормов, для создания микроклимата в животноводческих и птицеводческих помещениях, для кормоприготовления, доения, первичной обработки молока и других процессов сельскохозяйственного производства.

В стационарных установках широко применяется электрическая энергия для привода машин, освещения, нагрева, а также в специальной электротехнологии. В электрифицированных установках используют приборы и технические

средства автоматизации как наиболее универсальные, надежные, простые в эксплуатации. В определенных условиях производства не исключается применение пневматических и гидравлических устройств автоматизации, например в доильных установках, располагающих источником пневматической энергии.

Общий принцип автоматизации с учетом характеристик управляемого объекта и функций, выполняемых автоматическими установками, представлен функциональной схемой автоматизации. Функционально-технологическая схема отражает основные идеи, заложенные в автоматизацию машины, установки или процесса, и на данном этапе изучения дает информацию о видах автоматизации, принципах автоматического контроля, управления и регулирования, об уровне и степени автоматизации.

Реализация функционально-технологической схемы дается в принципиальных схемах автоматизации конкретной машины, установки или процесса и может, как уже отмечалось, отличаться в деталях применяемыми типами приборов и средств автоматизации в зависимости от конкретных условий. Например, в системе контроля уровня жидкости в качестве первичных преобразователей можно применить поплавковый, электродный, емкостный, индуктивный, ультразвуковой, радиационный и другие преобразователи в зависимости от конкретных требований производства. Эти требования в определенной степени учитываются в автоматических и автоматизированных промышленных установках.

4.1.1. Автоматизация насосных установок

В сельскохозяйственном производстве насосные установки применяются в системах водоснабжения, производственной и хозяйственной канализации, в оросительных системах.

Системы водоснабжения предназначены для добычи, очистки и распределения воды для технических и хозяйственных нужд. Они состоят из одной или нескольких насосных установок подачи воды из источников (насосные станции первого подъема), сооружений очистки воды, резервуаров чистой воды и насосных установок подачи воды в распределительную сеть (насосные станции второго подъема).

Автоматизация насосных станций первого и второго подъема предусматривает автоматический пуск и остано-

ку насосов, включение насосов по определенной программе, автоматическое регулирование подачи насосов, включение резервного насоса, защиту электродвигателей, сигнализацию нормальной работы и аварийной остановки, измерение давления, уровня воды, силы тока двигателя, напряжения.

Насосные станции перекачки производственной и хозяйственной канализации должны иметь автоматическое управление насосами в зависимости от уровня жидкости в приемных резервуарах, автоматический пуск и остановку насосных агрегатов, измерение уровня жидкости в резервуаре, измерение тока двигателей, сигнализацию нормальной работы и аварийной остановки, сигнализацию затопления помещения.

Автоматизация установок и сооружений очистки воды и канализационных стоков должна обеспечить нормальную их работу, сигнализацию аварийных режимов и измерение основных технологических параметров. Очистные сооружения комплектуют технологическим оборудованием и установками в зависимости от производственной мощности сооружений, качественных показателей исходного сырья, степени очистки и других требований, предъявляемых к качеству воды (техническая или питьевая вода) или степени очистки стоков (для сброса в водоем или для полива) и др.

Для водоснабжения сельскохозяйственных предприятий используется преимущественно артезианская вода, не требующая дополнительной очистки и обработки. В систему артезианского водопровода входит один или несколько артезианских насосных агрегатов, подающих воду в резервуар (водонапорную башню) чистой воды, откуда она поступает в распределительную сеть самотеком или подается насосами.

Для насосных агрегатов артезианских скважин предусматриваются автоматическое управление в зависимости от уровня воды в приемном резервуаре (башне) или в зависимости от давления в напорной магистрали, защита агрегата от «сухого хода», защита электродвигателя от перегрузки, от работы на двух фазах и короткого замыкания, сигнализация нормальной работы и аварийного отключения, измерение тока в цепи двигателя, измерение давления в магистрали.

Как объект автоматизации, система водоснабжения при соответствующих допущениях и ограничениях может быть представлена тремя динамическими звеньями: аperiodическим звеном первого порядка (насосный агрегат), ин-

тегрирующим звеном (резервуар чистой воды) и звеном чистого запаздывания (трубопровод).

Передаточная функция управляемого объекта в этом случае имеет вид

$$W(s) = \frac{k_n k_B}{s(T_n s + 1)} e^{-s\tau}, \quad (4.1)$$

где k_n , T_n — коэффициент передачи и постоянная времени насосного агрегата; k_B — коэффициент передачи резервуара; τ — время чистого запаздывания трубопровода.

Коэффициент передачи резервуара

$$k_B = 1/S, \quad (4.2)$$

где S — площадь резервуара, м².

Коэффициент передачи насосного агрегата определяют по формуле

$$k_n = G/(3600P), \quad (4.3)$$

где G — подача насосного агрегата, м³/ч; P — мощность электродвигателя, кВт.

Электромеханическая постоянная времени насосного агрегата

$$T_n = \frac{GD^2 n_0^2}{364P_n}, \quad (4.4)$$

где GD^2 — маховой момент агрегата, т·м²; P_n — номинальная мощность электродвигателя, кВт; n_0 — синхронная частота вращения, об/мин.

Маховой момент агрегата складывается из маховых моментов двигателя и насоса, значения которых принимают по каталожным данным.

Автоматическое управление насосным агрегатом осуществляется в зависимости от уровня воды в резервуаре (водонапорной башне) или от давления в воздушно-водяном баке в пневматических безбашенных водокачках ВУ-5-30, ВУ-7-65, ВУ-6-50, ВУ-10-30. Уровень воды в резервуаре или баке должен поддерживаться в пределах между верхней и нижней отметками, определяемыми техническими характеристиками емкостей и технологическими требованиями (например, требованиями противопожарных мероприятий).

Функционально-технологическая схема башенной водокачки показана на рисунке 4.1. Установка состоит из насоса, электрического двигателя, трубопровода и резервуара чистой воды.

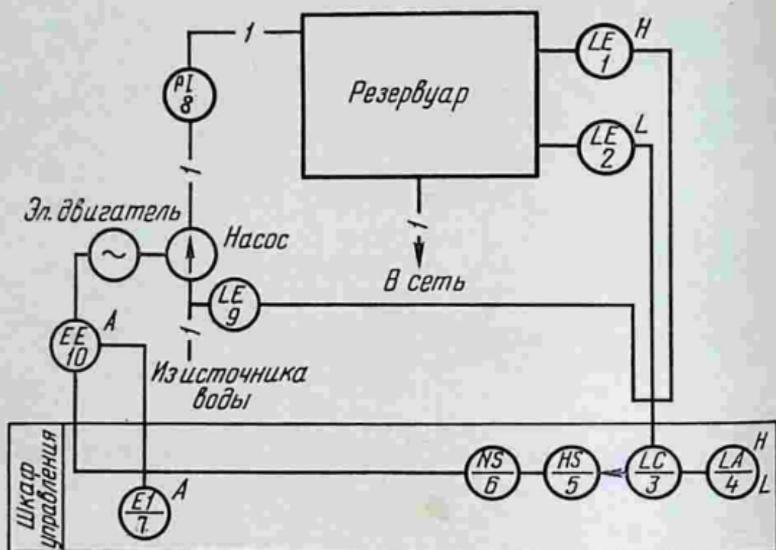


Рис. 4.1. Функционально-технологическая схема управления башенной водокачкой.

Для контроля уровня воды в резервуаре необходимо установить первичные преобразователи верхнего уровня и нижнего уровня. На схеме первичные преобразователи уровня имеют позиционное обозначение 1 и 2. Сигналы преобразователей уровня поступают в управляющее устройство 3, которое формирует управляющее воздействие на магнитный пускатель 6, непосредственно управляющий насосным агрегатом.

Когда вода достигает преобразователя верхнего уровня в резервуаре, насосный агрегат отключается и находится в таком состоянии, пока уровень воды не станет ниже преобразователя нижнего уровня. Насосный агрегат включается в работу и подает воду до заполнения резервуара. Затем цикл работы установки повторяется. Время цикла зависит от скорости разбора воды, вместимости резервуара, подачи насоса.

Для защиты насоса от «сухого хода» отключается двигатель при снижении уровня воды в скважине, который контролируется первичным преобразователем уровня 9. Для защиты от перегрузки, от потери фазы и короткого замыкания предусмотрены электрические защиты, действующие на отключение двигателя. Как правило, электрические защиты, встроенные в типовую пускорегулирующую аппара-

4.1. Таблица истинности

x_1	x_2	y_{t-1}	y	Формула состояния (конъюнктивная форма)
0	0	0	0	
0	0	1	1	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \underline{y}_{t-1}$
0	1	0	1	$\bar{x}_1 x_2 \underline{y}_{t-1}$
0	1	1	1	$\bar{x}_1 x_2 \underline{y}_{t-1}$
1	0	0	0	
1	0	1	0	
1	1	0	0	
1	1	1	0	

туру, на функционально-технологической схеме не показывают.

Работа логического управляющего устройства описывается последовательными логическими операциями. Обозначим входные сигналы управляющего устройства через x_1 и x_2 таким образом, что $x_1=1$ при срабатывании преобразователя верхнего уровня и $x_2=1$ при срабатывании преобразователя нижнего уровня. Преобразователь верхнего уровня срабатывает при заполнении резервуара водой, а преобразователь нижнего уровня — когда поверхность воды снижается ниже установки преобразователя. Выходной сигнал y управляет насосом и соответствует $y=1$ — «Работа» и $y=0$ — «Остановка». Обозначим состояние насоса в момент, предшествующий управляющему сигналу, через y_{t-1} .

В соответствии с условиями работы насосной установки можно составить таблицу состояний для всех комбинаций входных сигналов, включая сигнал y_{t-1} (табл. 4.1.).

Уравнение для выходной переменной имеет вид

$$y = \bar{x}_1 \bar{x}_2 y_{t-1} + \bar{x}_1 x_2 \bar{y}_{t-1} + \bar{x}_1 x_2 y_{t-1}. \quad (4.5)$$

После минимизации уравнения получаем

$$y = \bar{x}_1 (x_2 + y_{t-1}). \quad (4.6)$$

Логическая схема управления, построенная в соответствии с уравнением (4.6), показана на рисунке 4.2. Схема обладает «памятью», которая образуется за счет обратной связи с выхода схемы на ее вход.

Промышленность поставляет комплектно с насосными

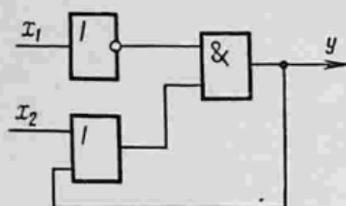


Рис. 4.2. Логическая схема управления насосом водокачки.

водонапорной башни или резервуара преобразователем «сухого хода», устанавливаемым в скважине. Блок смонтирован внутри шкафа и подключается в схему станции при помощи разъемов. Он состоит из транзисторных логических элементов, блока питания и согласующих трансформаторов.

Алгоритм управления насосом соответствует уравнению (4.6). Защита агрегата от перегрузок, от работы на двух фазах и от «сухого хода» осуществляется блоком автоматики, а защита от короткого замыкания — автоматическим выключателем. На переднюю панель выведены сигнальная лампа аварийного отключения, приборы и аппаратура управления.

4.1.2. Автоматизация вентиляционных установок

Для создания необходимого воздухообмена в производственных помещениях промышленность выпускает комплекты вентиляционного оборудования. Основная особенность оборудования заключается в использовании специальных низконапорных электровентиляторов, подачу которых можно регулировать в широких пределах изменением напряжения питания электродвигателя.

Система автоматического регулирования вентиляционных установок должна обеспечивать поддержание заданной температуры в помещении, контроль напряжения, подводимого к электродвигателям, сигнализацию частоты вращения электровентиляторов (при ступенчатом регулировании подачи), наличие напряжения на станции управления, защиту электрического оборудования от перегрузок и коротких замыканий.

Требования к качеству регулирования температуры в животноводческих, птицеводческих и других помещениях

агрегатами станции управления, оборудованные блоком автоматики. Блок автоматического управления и защиты типа БЭА 8832 предназначен для установки в шкафу станции управления погружными электронасосами ШЭТ 5802. Он комплектуется преобразователями уровней воды в баке

зависят от вида и возраста животных или птиц и определяются нормами технологического проектирования.

Для крупного рогатого скота отклонение от расчетной температуры в зимнее время не должно превышать $\pm 2^\circ$, а в теплый период года (при температуре $+10^\circ\text{C}$ и выше) температура воздуха внутри помещения не должна быть более чем на 5° выше расчетной наружной температуры для проектирования вентиляции. Расчетная зимняя температура в зависимости от возраста крупного рогатого скота находится в пределах от $+3$ до $+15^\circ\text{C}$.

Для свиноводческих помещений расчетная зимняя температура находится в пределах от 16 до 20°C в зависимости от назначения помещений.

Расчетная зимняя температура в птицеводческих помещениях зависит от вида птицы, способа ее содержания и возраста. Она должна находиться в пределах от 7 до 16°C . В теплый период года расчетная температура воздуха внутри помещений для содержания птицы не должна быть более чем на 5° выше среднемесячной температуры наружного воздуха в 13 ч самого жаркого месяца (но не более $+33^\circ\text{C}$) при влажности не ниже установленных пределов.

Объектом автоматизации является вентиляционная система вместе со зданием и животными. При исследовании объекта учитывают температуру внешней среды, ветер, солнечную радиацию и другие факторы. Выходной величиной управляемого объекта является температура внутри помещения $\theta_{в}$, а входной — подача вентиляторов или пропорциональное ей положение регулирующего органа. На температуру внутри помещения влияют температура наружного воздуха, изменение потерь теплоты через ограждения, тепловыделения животных и другие возмущения.

Уравнение теплового баланса объекта в установившемся режиме имеет вид

$$nq_0 = c\rho G_0(\theta_{в} - \theta_{н}) + k_T S(\theta_{в} - \theta_{н}), \quad (4.7)$$

где n — число животных в помещении; q_0 — тепловыделение одного животного; c — теплоемкость воздуха; ρ — плотность воздуха; k_T — коэффициент теплопередачи ограждения; S — площадь ограждения.

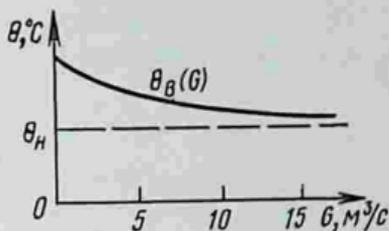


Рис. 4.3. Зависимость температуры внутри помещения от интенсивности воздухообмена.

Преобразуя уравнение (4.7), получаем выражение для температуры внутри помещения в установившемся режиме

$$\theta_{в} = \theta_{н} + \frac{nq_0}{cpG_0 + k_{\tau}S} . \quad (4.8)$$

Общий вид статической характеристики объекта показан на рисунке 4.3. Коэффициент передачи объекта определяется выражением

$$k_0 = \frac{d\theta_{в}}{dG} = - \frac{nq_0cp}{(cpG_0 + k_{\tau}S)^2} . \quad (4.9)$$

В первом приближении управляемый объект можно представить аperiodическим звеном первого порядка и звеном чистого запаздывания.

Передаточная функция объекта имеет вид

$$W(s) = \frac{k_0}{T_0s + 1} e^{-\tau_0 s} . \quad (4.10)$$

Ориентировочные значения коэффициентов передаточной функции для усредненных помещений и способов вентиляции, полученные аналитическим путем, приведены в таблице 4.2.

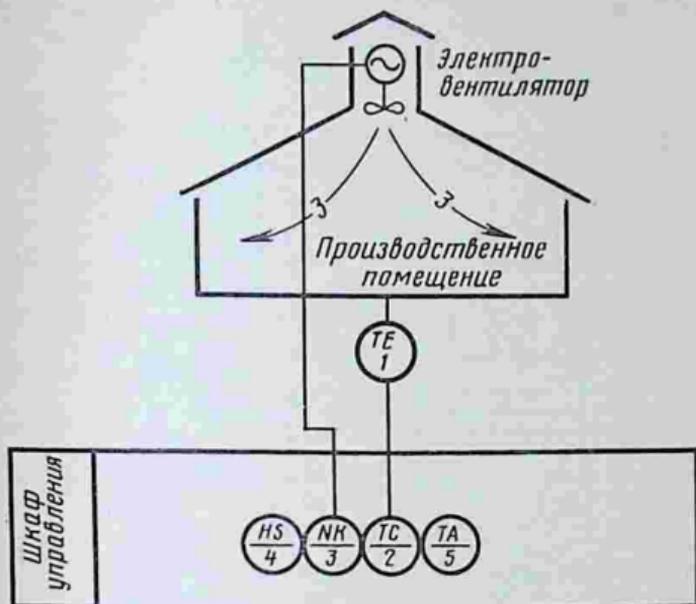
Для регулирования температуры применяются позиционные регуляторы, обеспечивающие ступенчатое изменение подачи вентиляторов, а также непрерывное путем изменения частоты вращения вентиляторов.

Функционально-технологическая схема управления вентиляционной установкой показана на рисунке 4.4. Преобразователь температуры I устанавливают в вентилируемом помещении. Логическое или непрерывное управление частотой вращения электродвигателей вентиляторов осуществляется устройством 2.

В животноводческих и птицеводческих помещениях

4.2 Коэффициенты передаточной функции

Здание	k_0	T_0, c	τ_0, c
Молочная ферма на 400 голов	1,4	500	40
Откормочник молодняка крупного рогатого скота 2-го периода	0,9	200	20
Свинарник-откормочник	1,5	300	30
Птичник на 10 тыс. голов	0,8	250	20



Примечание: N-переключение напряжения питания двигателей

Рис. 4.4. Функционально-технологическая схема управления вентиляционной установкой.

применяются вентиляционные комплекты типа «Климат-4», ПВУ, МК-ВА УЗ.

Комплект вентиляционного оборудования «Климат-4» обеспечивает ступенчатое изменение подачи вентиляторов путем трехступенчатого регулирования частоты вращения электровентилятора и включение различного числа вентиляторов, разделенных на три группы.

Управляющее устройство состоит из двух трехпозиционных регуляторов температуры типа ПТР 3-04. На выходе регулятора в зависимости от температуры регулируемой среды могут быть получены три команды: «выше», «норма» и «ниже». Регуляторы настроены на разные температуры срабатывания: настройка температуры регулирования одного регулятора на несколько градусов выше настройки температуры регулирования другого регулятора. Это позволяет составить логические схемы управления магнитными пускателями, которые подключают к разным ступням напряжения, снимаемого с автотрансформатора, групп вентиляторов. В соответствии с принципиальной схемой включения электровентиляторов (рис. 4.5) используют

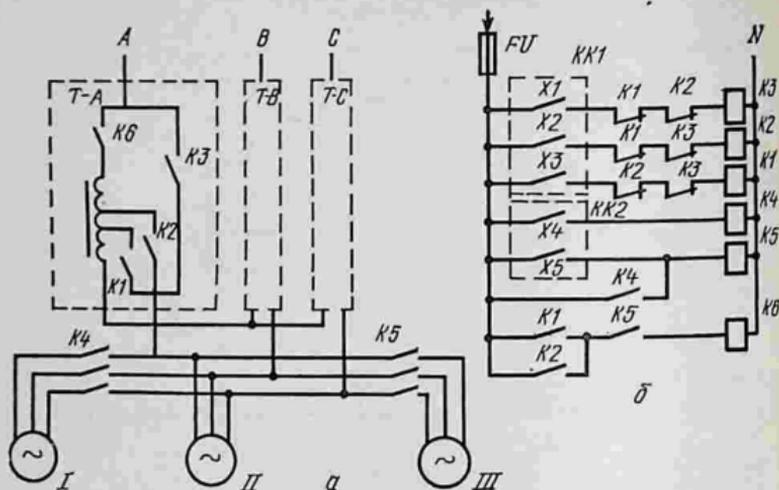


Рис. 4.5. Электровентиляторы комплекта «Климат-4»: а — схема включения; б — схема управления.

следующие режимы вентиляционной установки по подаче: 1 — работают все вентиляторы с максимальной подачей (включены магнитные пускатели $K3$, $K4$, $K5$); 2 — работают все вентиляторы со средней подачей (включены $K2$, $K4$, $K5$ и $K6$); 3 — работают все вентиляторы с малой подачей (включены $K1$, $K4$, $K5$ и $K6$); 4 — работают только вторая и третья группы вентиляторов с малой подачей (включены $K1$, $K5$ и $K6$); 5 — работает только вторая группа вентиляторов с малой подачей (включены $K1$ и $K6$); 6 — отключены все вентиляторы.

Для изменения подачи вентиляторов их подключают к ступеням напряжения автотрансформатора 380, 160 и 110 В, что соответствует подаче 100, 60 и 30%. Режим работы вентиляционной установки выбирают в зависимости от температуры в помещении: если температура выше заданной уставкой на первом регуляторе, то включается режим 1; при температуре в помещении, меньшей заданной уставкой второго регулятора, — режим 6. Остальные режимы работы вентиляционной установки выбирают в диапазоне промежуточных температур, заданных уставками регуляторов $KK1$ и $KK2$. Схема логического выбора режимов управления в зависимости от температуры в помещении с учетом особенностей соединения контактов регулятора ПТР 3-04 показана на рисунке 4.5, б. На схеме контакты выходов

реле соответственно обозначены: первого регулятора x_1 — «выше», x_2 — «норма», x_3 — «ниже» и второго регулятора x_4 — «выше», x_5 — «норма». В схеме использованы также контакты магнитных пускателей для блокировки цепей управления пускателями, исключающей короткое замыкание выводов автотрансформатора и в цепях управления. Логические функции управления для приведенных режимов работы установки имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= x_3 \wedge \bar{K}_2 \wedge \bar{K}_3, \\ K_2 &= x_2 \wedge \bar{K}_1 \wedge \bar{K}_3, \\ K_3 &= x_1 \wedge \bar{K}_1 \wedge \bar{K}_2, \\ K_4 &= x_4, \\ K_5 &= x_5 \vee K_4, \\ K_6 &= (K_1 \vee K_2) \wedge K_5. \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Вентиляционная установка «Климат-4» комплектуется станцией управления ШАП.5701.03А2Д. На переднюю панель шкафа управления станции выведены лампы, сигнализирующие режим работы установки. Электродвигатели вентиляторов защищены автоматическими выключателями с тепловыми и электромагнитными расцепителями. Установка в целом защищена автоматическим выключателем.

Вентиляционная установка МК-ВА УЗ — аналог установки «Климат-4». В ней вместо трансформатора и логического управляющего устройства установлено тиристорное устройство управления с плавным регулированием частоты вращения вытяжных вентиляторов в зависимости от отклонения температуры внутри вентилируемого помещения от заданного значения.

4.1.3. Автоматизация отопительных установок

Отопительные установки предназначены для нагрева воздуха в системах приточной вентиляции и отопления сельскохозяйственных помещений. Их используют также для сушки зерна, трав, вентиляции и отопления овощехранилищ и теплиц. Применяются установки, работающие на жидком топливе (теплогенераторы), на горячей воде (водяные калориферы), и электрические калориферы.

Автоматические отопительные установки обеспечивают стабилизацию температуры нагретого воздуха путем изме-

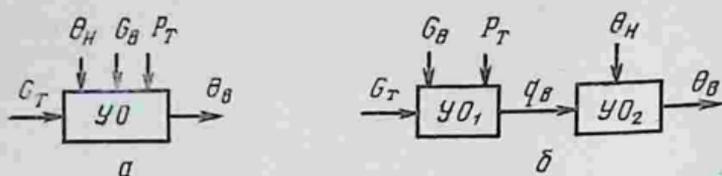


Рис. 4.6. Структурная схема системы обогрева производственного помещения.

нения количества подаваемого в теплообменник теплоносителя, топлива или изменения тепловой мощности электронагревателей, а также при помощи заслонки-шибера или жалюзи изменением количества нагреваемого воздуха.

Для отопления животноводческих и птицеводческих помещений применяют теплогенераторы типа ТГ-75, ТГ-150, ТГ-2,5, ТГ-500, работающие на жидком топливе. Теплогенераторы оборудованы системой автоматического регулирования рабочего процесса и защиты. В автоматическом режиме система управления теплогенератором обеспечивает его пуск, если температура воздуха в отапливаемом помещении ниже заданной, и остановку при нагреве воздуха до заданной температуры; защиту теплогенератора при погасании факела во время работы, при перегреве теплогенератора выше допустимой температуры, при отказе системы зажигания; защиту электродвигателей вентилятора и форсунки от перегрузок и коротких замыканий, сигнализацию нормальной работы теплогенератора и аварийных отключений.

Режим работы отопительной установки зависит от характеристик потребителя теплоты. Система отопления производственных помещений, представляющая управляемый объект, состоит из двух элементов: отопительной установки и производственного помещения. Структурная схема такого объекта показана на рисунке 4.6. Управляемая величина объекта — температура воздуха в помещении, а входная — количество подаваемого топлива в единицу времени (рис. 4.6, а). На управляемый объект действует изменение температуры наружного воздуха, изменение количества нагреваемого воздуха, изменение тепловыделения животных или птицы, изменение теплоты сгорания и давления топлива и другие возмущения. Промежуточной переменной объекта является выходная величина теплогенератора — входная величина помещения, то есть количество теплоты, подаваемое в единицу времени в помещение (рис. 4.6, б). Передаточную функцию производственного помещения по каналу

«количество теплоты — температура» в первом приближении можно представить в виде

$$W_n(s) = \frac{k_n}{T_n s + 1} e^{-s\tau_n}, \quad (4.12)$$

где k_n , T_n — коэффициент передачи и постоянная времени помещения; τ_n — время запаздывания, обусловленное передаточными каналами нагретого воздуха и распределенными параметрами помещения.

