

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АВТОМАТИКА

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение
сельского хозяйства (по направлениям)»*

Минск
БГАТУ
2023

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7
А18

Составитель
старший преподаватель *Е. Е. Мякинник*

Рецензенты:
кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники
УО «Белорусский государственный технологический университет»
(кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой *Д. С. Карпович*);
кандидат технических наук, доцент,
заведующий лабораторией научного обеспечения испытаний
и информационно-технических технологий
РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации
сельского хозяйства» *В. К. Клыбик*

Автоматика : учебно-методическое пособие / сост.
А18 Е. Е. Мякинник. – Минск : БГАТУ, 2023. – 360 с.
ISBN 978-985-25-0232-0.

Содержит материалы по математическому описанию звеньев и систем автоматического управления, синтезу непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования, классификацию программно-технических средств автоматизации и принципы их действия, а также материалы по выполнению лабораторных работ.

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства (по направлениям)», всех форм обучения.

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-25-0232-0

© БГАТУ, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
История развития теории автоматического управления.....	9
Особенности и значение автоматизации сельскохозяйственного производства.....	10

Раздел I. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	12
1.1. Алгоритмы функционирования и управления.....	12
1.2. Функциональная схема.....	15
1.3. Классификация автоматических систем управления (АСУ).....	19
1.4. Фундаментальные принципы управления.....	20
2. УСТАНОВИВШИЕСЯ И ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ. СТАТИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	27
2.1. Типовые воздействия.....	27
2.2. Статические и динамические установившиеся режимы.....	31
2.3. Статические характеристики.....	32
2.4. Линеаризация статических характеристик.....	35
2.5. Временные (переходные) характеристики линейных систем и звеньев.....	37
2.6. Переходная функция.....	40
2.7. Частотные характеристики.....	41
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ И ЗВЕНЬЕВ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАПЛАСА. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ	46
3.1. Понятие звена.....	46
3.2. Математическое описание звеньев во временной области с помощью дифференциальных уравнений.....	46
3.3. Структурные схемы и общие правила составления структурных схем.....	48

3.4. Преобразование Лапласа и его основные свойства	49
3.5. Определение и смысл передаточной функции.....	50
4. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СОЕДИНЕНИЙ ЗВЕНЬЕВ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	51
4.1. Передаточные функции звеньев, соединенных последовательно и параллельно и охваченных обратной связью	51
4.2. Правила замены нескольких звеньев одним эквивалентным звеном в случаях последовательного, параллельного, встречно-параллельного соединений звеньев	55
4.3. Передаточные функции систем автоматического регулирования.....	55
5. ТИПОВЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЗВЕНЬЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ	59
5.1. Типовые линейные звенья и их характеристики	59
5.2. Идентификация линейных объектов управления по виду переходной функции	59
6. КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ	60
7. ПОНЯТИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ. ТОЧНОСТЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ	80
7.1. Понятие устойчивости систем автоматического управления	80
7.2. Общее математическое условие устойчивости	82
7.3. Критерии устойчивости автоматической системы управления	87
7.4. Определение запасов устойчивости.....	91
7.5. Области устойчивости систем автоматического управления	92
7.6. Пример определения устойчивости по критерию Гурвица	93
7.7. Оценка качества по переходным функциям прямым методом.....	95
7.8. Интегральные критерии качества переходных процессов.....	98

7.9. Статическая точность линейных систем по управляющему и возмущающему воздействиям.....	101
8. ТИПОВЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	104
8.1. Виды типовых линейных законов регулирования.....	104
8.2. Свойства систем с типовыми линейными законами регулирования.....	106
9. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	108
9.1. Основные понятия синтеза.....	108
9.2. Общие принципы синтеза алгоритмической структуры АСУ.....	110
9.3. Синтез автоматической системы управления при отсутствии возмущающего воздействия.....	111
9.4. Синтез алгоритмической структуры АСУ при наличии возмущающего воздействия.....	112
9.5. Выбор типа регулятора и его настроечных параметров.....	118
9.6. Синтез многоконтурной АСУ подчиненного регулирования.....	120
10. НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	122
10.1. Особенности нелинейных систем.....	122
10.2. Типовые нелинейные звенья.....	123
10.3. Позиционные системы автоматического регулирования.....	127
10.4. Импульсные системы.....	133

Раздел II. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

11. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	137
11.1. Понятие технических средств автоматизации.....	137
11.2. Классификация технических средств автоматизации.....	139
11.3. Основные характеристики.....	140
12. ДАТЧИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. ПОНЯТИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА, РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА.....	143
12.1. Понятия первичного измерительного преобразователя и датчика.....	143

12.2. Статическая и динамическая характеристики датчиков	145
12.3. Понятия исполнительного устройства, исполнительного механизма, регулирующего органа	147
12.4. Классификация исполнительных устройств	148
12.5. Основные характеристики исполнительных устройств.....	157
13. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	159
13.1. Омические первичные преобразователи: потенциметрические, тензометрические.....	159
13.2. Электромагнитные первичные преобразователи.....	172
13.3. Емкостные первичные преобразователи	179
13.4. Фотоэлектрические первичные преобразователи.....	181
13.5. Датчики температуры.....	184
13.6. Датчики положения и уровня	193
13.7. Датчики давления, расхода и количества	196
13.8. Датчики влажности.....	198
13.9. Датчики состава и свойств веществ	201
14. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ	205
14.1. Цифровые системы	205
14.2. Структура современных контроллеров.....	206
14.3. Программируемые логические контроллеры (ПЛК): классификация, характеристики, программирование.....	207
14.4. Применение контроллеров для автоматизации технологических процессов.....	211
14.5. Современные интерфейсы для связи микропроцессорных систем управления.....	212
14.6. Последовательная и параллельная передача данных	214
14.7. Современные протоколы передачи информации (RS-232, RS-485, CAN, USB).....	216
14.8. Принципы построения сети микропроцессорных устройств управления	225

Раздел III. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

№ 1. Изучение и исследование систем с разомкнутым и замкнутым принципами управления	233
№ 2. Исследование линейных звеньев и получение их статических и частотных характеристик	235

№ 3. Моделирование статических и частотных характеристик линейных звеньев	240
№ 4. Линеаризация гладких нелинейных характеристик звеньев систем автоматизации	252
№ 5. Идентификация объектов управления и средств автоматизации	255
№ 6 (УСРС). Изучение и оценка качества регулирования линейных систем прямым методом	260
№ 7. Исследование систем с пропорциональным законом (П-законом) регулирования	265
№ 8. Исследование систем с интегральным законом (И-законом) регулирования	276
№ 9 (УСРС). Изучение и исследование системы, определение закона регулирования	281
№ 10. Синтез систем автоматического регулирования.....	291
№ 11. Исследование двухпозиционного регулятора	298
№ 12. Изучение и исследование трехпозиционного регулятора	302
№ 13. (УСРС). Изучение и определение функционального состава системы автоматического регулирования	305
№ 14. Исследование потенциометрических датчиков	310
№ 15. Исследование индуктивных и индукционных датчиков.....	315
№ 16. Исследование датчиков температуры.....	320
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	325
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	327

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация и компьютеризация управления является средством повышения конкурентоспособности сельскохозяйственного производства. Экономичное, надежное и безопасное функционирование сложных биотехнических объектов, каковыми являются технологические процессы сельскохозяйственных предприятий, может быть обеспечено с помощью лишь самых совершенных принципов и программно-технических средств управления.

Автоматика – учебная дисциплина, предметом изучения которой являются информационные процессы, протекающие в системах управления техническими и технологическими объектами. Автоматика выявляет общие закономерности функционирования, присущие автоматическим системам различной физической природы, и на основе этих закономерностей разрабатывает принципы построения высококачественных систем автоматического управления (САУ).

Автоматизация является важнейшим направлением развития современного сельскохозяйственного производства. Автоматизированные и автоматические системы обеспечивают оптимизацию хода технологических процессов, за счет чего наиболее эффективно используются все виды ресурсов, повышается качество и увеличивается количество продукции, обеспечивается безопасность производства, повышается производительность труда.

Охватывая широкий круг научных, технических и производственных проблем, автоматика является базой дальнейшего прогресса, в частности основой многих областей промышленности, сельского хозяйства, транспорта и энергетики.

Целью учебной дисциплины является формирование знаний и умений в применении методов построения и исследования систем автоматического управления и наиболее распространенных средств автоматизации.

Задачи учебной дисциплины:

- ознакомление с современным состоянием, перспективами развития и областями применения систем автоматического управления;
- изучение фундаментальных принципов управления и общих принципов построения САУ;
- изучение математического описания объектов управления;

- изучение режимов работы и методов оценки качества управления;
- изучение методов математического и компьютерного моделирования, анализа и синтеза САУ;
- закрепление современных методов поиска, обработки и использования информации.

При изучении процессов управления в теории автоматического управления (ТАУ) абстрагируются от физических и конструктивных особенностей автоматических систем управления (АСУ) и вместо реальных АСУ рассматривают их адекватные математические модели. Поэтому *основным методом исследования в ТАУ* является математическое моделирование.

Теория автоматического управления вместе с теорией функционирования программно-технических средств автоматизации (датчиков, регуляторов, исполнительных механизмов) образуют более широкую отрасль науки – автоматiku. Автоматика, в свою очередь, является одним из разделов технической кибернетики, которая изучает сложные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) и предприятиями (АСУП), построенными с использованием управляющих электронных вычислительных машин.

История развития теории автоматического управления

Первые теоретические работы в области автоматического управления появились в конце XIX в., когда в промышленности получили широкое распространение регуляторы паровых машин. При проектировании и наладке этих регуляторов инженеры-практики стали сталкиваться с трудностями. Именно в этот период выполнен ряд исследований, в которых паровая машина и ее регулятор впервые были проанализированы математическими методами как единая динамическая система.

Приблизительно до середины XX в. теория регуляторов паровых машин и котлов развивалась как раздел прикладной механики. Параллельно разрабатывались методы анализа и расчета автоматических устройств в электротехнике. Формирование ТАУ в самостоятельную научную и учебную дисциплину произошло в период

с 1940 по 1950 г. В это время были изданы первые монографии и учебники, в которых автоматические устройства различной физической природы рассматривались едиными методами.

В настоящее время ТАУ наряду с новейшими разделами так называемой общей теории управления (исследование операций, системотехника, теория игр, теория массового обслуживания) играет важную роль в совершенствовании и автоматизации управления производством.

Автоматизация является одним из главных направлений научно-технического прогресса и важным средством повышения эффективности производства. Современное промышленное производство характеризуется ростом масштабов и усложнением технологических процессов, увеличением единичной мощности отдельных агрегатов и установок, применением интенсивных, высокоскоростных режимов, близких к критическим, повышением требований к качеству продукции, безопасности персонала, сохранности оборудования и окружающей среды.

Экономичное, надежное и безопасное функционирование сложных технических объектов может быть обеспечено с помощью лишь самых совершенных технических средств, чья разработка, изготовление, монтаж, наладка и эксплуатация немыслимы без знания ТАУ.

Современные тенденции в автоматизации производства:

- широкое применение ЭВМ для управления;
- создание машин и оборудования со встроенными микропроцессорными средствами измерения, контроля и регулирования;
- переход на децентрализованные (распределенные) структуры управления с микроЭВМ;
- внедрение человеко-машинных систем;
- использование высоконадежных технических средств;
- автоматизированное проектирование систем управления.

Особенности и значение автоматизации сельскохозяйственного производства

Основной особенностью является наличие в объекте управления биологической составляющей, что обязательно нужно учитывать

при разработке и эксплуатации системы. Другая особенность – обязательная экономическая обоснованность проекта, а также обоснованность проекта с точки зрения экологии и безопасности производства.

Значение автоматизации заключается прежде всего в обеспечении оптимального хода технологического процесса, за счет чего достигается наиболее эффективное использование всех видов ресурсов (энергетических, водных, кормовых и т. д.), в улучшении качества и увеличении количества продукции. Также автоматика зачастую решает проблему экологической и производственной безопасности объекта, увеличивает производительность труда. Улучшение условий труда и культуры производства за счет автоматизации имеет огромный социальный эффект.

К настоящему времени оптимизация хода технологических процессов за счет систем автоматизации на всех стадиях сельскохозяйственного производства (обработки почвы, посева, внесения удобрений, ухода за посевами, уборки, производства и приготовления кормов, кормления, производства молока, переработки и хранения продукции и т. д.) привела в аграрно развитых странах к решающему повышению эффективности производства.

Большое значение имеет также то, что автоматизация повысила конкурентоспособность малых производств при сохранении их организационных и экологических преимуществ.

Раздел I. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Алгоритмы функционирования и управления

Алгоритм функционирования устройства (системы) – совокупность предписаний, ведущих к правильному выполнению технологического процесса в каком-либо устройстве или в совокупности устройств (системе).

Например, электрическая система – совокупность устройств, обеспечивающих единство процессов генерирования, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии при обеспечении ряда требований к режимным параметрам (частоте, напряжению, мощности и т. д.). Электрическая система спроектирована таким образом, чтобы при нормальных условиях эксплуатации эти требования выполнялись, т. е. правильно выполнялся технический процесс. В данном случае алгоритм функционирования электрической системы реализован в конструкции входящих в ее состав устройств (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и т. д.) и в определенной схеме их соединения.

Однако надлежащему функционированию устройства (системы) могут мешать внешние обстоятельства (воздействия). Для электрической системы такими воздействиями могут быть: изменение нагрузки потребителей электрической энергии, изменение конфигурации электрической сети в результате переключений, короткие замыкания, обрывы проводов и т. д. Поэтому на устройство (систему) приходится оказывать специальные воздействия, направленные на компенсацию нежелательных последствий внешних воздействий и выполнение алгоритма функционирования.

Под *объектом управления (ОУ)* в общем случае понимают совокупность взаимосвязанных технических средств и биологических объектов, которыми необходимо управлять для достижения цели.

Объектами управления являются как отдельные устройства электрической системы (турбогенераторы, силовые преобразователи электрической энергии, нагрузки), так и электрическая система

в целом. В частном случае ОУ может содержать только технические устройства или только биологические объекты.

Алгоритм управления – совокупность предписаний, определяющая характер воздействий извне на объект управления, обеспечивающих его алгоритм функционирования.

Примерами алгоритмов управления являются алгоритмы изменения возбуждения синхронного генератора и расхода пара в их турбинах с целью компенсации нежелательного влияния изменения нагрузки потребителей на уровни напряжения в узловых точках электрической системы и частоту этого напряжения.

Устройство управления (УУ) – устройство, осуществляющее в соответствии с алгоритмом управления воздействие на объект управления.

Примерами устройств управления являются автоматический регулятор возбуждения (АРВ) и автоматический регулятор частоты вращения (АРЧВ) синхронного генератора.

Автоматическая система управления (АСУ) – совокупность взаимодействующих между собой объекта управления и устройства управления.

Таковой является, например, автоматическая система возбуждения синхронного генератора, содержащая взаимодействующие между собой АРВ и собственно синхронный генератор.

На рис. 1.1 приведена обобщенная структурная схема АСУ.

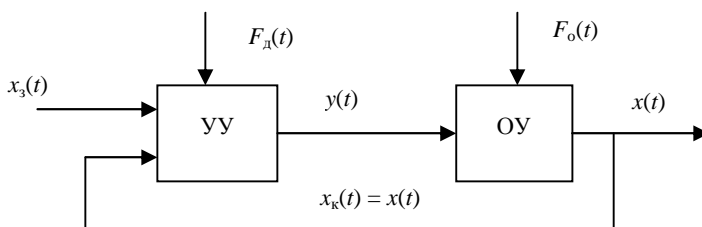


Рис. 1.1. Обобщенная структурная схема АСУ

Управляемая величина $x(t)$ – физическая величина, характеризующая состояние объекта.

Часто объект управления имеет несколько управляемых величин $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, тогда говорят об n -мерном векторе состояния объекта $x(t)$ с перечисленными компонентами. Объект управления в этом случае называют многомерным.

Примерами управляемых величин в электрической системе являются: ток, напряжение, мощность, частота вращения и т. д.

Примерами *основного возмущающего воздействия* $F_o(t)$, действующего на объект управления, являются изменение нагрузки синхронного генератора, температуры охлаждающей его среды и т. п., а *дополнительного возмущающего воздействия* $F_d(t)$, действующего на устройство управления, – изменение условий охлаждения УУ, нестабильность напряжения источников питания УУ и т. п.

Управляющее воздействие $y(t)$ вырабатывается в управляющем устройстве в соответствии с алгоритмом управления в зависимости от истинного и предписанного значений управляемой величины.

Контрольное воздействие $x_k(t) = x(t)$ – информация об истинном значении управляемой величины.

Задающее воздействие $x_3(t)$ – предписанное (желаемое) значение управляемой величины.

Алгоритм управления (алгоритм функционирования управляющего устройства) – зависимость управляющего воздействия от задающего воздействия, управляемой величины и дополнительного возмущающего воздействия.

Для одномерной АСУ алгоритм управления можно записать следующим образом:

$$y(t) = A_y[x_3(t), x(t), F_d(t)]. \quad (1.1)$$

Алгоритм функционирования объекта управления – зависимость управляемой величины от управляющего и основного возмущающего воздействий.

Для одномерной АСУ алгоритм функционирования объекта можно записать следующим образом:

$$x(t) = A_o[y(t), F_o(t)]. \quad (1.2)$$

Алгоритм функционирования объекта и алгоритм управления в совокупности образуют алгоритм функционирования АСУ.

Воздействия $F(t)$ и $x_3(t)$ являются внешними для рассматриваемой системы, а воздействия $x_k(t)$ и $y(t)$ – внутренними. Передача внешних и внутренних воздействий происходит через элементы АСУ, которые в совокупности образуют несколько цепей воздействий.

На рис. 1.1 можно указать, например, цепи воздействий от величины $x_3(t)$ к величине $y(t)$ и далее к $x(t)$, от $F_o(t)$ к $x(t)$.

Различают три стороны любого воздействия:

- *энергетическая* – сторона, проявляющаяся в процессах преобразования и передачи энергии;
- *метаболическая* – сторона, проявляющаяся в процессах преобразования формы и состава вещества;
- *информационная* – сторона, связанная с переносом каждым воздействием определенной информации.

Информационная сторона наиболее важна для изучения процессов, происходящих в АСУ. Эти процессы заключаются в преобразовании сигналов.

В автоматике *сигнал* – определенная физическая величина, отображающая в соответствии с принятой условностью информацию, содержащуюся в воздействии.

1.2. Функциональная схема

Изучение и математический анализ АСУ существенно облегчаются, если предварительно разделить ее на типовые элементы, выявить физические взаимосвязи между ними и отобразить эти взаимосвязи схематично в какой-либо условной форме.

АСУ может быть разделена на части по различным признакам: назначению частей, алгоритмам преобразования информации, конструктивной обособленности. Различают следующие структуры и структурные схемы АСУ:

- функциональную;
- структурную;
- конструктивную.

Структура – совокупность связанных между собой частей чего-либо целого; структурная схема – графическое изображение структуры.

В теории автоматического управления чаще всего имеют дело с функциональной и структурной схемами. Данные схемы состоят из условных изображений элементов и звеньев (обычно в виде прямоугольников) и различных связей, изображаемых в виде линий со стрелками, показывающих направление передачи воздействий. Каждая линия соответствует обычно одному сигналу или одному

воздействию. Около каждой линии указывают физическую величину, характеризующую данное воздействие.

Обычно вначале составляют функциональную схему АСУ, затем структурную схему.

Структурные схемы могут составляться с большей или меньшей степенью детализации. Схемы, на которых показаны лишь главные или укрупненные части АСУ, называются обобщенными (см. рис. 1.1).

Функциональная структура (схема) отражает функции (целевые назначения) отдельных частей АСУ.

Таковыми функциями могут быть:

- получение информации о состоянии объекта управления;
- преобразование сигналов;
- сравнение сигналов и т. п.

В качестве частей функциональной структуры (схемы) АСУ рассматриваются функциональные устройства. Названия устройств указывают на выполняемую функцию. Например, датчик, усилитель, блок сравнения, управляющий блок, исполнительное устройство и т. п.

На рис. 1.2 приведена упрощенная схема системы автоматического регулирования (САР) температуры в животноводческом помещении.

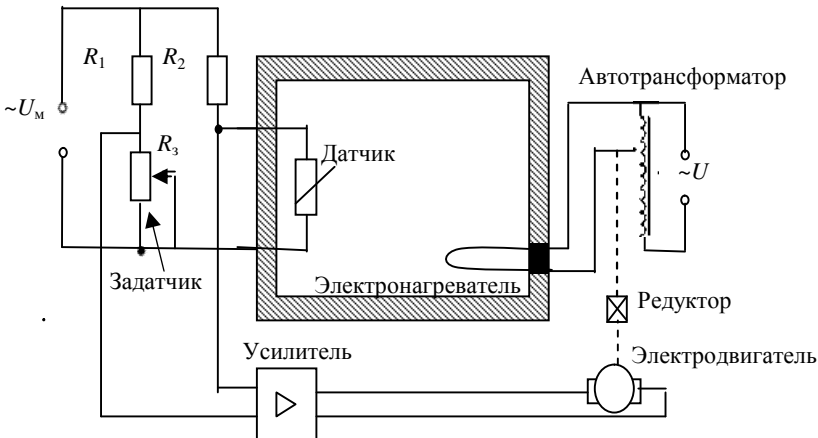


Рис. 1.2. Упрощенная схема САР температуры в животноводческом помещении

Система стабилизирует температуру в помещении в зимний период за счет изменения температуры приточного воздуха, которая регулируется путем изменения мощности электронагревателя. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры воздуха внутри помещения – термометр сопротивления R_d . Устройством сравнения является мост. Функциональная схема АСУ представлена на рис. 1.3.

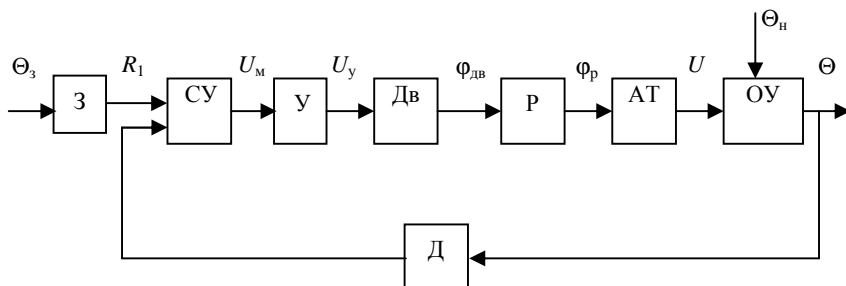


Рис. 1.3. Функциональная схема АСУ:

З – задатчик (R_1); СУ – сравнивающее устройство (мост); У – усилитель;
 Дв – двигатель; Р – редуктор; АТ – автотрансформатор; ОУ – объект управления;
 Д – датчик (термометр сопротивления); Θ_3 – заданная температура;
 R_1 – сопротивление задатчика; U_m – напряжение на выходе моста;
 U_y – напряжение на выходе усилителя; $\varphi_{дв}$ – угол поворота вала двигателя;
 φ_p – угол поворота вала редуктора; U – напряжение, подаваемое
 на электронагреватель; Θ – температура в животноводческом помещении;
 Θ_n – наружная температура; R_d – сигнал датчика

Алгоритмическая структура (схема) – структура (схема), представляющая собой совокупность взаимосвязанных алгоритмических звеньев и характеризующая алгоритмы преобразования информации в АСУ.

Алгоритмическое звено – часть алгоритмической структуры АСУ, соответствующая определенному математическому или логическому алгоритму преобразования сигнала.

Если алгоритмическое звено выполняет одну простейшую математическую или логическую операцию, то его называют *элементарным алгоритмическим звеном*. На схемах алгоритмические звенья изображают прямоугольниками, внутри которых записывают

соответствующие операторы преобразования сигналов. Иногда вместо операторов в формульном виде приводят графики зависимости выходной величины от входной или графики переходных функций.

Различают следующие виды алгоритмических звеньев:

- статические;
- динамические;
- арифметические;
- логические.

Статическое звено – звено, преобразующее входной сигнал в выходной мгновенно (без инерции).

Связь между входным и выходным сигналами статического звена описывается обычно алгебраической функцией. К статическим звеньям относятся различные безынерционные преобразователи, например резистивный делитель напряжения.

Динамическое звено – звено, преобразующее входной сигнал в выходной в соответствии с операциями интегрирования и дифференцирования во времени.

Связь между входным и выходным сигналами динамического звена описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями.

К классу динамических звеньев относятся элементы АСУ, обладающие способностью накапливать какой-либо вид энергии или вещества, например интегратор на основе электрического конденсатора.

Арифметическое звено – звено, осуществляющее одну из арифметических операций: суммирование, вычитание, умножение, деление.

Наиболее часто встречается в автоматике арифметическое звено, выполняющее алгебраическое суммирование сигналов, – сумматор.

Логическое звено – звено, выполняющее какую-либо логическую операцию: логическое умножение («И»), логическое сложение («ИЛИ»), логическое отрицание («НЕ») и т. д.

Входной и выходной сигналы логического звена являются обычно дискретными и рассматриваются как логические переменные.

Конструктивная структура (схема) – структура (схема), отражающая конкретное схемное, конструктивное и прочее исполнение АСУ.

К конструктивным схемам относятся: кинематические схемы устройств, принципиальные и монтажные схемы электрических соединений и т. д. Так как ТАУ имеет дело с математическими моделями АСУ, то в ее случае конструктивные схемы используются в значительно меньшей степени, чем функциональные и алгоритмические.

1.3. Классификация автоматических систем управления (АСУ)

Классификация АСУ может быть осуществлена по различным принципам и признакам, характеризующим назначение и конструкцию систем, вид применяемой энергии, используемые алгоритмы управления и функционирования и т. д.

Следует рассмотреть классификацию АСУ по наиболее важным для теории управления признакам, которые характеризуют алгоритм функционирования и алгоритм управления АСУ.

В зависимости от характера изменения задающего воздействия во времени АСУ разделяют на три класса:

- стабилизирующие;
- программные;
- следящие.

Стабилизирующая АСУ – система, алгоритм функционирования которой содержит предписание поддерживать значение управляемой величины постоянным:

$$x(t) \approx x_3 = \text{const.} \quad (1.3)$$

Знак \approx означает, что управляемая величина поддерживается на заданном уровне с некоторой ошибкой.

Стабилизирующие АСУ самые распространенные в промышленной автоматике. Их применяют для стабилизации различных физических величин, характеризующих состояние технологических объектов.

Программная АСУ – система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять управляемую величину в соответствии с заранее заданной функцией времени:

$$x(t) \approx x_3(t) = f_{\text{п}}(t). \quad (1.4)$$

Примером программной АСУ является система управления активной мощностью нагрузки синхронного генератора на электрической станции в течение суток. Управляемой величиной в системе служит активная мощность нагрузки P генератора. Закон изменения задания активной мощности P_3 (задающего воздействия) определен как функция времени t в течение суток (рис. 1.4).

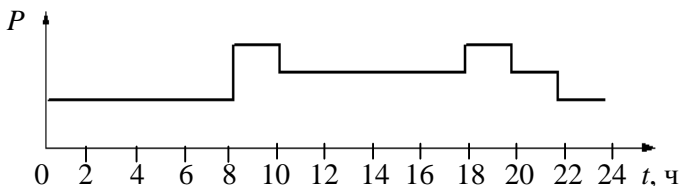


Рис. 1.4. График закона изменения задания активной мощности

Следящая АСУ – система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять управляемую величину в соответствии с заранее неизвестной функцией времени:

$$x(t) \approx x_3(t) = f_c(t). \quad (1.5)$$

Примером следящей АСУ является система управления активной мощностью нагрузки синхронного генератора на электрической станции в течение суток. Управляемой величиной в системе служит активная мощность нагрузки P генератора. Закон изменения задания активной мощности P_3 (задающего воздействия) определяется, например, диспетчером энергосистемы и имеет неопределенный характер в течение суток.

В стабилизирующих, программных и следящих АСУ цель управления заключается в обеспечении равенства или близости управляемой величины $x(t)$ к ее заданному значению $x_3(t)$. Такое управление, осуществляемое с целью поддержания

$$x(t) \approx x_3(t), \quad (1.6)$$

называется *регулированием*.

Управляющее устройство, осуществляющее регулирование, называется *регулятором*, а сама система – *системой регулирования*.

В зависимости от способа выработки управляющего воздействия замкнутые АСУ бывают:

- беспойсковые;
- поисковые.

Беспоисковая автоматическая система управления – это система, в которой управляющее воздействие вырабатывается в результате сравнения истинного значения управляемой величины с заданным значением.

Такие системы применяют для управления сравнительно несложными объектами, характеристики которых достаточно хорошо изучены и для которых заранее известно, в каком направлении и насколько нужно изменить управляющее воздействие при определенном отклонении управляемой величины от заданного значения. Таковой, например, является рассмотренная АСУ возбуждением синхронного генератора.

Поисковая автоматическая система управления – это система, в которой управляющее воздействие формируется с помощью пробных управляющих воздействий и путем анализа результатов этих пробных воздействий.

Такую процедуру поиска правильного управляющего воздействия приходится применять в тех случаях, когда характеристики объекта управления меняются или известны не полностью; например, известен вид зависимости управляемой величины от управляющего воздействия, но неизвестны числовые значения параметров этой зависимости. Поэтому поисковые системы называют еще *системами с неполной информацией*.

Наиболее часто принцип автоматического поиска управляющих воздействий применяют для управления объектами, характеристики которых имеют экстремальный характер. Целью управления является отыскание и поддержание управляющих воздействий, соответствующих экстремальному значению управляемой величины. Такие поисковые системы называют *экстремальными (оптимальными)*.

По такому принципу можно, например, строить АСУ режимом тепловой электрической станции в условиях нестабильности теплотворной способности топлива, температуры охлаждающей воды, режима нагрузки с целью обеспечения минимума затрат на производство тепловой и электрической энергии.

Особый класс АСУ образуют системы, которые способны автоматически приспособляться к изменению внешних условий и свойств объекта управления, обеспечивая при этом необходимое качество управления путем изменения структуры и параметров

управляющего устройства. Такие системы называются *адаптивными (самоприспосабливающимися)*. В составе адаптивной АСУ имеется дополнительное автоматическое устройство, которое меняет алгоритм управления основного управляющего устройства таким образом, чтобы АСУ в целом осуществляла заданный алгоритм функционирования. Обычно он предписывает максимизацию показателя качества, который характеризует либо свойства процесса управления в АСУ в целом (быстродействие, точность и т. д.), либо свойства процессов, протекающих в объекте управления (производительность, достижение наивысшего коэффициента полезного действия, минимизация затрат и т. д.). Поэтому *адаптивные АСУ* являются, как правило, еще и *оптимальными*.

По дополнительным признакам АСУ классифицируются следующим образом.

В зависимости от вида сигналов, действующих в системах, различают АСУ:

- непрерывные;
- дискретные.

Непрерывная автоматическая система управления – это система, в которой действуют непрерывные (аналоговые), определенные в каждый момент времени сигналы.

Дискретная автоматическая система управления – это система, в которой действует хотя бы один дискретный, определенный только в некоторые моменты времени сигнал.

К дискретным АСУ относятся АСУ, имеющие в своем составе цифровые вычислительные устройства: микропроцессоры, контроллеры, электронные вычислительные машины.