Коэффициенты передаточной функции находят аналитическим методом из уравнения теплового баланса или из разгонной характеристики, полученной экспериментально.

Для теплогенератора, как элемента объекта, в установленном режиме уравнение теплового баланса имеет вид

$$mQ_n^p = q_v + q_r, \quad (4.13)$$

где Q_n^p — теплота сгорания топлива, кДж/кг; m — расход топлива, кг/с; q_r — потери теплоты с выходными газами, кДж/с; q_v — количество теплоты, подаваемое в помещение, кДж/с.

Упрощенная физическая модель теплогенератора представляет собой теплообменник «труба в трубе» (рис. 4.7), в кольцевом канале которого движется рабочее тело — теплоноситель (воздух), а во внутреннем — продукты сгорания.

Передаточную функцию теплогенератора в первом приближении можно представить в виде

$$W_{tr}(s) = \frac{k_{tr}}{T_{tr}s + 1} e^{-s\tau_{tr}}. \quad (4.14)$$

Коэффициент передачи определяют с достаточной для практики точностью по паспортным данным теплогенератора из выражения

$$k_{tr} = q_v/m, \quad (4.15)$$

где q_v — производительность теплогенератора, кДж/ч; m — расход топлива, кг/ч.

Постоянную времени теплогенератора более достоверно можно получить по разгонной характеристике, полученной экспериментально, по каналу «расход топлива — температура нагретого воздуха». Постоянная времени теплогенераторов находится в пределах от 150 до 300 с.

Время запаздывания теплогенератора состоит из вре-

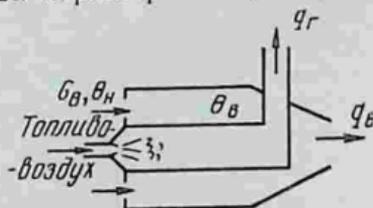


Рис. 4.7. Физическая модель теплогенератора.

мени переходного запаздывания теплогенератора и времени чистого запаздывания от момента подачи команды пуска теплогенератора до момента включения электродвигателя главного вентилятора. Это время обусловлено технологией пуска теплогенератора и состоит из времени продувки камеры сгорания перед подачей топлива, времени подачи, зажигания и воспламенения топлива и времени прогрева камеры до заданной температуры. Время продувки камеры составляет не менее 30 с. Общее время чистого запаздывания для теплогенераторов — 50. . 80 с.

Передаточная функция объекта, включающего теплогенератор и производственное помещение, состоит из аperiodического звена второго порядка и звена чистого запаздывания:

$$W_o(s) = \frac{k_n k_{тг}}{(T_n s + 1)(T_{тг} s + 1)} e^{-\sigma \tau}, \quad (4.16)$$

где T_n , $T_{тг}$ — постоянные времени помещения и теплогенератора; τ — суммарное время запаздывания помещения и теплогенератора.

Функционально-технологическая схема системы автоматического контроля и управления теплогенератором показана на рисунке 4.8,а. Преобразователь температуры 1 установлен в производственном помещении. Его сигнал поступает на управляющее устройство 2, которое совместно с программным устройством 3 управляет исполнительными механизмами 4, 5, 6, осуществляющими пуск теплогенератора по заданной программе. Магнитный пускатель 4 включает электродвигатель вентилятора и топливного насоса форсунки. После продувки камеры сгорания исполнительный механизм (электромагнитный клапан) 5 открывает подачу топлива в форсунку и одновременно включается система зажигания топлива. Факел в камере сгорания контролируется преобразователем 7. После прогрева камеры до заданной температуры, которая контролируется датчиком 8, магнитный пускатель 6 включает электродвигатель главного вентилятора, чем заканчивается пуск теплогенератора. Для контроля давления топлива по месту устанавливают показывающий прибор (манометр). Температуру нагретого воздуха контролирует преобразователь температуры 9, установленный на выходе теплогенератора. Для измерения температуры предназначен вторичный прибор 10. Он имеет контактное устройство, которое защищает теплогенератор от перегрева. Для защиты теплогенератора от погасания факела во время работы предусмотрена его остановка

или повторная подача зажигания при случайном погасании факела в нормальном режиме работы теплогенератора. О нормальной работе и аварийных отключениях теплогенератора судят по сигнальным лампочкам и звуковой сигнализации.

Для контроля температуры в помещении устанавливается первичный преобразователь регулятора температуры ПТР-2-04 или другой преобразователь температуры, например камерный биметаллический преобразователь температуры типа ДТКБ, терморегулятор ТРДЭ и т. п.

Для контроля температуры в теплогенераторе применяются dilatометрические преобразователи — реле типа ТР-200, а для измерения температуры — логометрическая установка. Для контроля факела применяют фотореле с фоторезисторами, вставляемые в отверстие корпуса форсунки.

Приборы автоматического контроля и управления смонтированы в шкафу управления, на передней двери которого установлены переключатель режима («Ручной» или «Автоматический»), кнопки управления, регулятор температуры, измерительный прибор, лампы сигнализации.

Принципиальная электрическая схема управления теплогенератором ТГ-2,5А показана на рисунке 4.8,б. Система автоматического управления оборудована двухпозиционным регулятором температуры ПТР-2-04. Работа схемы в автоматическом режиме устанавливается переключателем «Выбор режима». При включении напряжения срабатывает реле $K1$. Если температура в помещении ниже заданной уставкой регулятора ПТР-2, контакты регулятора SK замкнуты и через них подается напряжение на программное реле времени $BC-10-32$. Через 5 с после включения реле времени замыкаются его контакты $KT : 1$ и магнитный пускатель $KM2$ получает напряжение по цепи $KT : 2—BK3$. Включается двигатель вентилятора форсунки, и начинается продувка камеры горения. По истечении 20...30 с замыкаются контакты $KT : 2$ и напряжение подается на трансформатор высокого напряжения зажигания $T1$ типа ТГ-1020К и на электромагнитный клапан $УА$, открывающий доступ горючего через форсунку в камеру горения. Воздушно-топливная смесь загорается и освещает камеру сгорания. Под действием света сопротивление фоторезисторов BL уменьшается, что приводит к срабатыванию реле $K3$, а затем и реле $K2$, контакты которого отключают трансформатор зажигания и реле времени KT . После прогрева камеры горения до температуры $+38^{\circ}\text{C}$ размыкаются кон-

такты преобразователя-реле температуры *BK2*, отключается реле *K1* и его контакты включают магнитный пускатель *KM1* главного вентилятора. В помещение начинает поступать теплый воздух, подогретый в теплогенераторе.

Если пуск теплогенератора затянется, то замыкаются контакты *KT3*, которые включают сигнальную лампу *HL4* «Авария» и звуковой сигнал *HA* (звонок) и отключают реле времени *KT*.

При повышении температуры воздуха на выходе теплогенератора выше $+90^{\circ}\text{C}$ преобразователь-реле температуры (или измерительный прибор) размыкает контакты *BK3* и отключает магнитный пускатель *KM2*. При этом отключается также электромагнитный клапан *УА*, прекращая подачу топлива в форсунку. Факел погасает, что приводит к отпусанию реле *K3* и *K2*. Включается реле времени *KT*, и через 15. . .20 с замыкаются контакты *KT : 3*, включающие сигнал «Авария».

В случае кратковременного срыва факела при нормальной работе теплогенератора через замкнутый контакт *K2* в цепи трансформатора зажигания *T1* подается искра зажигания. Если смесь не воспламеняется, то через заданное время замыкаются контакты *KT : 3* и система отключается, сигнализируя об аварийном останове лампой *HL4*. Главный вентилятор работает до тех пор, пока температура в топке не снизится до $+38^{\circ}\text{C}$ и не замкнутся контакты *BK2*, за исключением того случая, когда срабатывают реле тепловой защиты электродвигателя главного вентилятора *KK1* и *KK2*.

Если температура в помещении достигает заданной, то размыкаются контакты регулятора температуры *SK* и теплогенератор останавливается. При снижении температуры в помещении ниже заданной повторяется пуск теплогенератора.

При аварийной остановке теплогенератора его отключают переключателем «Выбор режима» и после устранения неисправности снова устанавливают этот переключатель в положение «Отопление автоматическое».

Ручное управление теплогенератором осуществляется в соответствии с инструкцией по его эксплуатации.

Принципиальные электрические схемы управления и сигнализации теплогенераторов других типов (*ТГ-75*, *ТГ-150* и др.) отличаются используемыми электрическими аппаратами и приборами, типами измерительных преобразователей, реле, регуляторов и исполнительных механизмов.

4.1.4. Автоматизация установок первичной обработки молока

К первичной обработке молока относятся охлаждение, пастеризация, очистка и удаление механических и частично бактериальных примесей. Для охлаждения молока применяются специальные аппараты — молочные охладители. По конструкции они могут быть открытые и закрытые, противоточные и параллельноточные, трубчатые и пластинчатые. В качестве хладагента применяются вода и рассол. Противоточные охладители рассчитаны на охлаждение молока до температуры, превышающей на 3° начальную температуру охлаждающей жидкости.

При пастеризации молоко нагревают до $63 \dots 93^{\circ}\text{C}$. Для длительной пастеризации применяют ванны длительной пастеризации типа ВДП различной вместимости. Кратковременную пастеризацию проводят в паровых пастеризаторах с вытеснительным барабаном и в пластинчатых аппаратах с обогревом горячей водой.

Пластинчатые пастеризаторы не имеют движущихся деталей. В них теплообмен происходит между потоками горячей воды и молока, разделенными тонкими пластинами из нержавеющей стали. Между пластинами протекают в противоположном направлении вода и молоко. Водяной и молочный насосы создают необходимый для движения напор.

В автоматизированных установках ОПФ-1, ОПУ-3М, ОПУ-5М применяют комбинированные пастеризатор, теплообменник-регенератор и охладитель, собранные из одинаковых по конструкции пластин на одной станине.

Для удаления механических примесей применяется сепаратор-молокоочиститель, приводимый в движение от электродвигателя.

Автоматизированные установки первичной обработки молока состоят из центробежного молокоочистителя, пластинчатых пастеризатора, теплообменника-регенератора и охладителя.

Качество первичной обработки молока определяется точностью выполнения режима пастеризации и охлаждения молока. Технологические требования относительно температурного режима предусматривают допустимое отклонение температуры нагрева и охлаждения до $\pm 2^{\circ}$, а погрешность регистрации температуры 1° . Динамическое отклонение температуры нагрева и охлаждения молока

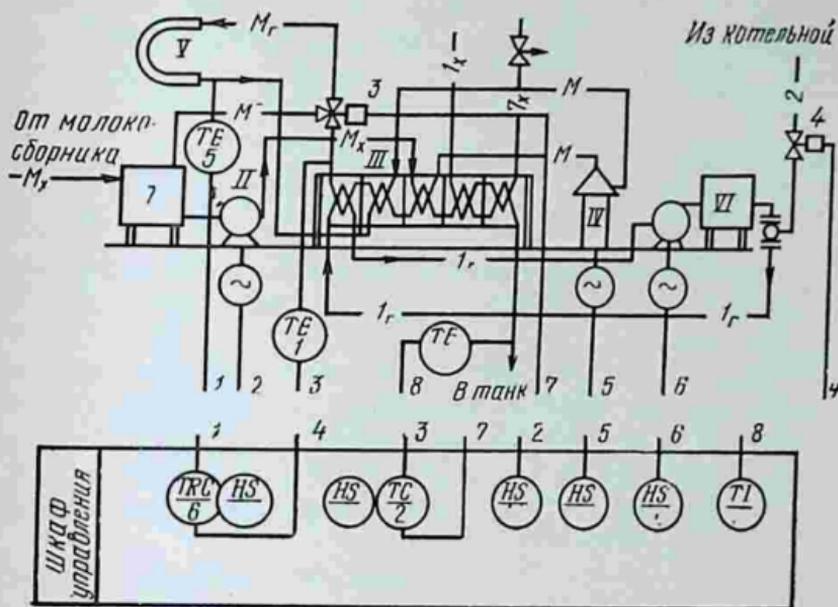


Рис. 4.9. Функционально-технологическая схема управления установкой ОПФ-1.

от заданных значений во время работы автоматических систем регулирования должно быть в пределах $\pm 2^\circ$. Превышение температуры над заданной при выходе установки на режим не должно быть более 5° .

Рабочий процесс первичной обработки молока на установке ОПФ-1 рассмотрим по функционально-технологической схеме, показанной на рисунке 4.9. Из молокооборота молоко поступает в уравнивательный бак. Из бака I и II подает молоко в первую секцию III пластинчатого агрегата (секцию регенерации), где молоко за счет теплообмена нагревается до $37 \dots 40^\circ\text{C}$. Из первой секции регенерации молоко поступает в молокоочиститель IV, очищается и подается во вторую секцию регенерации и переходит в секцию пастеризации, где за счет теплообмена с горячей водой нагревается до температуры $+76^\circ\text{C}$ (в установке ОПФ-1-200) или до $+90^\circ\text{C}$ (в установке ОПФ-1-300). Пастеризованное молоко через выдерживатель V проходит в секцию регенерации, и его температура снижается до $+20 \dots 25^\circ\text{C}$. Затем молоко проходит секцию охлаждения, где его температура снижается до $+5 \dots 8^\circ\text{C}$. Холодное молоко поступает в танк.

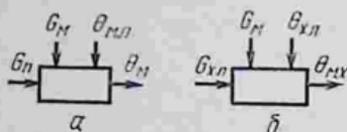


Рис. 4.10. Структурные схемы: а — пастеризации молока; б — охлаждения молока.

Горячая вода готовится в бойлере VI, где нагревается паром через инжектор паропровода от котельной установки.

Дополнительная выдержка молока в течение 20 с в выдерживателе установки ОПФ-1-20 и 300 с в выдерживателе установки ОПФ-1-300 перед охлаждением способствует уменьшению бактериальных загрязнений.

Контроль температуры молока после пастеризационной секции осуществляется первичным преобразователем 1, сигнал которого подается на регулятор 2, формирующий сигнал исполнительному механизму 3 трехходового клапана, который при низкой температуре молока перепускает его обратно в уравнильный бак.

Температура молока после выдерживателя контролируется преобразователем 5, сигнал которого подается на регулятор 6. Исполнительный механизм 4 управляет вентилем подачи пара в бойлер для изменения температуры воды.

Для выбора наиболее рациональных схем автоматического управления установкой проводят ее исследование с целью получения математического описания установки как объекта автоматизации. Определение статических и динамических характеристик позволяет выбрать наиболее эффективные регуляторы и параметры их настройки.

Процесс пастеризации и охлаждения молока можно представить структурными схемами, показанными на рисунке 4.10. Входная величина секции пастеризации — расход пара $G_{п.}$, а выходная — температура молока $\theta_{м. п.}$. Возмущениями являются непостоянство расхода молока $G_{м.}$, его температура, изменение коэффициента теплопередачи пастеризатора вследствие отложения белка на теплопроводящих поверхностях. Входная величина секции охлаждения — расход хладоносителя $G_{х.л.}$, а выходная — температура холодного молока $\theta_{м. х.}$ Основными возмущениями в охладителях молока являются колебания температуры хладоносителя, изменение давления хладоносителя $p_{х.л.}$, расхода молока $G_{м.}$ и др.

Динамика нагревательной части пластинчатого пастеризатора по каналу «расход пара — температура молока» описывается уравнением теплового баланса секции пастеризатора и системы подогрева горячей воды. Если пренеб-

речь потерями тепла в окружающую среду, то уравнение теплового баланса в установившемся режиме имеет вид

$$c_m G_m (1 - \xi) (\theta_{m. n} - \theta_{m. o}) = G_n (i - c_v \theta_v), \quad (4.17)$$

где c_m, c_v — теплоемкость молока и воды, кДж/кг; G_m, G_n — расход молока и пара, кг/с; ξ — коэффициент регенерации теплоты; $\theta_{m. o}, \theta_{m. n}$ — температура молока на входе и на выходе пастеризатора; i — энтальпия пара, кДж/кг; θ_v — температура воды.

Из уравнения (4.17) получаем статическую характеристику пастеризатора

$$\theta_{m. n} = \theta_{m. o} + \frac{i - c_v \theta_v}{c_m G_m (1 - \xi)} G_n. \quad (4.18)$$

По результатам экспериментальных и теоретических исследований передаточная функция пастеризатора с достаточной для практики точностью может быть представлена аperiодическим звеном первого порядка и звеном чистого запаздывания:

$$W(s) = \frac{k_n}{T_n s + 1} e^{-s\tau_n}, \quad (4.19)$$

где k_n — коэффициент передачи; T_n, τ_n — постоянная времени и время запаздывания, с.

Из уравнения (4.18) коэффициент передачи

$$k_n = \frac{i - c_v \theta_v}{c_m G_m (1 - \xi)}. \quad (4.20)$$

Средние значения параметров k_n, T_n и τ_n для некоторых установок приведены в таблице 4.3.

4.3. Значения k_n, T_n и τ_n

Установка	$k_n, \text{К} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$T_n, \text{с}$	$\tau_n, \text{с}$	Производительность, л/ч	Площадь поверхности теплообменника, м ²
ОПУ-3М	3820	250	20	3000	13,4
ОПУ-5М	2300	369	12	—	—
ОПФ-1	—	—	—	1000	2,5

При накоплении белковых веществ значение T возрастает на 50...60%.

Температуру нагревания молока можно изменять при помощи позиционного и непрерывного регулирования. В пластинчатых пастеризационно-охладительных установках применяются ПИ-регуляторы, обеспечивающие высо-

кую точность регулирования температуры. В установках ОПФ-1 для регулирования температуры воды используется электронный регулятор ЭР-СС-63 с термометром сопротивления. Исполнительным механизмом в системе регулирования является электрогидравлический клапан. Он снабжен электромагнитом для управления клапаном пропуска воды, которая под давлением действует на мембрану, соединенную штоком с золотником, перекрывающим канал впуска пара через инжектор в систему циркуляции горячей воды.

В установках ОПУ-3М, ОПУ-5М для контроля и регулирования температуры нагревания и охлаждения молока применяются самопишущие мосты типа МСР1-05 с пределами измерения от 0 до 100°C. Первичные преобразователи — термометры сопротивления типа ТСП-864. Мосты снабжены реостатными задатчиками, которые совместно с балансными реле типа БР-3 и реостатами обратной связи электрических исполнительных механизмов типа ПР-М регулирующих клапанов реализуют пропорциональный закон регулирования.

В установке ОПФ-1 температура охлажденного молока контролируется логометром с термометром сопротивления типа ТСМ.

Температура молока в пастеризационной секции контролируется и регистрируется самопишущим мостом типа МСР 1-01 с термометром сопротивления типа ТСП. Мост имеет контакты, которые при снижении температуры молока ниже заданной замыкаются и в цепи исполнительного механизма трехходового клапана подается напряжение. При этом клапан входа воды в гидрореле закрыт и мембрана с ее клапанным устройством находится в верхнем положении, перекрывая выход молока в выдерживатель и направляя его обратно в уравнительный бак. Когда температура молока достигает заданной, контакты моста размыкаются, ток в катушке электромагнита прерывается и под действием пружины шток опускается и открывает доступ воде в гидрокамеру клапана. Вода под давлением действует на мембрану и перемещает клапанный механизм в нижнее положение. При этом молоко поступает из пастеризатора в камеру выдерживания.

Секция охлаждения пастеризационных установок менее инерционная, чем секции нагревательной части.

Нормированная разгонная характеристика секции охлаждения установки ОП2-У5 по каналу «расход хладоно-

сителя (рассола) — температура» показана на рисунке 4.11.

Управление двигателями насосов и центрифуги ручное, при помощи кнопок и магнитных пускателей. Аппаратура управления, регулирования и контроля расположена в шкафу управления. На переднюю панель шкафа вынесены приборы и ключи управления, электронный мост, регулятор, логометр и сигнальные лампы.

В ручном режиме установки ОПФ-1 запускает оператор. Перед пуском он проверяет состояние пакета пластин, соединения, направление вращения барабана сепаратора. Затем в уравнительный бак заливает содовый раствор и включает насосы в работу. Включает пар и в течение 15 мин промывает систему. После этого заливает холодную воду для вытеснения содового раствора и в течение 30 мин промывает систему горячей водой. После стерилизации системы переключает ее в автоматический режим. Сначала подает молоко в уравнительный бак, включает сепаратор и после установления рабочей частоты вращения включает насосы подачи молока и горячей воды. После срабатывания перепускного клапана установка переходит в рабочий режим. Через 2,5...3 ч работы установку останавливают для удаления грязи из сепаратора-очистителя. Остановку осуществляет оператор в ручном режиме, выполняя необходимые операции в требуемой последовательности, определяемой инструкцией.

4.1.5. Автоматизация теплиц

Выращивание овощей в условиях защищенного грунта требует обеспечения необходимых факторов для роста и развития растений. Агротехнические требования зависят от вида растений, фазы их развития и других особенностей выращивания растений. Особые требования предъявляют растения к параметрам микроклимата в теплице: освещенности, температуре и влажности воздуха, концентрации углекислого газа, скорости движения воз-

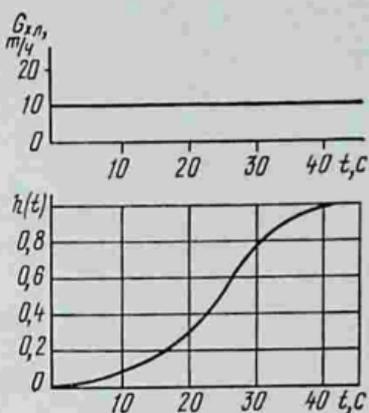


Рис. 4.11. Разгонная характеристика секции охлаждения установки ОП2-У5.

духа. Важное значение для выращивания растений имеют также температура и влажность почвы, обеспечение минеральными веществами корневой системы и другие факторы.

Параметры микроклимата тесно связаны между собой. В процессе роста растения усваивают лучистую энергию, и от уровня освещенности существенно зависят значения других параметров микроклимата: температуры, влажности, содержания CO_2 в воздухе. Их оптимальные значения бывают разными днем и ночью, в начальной стадии развития и при цветении, завязывании и росте плодов овощей. Связи между параметрами микроклимата, обеспечивающие оптимальные условия роста и развития растений в теплицах, еще не полностью изучены, чтобы можно было автоматизировать весь процесс получения овощей в теплицах.

Тем не менее применение локальных систем автоматического регулирования отдельных параметров микроклимата и других процессов позволяет значительно повысить эффективность производства овощей в защищенном грунте. Используя опыт выращивания отдельных культур, оперативный персонал может периодически изменять задания регуляторам или программы изменения параметра во времени и таким образом приблизиться к оптимальным режимам.

Основные требования по выращиванию овощей в условиях защищенного грунта изложены в нормах технологического проектирования теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады.

Системы обогрева воздуха и почвы в теплицах должны обеспечивать температуру воздуха в различное время суток с погрешностью не более 1% от заданной в диапазоне от 0 до 30°C. Температура почвы в зоне корневой системы должна стабилизироваться в пределах $\pm 3^\circ$ от заданной.

Системы вентиляции предназначены для отвода теплоты из теплицы путем замещения воздуха теплицы воздухом извне. Вентиляция осуществляется через фрамуги, расположенные на кровле у конька крыши, или при помощи осевых вентиляторов. При естественной вентиляции фрамуги открывают с обеих сторон конька крыши или только с одной подветренной стороны при большом ветре. Степень открытия фрамуг может иметь несколько промежуточных положений. Принудительная вентиляция при помощи вентиляторов должна иметь возможность регулировать подачу

воздуха путем изменения частоты вращения электродвигателя в зависимости от температуры воздуха.

Система увлажнения воздуха обеспечивает необходимую влажность воздуха путем разбрызгивания воды. Относительная влажность воздуха в теплице поддерживается в зависимости от различных параметров: суммарной солнечной радиации, освещенности, температуры воздуха, влажности воздуха, температуры листа и от комбинации этих факторов. Значение относительной влажности, которую следует поддерживать в теплице, зависит от вида выращиваемого растения, фазы его развития и может находиться в пределах от 45 до 90%. Отклонение относительной влажности от заданной специально не оговаривается.

Система увлажнения почвы должна обеспечивать равномерность увлажнения при экономном расходовании воды. Неравномерность увлажнения не должна превышать $\pm 5\%$ от заданной. Поэтому полив осуществляется периодически с интервалом во времени 20...60 мин. В зимнее время температура поливной воды должна быть не ниже $+15^{\circ}\text{C}$.

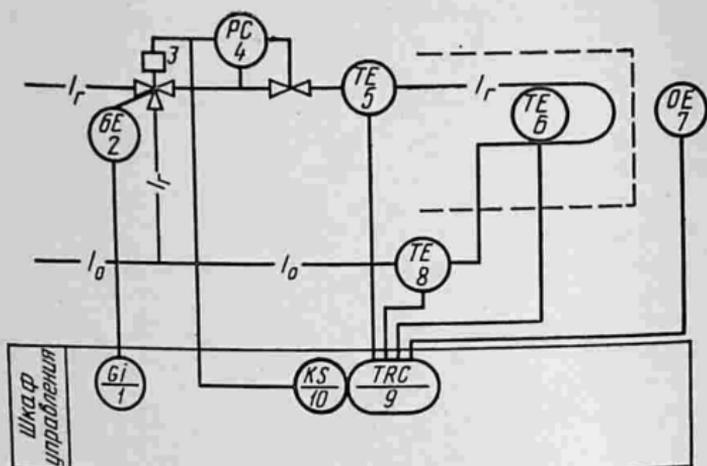
Для подкормки растений минеральными удобрениями используют систему полива: концентрированный раствор удобрения добавляют в поливочную воду и вносят в почву. Концентрация раствора минеральных удобрений должна выдерживаться с отклонением не более 5% от заданной.