По степени зависимости управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия АСУ бывают:

- статические;
- астатические.

Статическая автоматическая система управления – это система, в которой имеется зависимость управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия.

Астатическая автоматическая система управления – это система, в которой отсутствует зависимость управляемой величины

в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия.

По виду дифференциальных уравнений, описывающих элементы АСУ, они бывают:

- линейные;
- нелинейные.

Линейная автоматическая система управления – это система, все элементы которой описываются линейными дифференциальными и/или алгебраическими уравнениями.

Нелинейная автоматическая система управления – это система, хотя бы один элемент которой описывается нелинейными дифференциальными и/или алгебраическими уравнениями.

В зависимости от принадлежности источника энергии, при помощи которого создается управляющее воздействие, различают АСУ:

- прямого действия;
- непрямого действия.

АСУ прямого действия – АСУ, в которой управляющее воздействие создается при помощи энергии объекта управления.

К ним относятся простейшие системы стабилизации (уровня, расхода, давления и т. п.), в которых воспринимающий элемент через рычажную систему непосредственно действует на исполнительный орган (заслонку, клапан и т. д.).

АСУ непрямого действия – АСУ, в которой управляющее воздействие создается за счет энергии дополнительного источника.

Например, в АСУ возбуждением синхронного генератора (см. рис. 1.2) напряжение управления U_y (управляющее воздействие) формируется регулятором напряжения РН, получающим энергию от дополнительного источника питания.

1.4. Фундаментальные принципы управления

В настоящее время известны и используются три фундаментальных принципа управления:

- принцип разомкнутого управления (по задающему воздействию);
- принцип компенсации возмущающего воздействия;

– принцип замкнутого управления с обратной связью (управление по отклонению).

1.4.1. Управление по задающему воздействию на систему

В системах, построенных по этому принципу, значение управляемой величины Y не используется при формировании задающего (управляющего) воздействия на объект. Точность управления зависит от влияния возмущающих воздействий F на управляемую величину Y и стабильности параметров системы.

Общая функциональная схема такой системы показана на рис. 1.5.

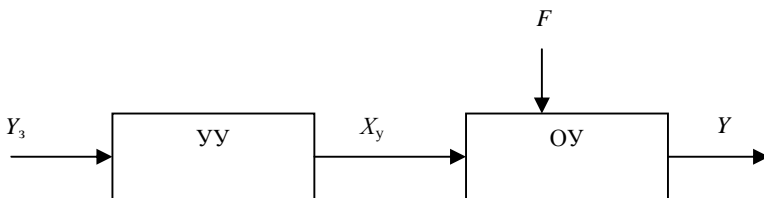


Рис. 1.5. Общая функциональная схема разомкнутой системы с управлением по задающему (управляющему) воздействию

В общем случае точность таких систем невелика, тем не менее благодаря простоте реализации они нашли широкое применение. Пример таких систем – различные автоматические дозаторы, где величина дозы зависит от времени работы дозатора.

1.4.2. Управление по возмущающему воздействию (принцип компенсации возмущающего воздействия)

В системах, построенных по этому принципу, управляющее воздействие X_y на объект формируется в зависимости от изменения возмущающего воздействия F так, чтобы ликвидировать его влияние на управляемую величину.

Общая функциональная схема таких систем приведена на рис. 1.6.

Поскольку контролировать все возмущающие воздействия невозможно, точность таких систем ограничена.

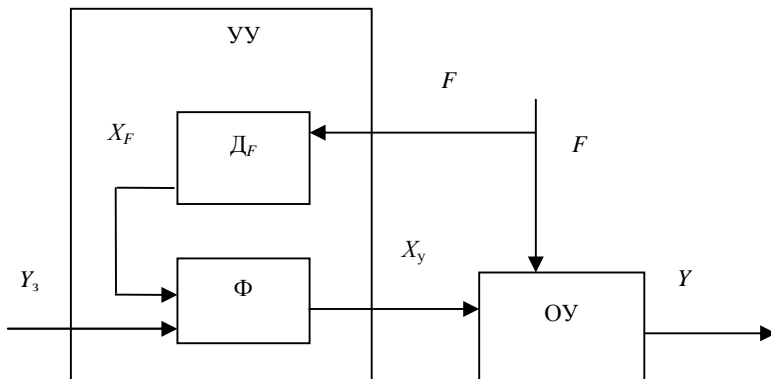


Рис. 1.6. Общая функциональная схема разомкнутых систем с управлением по возмущающему воздействию:

D_F – датчик возмущающего воздействия;

Φ – устройство, формирующее управляющее воздействие на объект

Примером таких систем является система стабилизации напряжения генератора. При изменении нагрузки ток генератора изменяется, вследствие чего изменяется и напряжение генератора. Например, при возрастании нагрузки ток увеличивается и напряжение уменьшается. Для того чтобы стабилизировать напряжение, генератор снабжают дополнительной компаундной обмоткой, по которой проходит ток равный или пропорциональный току генератора. Компаундная обмотка формирует дополнительный магнитный поток возбуждения, что стабилизирует напряжение генератора. Компенсация достигается только при изменении нагрузки. Изменение напряжения, например, вследствие изменения скорости приводного двигателя не компенсируется.

1.4.3. Принцип замкнутого управления (управление с обратной связью, управление по ошибке, управление по отклонению)

Общая функциональная схема таких систем приведена на рис. 1.7.

В системах, построенных по этому принципу, управляемая величина Y контролируется в процессе управления (измеряется датчиком D_y). На сравнивающем устройстве формируется сигнал ошибки e_c .

Управляющее воздействие X_y на объект формируется так, чтобы ликвидировать ошибку:

$$e = Y - Y_3.$$

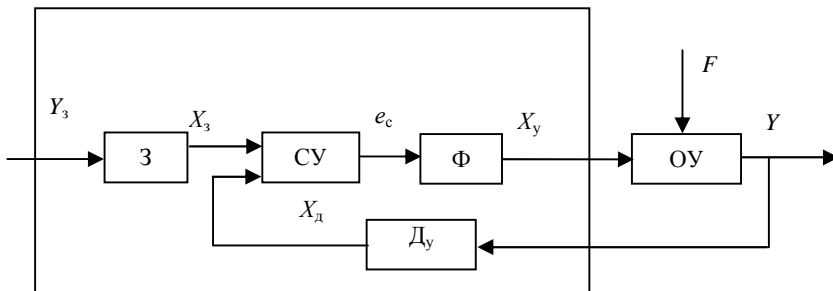


Рис. 1.7. Общая функциональная схема систем, построенных по принципу замкнутого управления:

- З – задатчик (программатор); СУ – сравнивающее устройство;
- Ф – устройство, формирующее управляющее воздействие на объект;
- ОУ – объект управления; Д_у – датчик управляемой величины;
- Y – управляемая величина; Y₃ – управляющее воздействие на систему;
- X_y – управляющее воздействие на объект; F – возмущающее воздействие;
- X₃ – сигнал задатчика; X_д – сигнал датчика; e_с – сигнал ошибки

Обратная связь, по которой сигнал Y с выхода системы подается на ее вход, называется *главной обратной связью*.

Системы, построенные по рассматриваемому принципу управления, стремятся ликвидировать ошибку независимо от природы ее происхождения.

Примером таких систем является система автоматического регулирования температуры животноводческого помещения, функциональная схема которой приведена на рис. 1.3.

1.4.4. Принцип комбинированного управления

Из-за инерционности ОУ и элементов УУ не всегда удается обеспечить требуемое быстродействие таких систем. В этом случае организуют *комбинированное управление*, когда управляющее воздействие на объект формируется в функции от ошибки e и изменения возмущающего воздействия F .

Общая функциональная схема таких систем приведена на рис. 1.8.

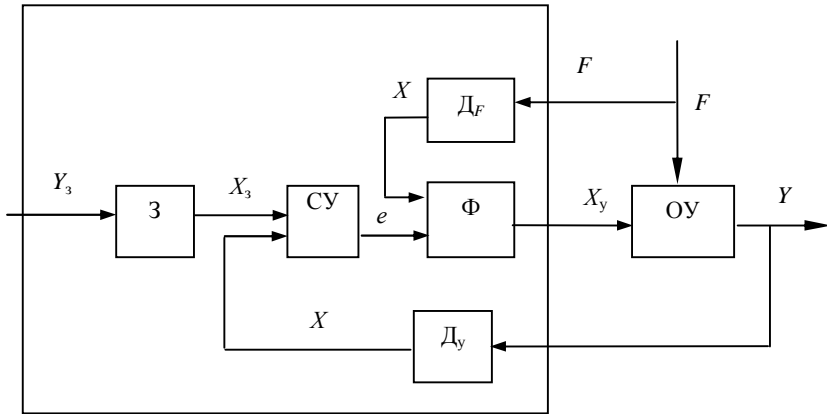


Рис. 1.8. Общая функциональная схема систем, построенных по принципу комбинированного управления

2. УСТАНОВИВШИЕСЯ И ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ. СТАТИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1. Типовые воздействия

При взаимодействии частей АСУ между собой, а также в процессе функционирования самого объекта управления осуществляется преобразование энергии одного вида в энергию другого вида. Это обусловлено различной физической природой элементов, входящих в состав АСУ. Так одна и та же система может включать в себя, например, механические, электрические и гидравлические элементы. Но процессы преобразования и перераспределения энергии в АСУ, в отличие от многих других физических систем, *строго ориентированы*, т. е. энергия и воздействия передаются только в определенном направлении.

Направленность передачи воздействий в АСУ обеспечивается благодаря наличию у одного или нескольких конструктивных элементов системы так называемого *детектирующего свойства*: рассматриваемый элемент не оказывает обратного действия на предыдущий, а его выходная величина не влияет на свою входную. Например, электрический четырехполюсник обладает *однаправленностью* передачи воздействий, если его не нагружает предшествующий четырехполюсник, т. е. если выходное сопротивление предшествующего элемента существенно меньше входного сопротивления рассматриваемого четырехполюсника.

Обычно свойством однонаправленности обладают те элементы АСУ, которые передают информационные воздействия. К таким элементам относятся в первую очередь измерители и преобразователи сигналов. Конструктивные части системы, через которые передаются энергетические воздействия, этим свойством, как правило, не обладают.

Только вследствие наличия элементов *направленного действия* в АСУ создается замкнутый контур передачи воздействий, при помощи которого и осуществляется целенаправленный процесс управления. Без таких элементов АСУ были бы неработоспособны или малоэффективны.

Большое разнообразие конструкций и условий работы АСУ определяет многообразие воздействий и сигналов. Анализ конкретных АСУ существенно упрощается, если пользоваться разработанной в ТАУ *типизацией* воздействий и сигналов.

В зависимости от характера изменения во времени различают сигналы:

- регулярный (детерминированный);
- нерегулярный.

Регулярный (детерминированный) сигнал – сигнал, который изменяется по определенному закону и может быть описан конкретной математической функцией времени. Пример регулярного сигнала приведен на рис. 2.1, а.

Нерегулярный сигнал – сигнал, который изменяется во времени случайным образом и не может быть представлен конкретной математической функцией. Характер изменения случайного сигнала во времени показан на рис. 2.1, б.

В зависимости от определенности во времени различают сигналы:

- непрерывный (аналоговый);
- дискретный.

Непрерывный (аналоговый) сигнал – сигнал, который определен в любой момент времени. Примерами такого сигнала являются сигналы, приведенные на рис. 2.1, а, б.

Дискретный сигнал – сигнал, который определен лишь в некоторые моменты времени. Пример дискретного сигнала приведен на рис. 2.1, в.

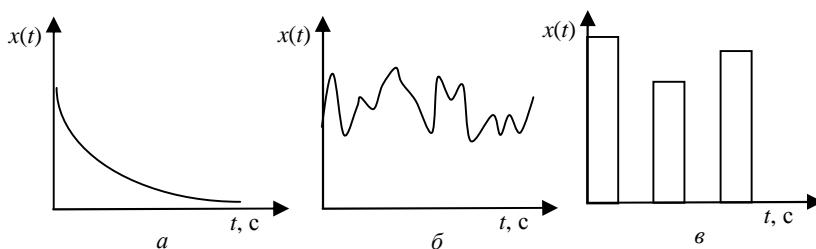


Рис. 2.1. Виды сигналов:
а, б – непрерывные; в – дискретный

При исследовании АСУ и их элементов используют ряд стандартных сигналов, называемых *типовыми воздействиями*. Эти воздействия описываются простыми математическими функциями и легко воспроизводятся при исследовании АСУ. Использование типовых воздействий позволяет унифицировать анализ различных систем и облегчает сравнение их передаточных свойств.

Наибольшее применение в ТАУ находят следующие типовые воздействия:

- ступенчатое;
- импульсное;
- гармоническое;
- линейное.

Ступенчатое воздействие – воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до некоторого значения и далее остается постоянным (рис. 2.2, а):

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1(t)a & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

где $1(t)$ – единичное ступенчатое воздействие;
 a – величина ступенчатого воздействия.

Импульсное воздействие (дельта-функция) (рис. 2.2, б):

$$x(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0; \\ 0, & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

Согласно определению:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (2.3)$$

Дельта-функция связана с единичным ступенчатым воздействием:

$$\delta(t) = 1 \cdot x(t). \quad (2.4)$$

Гармоническое воздействие (рис. 2.2, в):

$$x(t) = A_x \sin \omega t, \quad (2.5)$$

где A_x – амплитуда;
 ω – угловая частота.

Линейное воздействие – воздействие, описываемое функцией (рис. 2.2, г)

$$x(t) = 1(t)a_1 t; \quad 0 \leq t < \infty. \quad (2.6)$$

Коэффициент a_1 характеризует скорость нарастания воздействия $x(t)$.

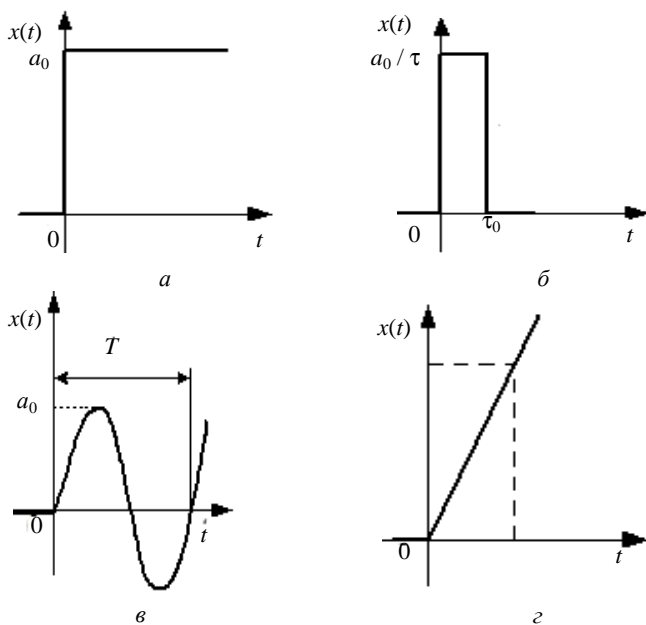


Рис. 2.2. Виды типовых воздействий

2.2. Статические и динамические установившиеся режимы

По характеру изменения выходной величины во времени различают следующие режимы элемента АСУ:

- статический;
- динамический.

Статический режим – состояние элемента АСУ, при котором выходная величина не изменяется во времени, т. е. $y(t) = \text{const}$.

Статический режим (состояние равновесия) может иметь место лишь тогда, когда входные воздействия постоянны во времени. Связь между входными и выходными величинами в статическом режиме описывают алгебраическими уравнениями.

Динамический режим – состояние элемента АСУ, при котором входная величина непрерывно изменяется во времени, т. е. $y(t) = \text{var}$.

Динамический режим имеет место, когда в элементе после приложения входного воздействия происходят процессы установления

заданного состояния или заданного изменения выходной величины. Эти процессы описываются в общем случае дифференциальными уравнениями.

Динамические режимы, в свою очередь, бывают:

- неустойчившимися (переходными);
- установившимися (квазиустановившимися).

Неустойчившийся (переходный) режим – режим, существующий от момента начала изменения входного воздействия до момента, когда выходная величина начинает изменяться по закону этого воздействия.

Установившийся режим – режим, наступающий после того, когда выходная величина начинает изменяться по тому же закону, что и входное воздействие, т. е. наступающий после окончания переходного процесса.

В установившемся режиме элемент совершает вынужденное движение. Статический режим является частным случаем установившегося (вынужденного) режима при $x(t) = \text{const}$.

Понятия «переходный режим» и «установившийся режим» иллюстрируются графиками изменения выходной величины $y(t)$ при двух типовых входных воздействиях $x(t)$ (рис. 2.3). Граница между переходным и установившимся режимами работы показана вертикальной пунктирной линией.

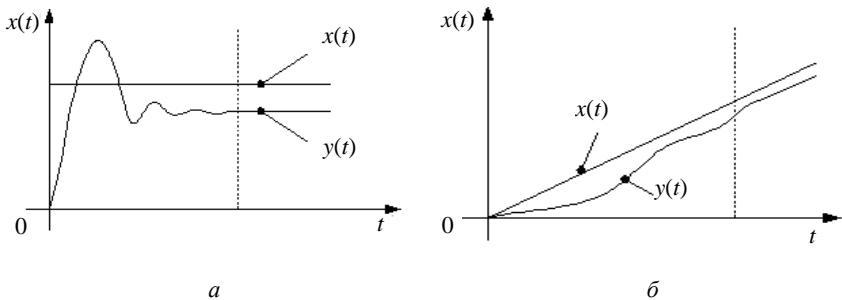


Рис. 2.3. Переходные (а) и установившиеся (б) режимы при типовых воздействиях

2.3. Статические характеристики

Передаточные свойства элементов и АСУ в статическом режиме описывают с помощью статических характеристик.

Статическая характеристика элемента – зависимость выходной величины y элемента от входной x в установившемся статическом режиме:

$$y = f(x) = y(x). \quad (2.7)$$

Статическая характеристика конкретного элемента может быть задана в аналитическом виде (например, $y = kx^2$) или в виде графика (рис. 2.4).

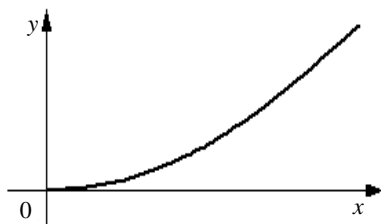


Рис. 2.4. Статическая характеристика элемента

Как правило, связь между входной и выходной величинами однозначная. Элемент с такой связью называют *статическим (позиционным)* (рис. 2.5, а). Элемент с неоднозначной связью называют *астратическим* (рис. 2.5, б, в).

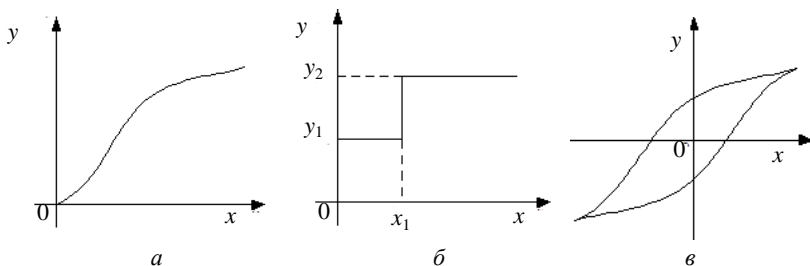


Рис. 2.5. Виды статических характеристик

По виду статических характеристик различают элементы:

- линейные;
- нелинейные.

Линейный элемент – это элемент, имеющий статическую характеристику в виде линейной функции (рис. 2.6):

$$y = b + ax. \quad (2.8)$$

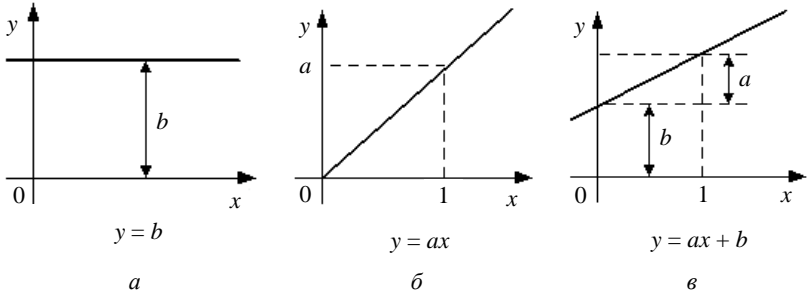


Рис. 2.6. Виды линейной функции:
 а – статическая; б – возрастающая; в – с задержкой времени

Нелинейный элемент – элемент, имеющий нелинейную статическую характеристику.

Нелинейная статическая характеристика аналитически обычно выражается в виде степенных функций, степенных полиномов, дробных рациональных функций и более сложных функций (рис. 2.7).

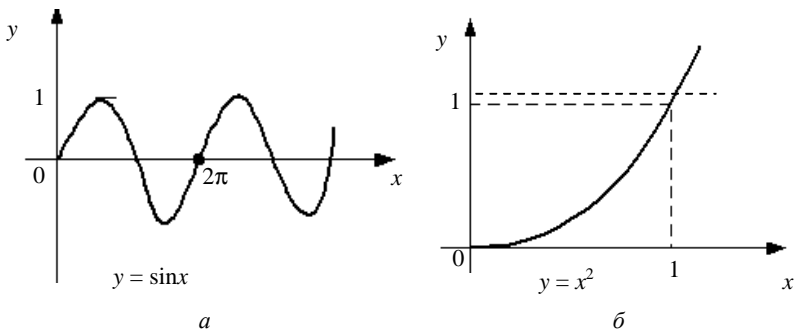


Рис. 2.7. Виды нелинейных функций:
 а – гармоническая; б – параболическая

Нелинейные элементы, в свою очередь, подразделяют:

- на элементы с существенно нелинейной статической характеристикой;
- элементы с несущественно нелинейной статической характеристикой.

2.4. Линеаризация статических характеристик

Несущественно нелинейная статическая характеристика – характеристика, описываемая непрерывной дифференцируемой функцией.

Практически это математическое условие означает, что график функции $y = f(x)$ должен иметь гладкую форму (см. рис. 2.5, а). В ограниченном диапазоне изменения входной величины x такая характеристика может быть приближенно заменена (аппроксимирована) линейной функцией. Приближенная замена нелинейной функции линейной называется *линеаризацией*. Линеаризация нелинейной характеристики правомерна, если в процессе работы элемента его входная величина меняется в небольшом диапазоне вокруг некоторого значения $x = x_0$.

Существенно нелинейная статическая характеристика – характеристика, описываемая функцией, имеющей изломы или разрывы.

Примером существенно нелинейной статической характеристики может служить характеристика реле (см. рис. 2.5, в), которое при достижении входным сигналом x (ток в обмотке реле) некоторого значения x_1 изменит выходной сигнал y (напряжение в коммутируемой цепи) с уровня y_1 до уровня y_2 . Замена такой характеристики прямой линией с постоянным углом наклона привела бы к существенному несоответствию между математическим описанием элемента и реальным физическим процессом, протекающим в элементе. Поэтому существенно нелинейная статическая характеристика линеаризации не подлежит.

Линеаризацию гладких (несущественно нелинейных) статических характеристик можно осуществлять по *методу касательной* либо по *методу секущей*.

Так, например, линеаризация по методу касательной заключается в разложении функции $y(x)$ в интервале вокруг некоторой точки x_0 в ряд Тейлора и в последующем учете первых двух членов этого ряда:

$$y(x) \approx y(x_0) + y'(x_0)(x - x_0), \quad (2.9)$$

где $y'(x_0)$ – значение производной функции $y(x)$ в заданной точке A с координатами x_0 и y_0 .

Геометрический смысл такой линеаризации заключается в замене кривой $y(x)$ касательной BC , проведенной к кривой в точке A (рис. 2.8).

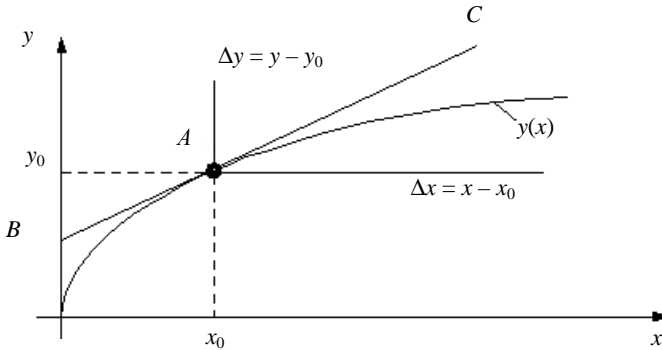


Рис. 2.8. Линеаризация статической характеристики методом касательной

При анализе АСУ линейные статические характеристики удобно рассматривать в отклонениях переменных x и y от значений x_0 и y_0 :

$$\Delta y = y - y_0; \quad (2.10)$$

$$\Delta x = x - x_0. \quad (2.11)$$

Тогда выражение (2.12) принимает вид:

$$\Delta y = k \Delta x, \quad (2.12)$$

где $k = y'(x_0)$ – передаточный коэффициент элемента, характеризующий его передаточные свойства в статическом режиме.

2.5. Временные (переходные) характеристики линейных систем и звеньев

Передаточные свойства элементов АСУ в динамическом режиме описывают с помощью временных (переходных) характеристик.

Различают следующие формы временных характеристик:

- обыкновенное дифференциальное уравнение;
- временные характеристики;
- передаточная функция;
- частотные характеристики.

Обыкновенное дифференциальное уравнение является наиболее общей и полной формой описания передаточных свойств элементов АСУ.

Для элемента, имеющего один входной сигнал $x(t)$ и один выходной $y(t)$, обыкновенное дифференциальное уравнение в общем случае имеет вид:

$$y(t), y_1(t), \dots, y_n(t); \quad x(t), \dots, x_m(t), t_1 = 0, \quad (2.13)$$

где t – независимая переменная (обычно время);

$m < n$ для реальных систем.

Это уравнение динамики (движения) элемента, когда под движением понимается любое изменение сигналов.

Дифференциальное уравнение (2.13) может быть:

- линейным;
- нелинейным.

Линейное дифференциальное уравнение – уравнение, в котором функция Φ линейна по отношению ко всем ее аргументам, т. е. к $y(t), y_1(t), \dots, y_n(t); x(t), \dots, x_m(t)$.

Так, передаточные свойства четырехполюсника с линейными элементами (рис. 2.9) описываются линейным дифференциальным уравнением вида

$$rc \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) - l(t) = 0. \quad (2.14)$$

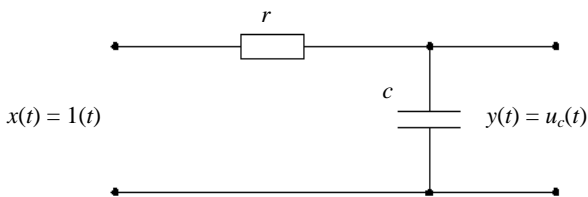


Рис. 2.9. Схема четырехполюсника с линейными элементами

Нелинейное дифференциальное уравнение – уравнение, в котором функция Φ содержит произведения, частные, степени и т. д. переменных $y(t)$, $x(t)$ и их производных.

Так, передаточные свойства четырехполюсника с нелинейным резистором (рис. 2.10) описываются нелинейным дифференциальным уравнением вида

$$r(t)c \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) - 1(t) = 0. \quad (2.15)$$

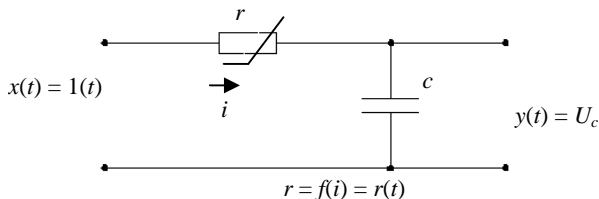


Рис. 2.10. Схема четырехполюсника с нелинейным резистором

В функцию Φ (дифференциальное уравнение) входят также величины, называемые *параметрами*. Они связывают между собой аргументы $y(t)$, $y'(t)$, $y^{(n)}(t)$; $x(t)$, ..., $x^{(m)}(t)$, t и характеризуют свойства элемента с количественной стороны (например, масса тела, активное сопротивление, индуктивность и емкость проводника и т. д.).

Большинство реальных элементов описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, что значительно усложняет последующий анализ АСУ. Поэтому от нелинейных уравнений переходят к линейным вида:

$$\begin{aligned}
 a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y(t) = \\
 = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_m x(t).
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Для всех реальных элементов выполняется условие $m \leq n$.

Коэффициенты $a_0, a_1 \dots a_n$ и $b_0, b_1 \dots b_m$ в уравнении (2.16) называются *параметрами*. Иногда параметры изменяются во времени, тогда элемент называют *нестационарным* или *с переменными параметрами*. Таковым, например, является четырехполюсник, схема которого приведена на рис. 2.10.

В дальнейшем будут рассматриваться только элементы с постоянными параметрами.

Если при составлении линейного дифференциального уравнения осуществлялась линейризация статической характеристики элемента, то оно справедливо лишь для окрестности точки линейризации и может записываться в отклонения переменных (2.10...2.13). Однако с целью упрощения записи отклонения переменных в линейризованном уравнении обозначаются теми же символами, что и в исходном нелинейном уравнении, но без символа Δ .

Важнейшим практическим достоинством линейного уравнения (2.16) является возможность применения *принципа наложения*, согласно которому изменение выходной величины $y(t)$, возникающее при действии на элемент нескольких входных сигналов $x_i(t)$, равно сумме изменений выходных величин $y_i(t)$, вызываемых каждым сигналом $x_i(t)$ в отдельности (рис. 2.11).

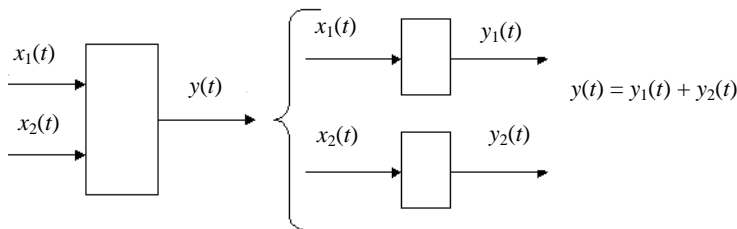


Рис. 2.11. Схема принципа наложения

2.6. Переходная функция

Дифференциальное уравнение не дает наглядного представления о динамических свойствах элемента, но такое представление дает функция $y(t)$, т. е. решение этого уравнения. Однако одно и то же дифференциальное уравнение может иметь множество решений, зависящих от начальных условий и характера входного воздействия $x(t)$, что неудобно при сопоставлении динамических свойств различных элементов. Поэтому было решено характеризовать эти свойства элемента только одним решением дифференциального уравнения, полученным при нулевых начальных условиях и одном из типовых воздействий: единичном ступенчатом, дельта-функции, гармоническом, линейном. Наиболее наглядное представление о динамических свойствах элемента дает его переходная функция $h(t)$.

Переходная функция $h(t)$ элемента – изменение во времени выходной величины $y(t)$ элемента при единичном ступенчатом воздействии и нулевых начальных условиях.

Переходная функция может быть задана:

- в виде графика;
- в аналитическом виде.

Переходная функция, как и любое решение неоднородного (с правой частью) дифференциального уравнения (2.16), имеет две составляющие:

- вынужденную $h_b(t)$ (равна установившемуся значению выходной величины);
- свободную $h_c(t)$ (решение однородного уравнения).