Подкормку растений углекислым газом проводят в зависимости от интенсивности процесса фотосинтеза в растениях. Концентрацию углекислого газа в воздухе поддерживают в зависимости от уровня поступающей солнечной радиации или источников искусственного освещения. Она должна быть не менее 0,15...0,20%.

Концентрацию CO_2 в воздухе регулируют как изменением количества подаваемого газа, так и изменением подачи газогенератора.

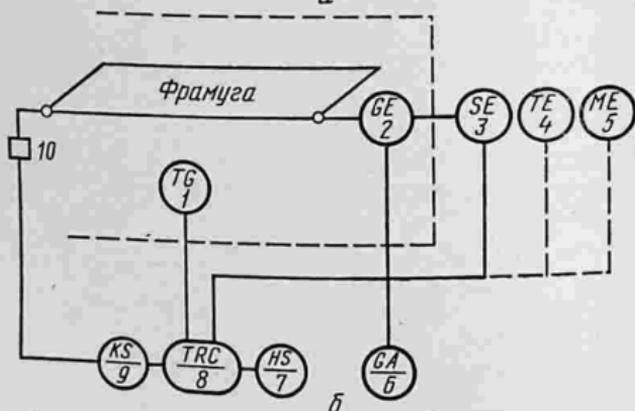
В теплицах с дополнительным искусственным освещением и облучением время досветки и дозу облучения регулируют изменением высоты подвески ламп и светильников по заданной программе, включением и отключением освещения.

Теплицу, как объект автоматизации, следует рассматривать относительно отдельных выходных величин и управляющих воздействий, а также возмущений, действующих на отклонение данной выходной величины по каждому каналу регулировки. Учитывая разнообразие теплиц, выращиваемых в них растений и способов создания необ-



Примечание: O — солнечная радиация

а



б

Рис. 4 12. Функционально-технологические схемы:

а — регулирования температуры в теплице; б — управления естественной вентиляцией в теплице.

ходимых параметров микроклимата, наиболее достоверными источниками информации для описания динамики параметров теплицы нужно считать данные, полученные экспериментально. В большинстве случаев процессы отопления, вентиляции, увлажнения воздуха в первом приближении могут быть описаны аperiodическим звеном первого порядка с звеном запаздывания. Коэффициент передачи, постоянную времени и время запаздывания по каждому каналу регулирования получают из разгонной характеристики объекта управления.

Для регулирования различных параметров в теплицах применяют непрерывное и позиционное регулирование. Например, для поддержания температуры воздуха в теплице применяют пропорциональное или пропорционально-интегральное регулирование для водотрубных систем отопления и позиционное для калориферного и электрического обогрева.

В тепличных комбинатах находятся в эксплуатации системы автоматического управления микроклиматом отечественного производства типа КТ и УТ-12, а также автоматизированное оборудование зарубежных фирм: системы ГРВ, Г-100 и Г-200 (ГДР), ДГТ (Дания), «Дельта-80» (голландской фирмы «Ван Флит»).

Система оборудования типа КТ объединяет средства регулирования отопления и вентиляции в теплице, увлажнения воздуха и полива, подкормки растений углекислым газом и минеральными удобрениями, а также контроль параметров микроклимата и работу оборудования технических систем.

Функционально-технологическая схема регулирования температуры при водотрубном обогреве показана на рисунке 4.12, а. В системе регулирования используются преобразователи температуры воздуха 6, температуры горячей воды 5 и температуры воды в обратном трубопроводе 8 и преобразователь энергетической освещенности 7. Регулятор 9 управляет при помощи исполнительного механизма 3 трехходовым клапаном, изменяя количество теплоносителя, подаваемого в систему. Регулятор давления 4 стабилизирует давление воды в трубах. Реле времени 10 задает температуру в ночное и в дневное время суток. Для контроля положения вентиля используются первичный преобразователь положения 2 и вторичный прибор 1. Предусматривается регистрация температуры в теплице.

Первичные преобразователи температуры монтируют внутри тепличного блока. Электронный регулятор формирует управляющий сигнал, который воздействует на электрический исполнительный механизм, изменяющий положение трехходового клапана типа 27ч905нж. Регулятор совместно с исполнительным механизмом формирует ПИ-закон регулирования, а с внешним дифференциатором (блоком предварения) — ПИД-закон регулирования. Максимальное время изодома 2000 с.

В системе типа КТ предусматривается также регули-

рование температуры воды теплоносителя при помощи трехпозиционного регулятора.

Функционально-технологическая схема управления естественной вентиляцией показана на рисунке 4.12, б. Вентиляция осуществляется путем открывания фрагм исполнительным механизмом 5. Степень открывания фрагм может составлять 40, 60, 80 и 100% от полного. Первичный преобразователь 3 контролирует направление и скорость ветра, которые учитываются при выборе степени открытия фрагм. Реле времени 9 изменяет программу регулирования температуры в дневное и в ночное время. Контроль степени открытия фрагм осуществляется преобразователем 2 дистанционного указателя положения фрагм 6. Регулятор 8 совместно с исполнительным механизмом формирует ПИ-закон регулирования с временем издрода 2000 с. Первичный преобразователь, регулятор и исполнительный механизм того же типа, что и в системе регулирования отопления. Система автоматического регулирования обеспечивает поддержание температуры с отклонением не более 1% от заданной.

В системе регулирования температуры почвы преобразователь температуры устанавливается на трубопроводе подачи горячей воды, а регулирующее воздействие от двухпозиционного регулятора передается на смесительный клапан. Температура почвы поддерживается в пределах $\pm 3^\circ$ от заданного значения в диапазоне от 5 до 30°C .

Система полива выполнена на базе автоматов АПТ-66, которые могут работать в полуавтоматическом режиме (по временной программе) и в автоматическом (от преобразователей влажности почвы или воздуха).

Функционально-технологическая схема полива показана на рисунке 4.13. Преобразователи относительной влажности воздуха 1 и почвы 2 используются в автоматическом режиме с регулятором 4. В полуавтоматическом режиме задаются продолжительность дождевания или полива устройством 7, программа выбора орошаемого участка 6 и кратность дождевания 5.

Система регулирования температуры поливочной воды в зимнее время показана на рисунке 4.14. Температура поливочной воды контролируется первичным преобразователем температуры 3. Регулятор 4 и исполнительный механизм 1 вентилем изменяют количество горячей воды, поступающей в скоростной водонагреватель. Регулятор температуры прямого действия 2 осуществляет перепуск

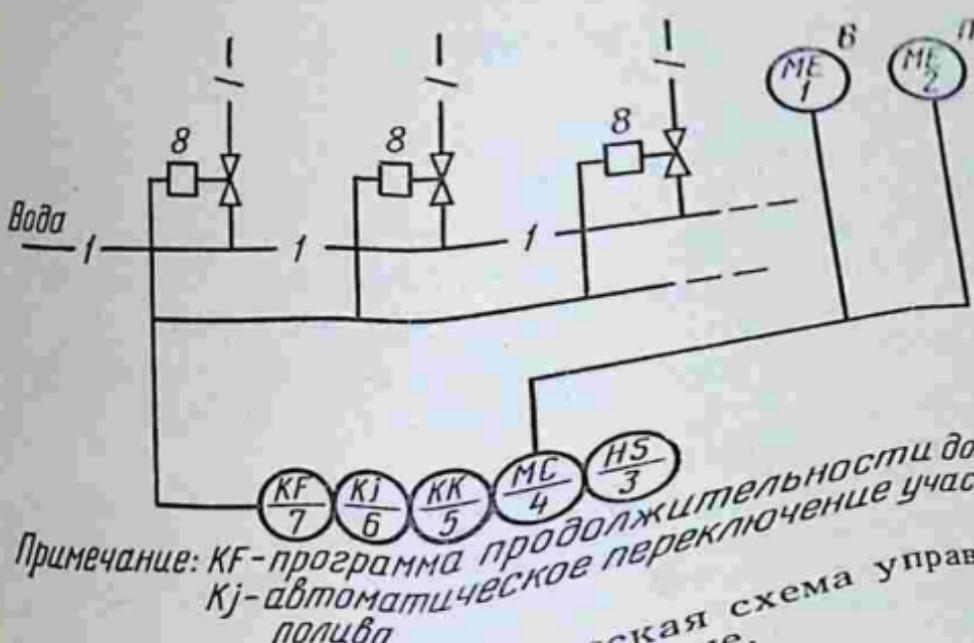


Рис. 4.13. Функционально-технологическая схема управления поливом и увлажнением воздуха в теплице.

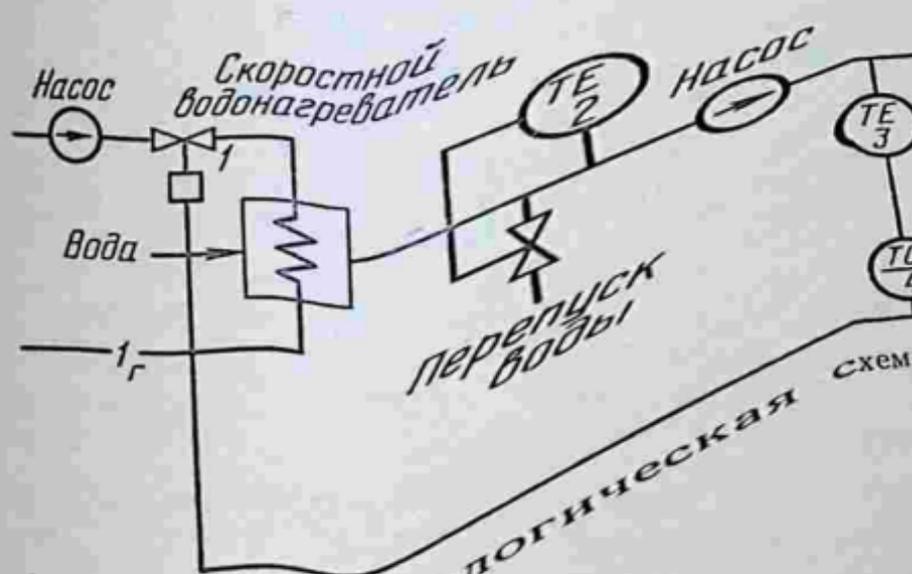


Рис. 4.14. Функционально-технологическая схема регулирования температуры поливочной воды.

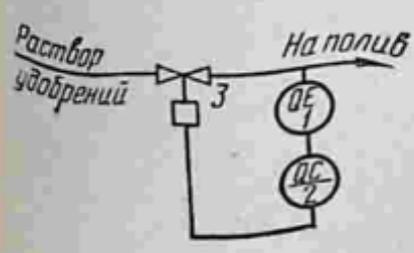


Рис. 4.15. Функционально-технологическая схема регулирования концентрации раствора

воды. Насосы горячей и поливочной воды включает оператор.

Система регулирования концентрации раствора минеральных удобрений показана на рисунке 4.15. Преобразователь проточного типа 1 измеряет концентрацию раствора. Регулятор 2 через исполнительный механизм 3 управляет регулирующим вентилем. Регулятор формирует П-закон регулирования. При уменьшении концентрации раствора его подача увеличивается по сравнению с заданной и наоборот.

Система управления подачей углекислого газа в теплицу имеет программу, рассчитанную на 24 ч, для включения генератора углекислого газа или других источников CO_2 с интервалом 15 мин.

Система автоматического управления КТ оформлена в виде двух щитов управления и главного пульта, которые устанавливают на центральном пункте управления теплицей. На главном пульте смонтированы приборы контроля и управления всеми системами теплицы, подсобных помещений и котельной. В каждом тепличном блоке установлены станции ручного управления отдельными установками.

Система УТ-12 предназначена для управления климатом ангарных и блочных теплиц, в том числе и пленочных площадью до 3 га. Устройство автоматически регулирует температуру воздуха, почвы, поливочной воды, режим полива почвы и увлажнения воздуха, концентрацию раствора минеральных удобрений, режим облучения рассады.

4.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ МАШИН И АГРЕГАТОВ

4.2.1. Значение и особенности автоматизации процессов растениеводства. Классификация автоматических систем

Важнейшим этапом повышения производительных сил в сельском хозяйстве в настоящее время является автоматизация процессов растениеводства.

Уровень механизации процессов растениеводства достаточно высок: например, для процессов производства зерновых культур он приближается к 100%, для процессов производства кукурузы, свеклы и ряда других важных сельскохозяйственных культур он не ниже 60%.

При таком достаточно высоком уровне механизации процессов в растениеводстве уровень их автоматизации очень невысок: для наиболее совершенных процессов он не превышает 20...30%. Поэтому именно автоматизация позволяет повысить производительность агрегатов, применяемых в растениеводстве, и улучшить качество сельскохозяйственной продукции.

По данным УНИИМЭСХа, автоматизация мобильных агрегатов, применяемых в растениеводстве, может дать следующее:

- а) повышение производительности труда до 30%;
- б) снижение потерь до 5%;
- в) снижение расхода горючего до 14%.

При этом будут значительно улучшено качество продукции и облегчены условия труда.

Так, например, автоматизация зерноуборочного комбайна СК-5 «Нива» позволяет сократить потери зерна за комбайном на 2...2,5% и увеличить его производительность на 10% [4].

Повышение производительности картофелеуборочного комбайна при автоматизации его загрузочных режимов достигает 15,3%, экономия топлива при этом составляет 4%.

По данным ЦНИИМЭСХа, при комплексной автоматизации производительность труда в сельском хозяйстве может увеличиться в 4...5 раз, а себестоимость продукции снизиться на 10...30%.

Повышение производительности труда мобильных агрегатов в растениеводстве может быть достигнуто за счет повышения скорости движения агрегата, а также за счет увеличения ширины захвата его рабочих органов.

Существующие мощности тракторов и самоходных агрегатов позволяют при проведении различных сельскохозяйственных операций в 2...3 раза увеличить существующие скорости. Однако достижение таких скоростей сдерживается отсутствием технических средств, способных при такой скорости осуществлять заданное направление движения агрегата, погашать нестабильность положения агрегата в вертикальной плоскости и т. д. Это под силу только совершенным автоматическим устройствам.

Увеличить ширину захвата рабочих органов сельскохозяйственного агрегата также невозможно без применения автоматических устройств. При увеличении ширины захвата увеличивается число рабочих органов (сошников сеялок, форсунок распылителей и т. д.), контроль за ра-

ботой которых невозможен без автоматических систем контроля и сигнализации. Кроме того, известно, что по технологическим нормам допустимые отклонения агрегата при вождении должны быть в пределах 5...10 см. Очевидно, что увеличение ширины захвата ухудшает управляемость агрегатом и удерживать агрегат при вождении с заданными отклонениями можно только при наличии автоматических систем вождения.

Важность решения вопросов автоматизации процессов производства в растениеводстве очевидна. Однако, как уже отмечалось, уровень автоматизации этих процессов очень низкий. Это объясняется в первую очередь сложностью и своеобразием процессов в растениеводстве.

Основная отличительная особенность производственных процессов в растениеводстве заключается в том, что их выполняют мобильные агрегаты. Обрабатываемый материал (почва и произрастающие на ней культуры) неподвижен, а средства производства должны перемещаться и выполнять определенные операции.

Кроме того, процесс выращивания растений протекает под открытым небом. В связи с этим средства производства работают в неопределенных изменяющихся условиях, зависящих от погоды.

Еще одна особенность — неоднородность обрабатываемого материала: почвы, физико-механических свойств растений и т. д. Например, загрузка уборочных машин зависит не только от изменения урожайности, но и от влажности, засоренности и ряда других, очень часто непредсказуемых факторов.

Нельзя не учитывать и такой фактор, как сложность рельефа, по которому должен двигаться агрегат. Случайные возмущения, которые вызывает рельеф обрабатываемых полей, характеризуются весьма широким спектром, обусловленным как различного рода косогорами и склонами, так и различными микронеровностями.

Все приведенные выше особенности процессов производства продукции растениеводства делают решение проблемы автоматизации этих процессов весьма сложной технической задачей.

Следуя В. Д. Шеповалову [19], проведем классификацию всех функционирующих и разрабатываемых автоматических и автоматизированных систем, применяемых на мобильных агрегатах в растениеводстве, по однородности выполняемых функций:

- 1) системы автоматического контроля, сигнализации и защиты;
- 2) системы автоматического регулирования положения машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля;
- 3) системы автоматического регулирования направления движения машин и рабочих органов;
- 4) системы автоматического регулирования загрузочных режимов машин и отдельных рабочих органов.

4.2.2. Системы автоматического контроля и защиты

Системы автоматического контроля мобильных сельскохозяйственных агрегатов предназначены для постоянного контроля за выполнением отдельных технологических операций и подачи свето-звуковой сигнализации водителю агрегата при технологических нарушениях или окончании операции.

В качестве контролируемых параметров технологических операций обычно выбирают:

предельные уровни заполнения и опорожнения технологических емкостей;

основные параметры рабочих органов сельскохозяйственных агрегатов;

пробуксовывание предохранительных муфт при перегрузках приводных органов;

количество и качество продукции, получаемой агрегатом.

Наряду с системами контроля применяются системы автоматической защиты, которые при выходе контролируемого параметра за заданные пределы отключают узел или систему механизмов во избежание аварии.

Обычно системы автоматической защиты снабжены системами автоматической сигнализации, информирующей водителя агрегата о срабатывании защитного устройства.

Системы автоматического контроля и защиты являются автоматизированными системами, которые не могут самостоятельно изменять ход технологического процесса. Причины, вызвавшие отклонение параметров технологического процесса, устраняет водитель агрегата. Такого рода системы являются разомкнутыми.

Рассмотрим фотоэлектрическую систему сигнализации уровня зерна в бункере высевающего агрегата [6]. При-

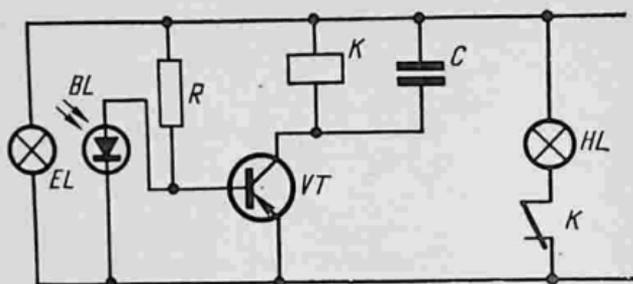


Рис. 4.16. Принципиальная схема фотоэлектрического сигнализатора уровня зерна в бункере.

ципиальная схема такого сигнализатора изображена на рисунке 4.16. Принцип действия системы заключается в следующем. При загруженном бункере резистор R подобран таким образом, что транзистор VT открыт, реле K включено и контакт K разомкнут, сигнальная лампочка HL обесточена. При снижении уровня в бункере световой поток лампочки EL попадает на фотодиод BL , что приводит к закрытию транзистора VT и появлению питания на лампочке HL . Конденсатор C служит для исключения ложных срабатываний при кратковременных затемнениях фотодиода.

Функциональная схема такой системы изображена на рисунке 4.17, она включает следующие элементы: воспринимающий элемент $BЭ$ — фотодиод с источником освещения, управляющие элементы $УЭ_1$ и $УЭ_2$ — транзистор и реле, исполнительный элемент $ИЭ$ — сигнальную лампочку. Объектом управления является бункер высевающего агрегата, а выходной величиной объекта управления — уровень зерна в нем H .

Обычно анализ динамических свойств систем сигнализации и защиты не проводят. Критерием качества работы таких систем является быстродействие. Сигнал о нарушении хода процесса должен быть подан мгновенно и так же быстро должна сработать система защиты. При этом си-

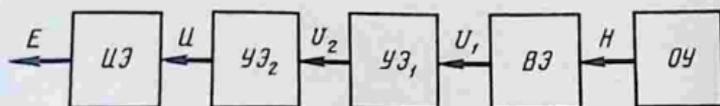


Рис. 4.17. Функциональная схема фотоэлектрического сигнализатора уровня зерна в бункере.

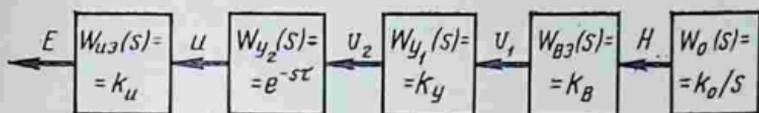


Рис. 4.18. Структурная схема фотоэлектрического сигнализатора уровня зерна в бункере.

Схема не должна реагировать на случайные помехи. Это обеспечивается безынерционностью работы ее элементов с фильтрацией полезного сигнала. Например, в рассматриваемой системе фотоэлектрического сигнализатора уровня зерна в бункере все элементы, обеспечивающие появление сигнала при снижении уровня зерна, являются безынерционными звеньями, кроме звена УЭ, состоящего из катушки реле и конденсатора. Это звено отфильтровывает полезный сигнал и не реагирует на случайные кратковременные возмущения. Структурная схема системы изображена на рисунке 4.18. Объект управления не принимает участия в передаче сигнала, поэтому его передаточная функция не должна учитываться. Три звена, передающие информацию о наличии зерна в бункере, безынерционные. Второй управляющий элемент представляет собой звено чистого запаздывания с временем запаздывания τ , которое определяется временем зарядки конденсатора. Конденсатор должен быть подобран таким образом, чтобы τ несколько превышало время действия возмущающих воздействий (наиболее часто встречающихся возмущений).

Системы автоматической сигнализации и защиты находят весьма широкое применение при управлении сельскохозяйственными агрегатами.

Рассмотрим некоторые из них. Универсальная система автоматического контроля (УСАК). Система была предложена ВИСХОМом, в настоящее время выпускается в НРБ. Система предназначена для автоматического контроля предельных значений частоты механических движений, совершаемых рабочими органами сельскохозяйственных машин, подачи одновременной световой и звуковой сигнализации о нарушении заданных предельных значений с указанием местоположения неисправного рабочего органа.

Система УСАК состоит из блока управления, индикатора, комплекта преобразователей и соединительных кабелей. Преобразователь индукционный, бесконтактный с постоянным магнитом, предназначен для преобразования

скорости вращения контролируемого рабочего органа в импульсы, частота которых пропорциональна частоте вращения рабочего органа. Преобразователь может контролировать частоту вращения вала от 1 до 2000 об/мин. Блок управления — электронный, предназначен для обработки импульсов от преобразователей и формирования сигналов для управления исполнительными элементами. Индикатор предназначен для монтажа органов управления и визуальной сигнализации аварийного состояния контролируемых узлов.

Принцип, на котором построена работа системы контроля, заключается в следующем. Импульсы от преобразователей, частота которых пропорциональна частоте вращения контролируемых органов, поступает на вход транзисторных усилителей. От усилителей импульсы подаются на транзисторные ключи, включенные параллельно конденсаторам, заряд от конденсаторов поступает на тиратроны. Тиратроны выполняют функции порогового устройства и светового индикатора.

Зарядка конденсаторов происходит через сопротивление от источников питания. Питание системы контроля получает от электросистемы сельхозмашины. Среднее напряжение питания 12В. При номинальной частоте вращения контролируемого органа транзисторные усилители открывают транзисторные ключи и разрядка конденсаторов происходит через цепь открытых транзисторных ключей.

При снижении частоты вращения какого-либо органа транзисторный ключ закрывается и заряд конденсатора достигает напряжения зажигания тиратрона. Происходит световая сигнализация места нарушения режима. Кроме того, в цепь тиратрона включен импульсный трансформатор, который при зажигании тиратрона формирует сигнал на тиристор, включающий звуковой сигнал машины.

Системы контроля типа УСАК имеют ряд модификаций. Например, система УСАК-13 имеет 14 преобразователей (13 основных и 1 запаенной), система УСАК-6—6 преобразователей.

Системы контроля устанавливают на различных уборочных сельскохозяйственных агрегатах. Например, систему УСАК-13 устанавливают на корнеуборочной самоходной машине КС-6. При этом сигнальные лампы сигнализируют о состоянии следующих рабочих органов: шести приводов копачей, привода шнеков, привода битеров копачей, передаточного вала, продольного транспортера,

погрузочного элеватора, ленточного транспортера, ком-кодробителя.

ВИСХОМом разработана электронная автоматическая система «КЕДР» для контроля за работой сеялок [6]. Система «КЕДР» состоит из восьми преобразователей высева, двух преобразователей уровня, пульта контроля и блока управления. Элементы системы соединяются между собой при помощи штепсельных разъемов и кабелей. Питание системы осуществляется постоянным током от электросети трактора.

Принцип действия части системы, контролирующей высев семян, следующий. При непоступлении семян из высевающего аппарата в течение секунды фотопреобразователь, установленный в корпусе высевающего агрегата, сигнализирует на цифровое табло о повреждении высевающего аппарата. Сигнал на пульте управления включается при отсутствии семян на высевающем диске, забивании полости аппарата зерном, забивании сошника землей или растениями, попадании в аппарат посторонних предметов, прекращении вращения высевающего диска и снижении степени разрежения.

Работа фотопреобразователей по контролю уровня семян в бункере и туков в туковой банке осуществляется примерно согласно схеме, изображенной на рисунке 4.16 (упрощенный вариант).

В системе «КЕДР» предусмотрен режим самоконтроля. При нажатии кнопки «Проверка» на пульте контроля источники светового потока преобразователей подключаются к внутреннему генератору, который обеспечивает импульсный режим работы осветителей. Таким образом имитируется пролет семян через рабочую полость фотопреобразователей. При наличии какой-нибудь неисправности в системе на пульте контроля включается номер неисправного канала и звуковой сигнал. Подобного рода системы автоматического контроля применяются на агрегатах при внесении гербицидов и жидких комплексных удобрений.