Вынужденную составляющую можно получить, решив уравнение (2.16) при нулевых производных и $x(t) = 1$:

$$h_b(t) = y(\infty) = \frac{b_m}{a_n}. \quad (2.17)$$

Свободную составляющую получают решением уравнения (2.16) при нулевой правой части:

$$h_c(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{p_k t}, \quad (2.18)$$

где p_k – k -й корень характеристического уравнения (в общем случае – комплексное число);

C_k – k -я постоянная интегрирования (зависит от начальных условий).

Характеристическое уравнение – алгебраическое уравнение, степень и коэффициенты которого совпадают с порядком и коэффициентами левой части линейного дифференциального уравнения вида (2.16):

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a = 0. \quad (2.19)$$

2.7. Частотные характеристики

Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов и АСУ в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием. Они находят применение в ТАУ, т. к. реальные возмущения, а следовательно, и реакции на них элемента или АСУ могут быть представлены как сумма гармонических сигналов.

Пусть на вход линейного элемента (рис. 2.12, а) в момент времени $t = 0$ подано гармоническое воздействие частотой ω

$$x(t) = x_m \sin \omega t. \quad (2.20)$$

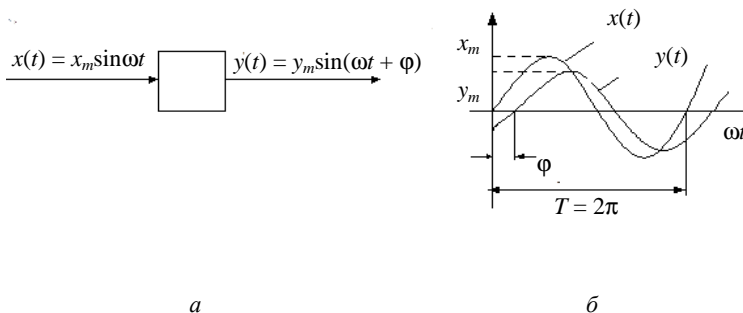


Рис. 2.12. Схема и кривые, поясняющие сущность частотных характеристик

По завершении переходного процесса устанавливается режим вынужденных колебаний и выходная величина $y(t)$ изменяется

по тому же закону, что и входная $x(t)$, но в общем случае с другой амплитудой y_m и с фазовым сдвигом φ по оси времени относительно входного сигнала (см. рис. 2.12, б):

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.21)$$

Аналогичный опыт при другой частоте ω показывает, что амплитуда y_m и фазовый сдвиг φ изменяются, т. е. зависят от частоты. Для другого элемента зависимость параметров y_m и φ от частоты ω иная. Поэтому такие зависимости могут служить характеристиками динамических свойств элементов.

В ТАУ наиболее часто используют следующие частотные характеристики:

- амплитудная частотная характеристика (АЧХ);
- фазовая частотная характеристика (ФЧХ);
- амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ).

Амплитудная частотная характеристика (АЧХ) – зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты:

$$A(\omega) = \frac{y_m}{x_m}. \quad (2.22)$$

АЧХ показывает, как элемент пропускает сигналы различной частоты. Пример АЧХ приведен на рис. 2.13, а.

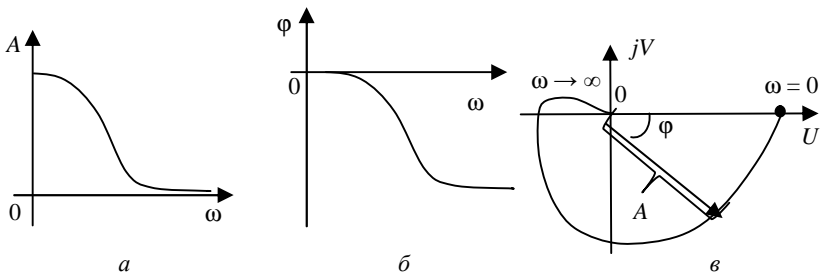


Рис. 2.13. Частотные характеристики:
а – амплитудная; б – фазовая; в – амплитудно-фазовая

Фазовая частотная характеристика ФЧХ – зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты.

ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает элемент при различных частотах. Пример ФЧХ приведен на рис. 2.13, б.

Амплитудную и фазовую характеристики можно объединить в одну общую – *амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ)*. АФЧХ представляет собой функцию комплексной переменной $j\omega$ (показательная форма):

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.23)$$

где $A(\omega)$ – модуль функции;

$\varphi(\omega)$ – аргумент функции.

Каждому фиксированному значению частоты ω_i соответствует комплексное число $W(j\omega_i)$, которое на комплексной плоскости можно изобразить вектором, имеющим длину $A(\omega_i)$ и угол поворота $\varphi(\omega_i)$ (см. рис. 2.13, в). Отрицательные значения $\varphi(\omega)$, соответствующие отставанию выходного сигнала от входного, принято отсчитывать по часовой стрелке от положительного направления действительной оси.

При изменении частоты от нуля до бесконечности вектор $W(j\omega)$ поворачивается вокруг начала координат, одновременно изменяется длина вектора. Кривая, которую при этом опишет конец вектора, и есть АФЧХ. Каждой точке характеристики соответствует определенное значение частоты.

Проекции вектора $W(j\omega)$ на действительную и мнимую оси называют соответственно *действительной* и *мнимой частотными характеристиками* и обозначают $P(\omega)$, $Q(\omega)$. Это позволяет записать АФЧХ в алгебраической форме:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (2.24)$$

Как и любую комплексную величину, АФЧХ можно также представить в тригонометрической форме:

$$W(j\omega) = A(\omega)\cos\varphi(\omega) + jA(\omega)\sin\varphi(\omega). \quad (2.25)$$

Аналитическое выражение для АФЧХ конкретного элемента можно получить из его передаточной функции путем подстановки $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = W(p). \quad (2.26)$$

Связь между различными частотными характеристиками следующая:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \quad (2.27)$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (2.28)$$

При практических расчетах АСУ (без применения электронных вычислительных машин) удобно использовать частотные характеристики, построенные в логарифмической системе координат. Такие характеристики называют *логарифмическими*. Они имеют меньшую кривизну и поэтому могут быть приближенно заменены ломаными линиями, составленными из нескольких прямолинейных отрезков. В большинстве случаев эти отрезки удается построить без громоздких вычислений при помощи простых правил. Кроме того, в логарифмической системе координат легко находить характеристики различных соединений элементов, т. к. умножению и делению обычных характеристик соответствуют сложение и вычитание ординат логарифмических характеристик.

За единицу длины по оси частот логарифмических характеристик принимают декаду.

Декада – интервал частот, заключенный между произвольным значением частоты ω_i и его десятикратным значением $10\omega_i$.

Отрезок логарифмической оси частот, соответствующий одной декаде, равен 1.

Обычно в расчетах используют *логарифмическую амплитудную частотную характеристику (ЛАЧХ)* ординаты которой измеряют в логарифмических единицах – беллах (Б) или децибеллах (дБ).

Белл – единица измерения мощностей двух сигналов:

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega). \quad (2.29)$$

Если мощность одного сигнала больше (меньше) мощности другого сигнала в 10 раз, то эти мощности отличаются на 1 Б, ($\lg 10 = 1$). Так как мощность гармонического сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды, то при применении этой единицы для измерения отношения амплитуд перед логарифмом появляется множитель 2. Например, если на некоторой частоте $A(\omega) = 100$, то это означает, что мощности входного и выходного сигналов отличаются в 100^2 раз, т. е. на $2\lg 100 = 4$ Б (40 дБ) и $L(\omega) = 20\lg A(\omega) = 40$ дБ соответственно.

При построении фазовой частотной характеристики логарифмический масштаб применяют только для оси абсцисс (оси частоты).

На рис. 2.14 показаны ЛАЧХ $L(\omega)$ (толстая линия) и соответствующая ей приближенная (асимптотическая) характеристика $L_a(\omega)$ в виде прямолинейных отрезков (тонкая линия). Частоты, соответствующие точкам стыковки отрезков, называют *сопрягающими* и обозначают ω_c .

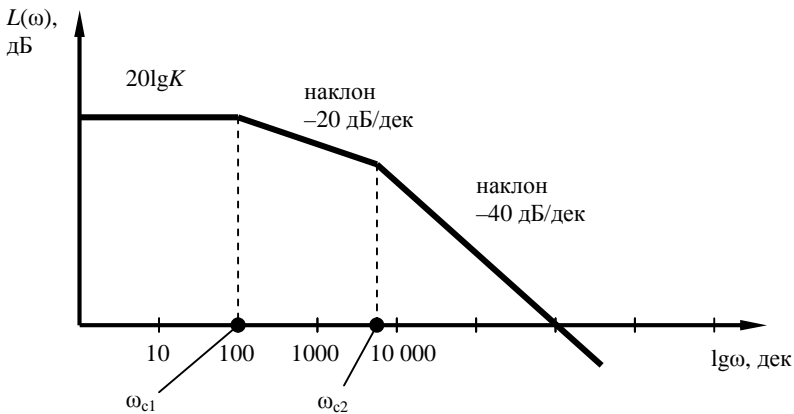


Рис. 2.14. Возможный вид ЛАЧХ

По виду частотных характеристик все элементы делятся на две группы:

- минимально-фазовые;
- неминимально-фазовые.

Минимально-фазовый элемент — элемент, у которого все полюсы и нули передаточной функции $W(p)$ имеют отрицательные действительные части.

Минимально-фазовые элементы дают минимальный фазовый сдвиг $\varphi(\omega)$ по сравнению с любыми другими элементами, имеющими такую же амплитудную характеристику $A(\omega)$, но у которой действительная часть хотя бы одного полюса или нуля положительна.

Минимально-фазовые элементы обладают важным для практических расчетов свойством: их частотная передаточная функция полностью определяется одной из трех составляющих – $A(\omega)$, $P(\omega)$ и $Q(\omega)$. Это существенно упрощает задачи анализа и синтеза минимально-фазовых систем.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ И ЗВЕНЬЕВ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАПЛАСА. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

3.1. Понятие звена

Функциональные элементы, используемые в АСУ, могут иметь самые различные конструктивное выполнение и принципы действия. Однако общность математических выражений, связывающих входные и выходные величины различных функциональных элементов, позволяет выделить ограниченное число так называемых *типовых алгоритмических звеньев*. Каждому типовому алгоритмическому звену соответствует определенное математическое соотношение между входной и выходной величинами. Если это соотношение является элементарным (например, дифференцирование, умножение на постоянный коэффициент), то и звено называется *элементарным*.

3.2. Математическое описание звеньев во временной области с помощью дифференциальных уравнений

При разработке и создании САУ, а также для анализа качества ее работы и настройки необходимо знать математическое описание

всех ее элементов, т. е. формулу, связывающую входной и выходной сигналы элемента.

Математическое описание (математические модели) систем составляют на основании законов той области знаний, к которой относится объект управления и технические средства автоматизации, образующие управляющее устройство.

Если теоретическим путем математическое описание какого-либо объекта получить затруднительно или невозможно, прибегают к *идентификации* этого объекта.

По математическому описанию системы классифицируют как линейные и нелинейные.

Линейные системы – это системы, описанные только линейными уравнениями.

Нелинейные системы – это системы, математическое описание которых содержит хотя бы одно нелинейное звено.

Линейное математическое описание почти всегда является приближенным. Такое приближенное математическое описание, если это допустимо, делают для облегчения исследования систем.

Математическое описание систем разбивают на отдельные звенья, передающие сигнал только в одном направлении – со входа на выход. Такие звенья называют *звеньями направленного действия*.

Линейные системы и звенья (кроме чистого запаздывания) описываются линейными дифференциальными уравнениями вида:

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n Y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dY}{dt} + a_n Y = \\ = b_0 x + b_1 \frac{dx}{dt} + b_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + \dots + b_m \frac{d^m x}{dt^m}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где Y – выходная величина системы или звена;

x – воздействие на систему или звено;

$n > m$.

Важнейшим свойством линейных систем и звеньев является выполнение для них *принципа суперпозиции*: реакция линейной системы или линейного звена на несколько воздействий равна сумме

реакций на отдельные воздействия. Поэтому в правой части выражения (3.1) кроме x могут суммироваться и другие воздействия.

Если у системы несколько выходных величин (многомерная система), то она описывается системой уравнений.

В теории автоматического управления выходные переменные (величины) принято располагать в уравнениях в левой части, а входные (воздействия) – в правой части уравнения. Кроме того, принято преобразовывать уравнения так, чтобы коэффициент при самой выходной величине (в данном случае Y) был равен единице.

Обе части уравнения делят на a_n и получают уравнение в принятом виде:

$$\begin{aligned} T_n^n \frac{d^n Y}{dt^n} + T_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + T_1 \frac{dY}{dt} + Y = \\ = k_0 x + k_1 \frac{dx}{dt} + k_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + \dots + k_m \frac{d^m x}{dt^m}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Коэффициенты $T_n \dots T_1$ при производных выходной величины Y называют постоянными времени. Они имеют размерность времени. Коэффициенты $k_0 \dots k_m$ при воздействиях и их производных называют коэффициентами передачи.

3.3. Структурные схемы и общие правила составления структурных схем

Из звеньев составляют структурные схемы. *Структурной схемой* называется наглядное графическое изображение математической модели (математического описания) системы. На структурной схеме каждое звено изображается прямоугольником, внутри которого записывается математическое описание звена. Связи между звеньями структурной схемы изображаются линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигналов. Над линиями ставятся обозначения сигналов.

На рис. 3.1 изображена структурная схема САР температуры в животноводческом помещении. Функциональная схема (см. рис. 1.1) и описание работы САР приведены в теме 1.

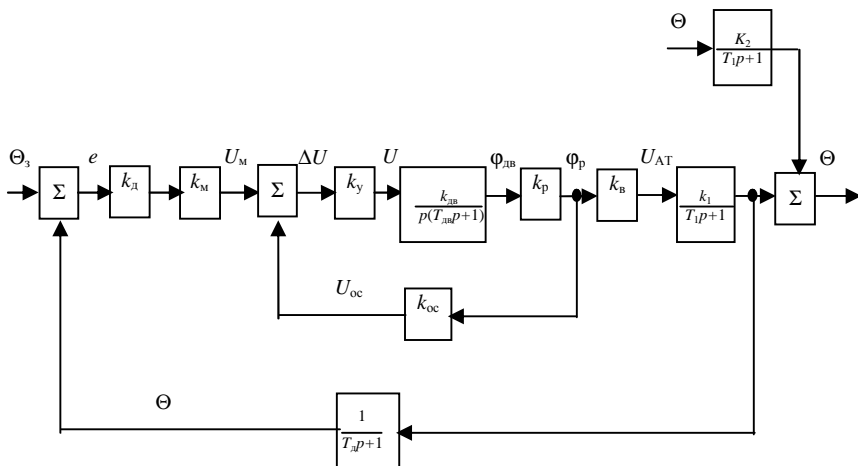


Рис. 3.1. Структурная схема САУ температуры в животноводческом помещении

3.4. Преобразование Лапласа и его основные свойства

В автоматике при математическом описании линейных систем и звеньев принято переходить от дифференциальных уравнений к передаточным функциям, что упрощает исследование систем и звеньев.

Наиболее распространенным методом описания и анализа АСУ является операционный метод (метод операционного исчисления), в основе которого лежит прямое интегральное преобразование Лапласа для непрерывных функций

$$F(p) = Z\{f(t)\} = \int f(t)e^{-pt} dt. \quad (3.3)$$

Это преобразование устанавливает соответствие между функцией действительной переменной t и функцией комплексной переменной $p = \alpha + j\beta$. Функцию $f(t)$, входящую в интеграл Лапласа (3.3), называют *оригиналом*, а результат интегрирования – функцию $F(p)$ – *изображением* функции $f(t)$ по Лапласу. Преобразование выполнимо лишь для функций, которые равны нулю при $t < 0$. Формально это условие в ТАУ обеспечивается умножением функции $f(t)$ на еди-

ничную ступенчатую функцию $1(t)$ или выбором начала отсчета времени с момента, до которого $f(t) = 0$.

Наиболее важными свойствами преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях являются:

$$Z\{f'(t)\} = pF(p); \quad (3.4)$$

$$Z\{\int f(t)dt\} = F(p) / p. \quad (3.5)$$

Операционный метод в ТАУ получил широкое распространение, т. к. с его помощью определяют так называемую *передаточную функцию*, которая является самой компактной формой описания динамических свойств элементов и систем.

С помощью прямого преобразования Лапласа дифференциального уравнения с использованием свойства (3.4) получено алгебраическое уравнение

$$D(p)Y(p) = K(p)X(p), \quad (3.6)$$

где

$$D(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + \dots + a_n - \text{собственный оператор}; \quad (3.7)$$

$$K(p) = b_0p^m + b_1p^{m-1} + \dots + b_m - \text{входной оператор}. \quad (3.8)$$

3.5. Определение и смысл передаточной функции

Передаточная функция – отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (3.9)$$

Тогда с учетом уравнения (3.6) и обозначений (3.7), (3.8) выражение для передаточной функции принимает вид:

$$W(p) = \frac{K(p)}{D(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (3.10)$$

Значение переменной p , при которой передаточная функция $W(p)$ обращается в бесконечность, называется *полюсом передаточной функции*. Полюсами являются корни собственного оператора $D(p)$.

Значение переменной p , при которой передаточная функция $W(p)$ обращается в нуль, называется *нулем передаточной функции*. Нулями являются корни входного оператора $K(p)$.

Если коэффициент $a_0 \neq 0$, то передаточная функция не имеет нулевого полюса ($p = 0$), характеризуемый ей элемент называют *астатическим* и передаточная функция этого элемента при $p = 0$ ($t = \infty$) равна передаточному коэффициенту

$$k = W(0) = \frac{b_m}{a_n}. \quad (3.11)$$

4. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СОЕДИНЕНИЙ ЗВЕНЬЕВ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

4.1. Передаточные функции звеньев, соединенных последовательно и параллельно и охваченных обратной связью

Для анализа АСУ используются их алгоритмические схемы. Для упрощения (свертывания) сложных алгоритмических схем применяются правила их преобразования.

Три главных правила относятся к трем типовым соединениям элементов:

- последовательному;
- параллельному;
- встречно-параллельному (охват обратной связью).

Если эти соединения состоят из элементов направленного действия (с детектирующим свойством), то каждое такое соединение может быть заменено одним элементом, статические и динамические характеристики которого эквивалентны свойствам соединения.

Последовательное соединение звеньев

Найти передаточную функцию $W(p)$ звена (рис. 4.1, б), эквивалентного последовательному соединению звеньев (рис. 4.1, а).

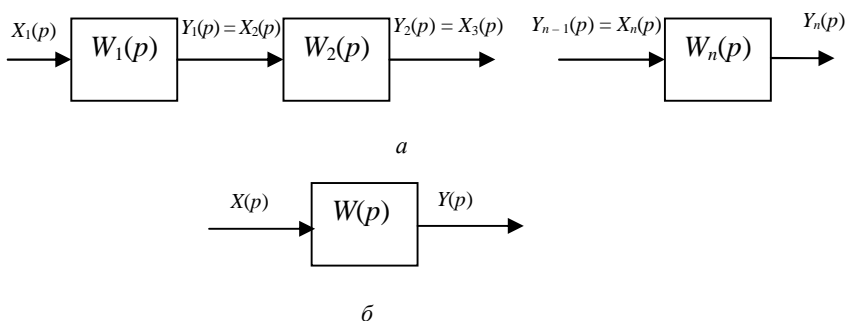


Рис. 4.1. Алгоритмические схемы последовательного соединения звеньев (а) и эквивалентного ему звена (б)

Искомая передаточная функция эквивалентного звена

$$\begin{aligned}
 W(p) &= \frac{Y_n(p)}{X_1(p)} = \frac{Y_n(p)}{X_n(p)} \cdot \frac{X_n(p)}{X_{n-1}(p)} \cdot \dots \cdot \frac{X_2(p)}{X_1(p)} = \\
 &= \frac{Y_n(p)}{X_n(p)} \cdot \frac{Y_{n-1}(p)}{X_{n-1}(p)} \cdot \dots \cdot \frac{Y_1(p)}{X_1(p)} = W_n(p) W_{n-1}(p) \cdot \dots \cdot W_1(p).
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Параллельное соединение звеньев

Найти передаточную функцию $W(p)$ звена (рис. 4.2, б), эквивалентного параллельному соединению звеньев (рис. 4.2, а).

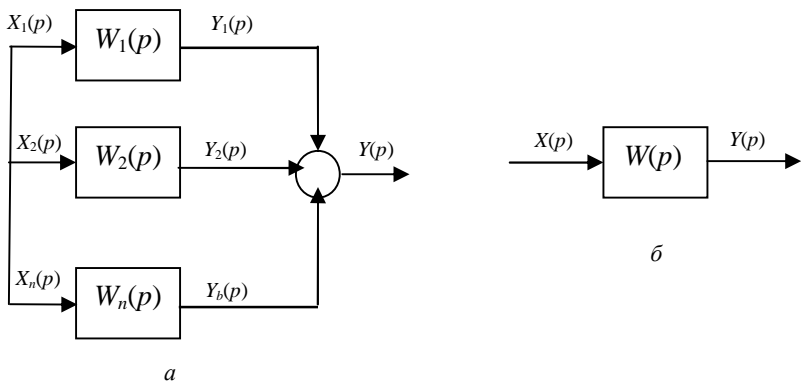


Рис. 4.2. Алгоритмические схемы параллельного соединения звеньев (а) и эквивалентного ему звена (б)

Искомая передаточная функция эквивалентного звена

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i(p)}{X(p)} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i(p)}{X_i(p)} = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (4.2)$$

Встречно-параллельное соединение звеньев

Найти передаточную функцию $W(p)$ звена (рис. 4.3, б), эквивалентного встречно-параллельному соединению звеньев (рис. 4.3, а).

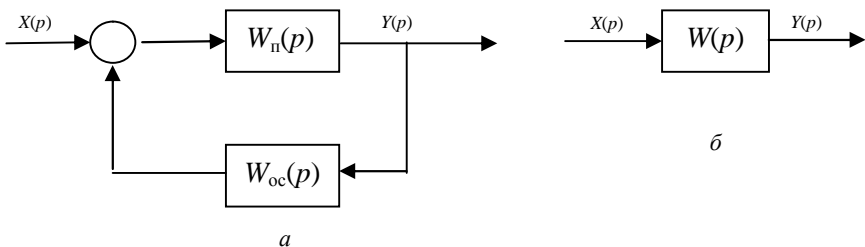


Рис. 4.3. Алгоритмические схемы встречно-параллельного соединения звеньев (а) и эквивалентного ему звена (б)

Передаточная функция соединения

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (4.3)$$

Но при этом

$$Y(p) = W_n(p)[X(p) \mathbf{m}W_{oc}(p)Y(p)], \quad (4.4)$$

где $W_n(p)$, $W_{oc}(p)$ – передаточные функции прямой цепи и цепи обратной связи встречно-параллельного соединения звеньев соответственно.

После деления обеих частей равенства (4.4) на $X(p)$ оно принимает вид:

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = W_n(p) \left[1 \mathbf{m}W_{oc}(p) \frac{Y(p)}{X(p)} \right]. \quad (4.5)$$

С учетом соотношения (4.3) в равенстве (4.5) последнее приводят к виду:

$$W(p) = W_n(p)[1 \mathbf{m}W_{oc}(p)W(p)]. \quad (4.6)$$

Путем решения уравнения (4.6) находят искомую передаточную функцию эквивалентного звена

$$W(p) = \frac{W_n(p)}{1 \pm W_n(p)W_{oc}(p)}. \quad (4.7)$$

При отрицательной обратной связи передаточная функция эквивалентного звена

$$W(p) = \frac{W_n(p)}{1 + W_n(p)W_{oc}(p)}. \quad (4.8)$$

При положительной обратной связи передаточная функция эквивалентного звена

$$W(p) = \frac{W_{\Pi}(p)}{1 - W_{\Pi}(p)W_{\text{oc}}(p)}. \quad (4.9)$$

4.2. Правила замены нескольких звеньев одним эквивалентным звеном в случаях последовательного, параллельного, встречно-параллельного соединений звеньев

Порядок приведения системы к одноконтурному виду:

1. Путем переноса воздействий ликвидируются пересекающиеся связи. При переносе пользуются принципом суперпозиции и рассмотренными передаточными функциями последовательно и параллельно соединенных звеньев. В полученных таким образом эквивалентных схемах результат преобразования сигналов должен совпадать с результатом преобразования сигналов исходной схемой.
2. Параллельно соединенные звенья заменяются эквивалентными звеньями с передаточными функциями вида (4.2).
3. Цепи, охваченные обратными связями, заменяются эквивалентными звеньями с передаточными функциями вида (4.8) и (4.9).

4.3. Передаточные функции систем автоматического регулирования

Под *типовой одноконтурной АСУ* понимается система, обобщенная функциональная схема которой приведена на рис. 4.4. Объект управления характеризуется одной управляемой переменной $X(p)$, которую требуется стабилизировать на заданном уровне $X_3(p)$. На стабилизируемую переменную $X(p)$ влияет возмущение $X_в(p)$. Отклонение стабилизируемой переменной $X(p)$, вызываемое этим возмущением, компенсируется в системе целенаправленными изменениями управляющего воздействия $Y(p)$, которое создается регулятором (управляющим устройством). На входе регулятора с передаточной

функцией $W_p(p)$ действует сигнал рассогласования (ошибки) $e(p)$. Этот сигнал формируется в результате сравнения (алгебраического суммирования) задающего воздействия $X_3(p)$ и управляемой величины $X(p)$.

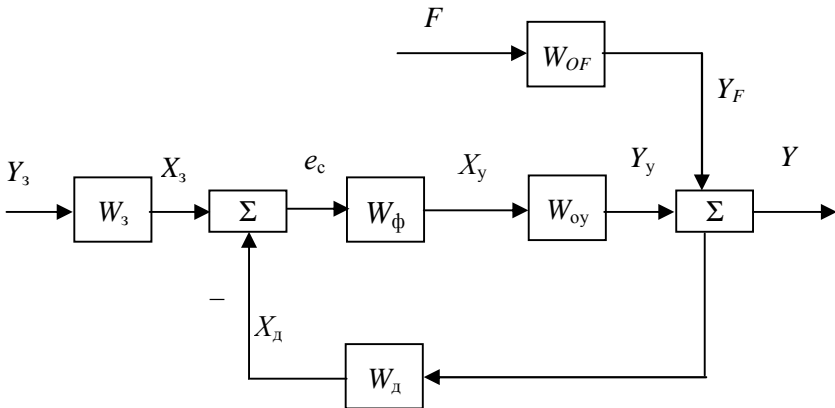


Рис. 4.4. Общая структурная схема одномерной САР:

- W_3 – передаточная функция задатчика;
- W_ϕ – передаточная функция устройства, формирующего управляющее воздействие на объект;
- W_{oy} – передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию;
- W_{OF} – передаточная функция цепи от места приложения возмущающего воздействия до выхода системы (передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию, если возмущающее воздействие приложено к объекту);
- W_d – передаточная функция датчика;
- Y_3 – управляющее (задающее) воздействие на систему;
- X_3 – сигнал задатчика;
- X_d – сигнал датчика;
- e_c – сигнал ошибки;
- X_y – управляющее воздействие на объект;
- Y_y – реакция объекта на управляющее воздействие;
- Y_F – реакция объекта на возмущающее воздействие;
- Y – регулируемая величина

При исследовании систем необходимо определить, как изменяется регулируемая величина Y и ошибка $e = Y_3 - Y$ при изменениях управляющего воздействия Y_3 и возмущающего воздействия F . Для этого пользуются четырьмя передаточными функциями. При их получении следует иметь в виду, что согласно принципу суперпозиции изменение регулируемой величины системы Y складывается из изменения регулируемой величины при изменении

управляющего воздействия Y_3 на систему и изменения регулируемой величины при изменении возмущающего воздействия F . Аналогичным образом изменение ошибки системы e складывается из изменения e_y ошибки системы при изменении управляющего воздействия Y_3 на систему и изменения e_F ошибки системы при изменении возмущающего воздействия F . Поэтому при получении передаточных функций по управляющему воздействию принимают $F = 0$, а при получении передаточных функций по возмущающему воздействию принимают $Y_3 = 0$.

Перед нахождением передаточных функций структурную схему системы необходимо привести к одноконтурному виду.

Передаточная функция САР по управляющему воздействию определяет взаимосвязь между изменением регулируемой величины Y и изменением управляющего воздействия Y_3 :

$$W_{yy}(p) = \frac{Y(p)}{Y_3(p)} = \frac{W_\phi(p)W_{oy}(p)}{1 + W_\phi(p)W_{oy}(p)W_d(p)} \quad W_3(p) = \frac{W_n(p)}{1 + W_p(p)}, \quad (4.10)$$

где $W_n(p)$ – передаточная функция прямой цепи системы;

$W_p(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы.

Передаточная функция САР по возмущающему воздействию определяет взаимосвязь между изменением регулируемой величины Y и изменением возмущающего воздействия F :

$$W_{FY}(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{W_{oF}(p)}{1 + W_p(p)}. \quad (4.11)$$

При выводе выражения (4.11) исходную структурную схему для наглядности можно привести к виду, представленному на рис. 4.5. При таком преобразовании учтено, что $Y_3 = 0$, поэтому звено W_3 можно исключить.

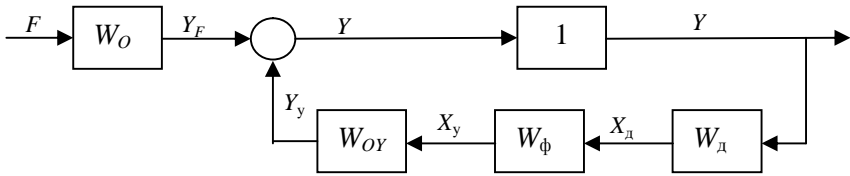


Рис. 4.5. Преобразованная структурная схема САР при условии $Y_3 = 0$

Передаточная функция САР для ошибки по управляющему воздействию определяет взаимосвязь между изменением ошибки e_y и изменением задающего воздействия Y_3 :

$$\begin{aligned}
 W_{ye}(p) &= \frac{e(p)}{Y_3(p)} = \frac{e_y(p)}{Y_3(p)} = \frac{Y_3(p) - Y(p)}{Y_3(p)} = 1 - \frac{Y(p)}{Y_3(p)} = \\
 &= 1 - \frac{W_{\Pi}(p)}{1 + W_p(p)} = 1 - \frac{W_{\Phi}(p)W_{oy}(p)W_3(p)}{1 + W_{\Phi}(p)W_{oy}(p)W_д(p)} = \\
 &= \frac{1 + W_{\Phi}(p)W_{oy}(p)W_д(p) - W_{\Phi}(p)W_{oy}(p)W_3(p)}{1 + W_p(p)}.
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Коэффициенты передачи датчика и задатчика равны друг другу, поскольку Y_3 и Y должны быть представлены в одном масштабе. Поэтому, если пренебречь инерционностью датчика и задатчика или считать их динамические свойства приблизительно одинаковыми, то $W_3 = W_д$ и передаточная функция (4.12) приобретает вид:

$$W_{ye}(p) = \frac{e_y(p)}{Y_3(p)} = \frac{1}{1 + W_p(p)}. \tag{4.13}$$

Форма выражения (4.13) удобна для исследования статических ошибок, когда инерционность звеньев системы не имеет значения.