Применяются и более сложные системы контроля: ноу расхода удобрений, гербицидов, семян и т. д. Есть системы контроля вождения агрегата по рядкам. Такая система установлена на свекловичном автоматическом прореживателе ПСА-2.7. Система автоматически вырабатывает звуковой сигнал о смещении агрегата и сигналы, указывающие водителю агрегата «влево» или «вправо» сместить агрегат. Кроме того, в системе контроля прореживателя

установлены преобразователи контроля густоты насаждений после прореживателя, движения рабочих органов и т. д.

Применение системы автоматического контроля и защиты не может в полной мере решить задачу автоматизации работы мобильных агрегатов. Однако и эти системы помогают водителю агрегата в управлении, способствуя повышению производительности агрегатов и улучшению качества проводимых работ. Так, например, экспериментальные исследования, проведенные ЦелинНИИМЭСХом и ВИМом [6], показали, что применение систем автоматического контроля на посевных агрегатах позволяет в среднем экономить 1100...1200 руб. на один агрегат в сезон. Основная причина такой экономии заключается в значительном уменьшении промеров при применении автоматических систем контроля.

4.2.3. Системы автоматического регулирования положения машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля

Системы автоматического регулирования положения машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля предназначены для стабилизации положения остова косогорных машин в пространстве и для регулирования по высоте относительно поверхности поля положения первичных рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и уборочных машин.

Системы регулирования положения машин и отдельных рабочих органов можно разделить на четыре основные группы: системы автоматической стабилизации положения остова косогорных машин, системы автоматического регулирования глубины пахоты и культивации, системы регулирования положения режущих аппаратов уборочных машин, системы регулирования глубины заделки семян.

Системы автоматической стабилизации положения остова косогорных машин. При работе сельскохозяйственной техники на склонах ее эффективность резко снижается. У обычного трактора при работе на склоне 14° потери мощности составляют около 30%. При работе на том же склоне трактора, оснащенного устройством для стабилизации остова, потери мощности не превышают 6%. По-

этому при работе на склонах используются специальные крутосклонные тракторы ДТ-75К, Т-50К и т. д.

Еще значительнее потери при работе на склонах обычных уборочных машин. В наклонном положении ухудшается работа молотилки зерноуборочного комбайна в связи с тем, что ворох и зерно на сепарирующих органах сосредотачиваются с одной стороны, изменяется скорость продвижения обрабатываемой массы.

Испытания показывают [19], что на склоне 14° без выравнивания потери молотилки зерноуборочного комбайна достигают до 26%, что более чем в 5 раз превышает потери в комбайне с выравниванием молотилки. Причем недомолот в этом случае составляет около 10%, а потери свободным зерном превышают 16%. При выравнивании молотилки эти показатели имеют значения соответственно 1 и 3,7%. Испытания показывают, что увеличение потерь зерна наблюдается уже при работе на склонах свыше 2° .

Таким образом, комбайны, работающие на склонах, необходимо обязательно оснащать системами автоматического регулирования горизонтального положения молотилки.

На рисунке 4.19 приведена принципиальная схема системы автоматического выравнивания остова зерноуборочного комбайна в поперечном направлении. Такие системы оснащаются крутосклонные зерноуборочные комбайны фирмы «Мак-Кормик» (США) [19]. В качестве преобразователя в системе использован маятник 1 с демпфирующим устройством 2 для поглощения случайных возмущений, вызванных незначительными по длине неровностями поля. Отклонение преобразователя передается на плунжер золотникового гидрораспределителя 7, который управляет работой гидроцилиндра 5. От гидрораспределителя масло подается в гидроцилиндр через систему

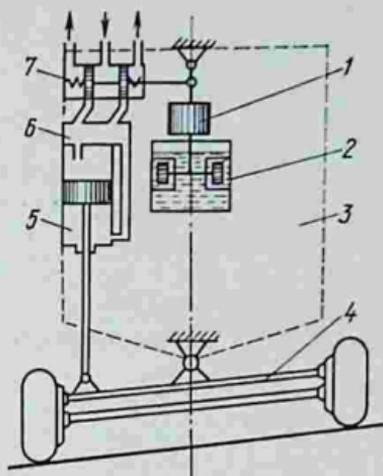


Рис. 4.19. Автоматическая система регулирования положения остова зерноуборочного комбайна:

1 — маятник; 2 — демпфирующее устройство; 3 — остов комбайна; 4 — опорный брус; 5 — гидроцилиндр; 6 — запорные клапаны; 7 — золотниковый гидрораспределитель.

запорных клапанов 6, с помощью которых поршень фиксируется при отсутствии подачи масла от гидрораспределителя.

Система действует следующим образом. При боковом наклоне остова комбайна маятник постепенно поворачивается относительно остова, стремясь занять вертикальное положение. Корпус гидрораспределителя укреплен на остова и неподвижен. Поэтому смещается его плунжер, прикрепленный к стержню маятника. Масло из гидрораспределителя нагнетается в соответствующую полость гидроцилиндра и поворачивает остов относительно опорного бруса до тех пор, пока не будет ликвидирован наклон.

Автоматические системы регулирования положения остова комбайна устанавливаются и на отечественных уборочных машинах. Принцип действия системы комбайна СКК-5 примерно такой же, как и у приведенной выше системы. Отличается лишь конструкция преобразователя. Преобразователь поплавкового типа.

При работе комбайнов, скорость которых не превышает ...2 км/ч, в качестве преобразователей используют ртуть-контактные трубки — заполненные ртутью сосуды, в основании которых помещены электроды. При горизонтальном расположении остова комбайна ртуть не замыкает электродов. При наклоне остова электроды замыкаются и электрогидравлический клапан управляет работой системы регулирования положения остова подобно тому, как было описано ранее.

Системы автоматического регулирования глубины пахоты и культивации. Основная задача систем регулирования глубины пахоты и культивации заключается в стабилизации глубины вспашки и рыхления, установленной агротехническими требованиями. В соответствии с агротехническими требованиями отклонения глубины пахоты на ровных участках не должны превышать $\pm 1...1,5$ см, а на неровных участках 2...3 см. Неравномерность глубины обработки при культивации не должна превышать ± 1 см.

Существует два основных принципа построения систем автоматического регулирования глубины пахоты — силовой и по отклонению. При использовании силового принципа система регулирования строится на основе измерения тягового усилия. Способ по отклонению использует сигнал, измеряющий расстояние от поверхности почвы до режущей кромки плуга. Естественно, что силовой принцип

построения системы регулирования является косвенным и поэтому при изменении физико-механических свойств почвы в системе, построенной по такому принципу, будут наблюдаться изменения глубины пахоты. Наиболее распространен именно этот не вполне совершенный принцип. Объясняется это простой конструкцией преобразователя (обычная пружина). Конструкция и принцип действия

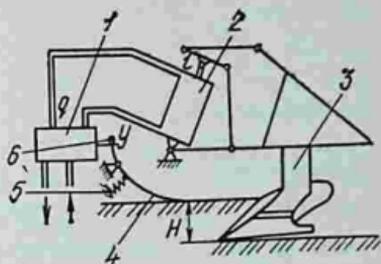


Рис. 4.20. Принципиальная схема системы регулирования глубины пахоты:

1 — золотниковый гидрораспределитель; 2 — гидроцилиндр; 3 — плуг; 4 — качающаяся планка с ползунком; 5 — пружина; 6 — винт.

такой системы описаны в литературе [4]. Мы рассмотрим работу системы, построенной на принципе управления по отклонению. Принципиальная схема такой системы изображена на рисунке 4.20 (разработка УНИИМЭСХа).

Измерительным устройством регулятора по отклонению является качающаяся планка с ползунком 4. Отклонение планки с ползунком передается на золотниковый гидрораспределитель 1, который управляет работой гидроцилиндра 2.

Действие системы происходит следующим образом. При отклонении глубины вспашки H в сторону увеличения планка с ползунком под действием пружины 5 отклонится и переместит плунжер золотникового гидрораспределителя. Масло от гидрораспределителя под давлением начнет поступать в нижнюю часть гидроцилиндра. Поршень гидроцилиндра подыметься вверх и тем самым уменьшит заглубление плуга. При уменьшении глубины пахоты система будет действовать в обратном направлении.

При резко изменяющихся физико-механических свойствах почвы применяется комбинированный способ регулирования глубины вспашки по отклонению и силовой. Резко возрастающие тяговые сопротивления приводят к временной пробуксовке движения трактора, требуют перехода на пониженную передачу или принудительное ручное выглубление орудия. Силовой преобразователь позволяет в значительной степени сгладить эти возмущения и увеличить производительность пахотного агрегата. Конструкция комбинированной системы регулирования описана в литературе [4].

Система автоматического регулирования глубины куль-

тивации и хода подкапывающих рабочих органов картофелеуборочного комбайна строится на основе принципа управления по отклонению. Чувствительным элементом системы является каток, который посредством рычажного механизма прикреплен к раме агрегата и прижимается к поверхности земли пружиной. Остальные элементы автоматической системы такие же, как у рассмотренных систем.

Системы автоматического регулирования положения режущих аппаратов. Неравномерность среза убираемых культур влияет на потери урожая за жаткой, а также на выполнение последующих технологических операций уборки. Так, по данным УНИИМЭСХа, применение автоматической системы копирования рельефа на силосоуборочных комбайнах позволило собрать с каждого гектара на 1,91 т силоса больше, то есть повысить урожайность на 4,5%. Применяемые в настоящее время пассивные механические системы опорного копирования рельефа не могут эффективно работать как на твердых почвах в связи с частой потерей контакта с почвой, так и на слабонесущих почвах в связи с частым зарыванием опорных башмаков в почву. Не являются эффективными и гидравлические компенсационные устройства, обеспечивающие постоянное давление опорных башмаков на поверхность почвы, которые на слабонесущих грунтах вообще неприменимы.

Для наиболее эффективного использования режущих уборочных агрегатов применяется замкнутая система автоматического регулирования. В качестве чувствительного элемента используется шарнирно закрепленный на жатке контактный рычаг с башмаком, копирующим рельеф поля. Остальные элементы автоматической системы конструктивно не отличаются от подобных элементов систем регулирования глубины хода рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов.

Разрабатываются системы бесконтактного регулирования величины среза зерновой массы на заданном расстоянии от колосьев [19]. Система содержит фотоэлементы, измеряющие длину срезаемых стеблей.

Системы автоматического регулирования глубины заделки семян. Урожай в значительной степени зависит от глубины заделки семян. При отклонении глубины заделки семян от заданной на ± 2 см урожайность зерновых снижается на 10...12%. Для всхожести семян льна глубина заделки имеет весьма существенное значение. Так, при заделке семян на оптимальную глубину 1,5...2 см всхо-

жесть составляет 90%, при глубине 5...6 см — 20...30%.

Определить глубину заделки семян непосредственно при выполнении посевных операций весьма сложно. Однако о глубине заделки семян можно судить по косвенному показателю — глубине хода сошников. Экспериментальными исследованиями Ленинградского сельскохозяйственного института (ЛСХИ) установлено, что между глубиной хода сошников и глубиной заделки семян существует тесная корреляционная связь. Коэффициент корреляции этих величин равен 0,8. Причем установлено, что глубина хода сошников на 1,5 см больше, чем глубина заделки семян.

Глубина хода сошников зависит от скорости движения посевного агрегата, физико-механических свойств почвы, в первую очередь от плотности почвы, а также от конструктивных и эксплуатационных особенностей сеялок, определяющих их динамические характеристики. По данным ряда исследований [6], в среднем с увеличением скорости движения посевного агрегата на 1 км/ч выглубление сошников составляет 3...4% заданной глубины хода сошников.

Указанные особенности работы посевных агрегатов положены в основу при создании систем автоматического регулирования глубины заделки семян.

Автоматический регулятор глубины хода сошников реагирует на изменения скорости движения посевного агрегата. Входным управляющим воздействием системы является скорость движения агрегата. Детальное описание работы такой системы автоматического регулирования глубины хода сошников приведено в литературе [4]. Определенная глубина хода сошников в системе поддерживается за счет работы вихревого дросселя, частота вращения которого определяется скоростью движения агрегата. При увеличении скорости движения агрегата увеличивает частота вращения вихревого дросселя, что вызывает увеличение давления подпора в гидроцилиндре. Шток гидроцилиндра выдвигается и через пружину увеличивает давление на сошник, что препятствует его выглублению. При уменьшении скорости движения агрегата уменьшается давление на сошник. Так поддерживается постоянная глубина хода сошников при переменной скорости движения посевного агрегата.

Существуют системы, которые вырабатывают управляющее воздействие на систему, регулирующую глубину хода сошников в зависимости от плотности почвы [6]. Преобразователем в этом случае служит устройство, состоящее

из двух нагруженных башмаков разной ширины. Изменение плотности почвы влияет на относительное смещение обоих башмаков, которое используют для управления гидрораспределителем системы.

Саратовский институт механизации сельского хозяйства предложил систему регулирования глубины хода сошников, вырабатывающую управляющее воздействие по отклонению копира рельефа поверхности почвы.

Несмотря на большое разнообразие принципов построения систем автоматического регулирования положения машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля, их конструктивного исполнения, все они являются замкнутыми системами регулирования со стабилизацией выходной величины. Поэтому методы анализа их работы примерно идентичны. Так как наиболее часто встречаются системы с регулированием по отклонению, рассмотрим методы анализа их работы на примере системы регулирования глубины пахоты, построенной на принципе выработки управляющего воздействия по отклонению (рис. 4.20).

Первым этапом анализа системы является определение ее функциональных элементов, связей между ними и построение функциональной схемы автоматической системы.

Объект управления — плуг 3, выходная величина объекта — глубина вспашки H , а входная — перемещение штока поршня l . Воспринимающим элементом служит ползковый копир 4, на вход которого поступает сигнал об отклонениях величины H , а выходом является пропорциональное отклонению перемещение плунжера золотникового гидрораспределителя y . Управляющий элемент — золотниковый гидрораспределитель, на выходе которого при изменении появляется поток масла q , пропорциональный y . Поток масла q , направленный в ту или иную полость гидроцилиндра, является его входным воздействием. Выходом гидроцилиндра, который служит исполнительным механизмом системы, будет перемещение штока поршня l , изменяющее положение объекта управления и его выходную величину H . Задающий элемент системы — винт 6, способный изменять положение воспринимающего элемента и задавать различную величину H . Таким образом, элементом сравнения является сам воспринимающий элемент (положение основания копира относительно режущей кромки плуга). Только в случае соответствия действительной и заданной H величин золотник гидрораспределителя

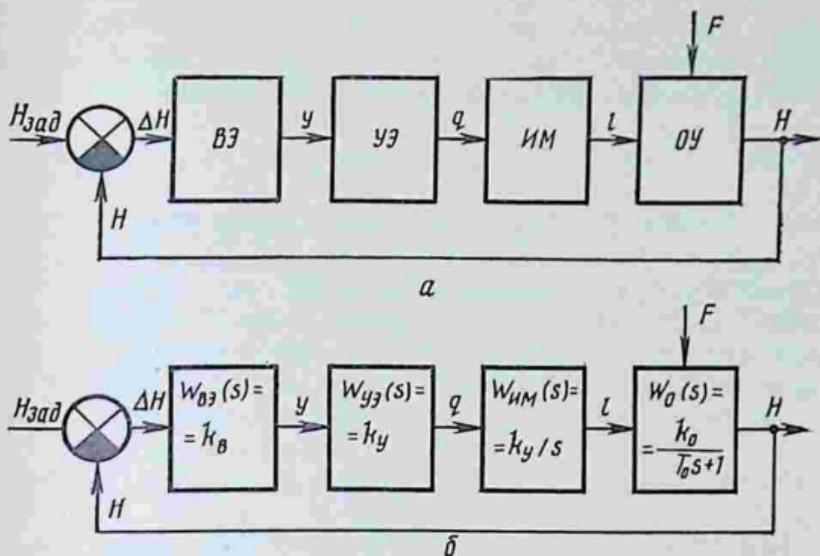


Рис. 4.21. Функциональная (а) и структурная (б) схемы автоматической системы регулирования глубины пахоты.

будет устанавливаться в такое положение, при котором масло от гидросистемы не будет попадать в исполнительный механизм.

Функциональная схема показана на рисунке 4.21, а. На схеме изображены все функциональные элементы и связи между ними, рассмотренные выше. Возмущающими воздействиями F объекта управления являются неровности поверхности поля, по которым движется ползковый копир а также вертикальные колебания плуга, возникающие при движении пахотного агрегата.

Дальнейший анализ работы автоматической системы заключается в определении динамических характеристик элементов и построении структурной схемы автоматической системы.

Объект управления — плуг, который имеет значительную массу и обладает определенной инерционностью и приложении усилий по его перемещению. В идеальном случае его передаточная функция, связывающая перемещение штока поршня и величину перемещения плуга, может быть представлена передаточной функцией инерционного звена первого порядка:

$$W_{o.y}(s) = k_o / (T_o s + 1). \quad (4.21)$$

Воспринимающий элемент представляет собой обычное рычажное устройство. При небольших скоростях переме-

шения ползкового копира, когда вынужденные колебания его незначительны, воспринимающий элемент можно считать безынерционным звеном с передаточной функцией

$$W_{в.э}(s) = k_{в}. \quad (4.22)$$

Золотниковый гидроусилитель — управляющий элемент, представляет собой нелинейное звено со статической характеристикой, соответствующей третьей позиции таблицы 3.1. Предположим, что работа усилителя велась на линейном участке (рабочий участок между d и h). В этом случае управляющий элемент также можно считать безынерционным звеном с передаточной функцией

$$W_{у.э}(s) = k_{у}. \quad (4.23)$$

Исполнительный механизм представляет собой интегрирующее элементарное звено, так как перемещение штока при подаче на вход потока рабочей жидкости изменяется во времени по линейному закону. Передаточную функцию такого звена можно записать формулой

$$W_{и.м}(s) = k_{и}/s. \quad (4.24)$$

Строим структурную схему автоматической системы рис. 4.21, б).

Определяем передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_{раз}(s) = \frac{k_{в}k_{у}k_{и}k_{о}}{s(T_{о}s + 1)}. \quad (4.25)$$

Обозначим произведение $k_{в}k_{у}k_{о} = k_{1}$ и определим передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_{зам}(s) = \frac{k_{1}}{s(T_{о}s + 1) + k_{1}}. \quad (4.26)$$

Для определения работоспособности системы и ее показателей качества необходимо найти значения передаточных коэффициентов и постоянной времени объекта управления. По данным исследований [4], для агрегата, состоящего из трактора К-701 и плуга ППП-7-40, $k_{1} = k_{в}k_{о}k_{у} = 6$ мм/(мм·с), $T_{о} = 0,08$ с. Без большой погрешности $k_{в}$ можно принять равным единице, так как его определяют соотношением плеч рычага.

Тогда

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{6}{s(0,08s+1)}; \quad (4.27)$$

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{6}{0,08s^2+s+6}. \quad (4.28)$$

Вид передаточной функции разомкнутой системы показывает, что амплитудно-фазочастотная характеристика (АФЧХ) системы будет находиться в третьем квадранте и не будет пересекать отрицательную часть вещественной оси комплексной плоскости. Таким образом, система будет устойчива при любых коэффициентах усиления регулятора автоматической системы.

Показатели качества системы лучше всего определять прямым методом, решением дифференциального уравнения движения системы. В соответствии с выражением (4.28) дифференциальное уравнение движения автоматической системы можно записать так:

$$0,08 \frac{d^2 \Delta H(t)}{dt^2} + \frac{d \Delta H(t)}{dt} + 6 \Delta H(t) = 6y(t), \quad (4.29)$$

где $\Delta H = H_{\text{зам}} - H$.

Пусть входное воздействие $y(t)$ изменилось на 1 см от равновесного состояния. Начальные условия нулевые $\Delta H(0) = 0, \frac{d \Delta H(0)}{dt} = 0$. Характеристическое уравнение (4.29) примет вид

$$0,08s^2 + s + 6 = 0. \quad (4.30)$$

Определим корни характеристического уравнения

$$s_{1,2} = -6,75 \pm j 5,25.$$

Корни комплексные с отрицательной вещественной частью. Общее решение однородного дифференциального уравнения

$$\Delta H'(t) = e^{-6,75t} (C_1 \cos 5,25t + C_2 \sin 5,25t).$$

Частное решение

$$\Delta H''(t) = 1.$$

Общее решение

$$\Delta H(t) = 1 + e^{-6,75t} (C_1 \cos 5,25t + C_2 \sin 5,25t).$$

Используя начальные условия, получим

$$C_1 = C_2 = -1.$$

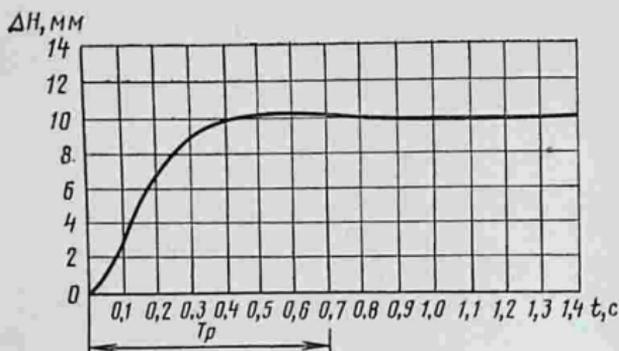


Рис. 4.22. График переходного процесса систем автоматического регулирования глубины пахоты.

Тогда общее решение уравнения (4.29) запишется так:

$$\Delta H(t) = 1 - e^{-0,75t} (\cos 5,25t + \sin 5,25t). \quad (4.31)$$

Подставляем различные значения t от 0 до ∞ и определяем значения переходного процесса. График переходного процесса изображен на рисунке 4.22. Ход процесса показывает, что перерегулирование в системе не превышает 10%, время регулирования $T_p < 0,7$ с, колебательность процесса $n \approx 1$. Таким образом, система обладает достаточно хорошими показателями качества работы.

При анализе работы системы было принято допущение, что золотниковый гидрораспределитель является элементарным пропорциональным звеном. Если считать его нелинейным звеном с зонами нечувствительности и насыщения (поз. 3, табл. 3.1), то в системе также будет затухающий переходный процесс с несколько бóльшим числом полуколебаний.

Принятая для анализа автоматическая система не является в динамическом отношении самой сложной из рассмотренных нами систем регулирования положения машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля. Более сложными зависимостями могут быть описаны динамическая характеристика объектов управления [4] и воспринимающих элементов [19]. Однако методика анализа работы остается такой же, как показано на примере регулирования глубины пахоты.

Как было показано выше, применение систем регулирования положения машин и отдельных рабочих органов

относительно поверхности поля может дать значительный экономический эффект за счет улучшения качества технологических процессов, снижения потерь сельскохозяйственной продукции, а также за счет увеличения производительности труда. Однако пока не все рассмотренные нами системы находят широкое применение в производстве.

Оснащаются автоматическими системами агрегаты, работающие на косогорах (тракторы ДТ-75К, комбайны СКК-5, КБК-1,0 и т. д.). Находят ограниченное применение системы регулирования высоты среза и глубины подкапывающих агрегатов. Выпускаются регуляторы стабилизации положения орудий пахотных агрегатов, основанные на силовом принципе. Пока не находят применения многие системы стабилизации положения сошников посевных агрегатов. Часть выпускаемых систем, установленных на агрегатах, используется неэффективно. Причина такого недостаточного использования систем управления положением машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля объясняется несовершенством конструкции систем и в первую очередь чувствительных элементов. Очевидно, принцип определения отклонений регулируемой величины с помощью контакта с поверхностью обрабатываемого материала неприемлем.

4.2.4. Системы автоматического регулирования направления движения машин и отдельных рабочих органов

Системы автоматического регулирования направления движения машин и отдельных рабочих органов служат для поддержания движения агрегатов или их рабочих органов по заданным траекториям и ориентирам. Эти системы могут быть разделены на следующие основные группы: системы автоматического вождения мобильных сельскохозяйственных агрегатов; системы автоматического вождения самоходных сельскохозяйственных машин; системы автоматического направления движения рабочих органов сельскохозяйственных орудий при междурядной обработке.

Системы автоматического вождения мобильных сельскохозяйственных агрегатов. При работе на машинно-тракторном агрегате водитель выполняет одновременно несколько операций: управляет направлением движения агрегата, контролирует качество выполнения технологических опе-

раций орудиями агрегата и управляет режимом работы двигателя. Все эти операции определяют физическую и психологическую нагрузку на механизатора. Эта нагрузка характеризуется однообразием действий при управлении движением агрегата. Поэтому работа по созданию системы автоматического вождения тракторов началась с момента их создания. Уже в 1911 г. в России было зарегистрировано изобретение «Автоматически действующий руль для пахотных тракторов». В 1930 г. делались попытки осуществить вождение колесных тракторов с помощью механических направителей. С 1957 г. тракторы оснащали первыми опытными устройствами для автоматического вождения [9].

Работы над созданием совершенных средств автоматического вождения сельскохозяйственных агрегатов ведутся и в настоящее время. Особенно это важно для увеличения скорости движения машинно-тракторных агрегатов. Известно, что от момента регистрации механизатором какого-либо отклонения в ведении технологического процесса до начала реакции системы на это отклонение проходит не менее 1 с. За это время агрегат, двигаясь со скоростью 10 км/ч, пройдет 2,8 м. Поэтому при увеличении скорости и ширины захвата мобильных агрегатов механизатору без автоматических средств вождения невозможно обеспечить необходимое качество выполнения технологических операций.

Отклонение ширины захвата плуга от номинального значения не должно превышать 10%. Отклонение направления движения агрегата при пахоте должно быть не более 1 м на 500 м длины гона. При лущении, дисковании, бороновании и культивации допустимые отклонения стыковых междурядий должны быть не более 7...10 см, а при посеве — 5 см. Отклонение осевой линии при посеве не должно превышать 5 см на каждые 50 м длины ряда.

Для автоматизации вождения машинно-тракторных агрегатов в настоящее время разработан ряд методов ориентации: метод копирования, задание программы движения, дистанционное управление, использование естественных ориентиров поля.

Возможны и другие методы, построенные на комбинировании перечисленных.

Метод копирования основан на копировании агрегатом с помощью чувствительных элементов линии, оставленной им же при предыдущем проходе.

Задание программы движения может осуществляться

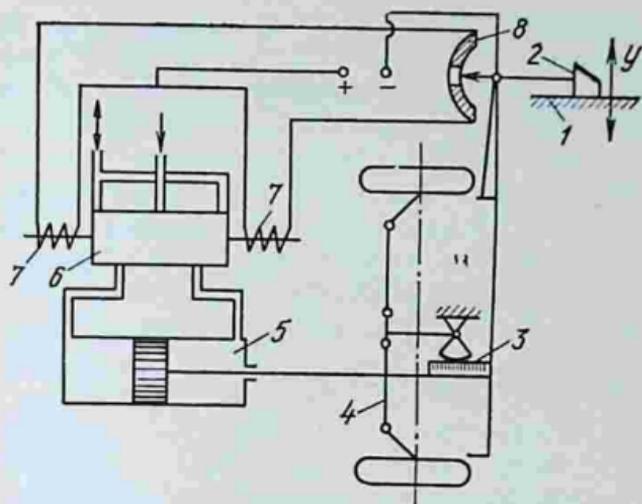


Рис. 4.23. Упрощенная принципиальная схема автоматического вождения трактора:

1 — борозда; 2 — копир; 3 — реечная передача; 4 — рулевая трапеция; 5 — гидроцилиндр; 6 — золотниковый гидрораспределитель; 7 — соленоидный исполнительный механизм; 8 — контактная головка.

предварительной прокладкой траектории на местности в виде маркерной линии, установкой вешек, укладкой токонесущего кабеля или заданием определенного алгоритма движения.

Дистанционное управление можно осуществлять с пути управления или ведущего агрегата, управляемого в ную. Ведомыми агрегатами при этом можно управ. механическим, оптическим методами или по радио. Можно использовать естественные ориентиры поля: рядки ранний или арматуру, установленную для поддержания стений.

На рисунке 4.23 изображена упрощенная принципиальная схема системы автоматического вождения трактора, построенная на методе копирования. Чувствительный элемент автоматической системы — копир 2, который прижимается к направляющей борозде 1. Недопустимое отклонение копира воспринимается контактной головкой 8, сигнал от которой подается на один из электромагнитов 7. Электромагниты управляют работой золотникового гидрораспределителя 6, а он, в свою очередь, управляет работой гидроцилиндра 5. Перемещение штока гидроцилиндра воздействует через реечную передачу 3 на рулевую трапецию 4, в результате чего трактор поворачивает в

нужном направлении. Поворот происходит до тех пор, пока копир снова не займет нейтральное положение.

Системы такого рода изготавливают и устанавливают на тракторах типа К-700, ДТ-75 и т. д. [7]. Однако такие системы вождения имеют ряд недостатков. Они накапливают ошибки первых проходов, что приводит к потере ориентации и снижению качества вспашки уже на пятом проходе. Искривление направления траектории требует периодической коррекции. Кроме того, борозда не может быть надежным ориентиром для механических копирующих устройств.

Институтом механики АН Грузинской ССР разработан бесконтактный чувствительный элемент для системы автоматического вождения тракторов [7]. Это фотооптический преобразователь, улавливающий разницу отражения света от вспаханного и неспаханного участков.

В Горском СХИ [9] разработана система автоматического вождения, которая имеет два контура управления. Один контур вырабатывает управляющее воздействие на основе линейного отклонения агрегата. Второй контур управляет агрегатом по отклонению от заданного курса. Контур управления по отклонению ничем не отличается от рассмотренных нами систем вождения. Регулятор управления по курсу прямого действия. Его действие начинается после действия контура системы управления по линейному отклонению. При ликвидации ошибки по линейному отклонению в действие вступает силовая трапеция, состоящая из Т-образной рамы и двух пружин и являющаяся преобразователем и исполнительным механизмом. Т-образная рама системой рычагов связана с рулевой трапецией. При наличии угла между заданным курсом и положением колес трактора после ликвидации линейного отклонения действием пружин этот угол исчезает.

Рассмотренные системы вождения проходят опытную проверку и являются перспективными.

Одно из перспективных направлений автоматизации вождения сельскохозяйственных агрегатов — групповой метод вождения. При групповом методе один тракторист, находящийся на ведущем тракторе — лидере, управляет группой тракторов-роботов. Связь между тракторами может осуществляться с помощью радиоустройств, механическим способом (один трактор-робот), с помощью единой гидравлической системы и с использованием квазистатического электромагнитного поля переменного тока. Ра-

боты в этом направлении ведутся в УНИИМЭСХе и других институтах.

В НАТИ, ВИМе проводятся разработки индукционных систем автоматического вождения [7]. Работа таких систем основана на использовании в качестве направляющей квазистатического магнитного поля переменного тока звуковой частоты тока, протекающего по проводам, уложенным в почве на глубине $\sim 0,7$ м и на расстоянии друг от друга 1,8 м.

Системы автоматического вождения самоходных сельскохозяйственных машин. При уборке урожая на самоходных уборочных машинах примерно 80% времени механизатор затрачивает на операции, связанные с вождением. Специфика условий проведения сельскохозяйственных работ такова, что при ручном управлении современные энергонасыщенные машины могут быть использованы только на 60...70%. При этом после первых 3...4 ч работы неизбежно снижается качество выполняемых операций.

Автоматические системы вождения самоходных сельскохозяйственных машин позволяют повысить производительность труда на гоне, улучшить качество проведения технологических операций и облегчить труд механизатора.

Созданные в настоящее время системы автоматического вождения построены в основном на методе ориентации с использованием естественных ориентиров поля. Встречаются системы с использованием метода копирования

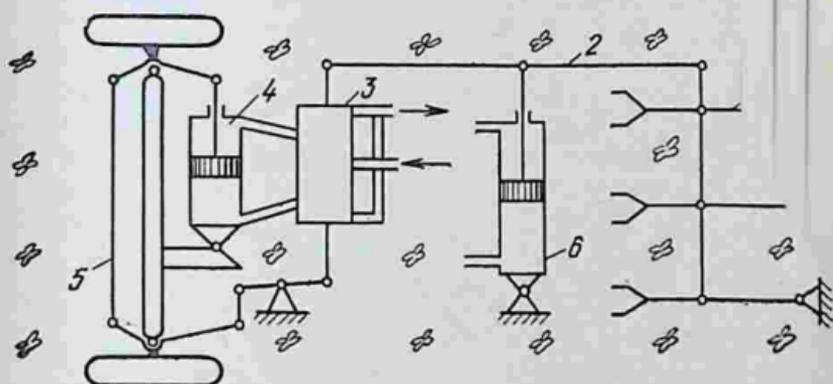


Рис. 4.24. Упрощенная принципиальная схема системы автоматического вождения свеклоуборочных комбайнов КС-6:

1 — копир; 2 — рычаг; 3 — гидрораспределитель; 4 — гидроцилиндр; 5 — рулевая трапеция; 6 — гидроцилиндр ручной коррекции.

На рисунке 4.24 приведена принципиальная схема системы автоматического вождения самоходного свеклоуборочного комбайна КС-6 [4]. Система осуществляет управление передними колесами машины с требуемой точностью вдоль убираемых рядков. Работа системы построена на гидромеханическом принципе.

Копирующее устройство состоит из трех преобразователей 1 ползкового типа, установленных на параллелограммных подвесках и подвешенных к брусу рамы на поворотных кронштейнах. Для заглубления перьев в почву преобразователь имеет культиваторную лапу, что повышает надежность нащупывания корней. Применение трех преобразователей повышает надежность отслеживания рядков при наличии пропусков корней в рядках. Для усреднения показателей преобразователи соединены поперечной тягой.

При отклонении преобразователей рычаг 2 передает отклонение на золотниковый гидрораспределитель 3, который подает масло от гидросистемы в одну из полостей гидроцилиндра 4, и шток гидроцилиндра, воздействуя на рулевую трапецию 5, поворачивает колеса в нужном направлении. Положение копиров относительно рамы корректируется при помощи гидроцилиндра ручной коррекции 6.

Для автоматического вождения самоходных кукурузоуборочных комбайнов применяются системы, построенные на гидромеханическом [3] и электрогидравлическом [7] принципах. Системы автоматического вождения, построенные на этих принципах, нами уже рассматривались (см. рис. 4.23 и 4.24). В качестве чувствительного элемента таких систем используются механические и электромеханические щупы. Преобразователи-щупы устанавливают внутри третьего и пятого мысов жатки комбайна. Основными узлами электромеханического преобразователя, разработанного УНИИМЭСХом, являются рамка, дифференциальный преобразователь, тросик и фиксатор. При отклонении приемных русл жатки от рядков стеблей кукурузы рамка поворачивается вокруг оси и тросик поворачивает ось дифференциального преобразователя, на выходе которого появляется электрический сигнал. При этом сжимается пружина фиксатора. После выравнивания комбайна рамка под действием пружины возвращается в исходное положение и возвращает посредством тросика в исходное положение дифференциальный преобразователь. В остальном

действие системы вождения аналогично действию схемы, приведенной на рисунке 4.23.

Для автоматизации вождения самоходных зерноуборочных комбайнов также разработаны гидромеханические и электромеханические системы автовождения. В качестве направляющих используются естественные ориентиры — бровка хлебостоя при прямом комбайнировании и валок при раздельном. Конструкция систем неоригинальна, это обычная конструкция преобразователя-щупа, применяемого при обмолоте валков. Оригинальным является разработанный в ГДР [7] преобразователь автомата вождения комбайна по бровке хлебостоя. На левой стороне жатки закреплена консоль с двумя индукционными преобразователями. Внутри индукционного преобразователя при помощи специальной гильзы крепится щуп-пруток, который контактирует с бровкой хлебостоя. При отклонении щупа изменяется выходной сигнал индуктивного преобразователя, причем изменение сигнала пропорционально расстоянию от края жатки до бровки хлебостоя. Выходной сигнал преобразователя поступает на электронный регулятор, в котором формируется управляющий сигнал для электрогидросистемы автомата вождения.

Работа автомата вождения зерноуборочного комбайна зависит от состояния хлебостоя. При вертикальном положении растений и густом хлебостое работа автомата вполне надежна. Автомат может работать, если протяженность участков полеглого хлебостоя не превышает 1,5 м.

Системы автоматического направления движения рабочих органов сельскохозяйственных орудий при междурядной обработке. При проведении междурядной обработки растений к качеству проведения операций по рыхлению междурядий и их подкормке предъявляются жесткие агротехнические требования [7]. Величина защитной зоны в зависимости от стадии развития всходов должна быть в пределах 5...8, 10...12 или 14...15 см при допустимых отклонениях от заданного значения соответственно 2, 3 и 4 см. Число поврежденных растений не должно превышать 4%. Опыт работы показывает, что без применения автоматических устройств такие агротехнические требования могут быть выдержаны при скоростях движения культиватора 6...7 км/ч. При скорости 12 км/ч работа неавтоматизированным культиватором приводит к появлению 40% поврежденных и присыпанных растений.

На рисунке 4.25 приведена принципиальная схема ав-

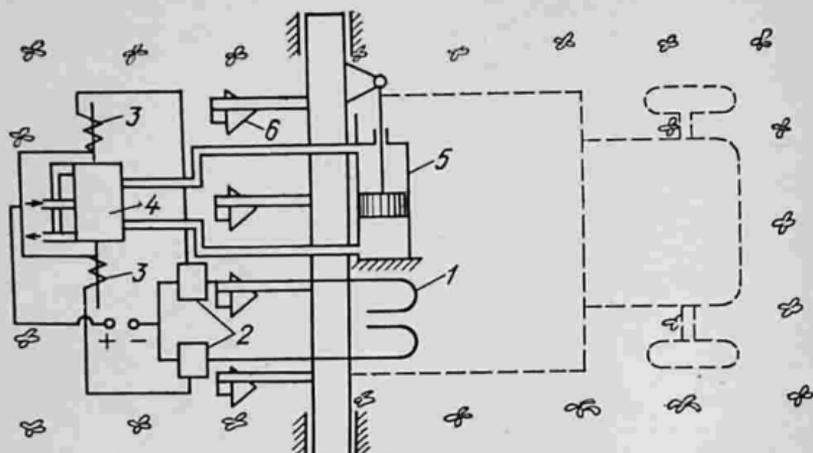


Рис. 4.25. Принципиальная схема автоматической системы направления движения рабочих органов культиватора по рядкам:

1 — преобразователи-щупы; 2 — усилители; 3 — электромеханический преобразователь; 4 — гидроусилитель; 5 — гидроцилиндр; 6 — культиватор.

томатической системы направления движения рабочих органов культиватора по рядкам для серийно выпускаемых навесных культиваторов типа КРН [3].

Воспринимающими элементами таких систем являются электроконтактные щупы 1, принцип действия которых основан на электропроводности растений. Электроконтактные щупы представляют собой проволочные электроды с низковольтным источником питания, которые при соприкосновении с растениями образуют электрическую цепь через растения, землю и рабочую машину. Сопротивление этой цепи составляет 15...25 мОм, поэтому для усиления сигнала от преобразователей, который составляет доли микроампер, установлены двухкаскадные полупроводниковые усилители 2. Сигнал от усилителей поступает на один из соленоидных клапанов 3, который воздействует на золотниковый гидроусилитель 4. Сигнал от гидроусилителя поступает к гидроцилиндру 5, который изменяет положение культиватора 6.

Электроконтактные щупы следует применять при первых культивациях, когда стебли растений еще слабые. При обработке зрелых растений применяются механические щупы с электромеханическими преобразователями.

Для автоматической коррекции направления движения рабочих органов машин, предназначенных для работы в

садах и виноградниках, используются автонаправители рабочих органов. Приспособление ПРВН-72000М предназначено для междурядной обработки [7]. Воспринимающим органом является шарнирно закрепленный щуп, который при соприкосновении с растением отводит обрабатывающий орган от растения. Работа всей системы коррекции направления движения рабочих органов основана на электрогидравлическом принципе, уже описанном в рассмотренных выше системах автоматического вождения.

Рассмотренные системы автоматического регулирования направления движения машин и отдельных рабочих органов весьма разнообразны по конструктивному выполнению их элементов. Однако принципы их построения общие. Это замкнутые автоматические системы регулирования с принципом управления по отклонению и алгоритмам функционирования следящих автоматических систем.

Существует общий подход к анализу такого рода систем. Рассмотрим пример анализа работы автоматической системы вождения трактора (рис. 4.23).

Определим функциональные элементы системы автоматического вождения. Колесный трактор — объект управления, выходной величиной которого является смещение точки копирования и входной — угол поворота направляющих колес. Воспринимающим элементом является копир 2, входная величина которого — отклонение точки копирования y , а выходная — напряжение, подаваемое на обмотки соленоидных исполнительных механизмов, которое является для них входным воздействием. В воспринимающий элемент входит и y — той происходит сравнение. Поэтому конструктивно элемент с воспринимающим элементом.

Исполнительные механизмы — это управляющие механизмы, выходной величиной которых — перемещение вала гидрораспределителя 6. Гидрораспределитель является управляющим элементом системы, в результате действия которого — перемещение плунжера гидрораспределителя — поток масла в рабочую полость гидроцилиндра — исполнительного механизма автоматической системы является перемещение штока поршня, которое через регулирующий орган (реечную передачу 3 и рулевую трапецию 4) воздействует на объект управления и изменяет угол поворота его направляющих колес.

Функциональная схема автоматической системы при-

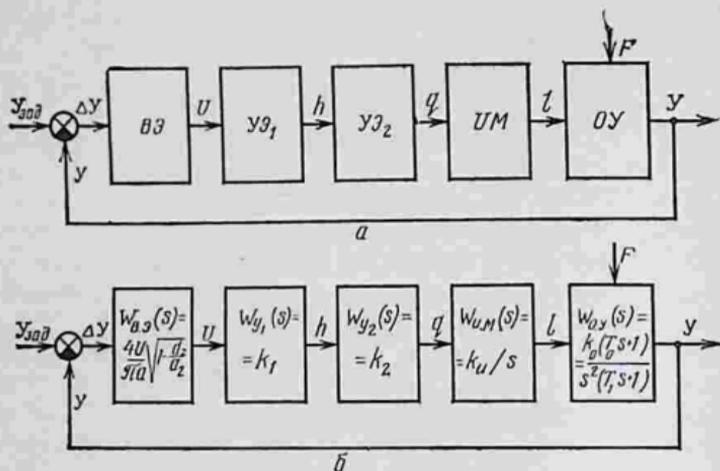


Рис. 4.26. Функциональная (а) и структурная (б) схемы автоматической системы вождения колесного трактора.

ведена на рисунке 4.26, а. Возмущающим воздействием объекта управления являются различные усилия, вызывающие изменение направления движения объекта управления, а также неровности поля под колесами трактора.

Рассмотрим динамические характеристики элементов автоматической системы.

Объект управления — колесный трактор. При некоторой идеализации процесса движения трактора его передаточная функция может быть записана в общем виде [10] следующим образом:

$$W_{o. y}(s) = \frac{kQ(s)}{s^2R(s)},$$

где $Q(s)$ и $R(s)$ — некоторые полиномы от s .

В простейшем случае это полиномы первой степени и упрощенная передаточная функция имеет вид

$$W_{o. y}(s) = \frac{k(T_0 s + 1)}{s^2(T_1 s + 1)}. \quad (4.32)$$

Коэффициенты T_0 , T_1 , k не постоянные, а зависят от скорости движения трактора и расстояния от точки копирования до направляющих колес по ходу движения трактора, то есть от выноса копирующего устройства. Например, для трактора МТЗ-50 выражение (4.32) может быть

еще несколько упрощено и представлено в виде [4]

$$W_{o. y}(s) = \frac{kv^2 \left(\frac{a'}{v} s + 1 \right)}{s^2} e^{-\tau s}, \quad (4.33)$$

где v — скорость движения трактора; a' — вынос копирующего устройства; τ — время чистого запаздывания.

Воспринимающий элемент — копир с контактной головкой является нелинейным звеном с характеристикой, соответствующей позиции 5 таблицы 3.7. Передаточная функция звена при его гармонической линеаризации имеет вид

$$W_{н. в}(s) = \frac{4u}{\pi a} \sqrt{1 - d^2/a^2}, \quad (4.34)$$

где a — амплитуда автоколебаний системы вождения; u — напряжение, подаваемое к соленоидным клапанам; d — половина зоны нечувствительности.

Управляющие элементы, соленоидный исполнительный механизм и золотниковый гидроусилитель — также нелинейные звенья с существенными нелинейностями. Однако при приближенных расчетах их можно считать обычными безынерционными звеньями с передаточной функцией

$$W_{y, 2} = k_{y, 2}. \quad (4.35)$$

Исполнительный механизм — интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W_{и. м}(s) = k_u/s. \quad (4.36)$$

На рисунке 4.26, б изображена структурная схема автоматической системы вождения колесного трактора.

Учитывая, что передаточная функция объекта управления имеет переменные значения коэффициентов, анализ подобных систем проводят методами, находящимися за пределами нашего курса.

В работе А. В. Калоева [9] приведен анализ работы таких систем при различных скоростях движения агрегата и различных значениях выноса копирующего устройства. Установлено, что система работает в режиме автоколебаний. Причем работа системы в режиме устойчивых автоколебаний возможна при значениях выноса копирующего устройства ~ 1 м и скоростях движения до 6 км/ч. При значениях выноса более 2 м устойчивые автоколебания системы

сохраняются при скоростях до 9 км/ч. При более высоких скоростях колебания становятся расходящимися и система теряет устойчивость.

Как уже отмечалось, использование систем автоматического вождения позволяет значительно увеличить производительность, повысить качество работы и улучшить условия труда механизаторов.

Исследования, проведенные ВИМом [7], показывают, что применение систем автоматического вождения машинно-тракторных агрегатов на гоне позволяет снизить приведенные затраты при выполнении основных технологических операций (лущении, пахоте, сплошной культивации и посеве) на 1,8% для тракторов типа МТЗ-8 и на 5,6% для тракторов типа К-700. При этом годовой экономический эффект на один агрегат в год составляет соответственно 21,2 р. и 185,1 р.

При расчетах стоимость системы автоматического вождения принималась равной 200...300 р. Несколько более значительный эффект может быть получен при применении автоматов вождения на поворотной полосе.

По данным УНИИМЭСХа, автоматическая система вождения кукурузоуборочного комбайна обеспечивает снижение потерь зерна в 1,3 раза и позволяет увеличить рабочую скорость до 15 км/ч.

В настоящее время в сельскохозяйственном производстве наиболее эффективно используются системы автоматического вождения таких уборочных сельскохозяйственных машин, как кукурузоуборочные комбайны, комбайны для уборки свеклы, капусты, то есть системы, использующие четкие естественные ориентиры поля. Остальные системы вождения пока находят ограниченное применение. Это объясняется, очевидно, применением не весьма эффективных алгоритмов управления, способов ориентации и несовершенством конструкции средств ориентации.

4.2.5. Системы автоматического регулирования загрузочных режимов машин и отдельных рабочих органов

Системы автоматического регулирования загрузочных режимов предназначены для поддержания требуемого уровня загрузки машин и отдельных рабочих органов технологическим материалом в соответствии с их пропускной способностью. Существующие системы управ-

ления загрузочными режимами можно разделить на две основные группы:

системы управления загрузочными режимами двигателей тракторов и сельскохозяйственных машин;

системы управления загрузочными режимами уборочных сельскохозяйственных машин.

Системы автоматического управления загрузочными режимами двигателей машин. Нагрузка машинно-тракторных агрегатов и самоходных сельскохозяйственных машин в процессе их работы непостоянна. Различные случайные

возмущения изменяют нагрузку в значительных пределах, причем эти изменения бывают достаточно резкими.

Изменение нагрузки влияет на работу двигателя. Для преодоления возросшей нагрузки необходимо увеличить мощность двигателя. При снижении нагрузки нужно уменьшить мощность, так как частота вращения коленчатого вала может настолько увеличиться, что приведет к аварии. При изменениях нагрузки необходимо поддерживать определенную оптимальную частоту вращения коленчатого вала двигателя, регулируя подачу топлива в цилиндры. Для этой цели применяют автоматические регуляторы.

Обычно на двигателях установлены механические все-режимные регуляторы прямого действия [3]. Чтобы улучшить качество работы двигателя, можно применить гидромеханический регулятор, использующий интегральный закон регулирования.

На рисунке 4.27 изображена принципиальная схема системы автоматического регулирования частоты вращения двигателя внутреннего сгорания. Система состоит из двигателя внутреннего сгорания 1, преобразователя скорости вращения 3, гидравлического золотникового усилителя 4, гидроцилиндра 5, рычажной системы 6 регулирующего органа, рейки топливного насоса 7 и рычага 2.

Работа системы автоматического поддержания частоты

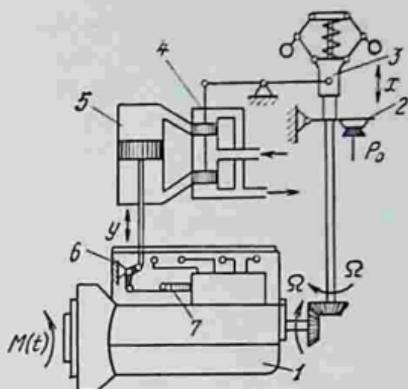


Рис. 4.27. Принципиальная схема системы автоматического регулирования частоты вращения двигателя внутреннего сгорания:

1 — двигатель внутреннего сгорания;
2 — задающее устройство; 3 — преобразователь вращения; 4 — золотниковый гидрораспределитель; 5 — гидроцилиндр;
6 — рычаг; 7 — рейка топливного насоса.

вращения двигателя происходит следующим образом. При изменении крутящего момента $M(t)$ на валу двигателя 1 и установившейся подаче топлива изменяется частота вращения двигателя. Это изменение через коническую шестеренчатую передачу вызывает изменение частоты вращения преобразователя 3, то есть скольжение его подвижной муфты. Перемещение муфты вызывает перемещение поршеньков золотникового гидрораспределителя 4. Под давлением рабочей жидкости перемещается поршень гидроцилиндра 5, который через рычажную передачу 6 изменяет положение рейки топливного насоса 7 или подачу топлива в цилиндры двигателя. При помощи рычага 2, который соединен системой тяг с ручным управлением подачей топлива, всережимному регулятору задают частоту вращения, которую необходимо поддерживать.

Ведутся работы по созданию более совершенных систем регулирования скоростных и нагрузочных режимов двигателей машинно-тракторных агрегатов, например электрогидравлической автоматической системы переключения передач [4].

Закон переключения передач такой системы определяется из условий поддержания максимальной производительности агрегата при обеспечении устойчивой работы двигателя на минимальном скоростном режиме и топливной экономичности.