Передаточная функция САР для ошибки по возмущающему воздействию определяет взаимосвязь между изменением ошибки e и изменением возмущающего воздействия F :

$$W_{Fe}(p) = \frac{e(p)}{F(p)} = \frac{e_F(p)}{F(p)} = \frac{Y_3 - Y}{F(p)} = -\frac{Y}{F(p)} = -\frac{W_{OF}(p)}{1 + W_p(p)} = -W_{FY}(p). \tag{4.14}$$

5. ТИПОВЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЗВЕНЬЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

5.1. Типовые линейные звенья и их характеристики

Функциональные элементы, используемые в АСУ, могут иметь самые различные конструктивное выполнение и принципы действия. Однако общность математических выражений, связывающих входные и выходные величины различных функциональных элементов, позволяет выделить ограниченное число так называемых *типовых алгоритмических звеньев*. Каждому типовому алгоритмическому звену соответствует определенное математическое соотношение между входной и выходной величинами. Если это соотношение является *элементарным* (например, дифференцирование, умножение на постоянный коэффициент), то и звено называется *элементарным*.

Алгоритмические звенья, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка, получили название *типовых динамических звеньев*.

Типовые динамические звенья являются основными составными частями алгоритмических схем непрерывных АСУ, поэтому знание их характеристик существенно облегчает анализ таких систем.

5.2. Идентификация линейных объектов управления по виду переходной функции

Для синтеза и анализа САУ необходимо иметь математические модели объекта управления и средств, входящих в систему (далее – объектов). Теоретически их можно получить путем составления дифференциальных уравнений. Однако в большинстве случаев точное математическое описание объектов получить затруднительно из-за сложности протекающих в них процессов и недостатка исходной информации. Поэтому на практике математические модели часто получают путем идентификации.

Идентификацией называют получение математической модели объекта на основании совместного анализа входных воздействий на объект и реакции объекта на эти воздействия.

При идентификации объект рассматривается как *черный ящик*, математическую модель которого необходимо найти.

Общий порядок идентификации:

1. На объект подаются тестирующие воздействия. Если объект идентифицируется в условиях эксплуатации, то записываются воздействия в этих условиях. Записывается реакция объекта на эти воздействия.

2. На основании совместного анализа воздействия на объект и реакции объекта и с привлечением всех априорных сведений о структуре объекта формируется гипотеза о структуре математического описания (модели) объекта. Оцениваются параметры модели.

3. Путем сравнения экспериментально полученной реакции и расчетной реакции по модели уточняются параметры математической модели. Если расчетная реакция достаточно точно аппроксимирует экспериментальную, то гипотеза принимается. В противном случае необходимо выдвигать новую гипотезу о структуре объекта и повторять ее проверку.

Идентификация сложных, особенно нелинейных, объектов часто оказывается задачей трудоемкой и нетривиальной. Конкретные методы ее решения определяются предполагаемой структурой объекта и формой воздействий. Наиболее просто решается вопрос идентификации линейных объектов при типовых воздействиях, поскольку в этом случае зависимость реакции объекта от вида передаточной функции (дифференциального уравнения) объекта достаточно известна. Наиболее распространенной является идентификация линейных объектов по переходной функции – реакции объекта на ступенчатое воздействие.

6. КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Алгоритмические звенья, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка, получили название *типовых динамических звеньев*.

Типовые динамические звенья являются основными составными частями алгоритмических схем непрерывных АСУ, поэтому знание их характеристик существенно облегчает анализ таких систем.

Математическое описание систем разбивают на простейшие звенья, свойства которых хорошо известны, что облегчает исследование систем. Такие звенья называют типовыми. Типовыми звеньями или их соединениями описываются отдельные элементы автоматики, составляющие систему.

Следует рассмотреть классификацию типовых линейных звеньев.

Безынерционное звено

1. Уравнение звена:

$$Y = kx. \quad (6.1)$$

2. Статическая характеристика звена:

$$Y = kx. \quad (6.2)$$

3. Передаточная и частотная передаточная функции звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{x(p)} = k; \quad (6.3)$$

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{x(j\omega)}. \quad (6.4)$$

4. Переходная функция звена (рис. 6.1):

$$h(t) = k. \quad (6.5)$$

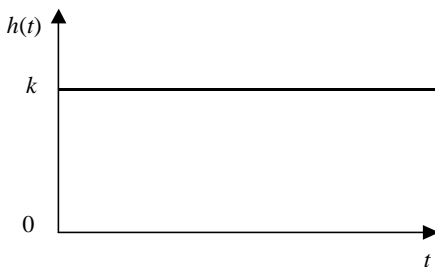


Рис. 6.1. График переходной функции безынерционного звена

5. Импульсная переходная функция звена (рис. 6.2):

$$W(t) = k\delta(t). \quad (6.6)$$



Рис. 6.2. График импульсной переходной функции безынерционного звена

График $W(t)$ изображен условно в виде импульса конечной высоты и конечной ширины. В действительности это импульс бесконечной высоты и бесконечно малой ширины, при этом

$$\int_{-\infty}^{+\infty} W(t)dt = k. \quad (6.7)$$

6. Частотные характеристики звена (рис. 6.3...6.5):

$$A(\omega) = k; \quad (6.8)$$

$$\varphi(\omega) = 0; \quad (6.9)$$

$$L(\omega) = 20 \lg k. \quad (6.10)$$

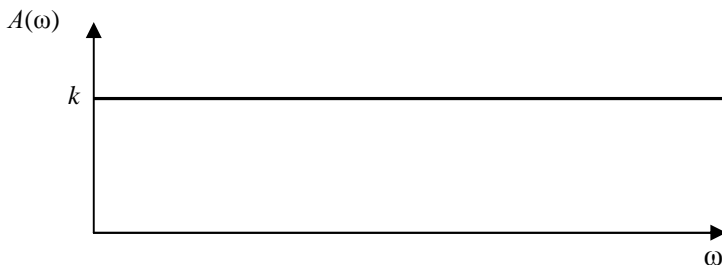


Рис. 6.3. АЧХ безынерционного звена

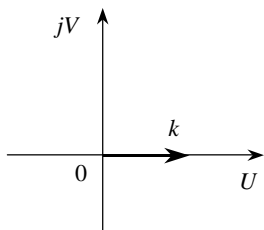


Рис. 6.4. АФЧХ
безынерционного звена

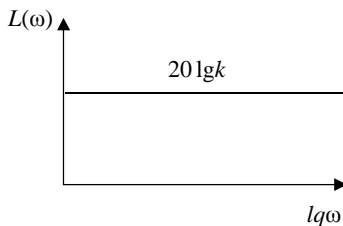


Рис. 6.5. ЛАХ
безынерционного звена

Апериодическое звено 1-го порядка

1. Уравнение звена:

$$T \frac{dY}{dt} + Y = kx. \quad (6.11)$$

2. Статические характеристики звена:

$$Y = kx. \quad (6.12)$$

3. Передаточная и частотная передаточная функции звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{x(p)} = \frac{k}{Tp + 1}; \quad (6.13)$$

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{k}{Tj\omega + 1}. \quad (6.14)$$

4. Переходная функция звена (рис. 6.6):

$$h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (6.15)$$

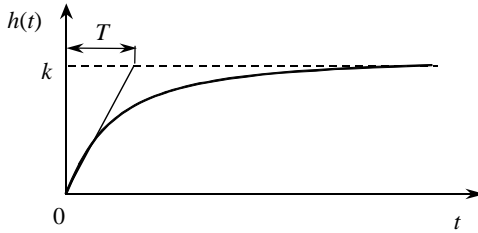


Рис. 6.6. График переходной функции аperiodического звена 1-го порядка

Касательная в начале переходной функции (показана на рис. 6.6 тонкой линией) отсекает на линии установившегося значения k переходной функции отрезок, равный постоянной времени T звена. Этот факт используется при определении значения T по графику переходной функции.

5. Импульсная переходная функция звена (рис. 6.7):

$$W(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6.16)$$

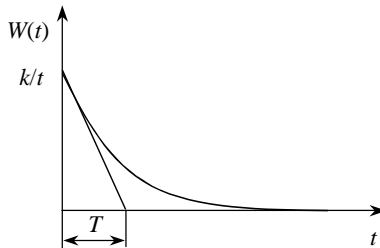


Рис. 6.7. График импульсной переходной функции звена

6. Частотные характеристики звена (рис. 6.8...6.11):

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1+T^2\omega^2}}; \quad (6.17)$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} T\omega; \quad (6.18)$$

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{1 + T^2 \omega^2}. \quad (6.19)$$

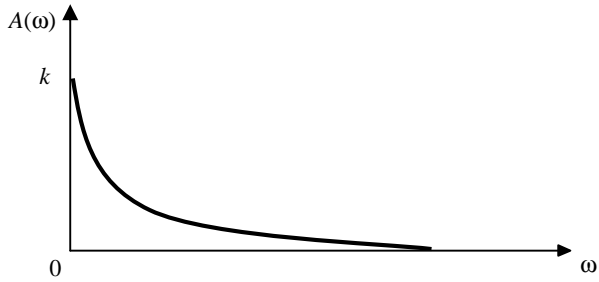


Рис. 6.8. АЧХ аperiodического звена 1-го порядка

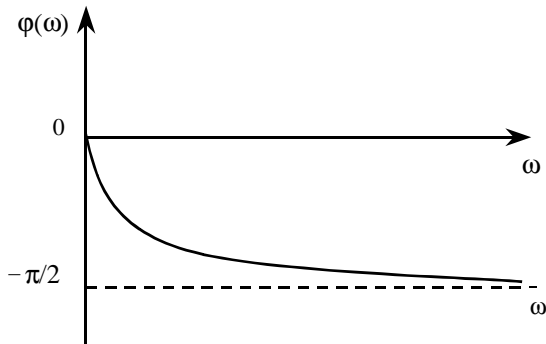


Рис. 6.9. ФЧХ аperiodического звена 1-го порядка

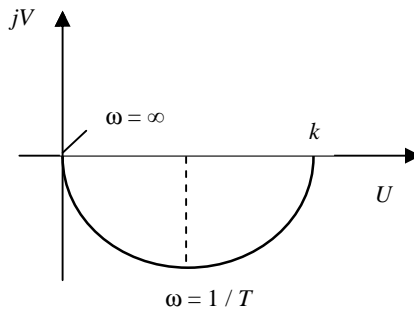


Рис. 6.10. АФЧХ аperiodического звена 1-го порядка

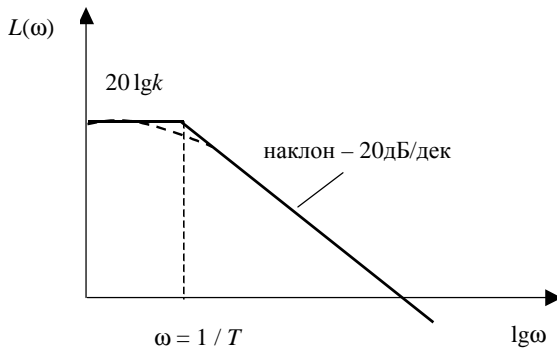


Рис. 6.11. ЛАХ аperiodического звена 1-го порядка (сплошной линией показана асимптотическая ЛАХ)

Аperiodическое звено 2-го порядка

1. Уравнение звена:

$$T_2^2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + T_1 \frac{dY}{dt} + Y = kx. \quad (6.20)$$

Постоянные времени T_1 и T_2 связаны условием $T_1 > 2T_2$, или

$$\xi = \frac{T_1}{2T_2} \geq 1. \quad (6.21)$$

2. Статические характеристики звена:

$$Y = kx. \quad (6.22)$$

3. Передаточная и частотная передаточная функции звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{x(p)} = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{k}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}; \quad (6.23)$$

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{k}{T_2^2 (j\omega)^2 + T_1 j\omega + 1} = \frac{k}{(T_3 j\omega + 1)(T_4 j\omega + 1)}; \quad (6.24)$$

$$T_1 = T_3 + T_4; \quad T_2^2 = T_3 T_4. \quad (6.25)$$

При условии (6.21) знаменатель передаточной функции разлагается на сомножители $(T_3 p + 1)$ и $(T_4 p + 1)$. Это показывает, что апериодическое звено 2-го порядка представляет собой два последовательно соединенных апериодических звена 1-го порядка с постоянными времени T_3 и T_4 , что отражено во второй форме записи передаточных функций.

4. Переходная функция звена (рис. 6.12):

$$h(t) = k \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right) \text{ при } T_3 > T_4. \quad (6.26)$$

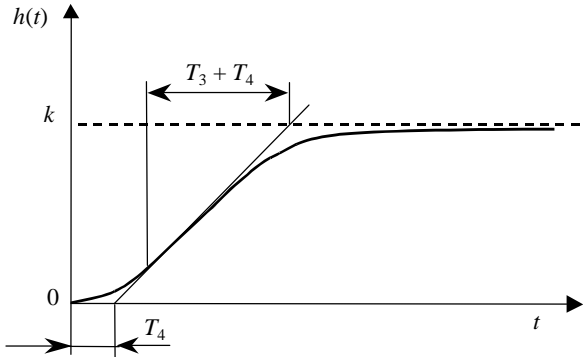


Рис. 6.12. График переходной функции апериодического звена 2-го порядка

Тонкой линией на рис. 6.12 показана касательная в точке перегиба переходной функции. Проведя касательную, можно определить постоянные времени T_3 и T_4 звена, что используется при определении значений T_3 и T_4 по графику переходной функции.

5. Импульсная переходная функция звена (рис. 6.13):

$$W(t) = \frac{k}{T_3 - T_4} (e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_4}}). \quad (6.27)$$

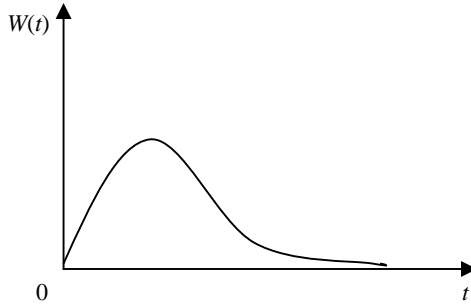


Рис. 6.13. График импульсной переходной функции аperiodического звена 2-го порядка

6. Частотные характеристики звена (рис. 6.14...6.17):

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(T_1\omega)^2 + (1 - T_2^2\omega^2)^2}} = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T_3^2} \sqrt{1 + \omega^2 T_4^2}}; \quad (6.28)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{T_1\omega}{1 - T_2^2\omega^2} = -\arctg T_3\omega - \arctg T_4\omega; \quad (6.29)$$

$$\begin{aligned} L(\omega) &= 20\lg k - 20\lg \sqrt{(T_1\omega)^2 + (1 - T_2^2\omega^2)^2} = \\ &= 20\lg k - 20\lg \sqrt{1 + T_3^2\omega^2} - 20\lg \sqrt{1 + T_4^2\omega^2}. \end{aligned} \quad (6.30)$$

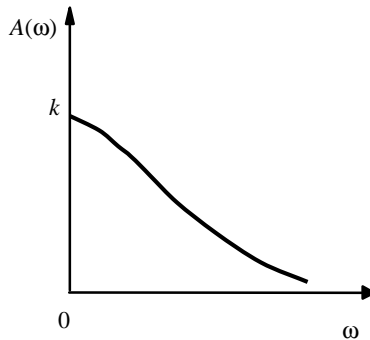


Рис. 6.14. АЧХ аperiodического звена 2-го порядка

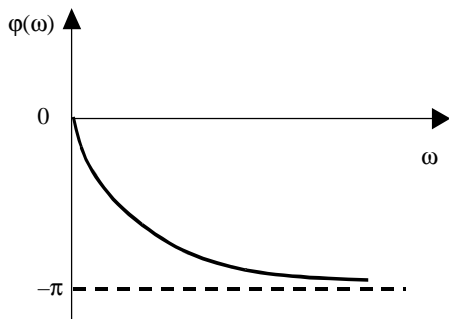


Рис. 6.15. ФЧХ апериодического звена 2-го порядка

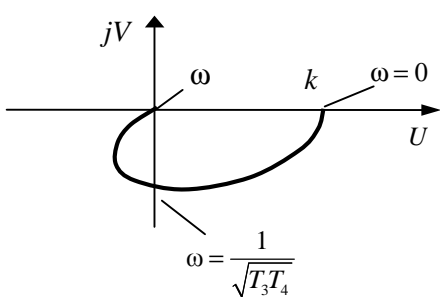


Рис. 6.16. АФЧХ

апериодического звена 2-го порядка

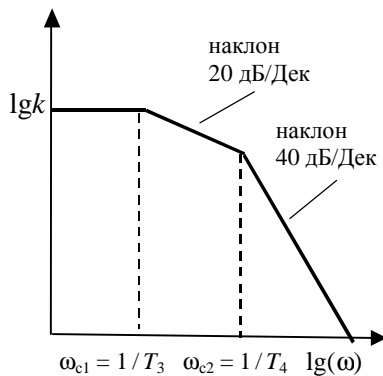


Рис. 6.17. ЛАХ

апериодического звена 2-го порядка

Колебательное звено

1. Уравнение звена:

$$T_2^2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + T_1 \frac{dY}{dt} + Y = kx. \quad (6.31)$$

Постоянные времени $T_1 < 2T_2$, или $\xi = \frac{T_1}{2T_2} < 1$.