Системы управления загрузочными режимами уборочных сельскохозяйственных машин. Основное условие эффективного использования уборочных машин — правильная загрузка его рабочих органов и двигателя. Загрузка рабочих органов уборочных машин определяется главным образом количеством перерабатываемой массы, поступающей в машину, и ее физико-механическими свойствами. Допустимое количество поступающей в машину массы при определенных физико-механических ее свойствах задается качеством выполняемого процесса уборки. Качество процесса характеризуется качеством и потерями выпускаемой продукции.

Принципы построения автоматических систем регулирования загрузочных режимов уборочных машин рассмотрим на примере зерноуборочного комбайна.

Агротехнические требования к процессу уборки зерновых культур определяют следующие условия:

потери зерна за жаткой допускаются не более 0,5% для прямостоящих хлебов и 1,5% для полеглых;

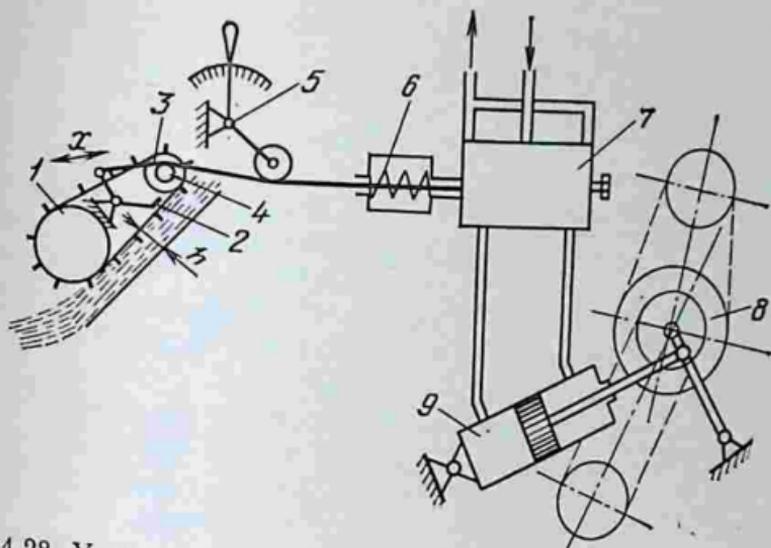


Рис. 4.28. Упрощенная принципиальная схема гидромеханического регулятора загрузки зерноуборочного комбайна:
 1 — транспортер; 2 — преобразователь; 3 — трос; 4 — направляющий ролик;
 5 — задающий рычаг; 6 — демпфирующее устройство; 7 — гидрораспределитель;
 8 — вариатор; 9 — гидроцилиндр.

потери зерна при подборе валков не должны превышать 1%;

общие потери зерна при прямом комбайнировании не должны превышать 1,5...2%;

чистота зерна в бункере должна быть не ниже 95...96%;

дробление зерна не должно превышать 2%.

Процесс уборки осуществляется современными зерноуборочными комбайнами типа СК-5 «Нива», СК-6 «Колос», СКД-5 «Сибиряк», «Дон» и т. д. Процесс уборки и переработки урожая в этих комбайнах примерно одинаков.

Качество уборки зависит от количества хлебной массы, подаваемой в молотилку комбайна в единицу времени, и физико-механических свойств этой массы. Количество подаваемой массы определяется урожайностью, скоростью передвижения агрегата и высотой среза. Физико-механические свойства хлебной массы определяются в первую очередь влажностью и затем соломистостью, засоренностью, степенью зрелости и т. д. Причем потери зерна возрастают с увеличением количества подаваемой массы, ее влажности, соломистости и засоренности. Для южных районов СССР основным изменяющимся параметром является урожайность зерновых, поэтому регуляторы строят по принципу определения толщины хлебной массы, подаваемой в молотилку.

На рисунке 4.28 показан автоматический регулятор загрузки зерноуборочного комбайна по толщине слоя хлебной массы под транспортером наклонной камеры.

Регулятор состоит из преобразователя толщины слоя хлебной массы 2, установленного на нижней ведущей ветви транспортера 1 наклонной камеры, который через направляющий ролик 4 при помощи тросика 3 соединен с золотниковым гидрораспределителем 7, пружинного компенсатора 6, гидроцилиндра 9, вариатора 8 и механизма 5 настройки регулятора на требуемую толщину хлебной массы.

Работа автоматического регулятора загрузки молотилки комбайна происходит следующим образом. При изменении подачи хлебной массы рычаг преобразователя поворачивается и посредством троса смещает плунжер золотникового гидрораспределителя. Масло из гидрораспределителя поступает в гидроцилиндр, и он своим штоком перемещает блок шкивов вариатора. При этом изменяется поступательная скорость перемещения зерноуборочного комбайна и соответственно изменяется подача хлебной массы в молотильный барабан. Для того чтобы автоматическая система не реагировала на кратковременные резкие колебания, вызванные вибрацией цепей транспортера и самоходного комбайна, случайными одноразовыми увеличениями подачи массы, преобразователь соединен с плунжером гидрораспределителя через компенсатор, который поглощает высокочастотные возмущения системы. При изменении физико-механических свойств хлебной массы, поступающей в молотилку, ее толщину регулируют вручную при помощи механизма настройки.

В зонах повышенного увлажнения изменение физико-механических свойств хлебной массы — определяющий фактор при загрузке молотильного барабана. В этих условиях применять рассмотренную выше систему неэффективно. Для учета изменения физико-механических свойств хлебной массы устанавливают преобразователь частоты вращения вала молотильного барабана или его крутящего момента. Однако работа системы только с преобразователями частоты вращения или крутящего момента также неэффективна из-за значительного транспортного запаздывания входного сигнала. Поэтому современные системы являются двухмерными, они вырабатывают управляющее воздействие в зависимости от двух сигналов: преобразователя толщины хлебной массы под транспортером наклонной камеры

или под шнеком жатки и преобразователя крутящего момента на валу молотильного барабана [4]. Причем управляющий сигнал на гидрораспределитель поступает от логического устройства, анализирующего сигналы от преобразователей.

Для сложных уборочных машин разрабатываются системы автоматического регулирования по нескольким параметрам (многомерные системы) [19]. Логическое устройство, которое вырабатывает управляющее воздействие на основе данных отдельных преобразователей, работает по принципу адаптивных (самонастраивающихся) систем [19]. Подобного рода автоматические системы загрузочных режимов создаются и для других видов уборочных машин, таких как кукурузоуборочный, картофелеуборочный, свеклоуборочный комбайны и др.

При построении автоматических систем используют те же принципы, что и при построении системы загрузки зерноуборочного комбайна. Кроме гидромеханической системы (рис. 4.28), применяются электрогидравлические, принцип работы которых был рассмотрен нами при изучении систем вождения машинно-тракторных агрегатов.

Эти системы отличаются между собой только воспринимающим элементом. Например, преобразователем системы загрузки картофелеуборочного комбайна грохотной модификации служат баллоны комкодавителя, измеряющие толщину слоя массы, поступающей на транспортер комкодавителя. Преобразователь картофелеуборочного комбайна элеваторного типа — приводной валик, который может перемещаться в вертикальной плоскости. Он измеряет толщину клубненосной массы на выходе сепаратора. Преобразователем силосоуборочного комбайна служит битерный барабан, положение которого по высоте изменяется пропорционально массе растений, подаваемой в комбайн.

Анализ работы автоматических систем загрузочных режимов уборочных машин проводят согласно принятой схеме, по которой анализировалась работа других автоматических систем. Рассмотрим порядок анализа автоматических систем загрузочных режимов на примере автоматической системы загрузки зерноуборочного комбайна (рис. 4.28). Объект управления системы — комбайн, его выходная величина — скорость движения v , которая пропорциональна толщине слоя хлебной массы h , подаваемой в молотильный барабан. Входная величина — перемещение штока гидроцилиндра y , изменяющего положение вариатора

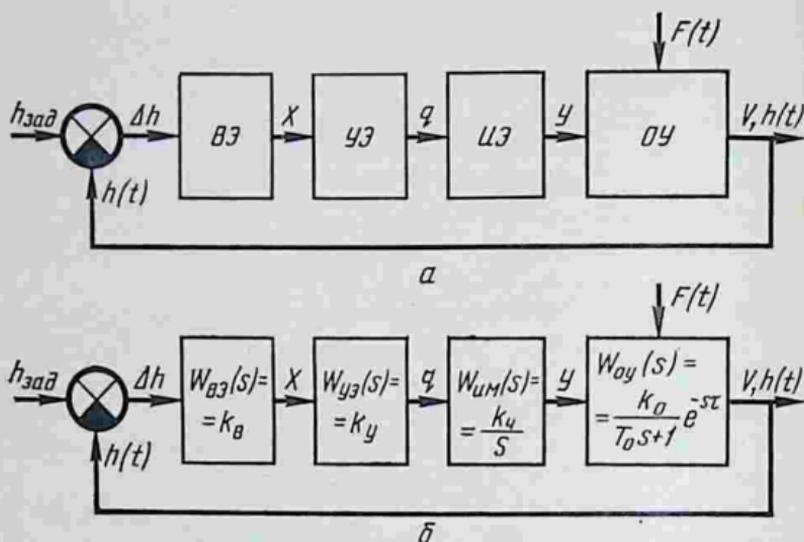


Рис. 4.29. Функциональная (а) и структурная (б) схемы регулирования загрузки зерноуборочного комбайна.

комбайна и скорость комбайна. Воспринимающий элемент системы — рычаг, изменяющий толщину слоя хлебной массы под ведущей лентой транспортера наклонной камеры. Толщина массы — входная величина преобразователя, а перемещение тросика x — выходная. Заданное положение тросика x_0 определяется задающим роликом. Относительно этого положения и определяется смещение тросика. Поэтому рычаг преобразователя и его положение составляют элемент сравнения системы. Гидроусилитель служит управляющим элементом, на вход которого подается перемещение тросика Δx , а выходом является поток масла q в ту или иную полость гидроцилиндра, пропорциональный степени перемещения плунжера гидроусилителя. Гидроцилиндр — это исполнительный механизм, входом которого является поток масла, а выходом — перемещение штока поршня y .

Функциональная схема автоматической системы приведена на рисунке 4.29, а.

Возмущающие воздействия объекта управления — неравномерность урожайности и засоренности поля.

Проанализируем динамические характеристики элементов автоматической системы.

Объект управления — зерноуборочный комбайн представляет собой сложную динамическую систему. Движение

ой системы подчинено различным физическим законам. Однако, принимая ряд допущений, комплекс можно считать инерционным звеном второго порядка с запаздыванием [11]

$$W_o(s) = \frac{k_o}{T_o^2 s^2 + T_o s + 1} e^{-\tau s} \quad (4.37)$$

где k_o — передаточный коэффициент объекта; T_o и T_o — постоянные времени; τ — время чистого запаздывания.

Как показывают эксперименты, значения T_o малы и составляют 0,03...0,1 с, поэтому в дальнейших расчетах мы не будем учитывать T_o . При этом передаточная функция объекта примет вид

$$W_o(s) = \frac{k_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s} \quad (4.38)$$

Воспринимающим элементом является рычажное устройство с пружиной, обладающее некоторой инерционностью, которой для практических расчетов можно пренебречь и считать устройство безынерционным:

$$W_{в.э}(s) = k_{в.э} \quad (4.39)$$

Гидроусилитель также можно считать безынерционным звеном, учитывая, что рабочий участок статической характеристики линеен:

$$W_{г.э}(s) = k_{г.э} \quad (4.40)$$

Исполнительный механизм (гидроцилиндр) — интегрирующее звено

$$W_{и.м}(s) = k_{и.м}/s \quad (4.41)$$

Структурная схема автоматической системы представлена на рисунке 4.29, б.

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{раз}(s) = \frac{k_{раз} e^{-\tau s}}{s(T_o s + 1)} \quad (4.42)$$

где $k_{раз} = k_{и.м} k_{г.э} k_{в.э}$

Передаточная функция замкнутой автоматической системы

$$W_{зам}(s) = \frac{k_{зам} e^{-\tau s}}{T_o s^2 + s + k_{зам}} \quad (4.43)$$

Оценку устойчивости систем с запаздыванием следует проводить по критерию Найквиста. Для расчетов подставим значения коэффициентов и параметров характе-

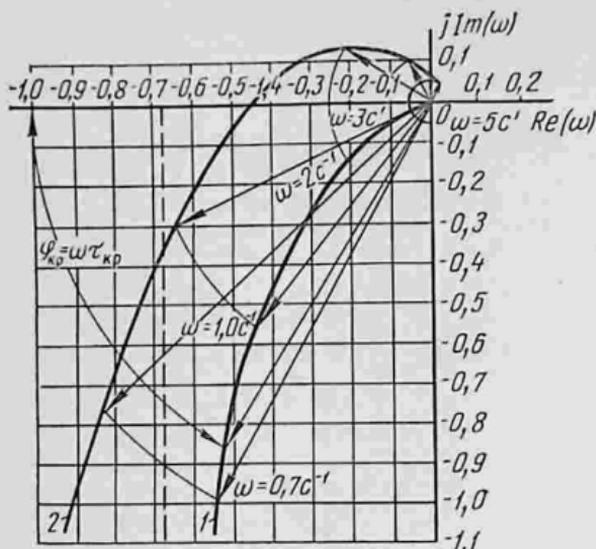


Рис. 4.30. Амплитудно-фазочастотная характеристика системы регулирования загрузки зерноуборочного комбайна.

ристик [19] в (4.43)

$$\tau = 0,5 \text{ с}, \quad k_0 = 0,9, \quad T_0 = 0,15.$$

Тогда амплитудно-фазочастотная характеристика системы запишется так:

$$W_{\text{раз}}(j\omega) = \frac{0,9}{-0,15\omega^2 + j\omega} e^{-0,5j\omega}, \quad (4.44)$$

или

$$W_{\text{раз}}(j\omega) = \left(\frac{-0,68}{0,56\omega^2 + 1} - j \frac{0,9}{0,56\omega^3 + \omega} \right) e^{-0,5j\omega}. \quad (4.45)$$

Вычислим параметры характеристики без учета запаздывания, изменяя ω от 0 до ∞ . Данные расчетов заносим в таблицу 4.4.

По данным таблицы строим амплитудно-фазочастотную характеристику без учета чистого запаздывания (рис. 4.30, кривая 1). Затем в каждой точке кривой поворачиваем вектор на угол $\omega\tau$. Соединяем точки и получаем годограф Найквиста системы регулирования загрузки зерноуборочного комбайна (рис. 4.30, кривая 2).

Так как разомкнутая система находится на границе устойчивости и годограф Найквиста не обходит точку

4.4. Расчетные данные частотной характеристики

ω	$Re(\omega)$	$Im(\omega)$	ω	$Re(\omega)$	$Im(\omega)$
0	-0,680	$-\infty$	3	-0,112	-0,056
1	-0,435	-0,576	5	-0,045	-0,012
0,7	-0,530	-1,000	10	-0,001	-0,001
2	-0,210	-0,139	∞	0	0

с координатами $(-1, j0)$, то замкнутая система будет устойчива.

Время чистого запаздывания зависит от места расположения преобразователя. Чем дальше стоит преобразователь от места поступления хлебной массы в комбайн, тем больше время чистого запаздывания. Так, время запаздывания преобразователя, расположенного в наклонной камере, меньше, чем у датчика, фиксирующего состояние молотильного барабана. На рисунке 4.30 показано, как определить значение $\tau_{кр}$ — времени запаздывания, при котором система теряет устойчивость. $\varphi_{кр} = 61^\circ = 1,27$ рад. В точке, которая является пересечением кривой I с окружностью единичного радиуса, $\omega \approx 0,8 \text{ с}^{-1}$, откуда $\tau_{кр} = 1,27/0,8 = 1,59$ с. Таким образом, если преобразователь установлен на таком расстоянии, что время хода массы по элементам комбайна до преобразователя превышает 1,59 с, система регулирования загрузочных режимов не будет работоспособной.

Рассмотренные локальные системы регулирования загрузочных режимов двигателей, сельскохозяйственных уборочных машин и их рабочих органов находят применение в сельскохозяйственном производстве. В первую очередь это относится к системам регулирования загрузки работы двигателя. Системы загрузки уборочных машин пока используются ограниченно. В основном автоматизация загрузочных режимов машин осуществляется за счет систем контроля работы отдельных узлов уборочных машин. Часто при оснащении такими системами уборочных машин эффективность их использования незначительна. Это объясняется несовершенством алгоритма функционирования таких систем.

В последнее время развиваются методы проектирования адаптивных автоматических систем с алгоритмом оптимального функционирования уборочных машин. В этом

случае управляющее воздействие выбирают на основе анализа загрузки всех узлов уборочной машины и оптимизации функции выхода. Функция выхода определяется усредненными показателями производительности комбайна и потерь. С увеличением производительности потери увеличиваются. Управление вырабатывается таким образом, чтобы функция выхода была наибольшей.

Применение на самоходных комбайнах адаптивных многомерных автоматических систем поддержания оптимальной загрузки, по данным УНИИМЭСХа, позволило повысить пропускную способность до 90...95% ее максимального значения при сохранении качества технологического процесса в пределах, допустимых агротребованиями. Достигаемое при этом повышение производительности зависит от условий работы, изменчивости урожайности и физико-механических свойств убираемой культуры. При коэффициенте вариации параметров физико-механических свойств фракций убираемого урожая, превышающем 15%, применение адаптивных автоматических систем повышает производительность на 20%.

Глава 5. ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

5.1. НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

5.1.1. Основные понятия и определения

Современные средства автоматики и измерительной техники характеризуются постоянным повышением их технической и функциональной сложности, а также возрастанием важности решаемых функциональных задач. Усложнение технических средств автоматики обусловлено необходимостью повышения гарантии своевременности и правильности решения задач, определенных алгоритмом функционирования систем. В то же время повышение сложности технических средств автоматики (в первую очередь рост числа комплектующих элементов) приводит к снижению надежности этих средств в процессе эксплуатации.

В соответствии с ГОСТ 13377—75 «Надежность в технике. Термины и определения» под надежностью понимается свойство изделия (элемента, прибора, устройства, системы) выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в строго нормированных пределах при заданных режимах и условиях эксплуатации в течение требуемого промежутка времени.

Надежность — одна из важнейших качественных характеристик изделия (объекта эксплуатации). Она характеризуется такими основными показателями, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Безотказность — это свойство объекта эксплуатации непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени при определенных режимах и условиях работы.

При этом под *работоспособностью* понимается состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией (ГОСТ, ТУ и т. п.). Наряду с понятием «работоспособность» в технике используется понятие «исправное состояние», то

есть состояние объекта, при котором он соответствует *всем* требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Если в данный момент времени объект не соответствует хотя бы одному из этих требований, то он находится в неисправном состоянии. Следует подчеркнуть, что неисправность объекта еще не означает, что он не в состоянии выполнять заданные функции (например, повреждение защитного покрытия кожуха магнитного пускателя — это неисправность, но она не нарушает работоспособность пускателя). *Неработоспособным* называется такое состояние объекта, при котором хотя бы *один из заданных* параметров, определяющих способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, называется *отказом*. Под отказом следует понимать не только полную потерю работоспособности, но и ухудшение работоспособности вследствие ухода заданных параметров за пределы эксплуатационных допусков (например, обрыв одной из обмоток электродвигателя — полная потеря работоспособности, снижение сопротивления изоляции обмоток электродвигателя до $R_{из} \leq 0,5 \text{ МОм}$ вследствие увлажнения — это еще не отказ, а частичная потеря работоспособности, которая может быть восстановлена). Окончание эксплуатации объекта или вынужденный вывод его в ремонт определяется предельным состоянием объекта или его элементов (узлов), то есть состоянием, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований техники безопасности, или неустранимого отклонения заданных параметров за пределы эксплуатационных допусков, или неустранимого снижения эффективности использования объекта по назначению.

По характеру изменения заданного (основного) параметра до момента возникновения отказа отказы подразделяются на внезапные и постепенные. *Внезапным* называют отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта («перегорание» плавкой вставки предохранителя вследствие возникновения в цепи короткого замыкания). *Постепенным* называют отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта (возникновение межвиткового замыкания в обмотке электродвигателя вследствие теплового старения изоляции).

Время нормального функционирования объекта ограничено неизбежными необратимыми процессами, происходящими в его элементах и узлах при эксплуатации и хранении. Эти необратимые процессы зависят от свойств элементов (узлов) и материалов, из которых они изготовлены. Вследствие этого период нормального функционирования объекта определяется его долговечностью.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. В отличие от безотказности, где главную роль играет непрерывность сохранения работоспособности, долговечность, как качественное свойство объекта, связана с сохранением работоспособности до заданного предела с необходимыми перерывами на ремонт. При этом под ремонтом понимают организацию и технологию производства работ по восстановлению работоспособности и технического ресурса объекта (элемента, прибора и т. п.).

Ремонтопригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость — способность объектов сохранять при определенных условиях свои заданные эксплуатационные свойства. Это особенно важно для объектов с длительными сроками хранения (комбайны, зерноочистительные комплексы и т. п.). В общем случае для оборудования, используемого сезонно, сохраняемость можно рассматривать как специфический случай его безотказности на этапе хранения.

5.1.2. Количественные характеристики надежности

Современные средства и системы автоматизации — это восстанавливаемые объекты, в состав которых входят как восстанавливаемые, так и невосстанавливаемые элементы (например, реле — восстанавливаемый элемент, транзистор — невосстанавливаемый элемент). В связи с этим надежность технических средств и систем автоматизации определяется в первую очередь надежностью комплектующих элементов и схемой их соединения. При этом следует отметить, что соединение элементов с точки зрения надежности, как правило, не соответствует их электрической

схеме соединения, так как оно осуществляется прежде всего с учетом влияния каждого элемента на работоспособность всего аппарата (прибора, системы). Различают следующие соединения элементов: последовательное, параллельное и смешанное.

Последовательное соединение элементов — наиболее распространенный способ соединения с точки зрения надежности. При этом отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу в работе всего аппарата (системы, объекта).

Параллельным называют такое соединение, при котором отказ объекта наступает только в том случае, если произойдет отказ как основного, так и резервного элемента. При введении резервирования по тому или иному элементу или каналу управления резервный элемент включают параллельно основному.

Смешанным называют сочетание последовательного и параллельного соединения элементов и средств автоматики.

Для количественной оценки надежности объекта используют определенные специальные критерии — показатели надежности.

При оценке надежности технических средств и систем автоматики наиболее часто используют следующие количественные критерии:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$ или параметр потока отказов $\Omega(t)$;
- наработка на отказ T_0 ;
- среднее время восстановления τ ;
- коэффициент готовности k_r .

Вероятность безотказной работы является основным количественным критерием надежности технических средств автоматики.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется как вероятность того, что отказ устройства (прибора, элемента) в течение времени t не наступит.

Величина, обратная вероятности безотказной работы, называется вероятностью появления отказа $Q(t)$. Как известно из теории вероятностей, сумма вероятностей противоположных событий (безотказной работы и отказа) равна единице:

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (5.1)$$

При этом функция надежности $P(t)$ обладает следующими очевидными свойствами:

$P(t)$ — функция, монотонно убывающая; при $t=0$ функция $P(t)=1$; при $t \rightarrow \infty$ функция $P(t \rightarrow \infty)$ стремится к нулю. Функция ненадежности $Q(t)$, наоборот, будет монотонно возрастающей и при $t \rightarrow \infty$ будет стремиться к единице.

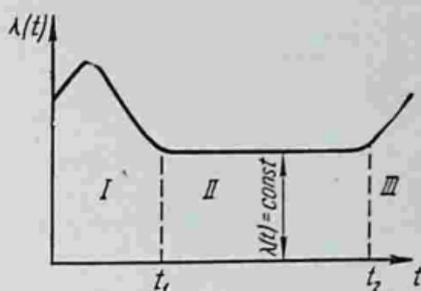


Рис. 5.1. График изменения интенсивности отказов во времени.

Приближенно вероятность безотказной работы устройств, находящихся в эксплуатации, можно определить экспериментальным путем:

$$P(t) \approx \frac{N_0 - n(t)}{N_{\text{ср}}}, \quad (5.2)$$

где N_0 — число устройств, исправно работающих в начальный момент эксплуатации; $n(t)$ — число устройств, отказавших за время эксплуатации (например, в течение года); $N_{\text{ср}}$ — среднее число исправно работающих устройств за время t :

$$N_{\text{ср}} = \frac{N_0 + [N_0 - n(t)]}{2}.$$

Для технических средств автоматики с известной степенью допущения можно считать, что на этапе нормальной эксплуатации функция $P(t)$ носит экспоненциальный характер:

$$P(t) = e^{-\lambda(t)t}, \quad (5.3)$$

где $\lambda(t)$ — интенсивность отказов устройства.

В большинстве случаев график $\lambda(t)$ имеет вид, близкий к кривой на рисунке 5.1. На этой кривой изменения интенсивности отказов в функции времени эксплуатации можно выделить три участка:

I) участок приработки (он характеризуется снижением интенсивности отказов после «выжигания» дефектных узлов и деталей);

II) участок нормальной эксплуатации (он характеризуется стабилизацией интенсивности отказов);

III) участок, начинающийся при $t \geq t_2$, характеризуется резким ростом интенсивности отказов из-за старения и износа комплектующих элементов (обычно при этом с экономической точки зрения следует прекращать эксплуатацию).

В связи с этим интенсивность отказов $\lambda(t)$ можно рассматривать как условную плотность вероятности возникновения отказа устройства, которая определяется для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не наступил.

Приближенно интенсивность отказов можно определить экспериментальным путем как отношение числа отказавших устройств (элементов) $n(t)$ за некоторый промежуток времени Δt к числу работоспособных в начале этого промежутка $N(t)$:

$$\lambda(t) \approx \frac{n(t)}{N(t) \Delta t}. \quad (5.4)$$

Для восстанавливаемых объектов (технических устройств, систем) характерно чередование работоспособного состояния и восстановления после отказа (или достижения предельного состояния одним из комплектующих элементов), то есть процесс эксплуатации можно представить как последовательное чередование интервалов времени работоспособного и неработоспособного состояния. Появление отказов в каждом из N элементов объекта (системы) можно рассматривать как поток требований для восстановления. Математическое ожидание числа отказов за время t рассматриваемого потока может быть определено из выражения

$$M(t) = \lim \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t), \quad (5.5)$$

где $m_i(t)$ — число отказов i -го элемента за время t .

В сложной системе автоматического управления поток отказов обычно равен сумме потоков отказов отдельных устройств.

Для восстанавливаемых объектов важным показателем надежности является наработка на отказ или среднее время безотказной работы. **Нарботка на отказ** T_0 представляет собой математическое ожидание времени безотказной работы устройства до первого отказа (или между отказами):

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5.6)$$

Величину T_0 можно определить по результатам подконтрольной эксплуатации как среднее значение времени

работы устройства между отказами:

$$T_o \approx \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1} + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (5.7)$$

где t_i — время работы, устройства между $i-1$ и i -м отказами.

На этапе нормальной эксплуатации можно принять, что $\lambda(t) = \text{const}$. Тогда наработка на отказ может быть с достаточной достоверностью определена как

$$T_o = 1/\lambda(t). \quad (5.8)$$

Существенным показателем надежности объекта, характеризующим его ремонтпригодность, является среднее время восстановления τ_{cp} , которое представляет собой математическое ожидание времени восстановления работоспособности объекта:

$$\tau_{cp} = 1/\mu(t), \quad (5.9)$$

где $\mu(t)$ — вероятность восстановления работоспособности устройства в единицу времени при условии, что до этого времени восстановление не произошло.

Среднее время восстановления (или ремонта) — это время нерегламентированного простоя, необходимого для отыскания и устранения отказа устройства. Оно может быть определено экспериментальным путем

$$\tau_{cp} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{n-1} + \tau_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n}, \quad (5.10)$$

где τ_i — время отыскания и устранения i -го отказа.

В ряде случаев для оценки эксплуатационной надежности технических устройств удобно использовать так называемые комплексные показатели надежности, в частности коэффициент готовности.

Коэффициент готовности K_r — это вероятность того, что объект (устройство) окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается. Коэффициент готовности обычно определяют по данным эксплуатации как отношение суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии ко всему времени эксплуатации:

$$K_r = T_o / (T_o + \tau_{cp}). \quad (5.11)$$

5.1.3. Методы расчета надежности

Сущность расчета надежности системы сводится к определению основного показателя надежности системы по известным показателям надежности ее комплектующих элементов. При рассмотрении, например, методов расчета безотказности системы (устройства) обычно исходят из предположения, что никаких предварительных мер по ее повышению не было принято и при создании системы использованы типовые элементы (узлы), которые с точки зрения надежности соединены между собой последовательно.

Считая первичные отказы элементов системы событиями независимыми, для определения вероятности ее безотказной работы можно воспользоваться теоремой умножения вероятностей, на основании которой

$$P_c(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (5.12)$$

где $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента автоматики ($i=1, 2, 3, \dots, n$).

С учетом выражения (5.3) можно записать

$$P_c(t) = P e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt}, \quad (5.13)$$

где $\lambda_{\Sigma}(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$ — суммарная интенсивность отказов системы (устройства).

Современные технические устройства (системы) включают в себя по несколько групп однотипных элементов с примерно одинаковыми показателями безотказности. В связи с этим для сложных электронных устройств целесообразно определять интенсивность отказов по каждой из групп элементов

$$\lambda_{\Sigma}(t) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^l n_i \lambda_i(t), \quad (5.14)$$

где k — число групп элементов; l — число элементов в группе.

Тогда с учетом этого выражения для экспоненциального закона распределения вероятность безотказной работы

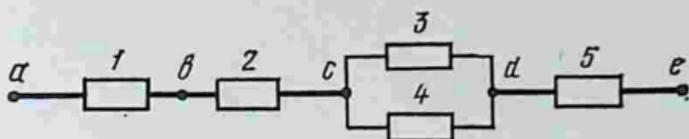


Рис. 5.2. Расчетно-структурная схема соединения элементов.

системы на участке нормальной эксплуатации можно представить в виде

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma}(t)t} = e^{-t/T_0}, \quad (5.15)$$

где $T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}(t)}$ — средняя наработка на отказ.

Из этого выражения следует, что вероятность безотказной работы системы будет тем ниже, чем больше элементов входит в ее состав (большие значения n и k). Вероятность безотказной работы системы всегда будет ниже вероятности безотказной работы самого ненадежного элемента [так как $P_i(t)$ всегда меньше единицы].

Расчет показателей надежности системы (устройства) начинается с составления структурно-логической схемы. При составлении структурно-логической схемы расчета надежности должны быть учтены лишь те элементы, которые участвуют в выполнении системой (устройством) заданных функций и отказ которых приводит к отказу системы (устройства). В расчетной схеме все основные элементы соединяются последовательно. Параллельно основным могут изображаться лишь элементы резервирования.

Определим вероятность безотказной работы системы, структурно-логическая схема которой показана на рисунке 5.2. Устройства 1, 2 и 5 соединены последовательно, а устройства 3 и 4 взаимно резервируются, то есть включены между собой параллельно. Из условия параллельного соединения следует, что отказ на участке cd и всей системы наступит в случае одновременного отказа устройств 3 и 4, то есть

$$Q_{cd}(t) = Q_3(t) Q_4(t); \quad (5.16)$$

$$Q_{cd}(t) = [1 - P_3(t)][1 - P_4(t)]. \quad (5.17)$$

Отсюда вероятность обеспечения безотказной работы на участке

$$P_{cd} = 1 - Q_{cd}(t) = 1 - [1 - P_3(t)][1 - P_4(t)]. \quad (5.18)$$

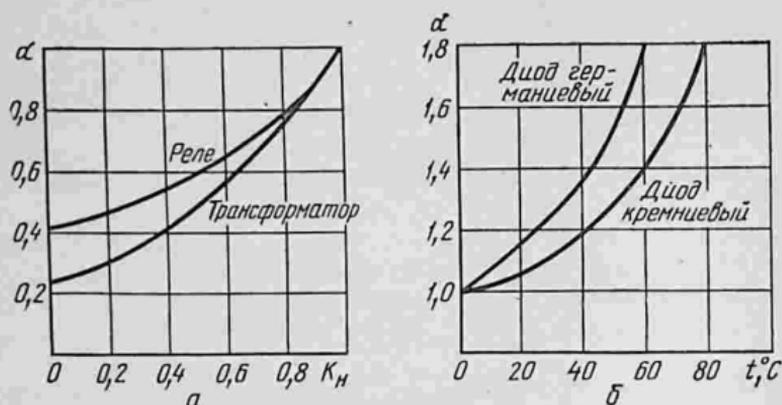


Рис. 5.3. Зависимость коэффициента интенсивности отказов элементов автоматики от нагрузки (а) и температуры (б).

Тогда для всей системы с учетом выражения (5.12) вероятность безотказной работы будет

$$P_c(t) = P_1(t) P_2(t) \{1 - [1 - P_3(t)] [1 - P_4(t)] P_5(t)\}. \quad (5.19)$$

Вероятность безотказной работы каждого из входящих в систему устройств можно определить, используя один из методов расчета надежности: по справочным или статистическим данным. В зависимости от полноты данных применяют приближенный или полный метод расчета. В практике наиболее часто используют аналитический метод расчета по интенсивности отказов. Этот метод позволяет достаточно полно оценить безотказность проектируемых систем (технических устройств).

В качестве исходных данных при использовании метода расчета по интенсивности отказов используют принципиальную схему системы (устройства), сведения о числе групп и типах комплектующих элементов и интенсивности их отказов. По справочным данным для всех используемых элементов находят максимальные и минимальные (или средние) значения интенсивностей отказов $\lambda_{oi \max}(t)$; $\lambda_{oi \min}(t)$; $\lambda_{oi \text{ ср}}(t)$. Если возможно, то учитывают режимы нагрузки элементов и степень влияния их на интенсивность отказов элементов:

$$\lambda_i(t) = \alpha \lambda_{oi}(t), \quad (5.20)$$

где α — коэффициент интенсивности отказов, который представляет собой функцию нагрузки и параметров температуры (рис. 5.3.).

Затем определяют общую интенсивность отказов систе-

мы (устройства):

$$\lambda \Sigma(t) = a \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i(t), \quad (5.21)$$

где a — эксплуатационный коэффициент, учитывающий условия работы системы.

Условия эксплуатации	Коэффициент эксплуатации a
Лабораторные	1
Производственные:	
а) на стационарных агрегатах . . .	10
б) на мобильных агрегатах	40

Используя это выражение, определяют вероятность безотказной работы системы $P_c(t)$ и среднее время наработки на отказ T_o (расчет обычно ведут для минимальных и максимальных значений интенсивности отказов). При этом часто ставится дополнительная задача по определению доверительных интервалов, в которых находится среднее значение времени наработки на отказ. Для экспоненциального закона распределения случайного времени до наступления отказа среднее значение времени наработки на отказ будет находиться в пределах

$$\frac{2t_n}{\epsilon_{\beta_1}^2(2n)} \leq T_o \leq \frac{2t_n}{\epsilon_{\beta_2}^2(2n)}, \quad (5.22)$$

где t_n — суммарное время, накопленное до отказов всеми испытуемыми (подконтрольными) устройствами; n — число отказов за определенный промежуток времени; $\epsilon_{\beta_1}^2(2n)$ и $\epsilon_{\beta_2}^2(2n)$ — функция, определяемая по таблице значений $2n$ и β (нижний предел $\beta_1 = \alpha/2$; верхний предел $\beta_2 = 1 - \alpha/2$).

Пример 5.1. Необходимо определить среднее время наработки на отказ (среднее время безотказной работы) для однотипных технических средств автоматки (ТСА), для каждого из которых известно время наработки до первого отказа (табл. 5.1).

5.1. Время наработки до первого отказа ТСА

Номер образца ТСА	Наработка T_{oi}^* , ч	Номер образца ТСА	Наработка T_{oi}^* , ч	Номер образца ТСА	Наработка T_{oi}^* , ч
1	800	6	880	11	930
2	830	7	940	12	870
3	860	8	900	13	850
4	920	9	840	14	820
5	890	10	810	15	910

5.2. Значение функции $\varepsilon_{\beta}^2(2n)$ для определения доверительных границ (при условии экспоненциального распределения времени безотказной работы)

2n	ε_{β}^2 при β				
	0,95	0,90	0,80	0,10	0,05
2	0,103	0,211	0,446	4,6	6,0
4	0,71	1,06	1,65	7,8	9,5
6	1,63	2,20	3,07	10,6	12,6
8	2,73	3,49	4,59	11,0	13,4
10	3,94	4,86	6,18	16,0	18,3
20	10,9	12,4	14,6	28,4	31,4
30	18,5	20,6	23,4	40,3	43,8

Среднестатистическое значение средней наработки на отказ будет

$$T_o^* = \sum_{i=1}^{15} T_{oi}^*/n = 13\ 050/15 = 870 \text{ ч.}$$

Для определения доверительного интервала, в котором находится T_o , задаемся доверительной вероятностью 0,9. Тогда $\alpha=0,1$ и соответственно $\beta_1=0,05$ и $\beta_2=0,95$. По таблице 5.2 находим

$$\varepsilon_{\beta_1}^2(2n) = \varepsilon_{0,05}^2(30) = 43,8;$$

$$\varepsilon_{\beta_2}^2(2n) = \varepsilon_{0,95}^2(30) = 18,5.$$

Таким образом, нижний предел среднего значения наработки на отказ будет

$$\frac{2t_n}{\varepsilon_{\beta_1}^2(2n)} = \frac{2 \cdot 13\ 050}{43,8} = 595,9 \text{ ч}$$

и верхний предел

$$\frac{2t_n}{\varepsilon_{\beta_2}^2(2n)} = \frac{2 \cdot 13\ 050}{18,5} = 1410,8 \text{ ч.}$$

Следовательно, с вероятностью 0,9 истинное значение средней наработки на отказ будет находиться в пределах $595,9 \leq T_o^* \leq 1410,8$.

В процессе производства и эксплуатации на средства и системы автоматического управления воздействует множество различных факторов, влияющих на их надежность. При этом все факторы можно разделить на две группы: объективные и субъективные. К группе объективных обычно относятся эксплуатационные факторы, определяющие режим и условия эксплуатации. К группе субъективных относятся факторы, определяющие неправильные решения разработчиков, нарушение технологии производства и пра-

вил технической эксплуатации средств и систем автоматики. Изменение этих факторов и их сочетания во времени могут быть весьма разнообразны и по-разному проявлять свое влияние на показатели надежности технических устройств на различных этапах их разработки, производства и эксплуатации. В связи с этим пути повышения надежности в первую очередь должны учитывать характер возможных проявлений различных факторов и эффективность мероприятий, направленных на повышение надежности. Однако следует помнить, что в реальных условиях разработки и производства не всегда удается учесть все факторы. Доля отказов технических устройств вследствие недостатков проектирования составляет примерно 35...40%, а вследствие нарушения технологии производства около 25...30%. 30...40% отказов происходит в процессе эксплуатации обычно вследствие ошибок эксплуатационного персонала и нарушения условий эксплуатации.

При разработке принципиальных схем технических устройств предпочтение обычно отдается наиболее простым схемам с ограниченным числом элементов. Если изделие состоит, например, из четырех последовательно соединенных элементов с вероятностью безотказной работы каждого из них 0,95, то вероятность безотказной работы изделия будет уже $0,95^4 \approx 0,744$. Если таких элементов будет восемь, то вероятность безотказной работы составит $0,95^8 \approx 0,553$.

В проектируемых устройствах необходимо стремиться использовать элементы повышенной надежности, которые в общем случае соответствовали бы требованиям к надежности самих технических устройств.

Важную роль в повышении надежности играет правильный выбор режимов работы элементов в схеме проектируемого устройства. Обычно рекомендуется электрические нагрузки элементов в современных технических устройствах ограничивать в пределах от 25 до 50% номинальных.

Среди методов повышения надежности, которые предусматриваются при проектировании сложных, с повышенной ответственностью систем и технических средств автоматики, особое место занимает метод избыточности, или резервирования. Сущность его заключается во введении в схему дополнительных (резервных) элементов, включенных обычно параллельно основным. Особенность же метода состоит в возможности создания технических устройств требуемого уровня надежности при использовании элементов с ограниченным уровнем безотказности. Если в устройстве (рис. 5.2)

элемент 3 резервирован элементом 4, то вероятность безотказной работы достигает 0,817, то есть увеличивается по сравнению со схемой без резервирования. Однако следует помнить, что резервирование связано с увеличением габаритов, массы и стоимости разрабатываемых технических устройств.

К эксплуатационным методам повышения надежности относятся:

- совершенствование системы технической эксплуатации;
- повышение квалификации технического персонала;
- контроль технического состояния устройств (систем) автоматизации (техническая диагностика);
- сокращение нормативов времени при отыскании и устранении отказов.

Совершенствование системы технической эксплуатации предусматривает внедрение такой организации технического обслуживания и ремонта, которая при минимальных затратах трудовых и материальных ресурсов обеспечила бы оптимальное значение коэффициента готовности технических устройств (систем). При этом взаимно увязываются вопросы подготовки технического персонала, планирование эксплуатационно-профилактических мероприятий, обеспечение технических средств автоматического контроля и диагностики, наличие запасных узлов и элементов и т. п. Особое место на современном этапе развития сельскохозяйственного производства отводится повышению квалификации обслуживающего персонала и внедрению автоматического контроля за состоянием САУ в процессе эксплуатации.

Эффективность эксплуатационных методов повышения надежности технических устройств автоматизации по сравнению с ранее рассмотренными методами повышения надежности на стадиях их проектирования и производства существенно ниже. Это обусловлено значительными эксплуатационными издержками при эксплуатации систем с низким уровнем надежности. Достаточно заметить, что стоимость эксплуатации современных автоматизированных комплексов оборудования более чем в 10 раз превосходит их первоначальную стоимость.

Основной решающий фактор, определяющий значение эксплуатационных издержек при эксплуатации САУ, — ее надежность (чем выше вероятность безотказной работы, тем меньше расходы на ремонт и техническое обслуживание, тем меньше затраты на повышение надежности). Повышение надежности и долговечности технических устройств и сис-

тем — очень трудная и сложная задача, и ее решают обычно на всех этапах разработки, производства и эксплуатации и в зависимости от конкретных условий используют те или иные мероприятия повышения надежности. При этом следует помнить, что, согласно ГОСТ 19348—74 «Изделия электротехнические сельскохозяйственного назначения. Общие технические условия», все технические устройства должны иметь расчетное значение вероятности безотказной работы не ниже 0,9 при доверительной вероятности 0,8.

5.2: ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Автоматизация сельскохозяйственного производства открывает новые возможности для облегчения и оздоровления условий работы человека, повышения производительности труда, увеличения выпуска продукции и повышения ее качества. Однако полностью автоматизировать можно только те технологические процессы, в которых исключен ручной труд. Следовательно, первое и основное требование к автоматизированному процессу — его механизация как по основным, так и по вспомогательным операциям. Но далеко не каждый, даже полностью механизированный процесс поддается автоматизации. Более того, отдельные простейшие технологические операции в сельском хозяйстве не могут быть автоматизированы без коренной перестройки технологического процесса. Поэтому автоматизацию технологических процессов нельзя рассматривать как надстройку над базисом (технологией). Автоматизация — это неотъемлемая часть управляемого технологического процесса, обеспечивающая повышение его эффективности.

Под эффективностью системы автоматизации принято понимать ее приспособленность к выполнению задачи, определенной алгоритмом функционирования. Судить об эффективности системы можно только по определенным количественным критериям, которые называются показателями эффективности. Показатели эффективности могут быть как технические, так и экономические. В качестве технических показателей обычно используются вероятность безотказной работы или математическое ожидание времени безотказной работы. Для осуществления автоматизации производственно-технологических процессов обычно требуются

дополнительные капитальные затраты на определенных этапах проектирования, монтажа и эксплуатации систем автоматизации. В результате внедрения автоматизации обычно снижаются издержки производства на единицу продукции и повышается производительность труда. В связи с этим в качестве экономических показателей эффективности рекомендуется использовать срок окупаемости первоначальных капитальных затрат, коэффициент относительной рентабельности капиталовложений в автоматизацию, процент снижения уровня себестоимости единицы продукции и процент снижения удельных капитальных затрат на единицу продукции. В связи с тем что при внедрении систем автоматизации могут быть использованы различные варианты и оценочные критерии, возникает необходимость оценить сопоставимость вариантов. Для этих целей обычно используют методику оценки эффективности по приведенным затратам.

Срок окупаемости первоначальных капитальных затрат $T_{ок}$ — важнейший обобщающий показатель экономической эффективности автоматизации производства

$$T_{ок} = \frac{K_a - K}{(C_{1a} - C_1) N_a Z_{1a} - (C_1 - C_1) N Z_1}, \quad (5.23)$$

где K_a и K — соответственно первоначальные капитальные вложения в автоматизированный и неавтоматизированный процесс; C_{1a} и C_1 — себестоимость единицы произведенной продукции, р.; C_{1a} и C_1 — закупочная (реализационная) цена единицы продукции, р.; N_a и N — численность производственных рабочих, чел.; Z_{1a} и Z_1 — готовая выработка продукции на одного рабочего, р.

Если в результате автоматизации повышается качество продукции, то $C_{1a} > C_1$, если же качество остается на первоначальном уровне, то $C_{1a} = C_1$. При этом годовой объем производства продукции после автоматизации на одного рабочего обычно может быть больше, чем при неавтоматизированном производстве. При сохранении постоянного объема производства продукции автоматизация будет обеспечивать повышение производительности труда

$$\Delta P_{гр} = \frac{Z_{1a} - Z_1}{Z_1} 100\%; \quad (5.24)$$

$$\Delta P_{гр} = \frac{N - N_a}{N_a} 100\%, \quad (5.25)$$

где $\Delta P_{гр}$ — повышение производительности труда, %.

Аналогично определится снижение затрат труда:

$$\Delta T_{\text{тр}} = \frac{1/Z_1 - 1/(Z_1 a)}{1/Z_1} = [(Z_{1a} - Z_1)/Z_{1a}] \cdot 100\%; \quad (5.26)$$

$$\Delta T_{\text{тр}} = [(T_{\text{тр}} - T_{\text{тр}(a)})/T_{\text{тр}}] \cdot 100\%, \quad (5.27)$$

где $T_{\text{тр}}$ и $T_{\text{тр}(a)}$ — соответственно затраты труда на единицу продукции до автоматизации и после, ч.

Другой важный обобщающий показатель эффективности — рентабельность производства, которая характеризует уровень доходности (относительную величину чистого дохода)

$$P = [(C - C)/C] \cdot 100\%, \quad (5.28)$$

где C — оптовая цена всей произведенной продукции, р.; C — себестоимость произведенной продукции, р.

Вследствие автоматизации производства появляется дополнительная рентабельность

$$\Delta P = [(C - C_a)/C] \cdot 100\%, \quad (5.29)$$

где C и C_a — соответственно себестоимость продукции до автоматизации и после, р.

При автоматизации производственных технологических процессов обычно численность рабочих снижается, а уровень средней заработной платы рабочего повышается, так как требуются рабочие более высокой квалификации. Из-за этого темп снижения себестоимости продукции (связанного с повышением производительности труда) при внедрении автоматизации отстает от темпа повышения производительности труда. Это снижение себестоимости можно определить, пользуясь выражением

$$\Delta C^* = [(\Delta P_{\text{тр}} - \Delta Z)/(100 + \Delta P_{\text{тр}})] \gamma_z, \quad (5.30)$$

где ΔZ — процент повышения уровня средней зарплаты рабочего (обычно $\Delta P_{\text{тр}} > \Delta Z$), %; γ_z — удельный вес зарплаты в себестоимости произведенной продукции до внедрения автоматизации.

Иногда в качестве показателя экономической эффективности используют так называемый коэффициент дополнительных капитальных вложений (часто его называют коэффициентом относительной рентабельности капитальных вложений в автоматизацию). Он представляет собой величину, обратную сроку окупаемости, выраженную в процентах:

$$K_o = (1/T_{\text{ок}}) 100\%. \quad (5.31)$$

Коэффициент относительной рентабельности капитальных вложений в автоматизацию показывает, какая часть перво-

начальных капитальных вложений в автоматизацию производства окупается в течение года. При технико-экономическом сравнении вариантов и оценке эффективности внедрения автоматизации наиболее целесообразно использовать методику приведенных затрат:

$$Z_{\text{пр}} = I + E_n K, \quad (5.32)$$

где K — капитальные затраты по каждому варианту, р.; I — годовые издержки производства продукции по тому же варианту, р.; E_n — отраслевой нормативный коэффициент эффективности (коэффициент приведения), численно равный величине, обратной нормативному сроку окупаемости: $E_n = 1/T_n$.

Отраслевой нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений принимается равным 0,15 (в некоторых случаях, например при разработке АСУ ТП, нормативный коэффициент устанавливается Госпланом СССР или соответствующими министерствами).

Расчет годового экономического эффекта от внедрения механизации и автоматизации производства сельскохозяйственной продукции ведут, исходя из минимума приведенных затрат:

$$\mathcal{E} = (Z_{1 \text{ пр}} - Z_{1 \text{ пр. а}}) V_a, \quad (5.33)$$

где $Z_{1 \text{ пр}}$ и $Z_{1 \text{ пр. а}}$ — соответственно приведенные затраты на единицу продукции до и после внедрения автоматизации; V_a — годовой объем производства продукции (в натуральных единицах).

С учетом выражений (5.32) и (5.33) получаем

$$\mathcal{E} = [(I_1 + E_n K_1) - (I_{1a} + E_n K_{1a})] V_a, \quad (5.34)$$

где K_1 и K_{1a} — соответственно удельные капитальные вложения до и после внедрения автоматизации.

Если обозначить изменение издержек при производстве продукции вследствие внедрения автоматизации через ΔI , а дополнительные капитальные вложения на автоматизацию через ΔK , выражение (5.34) примет вид

$$\mathcal{E} = \Delta I - E_n \Delta K. \quad (5.35)$$

Капитальные вложения на автоматизацию на всех этапах разработки и монтажа автоматизированной системы

$$K = K_p + K_n + K_k + K_m, \quad (5.36)$$

где K_p — затраты на разработку и проектирование; K_n — доля обще-производственных затрат на автоматизацию; K_k — стоимость комплектующих изделий; K_m — затраты на монтаж.

Если срок введения в эксплуатацию автоматизирован-

ной системы больше года, то при постоянстве издержек производства в качестве капитальных вложений K рекомендуется принимать их суммарную приведенную величину

$$K_{\text{пр}} = \sum_{t=1}^T K_t (1 + E_n)^{T-t}, \quad (5.37)$$

где K_t — капитальные вложения на t -й год ($t=1, 2 \dots T$); T — срок создания и монтажа системы.

Общие годовые издержки автоматизированного производства для первого года эксплуатации при этом определяются из выражения

$$I = I_{\text{п}} + I_{\text{н}} + I_{\text{а}} + I_{\text{м}} + I_{\text{э}} + I_{\text{т.о}} + I_{\text{пр}}, \quad (5.38)$$

где $I_{\text{п}}$ — затраты на пусконаладочные работы (для последующих лет); $I_{\text{н}}$ — затраты на проверку и наладку; $I_{\text{а}}$ — амортизационные отчисления (на реновацию и капитальный ремонт); $I_{\text{м}}$ — затраты на материалы и вспомогательное оборудование, необходимые для обеспечения производства; $I_{\text{э}}$ — затраты на все виды потребляемой энергии; $I_{\text{т.о}}$ — затраты на техническое обслуживание и ремонт системы, включая зарплату обслуживающего персонала; $I_{\text{пр}}$ — общепроизводственные затраты.

Затраты на пусконаладочные работы определяют, исходя из объема работ, по ценникам Госстроя СССР на наладку электрических установок, средств автоматики и КИП.

Амортизационные отчисления на реновацию и капитальный ремонт определяют в процентах от общей суммы капитальных затрат:

$$I_{\text{а}} = a \cdot K, \quad (5.39)$$

где a — норма амортизационных отчислений, %; $a = a_{\text{к.р}} + a_{\text{р}}$.

Норма амортизационных отчислений на все машины и комплекты оборудования для животноводства и птицеводства устанавливается в пределах 14,2%, на электронные вычислительные машины — 19%, в том числе на капитальный ремонт 13%, на полное восстановление 6%, на измерительные и регулирующие приборы и устройства — 12% (соответственно 2 и 10%) и т. д. в соответствии с нормами амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства СССР.

Затраты на материалы и вспомогательное оборудование, необходимые для обеспечения производства, включают в себя стоимость кормов, транспортные расходы и т. п.

Общеэнергетические затраты $I_{\text{э}}$ включают стоимость электрической энергии, а также других видов энергии, необходимых для обеспечения функционирования системы.

Затраты на техническое обслуживание и ремонт включают в себя стоимость запасных частей и материалов, необходимых для производства плановых эксплуатационных мероприятий с целью обеспечения надежного функционирования системы, а также основную и дополнительную зарплату обслуживающего персонала:

$$I_{т.о} = I_{м.з} + I_{з.п}, \quad (5.40)$$

где $I_{м.з}$ — стоимость материалов и запчастей, необходимых на расчетный срок эксплуатации (например, один год); $I_{з.п}$ — основная и дополнительная зарплата обслуживающего персонала;

$$I_{з.п} = (1 + \alpha) \left(\sum_{i=1}^{n_1} N_{ИТР} Q_{ИТР} + \sum_{i=1}^{n_2} N_{сл} q_{сл} \Phi_{Г1} \right); \quad (5.41)$$

$N_{ИТР}$, $N_{сл}$ — соответственно численность ИТР и технического персонала, чел.; $Q_{ИТР}$ — годовой фонд зарплаты ИТР, р.; $q_{сл}$ — часовая тарифная ставка технического персонала (слесаря, электромонтера и т. п.), р/ч; $\Phi_{Г1}$ — годовой фонд рабочего времени одного работника, ч; α — коэффициент, учитывающий долю дополнительной оплаты технического персонала и процент отчислений на социальное страхование.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Термопары

Наименование термопары	Тип	Градуировка	Верхний предел температуры, °С		Термо-ЭДС при перепаде температур между спаями 100°
			длин-тельно	кратко-временно	
Платина-платинородий (10% Rh)	ТПП	ПП-1	1300	1600	0,643
Платинородий (30% Rh)	—				
Платинородий (6% Rh)	ТПР	ПР-30/6	1600	1800	—
Хромель-алюмель	ТХА	ХА	1000	1300	4,10
Хромель-копель	ТХК	ХК	600	800	6,95
Медь-константан	—	М	350	500	4,16

Приложение 2. Термометры сопротивления

Тип	Градуировка	Пределы измерения, °С	Показатель тепловой инерции	Число чувствительных элементов
ТСМ-X, ТСМ-X1	23	-50...+100	4 мин	Один
ТСМ-6097	23 и 24	-50...+150 и -50...+250	4 и 30 с	»
ТСМ-5071	23 и 24	-50...+150	120 с	»
ТСМ-010, ТСМ-020	23	-50...+100	2,5 мин	Один (ТСМ-010), два (ТСМ-020)
ТСМ-6114	23	-50...+100	25 с	Один
ТСМ-8012	23	0—50	20 мин	»
ТСМ-148	23	0—120	80 с	»
ТСМ-8034М	23	-50...+85	30 с	»
ТСП-8012	22	0—50	20 мин	»
ТСП-6108	22	-50...+60	20 с	»
ТСП-154	21	-50...+140	20 с	»
ТСП-6105	22	-260...+200	9 с	»
ТСП-955М	22	0—100	9 с	»

Приложение 3. Терморезисторы для измерения и регулирования температуры

Тип терморезистора	R (кОм) при 20°C	t _{окр} , °C		P _{max} ' мВт	T (с), не более	Температурный коэффициент, % / град	
		от	до			от	до
ММТ-1	1...220	-60	125	600	85	-2,4	-5,0
КМТ-1	22...1000	-60	180	1000	85	-4,2	-8,4
ММТ-4	1...220	-60	125	700	115	-2,4	-5,0
КМТ-4	22...1000	-60	180	1100	115	-4,2	-8,4
ММТ-6	10...100	-60	125	50	35	-2,4	-5,0
ММТ-8	0,001...1	-40	70	600	—	-2,4	-4,0
КМТ-8	0,1...10	-40	70	600	—	-4,2	-8,4
ММТ-9	0,01...4,7	-60	125	—	—	-2,4	-5,0
ММТ-12	0,0047...1	-60	125	—	30	-2,4	-4,0
КМТ-12	0,1...10	-60	125	—	30	-4,2	-8,4
КМТ-17	0,33...22	-60	155	—	30	-4,2	-7,0

Приложение 4. Электрические исполнительные механизмы

Тип исполнительного механизма	Время одного оборота выходного вала, с	Максимальный угол поворота выходного вала, град	Напряжение питания при частоте 50 Гц, В	Потребляемая мощность, В·А	Габариты, мм
ПР-М	10, 30	180	220	50	230×122×285
ПР-1М	60, 90, 120				230×122×180
ИМ-2/120	120	120	220	30	246×230×210
МЭО-1,6/40	40	90, 240	220	40	234×234×213
МЭО-4/100	100			64	260×330×300
МЭО-10/100	100			64	260×330×300
МЭО-63/250	250			585	425×455×550
ИМТ-4/35	2,5	350	220/380	270	455×210×220
МЭК-10К/120	120	90, 270	127, 220	180	326×313×435
МЭК-25К/4СМ	40	90, 240	220/380	115	490×523×392

Приложение 5. Автоматические регуляторы температуры и разности температур позиционного типа

Автоматические регуляторы температуры типов ПТР, ПТРВ, РТИ, РТ, РТТ, МЭТРС, ТМ, ТЭ и др. предназначены для двух- и трехпозиционного регулирования температуры жидких и газообразных сред в системе кондиционирования воздуха, отопления и вентиляции.

В регуляторах ПТР применяются невзаимозаменяемые первичные преобразователи температуры в погружном и камерном исполнении типов ММТ и КМТ, а в регуляторах ПТРВ, РТ, МЭТРС, ТМ и ТЭ — термометры сопротивления ТСМ и ТСП соответствующих градуировок. В частности, ТЭ6ПЗ комплектуется термометром сопротивления ТСМ градуировки 23, РРТ-2В градуировки 24, РТИ-3 — платиновым термометром сопротивления ТСП градуировки 22, РТ2 — медным градуировки 23 или платиновым градуировки 21.

Регуляторы разности температур комплектуются двумя медными термометрами сопротивления ТСМ градуировки 23.

Двухпозиционные регуляторы выпускаются в двух конструктивных вариантах:

- А — с замыканием замыкающей выходной командной цепи при повышении температуры относительно заданного значения;
- В — с замыканием замыкающей выходной командной цепи при понижении температуры относительно заданного значения.

Автоматические регуляторы указанных типов обладают достаточно высокой надежностью. В частности, вероятность безотказной работы за 2000 ч работы для регуляторов РТИ-3 составляет 0,9, для регуляторов РРТ-2В, РТ-2 и МЭТРС-2 — 0,96.

Расчетный срок службы для современных регуляторов РТ, РТТ, ТЭ, ТМ, МЭТРС и других установлен 10 лет.

Основные технические характеристики автоматических регуляторов температуры позиционного типа

Наименование и тип регулятора	Модификация регулятора	Напряжение сети питания, В	Диапазон регулируемых температур, °С	Дифференциал, °С	Основная погрешность, град	Дистанционность подключения датчика, м	Потребляемая мощность, Вт	Коммутируемая мощность, В·А
Полупроводниковый регулятор температуры, двухпозиционный типа ПТР-2 (корпус пластмассовый)	ПТР-2-2	220/127	-30...-5	0,5...5	+1	300	15	500
	ПТР-2-03		-10...+15					
	ПТР-2-04		5...35					
	ПТР-2-05		30...60					
	ПТР-2-06		50...100					
	Полупроводниковый регулятор температуры, двухпозиционный типа ПРВТ-2 (корпус металлический)		ПТРВ-2Т-01					
ПТРВ-2Т-02		-30...-5						
ПТРВ-2Т-03		-10...+15						
ПТРВ-2Т-04		5...35						
ПТРВ-2Т-05		30...60						
ПТРВ-2Т-06		50...100						
Регулятор температуры типа РТ-2	РТ-2-01	220	-30...0	0,5...5	±0,5	300	7	500
	РТ-2-02		-10...+20					
	РТ-2-03		5...35					
	РТ-2-04		30...60					
	РТ-2-05		50...100					
	РТ-2-06		0...100					
Регулятор температуры (ТСП, гр. 22)	РТИ-3	220	36...39	0,2...0,3	±0,1	...	20	500

Регулятор разности температур	РТТ-2В	220	0...10	0,2...2	±0,5	300	10	Коммутирует цель 36 В при нагрузке 0,3...2А
Регулятор температуры мик- роэлектронный двухпози- ционный типа ТМ	ТМ2	6...220	-40...0 -20...+20 0...40 20...60 40...80 60...100	0,5...10	±1	300	5	Коммутирует цель 6... 220 В при нагрузке 0,001...3А
			-50...+50 0...100 50...150		±2 ±1 ±2 ±2			
	ТМ4	6...220	0...20	0,5...10	±1	300	5	То же
	ТМ8	6...220	-40...0 -20...+20 0...40 20...60 40...80 60...100 -50...+50	0,5...10	±1 ±1	300	5	»
					±2 ±1			
Регулятор температуры мик- роэлектронный трехпози- ционный типа ТМ	ТМ12	6...220	0...100 50...150 0...20	0,5...10	±2 ±2 ±1	300	5	Коммутирует цель 6... 220 В при нагрузке 0,001...3А
	(на разность температур)							

Наименование и тип регулятора	Модификация регулятора	Напряжение сети питания, В	Диапазон регулируемых температур, °С	Дифференциал, °С	Основная погрешность, град	Дистанция от датчика, м	Потребляемая мощность, Вт	Коммутируемая мощность, В·А
Регулятор температуры типа ТЭ:								
двухпозиционный								
	ТЭ1ПЗ	220	-40...0	0,5...10	±0,5	1000	5	500
			-20...+20					
			0...40					
			20...60					
			40...80					
			60...100					
трехпозиционный								
	ТЭ6ПЗ	220	0...5	0...25	±0,5	1000	5	500
	ТЭ2ПЗ	220	-40...0	0,5...10		1000	5	500
			-20...+20					
			0...40					
			20...60					
			40...80					
			60...100					

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация и электрификация защищенного грунта (под ред. акад. Л. Г. Прищепа).— М.: Колос, 1976, 320 с.
2. В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. Теория систем автоматического регулирования — М.: Наука, 1975. 768 с.
3. И. Ф. Бородин, Н. И. Кирилин. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов.— М.: Колос, 1977. 328 с.
4. Н. И. Бохан, И. С. Нагорский. Автоматизация механизированных процессов в растениеводстве.— М.: Колос, 1982. 176 с.
5. И. А. Будзко, И. Ф. Бородин. Новые элементы автоматики сельских электроустановок.— М.: Колос, 1971. 311 с.
6. Г. М. Бузенков, В. К. Хорошенков, М. Л. Тамиров. Автоматизация посевных агрегатов.— М.: Россельхозиздат, 1979, 88 с.
7. А. М. Евстратов, М. Л. Тамиров. Автоматизация вождения мобильных сельскохозяйственных агрегатов.— М.: Россельхозиздат, 1982. 78 с.
8. Н. Н. Иващенко. Автоматическое регулирование.— М.: Машиностроение, 1983. 736 с.
9. А. В. Калоев. Основы проектирования систем автоматического вождения самоходных машин.— М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
10. А. С. Ключев, Б. В. Глазов, М. Б. Миндин. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля.— М.: Энергоатомиздат, 1983. 376 с.
11. И. Ф. Кудрявцев, О. С. Шкляр, Л. Н. Матюнина. Автоматизация производственных процессов на фермах.— М.: Колос, 1976. 228 с.
12. И. М. Макаров, Б. М. Менский. Линейные автоматические системы.— М.: Машиностроение, 1982. 504 с.
13. И. И. Мартыненко, В. Т. Сергованцев, В. И. Саркисян, Е. М. Шукайло. Практикум по вычислительной технике в инженерных и экономических расчетах.— М.: Колос, 1982. 104 с.
14. Методика выбора норм надежности технических устройств.— М.: Госстандарт, 1971. 32 с.
15. Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов. Элементы систем автоматического управления и контроля.— Киев: Вища школа, 1982. 477 с.
16. В. С. Пугачев. Основы автоматического управления.— М.: Наука, 1974. 720 с.
17. Статистические методы в инженерных исследованиях.— М.: Высшая школа, 1983. 216 с.
18. Е. П. Стефани. Основы построения АСУ ТП.— М.: Энергоиздат, 1982. 352 с.
19. В. Д. Шеповалов. Автоматизация уборочных процессов.— М.: Колос, 1978. 384 с.
20. М. А. Ястребенецкий. Надежность технических средств в АСУ технологическими процессами.— М.: Энергоиздат, 1982. 232 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автомат 9
Автоматизация 9
Автоматический регулятор 11, 12
Автоматическое управляющее устройство 9, 10, 12, 24
Аккумулирующая способность 86
Алгоритм адаптации 15
— оптимального управления 14
— поиска экстремума 14
— управления 15, 238
— функционирования (АФ) 11, 12, 13, 14, 15, 17
Амортизационное отчисление 321
Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) 42, 46, 63, 65, 67, 69, 71, 72, 223
Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) 40, 44, 59, 62, 63, 65, 67, 69
Астатическая система автоматического регулирования 199, 200
Астатическое регулирование 23
АСУТП 5, 232
Безотказность 303
Блок управления (БУ) 17, 19
Вещественная частотная характеристика 203, 206, 207
Вероятность безотказной работы 306, 310, 311, 312
Возмущение 10, 21, 201
Воспринимающий элемент (ВЭ) 24, 26, 215
Время запаздывания 89, 97
— разгона 87
— регулирования 208
Входная величина 9
Выходная величина 9
Геркон 149
Гигрометры 129, 130
Годовые издержки 320, 321
Годовой фонд зарплаты 322
— — рабочего времени 322
Государственная система про-
мышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) 98, 99, 103, 131, 137
Динамический режим 31
Долговечность 303, 305
Д-разбиение 194
Задающий элемент (ЗЭ) 24, 26
Задатчик алгоритма функционирования (ЗАФ) 17, 19
Закон управления 15
Звено аperiodическое первого порядка 51, 60
— — второго порядка 57, 61
— безынерционное 47, 60
— запаздывания 61, 191, 192
— интегрирующее 47, 60
— колебательное 53, 55, 60
— консервативное 56, 60
— линейное 34
— системы автоматического управления 34
— стационарное 34
— типовое динамическое 44, 47, 60, 61
— элементарное 34
Измерительный преобразователь (ИП) 99, 100, 101, 102, 105, 107, 108, 109
ИП биметаллический 123
— дилатометрический 123
— дифференциальный 112
— емкостный 116, 117
— индуктивный 110, 111
— индукционный 114, 115
— контактный 107
— магнитоупругий 114, 115
— оптический 125, 128
— оптико-акустический 127
— потенциометрический 107
— пьезоэлектрический 116, 117, 118
— резистивный 107
— тензометрический 109, 110
— терморезистивный 122
— электромагнитный 107

- Импульсные переходные характеристики 36
- Интегральный закон (И-закон) 16, 33
- Исполнительный механизм (ИМ) 157. . .163
- — гидравлический 160, 162, 163, 166
 - — пневматический 160...162
 - — электрический 158
 - — электродвигательный 159
 - — электромагнитный 159, 160
 - элемент (ИЭ) 24, 26, 215
- Капитальные вложения 320, 321
- Корректирующие элементы (КЭ) 25
- Кривая переходного процесса 202, 204, 206
- Критерий устойчивости Гурвица, 180, 181
- — логарифмический частотный 187. . .189
 - — Михайлова 182. . .184
 - — Найквиста 184. . .187, 189, 190
 - — Рауса 179, 180
- Коэффициент готовности 306, 309
- емкости 86
 - передачи 33, 97, 195, 245
 - усиления 33
 - чувствительности 33
- Линеаризация 32
- Линейный элемент 33
- Логарифмические частотные характеристики 42, 193
- амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) 43, 44, 59, 62, 64, 66, 69, 188, 189, 190
 - фазочастотные характеристики (ЛФЧХ) 43, 44, 59, 64, 189, 190, 191
- Логическая операция (функция) 150, 151, 153
- Логический элемент 150. . .154
- Метод гармонической линеаризации 217. . .220
- припасовывания 227, 230
- Многомерные САУ 10
- Нагрузка 10, 21
- Надежность 303
- Наработка на отказ 306, 308, 313, 314
- Нелинейные автоматические системы 209. . .211, 214, 227
- Нелинейные элементы 33
- Объект астатический 83, 95, 97
- статический 83, 95
- Одномерные САУ 9
- Отказ внезапный 304
- интенсивный 303, 305
- Передаточные функции 37, 39, 45
- — замкнутой системы 77, 78
 - — разомкнутой системы 77
- Перерегулирование 208
- Переходная функция 34, 35
- — импульсная 35
- Преобразование Лапласа 38, 39
- — обратное 39, 40
- Принцип компенсации 17
- разомкнутого управления 17
 - управления по отклонению 19
- Программное управление 12, 23
- Пропорциональный закон (П-закон) 16
- Пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон) 16
- Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон) 16
- Постоянная времени объекта 88, 96, 97
- Разгонная характеристика 95
- Регулируемая величина 197
- Регулятор автоматический 163
- издромный (ПИД-регулятор) 169
 - интегральный (И-регулятор) 166, 167
 - пропорциональный (П-регулятор) 21, 165
 - пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор) 167, 168
 - прямого действия 27
 - релейный 170. . .172
- Релейный закон 15
- Реле нейтральное электрическое 146. . .150
- поляризованное 149
 - ремонтпригодность 303, 305

- Самовыравнивание 82, 84, 85, 88, 97
- Система автоматического регулирования (САР) 272, 274, 281, 292,
— автоматического управления (САУ) 9, 27, 174, 175, 176, 293, 316
- Следящая система 13, 23
- Сохраняемость 303, 305
- Срок окупаемости 318
- Стабилизация 11, 12, 19, 23, 270
- Статизм 21
- Статическое регулирование 21
- Статический режим 31
- Статическая система автоматического регулирования 200, 201
- Статическая характеристика 32
- Структурная схема 244, 252
- Термометры сопротивления 120
- Термопары 118
- Технологический объект 28
- Типовые входные возмущения 35
- Трансцендентные звенья 57
- Управление по возмущению 17
— по замкнутому контуру 19
- Управляющее воздействие 9, 10, 81
- Управляющий элемент (УЭ) 24, 26, 215
- Управляемый объект (УО) 9, 10, 14, 15, 18, 25, 80, 91, 92, 214
- Усилитель дроссельный 143
— гидравлический 142
— магнитный (МУ) 138, 139, 140, 141
— переменного тока 134
— постоянного тока 135
— пневматический 142
— фазочувствительный 134
- Фазочастотная характеристика (ФЧХ) 40, 44, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69
- Фоторезисторы 126
- Фотоэлементы 126
- Функциональная схема 244, 252
- Функционально - технологическая схема 28, 236, 237, 240, 241, 246, 247
- Характеристическое уравнение 39, 55, 195, 279
- Цепь обратной связи 12, 20
- Элемент сравнения (ЭС) 24, 25, 26

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Общие свойства систем автоматического управления	7
1.1. Основные понятия и определения	7
1.2. Задачи автоматического управления	11
1.3. Принципы действия систем автоматического управления	17
1.4. Функциональные элементы автоматических устройств	24
1.5. Описание функциональных элементов и систем автоматического управления	27
1.5.1. Функционально-технологические схемы	28
1.5.2. Математическое описание элементов и систем	31
1.6. Типовые динамические звенья	44
1.6.1. Временные характеристики типовых динамических звеньев	47
1.6.2. Частотные характеристики типовых звеньев	59
1.7. Соединение линейных звеньев	68
1.8. Структурные схемы и их преобразование	73
1.9. Передаточные функции системы автоматического управления	77
1.10. Свойства управляемых объектов	80
Глава 2. Технические средства автоматики	98
2.1. Основные понятия ГСП	98
2.2. Первичные преобразователи. Измерительные преобразователи	99
2.2.1. Общая характеристика преобразователей	99
2.2.2. Механические преобразователи	103
2.2.3. Электромеханические преобразователи	106
2.2.4. Тепловые преобразователи	118
2.2.5. Электрохимические преобразователи	124
2.2.6. Оптические ИП	125
2.2.7. Электронные и ионизационные преобразователи	128
2.3. Управляющие устройства	130
2.3.1. Усилительные устройства	131
2.3.2. Реле	145
2.3.3. Логические элементы	150
2.4. Исполнительные механизмы	157
2.4.1. Общие характеристики исполнительных механизмов	157
2.4.2. Электрические исполнительные механизмы	158
2.4.3. Пневматические и гидравлические исполнительные механизмы	160
2.5. Регуляторы	163
	333

Глава 3. Анализ систем автоматического управления . . .	174
3.1. Предмет анализа автоматических систем . . .	174
3.2. Устойчивость линейных систем автоматического управления	176
3.2.1. Понятие устойчивости. Необходимое условие устойчивости	176
3.2.2. Критерии устойчивости	179
3.2.3. Запасы устойчивости	189
3.2.4. Влияние чистого запаздывания на устойчивость автоматических систем	191
3.2.5. Области устойчивости	193
3.3. Качество работы систем автоматического управления	196
3.3.1. Показатели качества	196
3.3.2. Метод определения точности работы автоматических систем в установившихся режимах	198
3.3.3. Методы расчета динамических показателей качества регулирования автоматических систем	202
3.4. Особенности анализа нелинейных систем автоматического управления	209
3.4.1. Понятие о нелинейных системах. Виды нелинейностей	209
3.4.2. Метод гармонической линеаризации	217
3.4.3. Метод припасовывания	227
Глава 4. Автоматизация технологических объектов . . .	231
4.1. Автоматизация стационарных установок и процессов	232
4.1.1. Автоматизация насосных установок	233
4.1.2. Автоматизация вентиляционных установок	238
4.1.3. Автоматизация отопительных установок	243
4.1.4. Автоматизация установок первичной обработки молока	250
4.1.5. Автоматизация теплиц	255
4.2. Автоматизация мобильных машин и агрегатов	262
4.2.1. Значение и особенности автоматизации процессов растениеводства. Классификация автоматических систем	262
4.2.2. Системы автоматического контроля и защиты	265
4.2.3. Системы автоматического регулирования положения машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля	270
4.2.4. Системы автоматического регулирования направления движения машин и отдельных рабочих органов	281
4.2.5. Системы автоматического регулирования загрузочных режимов машин и отдельных рабочих органов	292

Глава 5. Понятия надежности и технико-экономической эффективности автоматизации	303
5.1. Надежность средств автоматики и систем автоматического управления	303
5.1.1. Основные понятия и определения	303
5.1.2. Количественные характеристики надежности	305
5.1.3. Методы расчета надежности	310
5.2. Экономическая эффективность автоматизации производственных процессов в сельском хозяйстве	317
Приложения	323
Указатель литературы	329
Предметный указатель	330

Иван Иванович Мартыненко,
Борис Леонтьевич Головинский,
Ростислав Данилович Проценко,
Тимофей Филиппович Резниченко

АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Заведующая редакцией *А. И. Гераськина*
Редактор *В. М. Никитина*
Художественный редактор *О. М. Соркина*
Технический редактор *Н. В. Новикова*
Корректоры *А. И. Болдуева, М. А. Давыдова,*
Т. Н. Бобрикова

ИБ № 3696

Сдано в набор 24.12.84. Подписано к печати 17.07.85.
Т-08494. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага кн.-журн. Гарни-
тура литературная. Печать высокая. Усл. печ.
л. 17,64. Усл. кр.-отт. 17,64. Уч.-изд. л. 17,69. Изд.
№ 306. Тираж 18 000 экз. Заказ № 1312. Цена 90 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени
ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП, Москва, Б-53,
ул. Садовая-Спасская 18

Набрано в Ордена Октябрьской Революции и орде-
на Трудового Красного Знамени МПО «Первая
Образцовая типография имени А. А. Жданова»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете
СССР по делам издательств, полиграфии и книж-
ной торговли, 113054, Москва, Валовая, 28

Отпечатано с матриц в областной ордена «Знак
Почета» типографии им. Смирнова Смоленского
облуправления издательств, полиграфии и книжной
торговли, г. Смоленск, пр. им. Ю. Гагарина, 2.