2. Статическая характеристика звена:

$$Y = kx. \quad (6.32)$$

3. Передаточная и частотная передаточная функции звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{x(p)} = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}; \quad (6.33)$$

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{k}{T_2^2 (j\omega)^2 + T_1(j\omega) + 1}. \quad (6.34)$$

4. Переходная функция звена (рис. 6.18):

$$h(t) = k \left[1 - \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \left(\beta t + \arctg \frac{\beta}{\alpha} \right) \right], \quad (6.35)$$

где $\alpha = -\frac{T_1}{2T_2}$, $\beta = \frac{\sqrt{4T_2^2 - T_1^2}}{2T_2^2}$ – действительная и мнимая части корней характеристического уравнения звена.

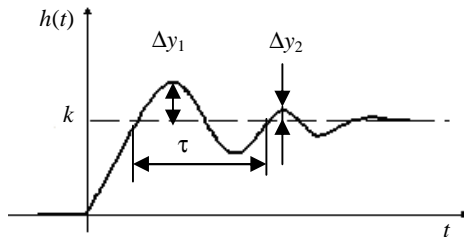


Рис. 6.18. График переходной функции колебательного звена

Величина β является частотой колебаний и может быть определена из графика переходной функции:

$$\beta = 2\pi / \tau. \quad (6.36)$$

Величина α характеризует степень затухания колебаний и может быть найдена из графика переходной функции:

$$\frac{\Delta Y_2}{\Delta Y_1} = e^{-\alpha\tau}; \quad (6.37)$$

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \ln \frac{\Delta Y_1}{\Delta Y_2}. \quad (6.38)$$

5. Импульсная переходная функция звена (рис. 6.19):

$$W(t) = \frac{k(\alpha^2 + \beta^2)}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t. \quad (6.39)$$

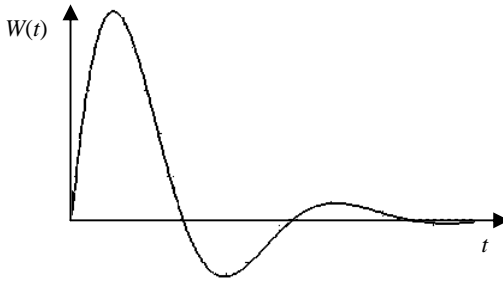


Рис. 6.19. График импульсной переходной функции колебательного звена

6. Частотные характеристики звена (рис. 6.20...6.23):

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(T_1\omega)^2 + (1 - T_2^2\omega^2)^2}}; \quad (6.40)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{T_1\omega}{1 - T_2^2\omega^2}; \quad (6.41)$$

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(T_1\omega)^2 + (1 - T_2^2\omega^2)^2}. \quad (6.42)$$

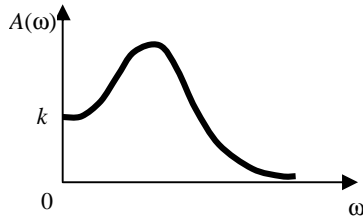


Рис. 6.20. АЧХ колебательного звена

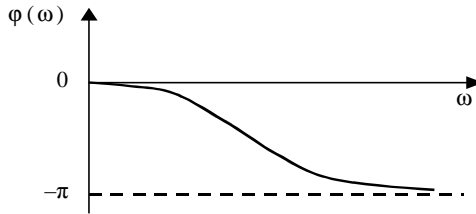


Рис. 6.21. ФЧХ колебательного звена

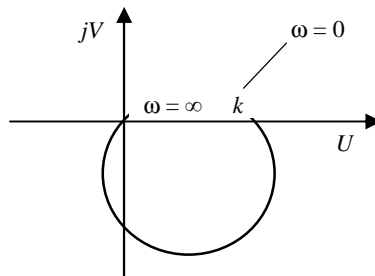


Рис. 6.22. АФЧХ колебательного звена

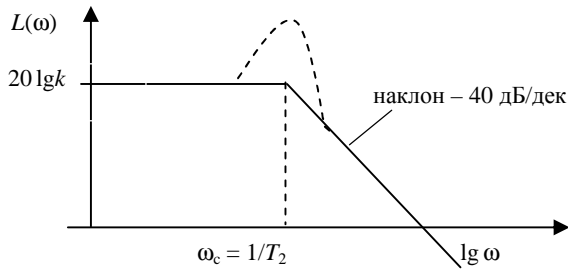


Рис. 6.23. ЛАХ колебательного звена
(сплошной линией показана асимптотическая ЛАХ)

В окрестностях частоты ω_c асимптотическая ЛАХ существенно отличается от действительной ЛАХ, поэтому в учебниках и справочниках имеются графики поправок к асимптотической ЛАХ.

Интегрирующее звено

1. Уравнение звена:

$$Y = k \int_0^t x dt, \quad \text{или} \quad \frac{dY}{dt} = kx. \quad (6.43)$$

2. Статическая характеристика звена.

У звена нет статической характеристики, поскольку при постоянном входном воздействии x выходная величина Y постоянно нарастает: $Y = kxt$. Это звено относится к астатическим звеньям.

Примечание. Рассмотренные ранее звенья относятся к статическим.

3. Передаточная и частотная передаточная функции звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{x(p)} = \frac{k}{p} = \frac{1}{T_n p}; \quad (6.44)$$

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{k}{j\omega} = \frac{1}{T_n j\omega}. \quad (6.45)$$

4. Переходная функция звена (рис. 6.24):

$$h(t) = kt. \quad (6.46)$$

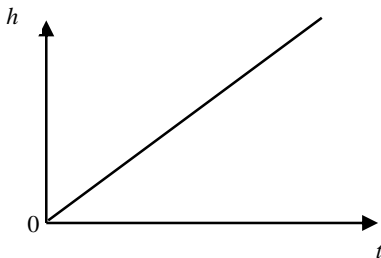


Рис. 6.24. График переходной функции интегрирующего звена

5. Импульсная переходная функция звена (рис. 6.25):

$$W(p) = h'(t) = k. \quad (6.47)$$

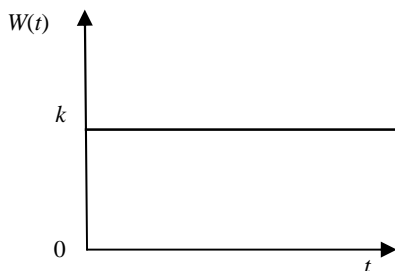


Рис. 6.25. График импульсной переходной функции интегрирующего звена

6. Частотные характеристики звена (рис. 6.26...6.29):

$$A(\omega) = \frac{k}{\omega}; \quad (6.48)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{\omega}{0} = -\arctg \infty = -\frac{\pi}{2}; \quad (6.49)$$

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega. \quad (6.50)$$

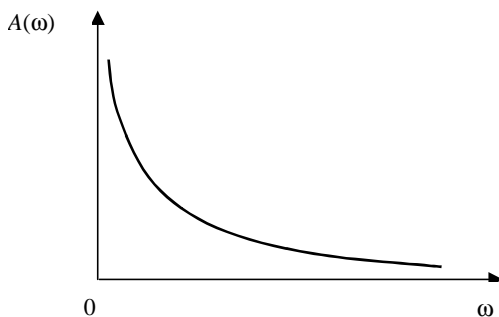


Рис. 6.26. АЧХ интегрирующего звена

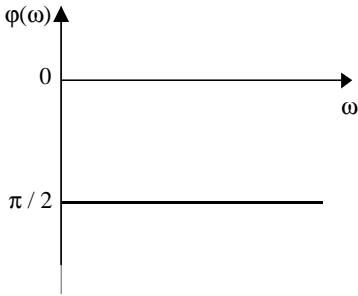


Рис. 6.27. ФЧХ интегрирующего звена

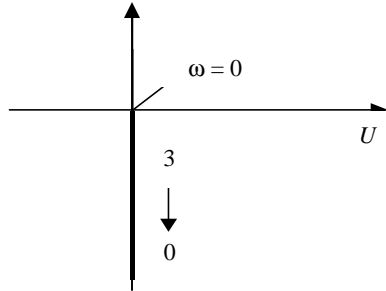


Рис. 6.28. АФЧХ интегрирующего звена

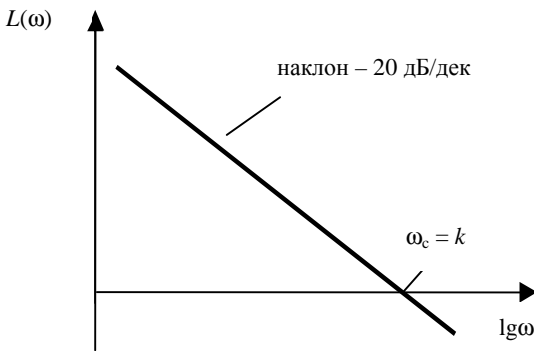


Рис. 6.29. ЛАХ интегрирующего звена

Дифференцирующее звено

1. Уравнение звена:

$$Y = k \frac{dx}{dt} \quad (6.51)$$

2. Статическая характеристика звена:

$$Y = 0. \quad (6.52)$$

3. Передаточная и частотная передаточная функции звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{x(p)} = kp ; \quad (6.53)$$

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{x(j\omega)} = kj\omega . \quad (6.54)$$

4. Переходная функция звена (рис. 6.30):

$$h(t) = k\delta(t) . \quad (6.55)$$

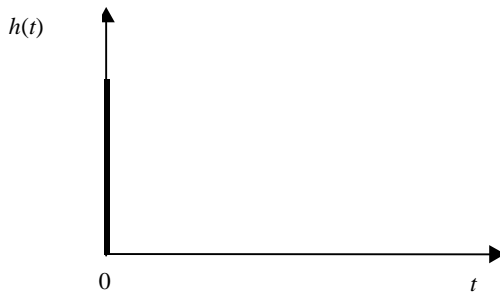


Рис. 6.30. График переходной функции дифференцирующего звена

5. Импульсная переходная функция звена (рис. 6.31):

$$W(t) = h'(t) = k\delta'(t) . \quad (6.56)$$



Рис. 6.31. График импульсной переходной функции дифференциального звена

6. Частотные характеристики звена (рис. 6.32...6.34):

$$A(\omega) = k\omega; \quad (6.57)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}; \quad (6.58)$$

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega. \quad (6.59)$$

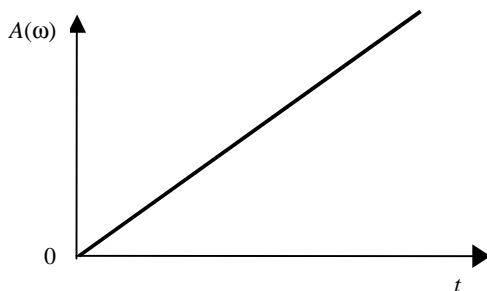


Рис. 6.32. АЧХ дифференцирующего звена

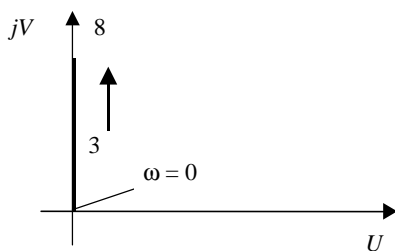


Рис. 6.33. АФЧХ дифференцирующего звена

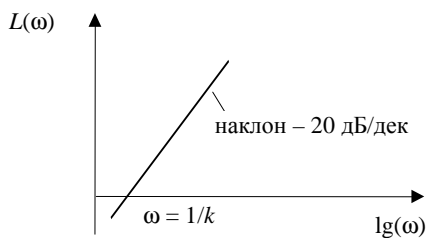


Рис. 6.34. ЛАХ дифференцирующего звена

Звено чистого (транспортного) запаздывания

1. Уравнение звена:

$$Y = kx(t - \tau), \quad (6.60)$$

где τ – время запаздывания.

2. Статическая характеристика звена:

$$Y = kx. \quad (6.61)$$

3. Передаточная и частотная передаточная функции звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{x(p)} = ke^{-p\tau}; \quad (6.62)$$

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{x(j\omega)} = ke^{-j\omega\tau}. \quad (6.63)$$

4. Переходная функция звена (рис. 6.35):

$$h(t) = kl(t - \tau). \quad (6.64)$$

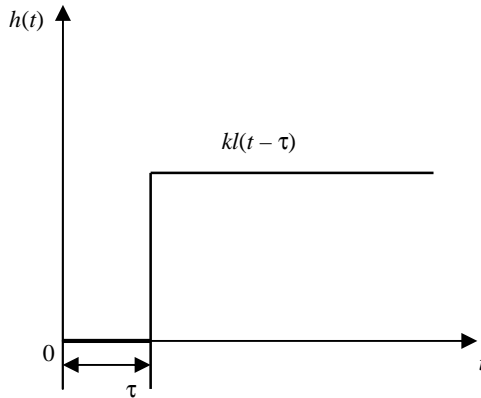


Рис. 6.35. График переходной функции звена чистого запаздывания

5. Импульсная переходная функция звена (рис. 6.36):

$$W(t) = k\delta(t - \tau). \quad (6.65)$$

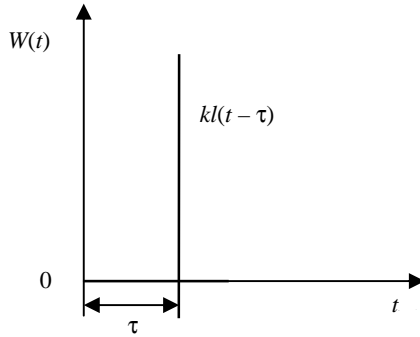


Рис. 6.36. График импульсной переходной функции звена чистого запаздывания

6. Частотные характеристики звена (рис. 6.37...6.40):

$$A(\omega) = k; \quad (6.66)$$

$$\varphi(\omega) = -\omega\tau; \quad (6.67)$$

$$L(\omega) = 20\lg k. \quad (6.68)$$

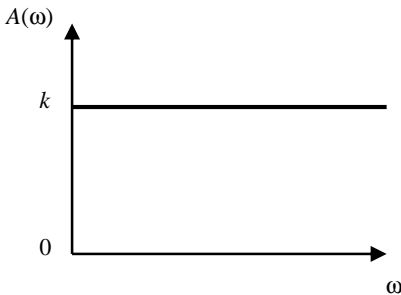


Рис. 6.37. АЧХ звена чистого запаздывания

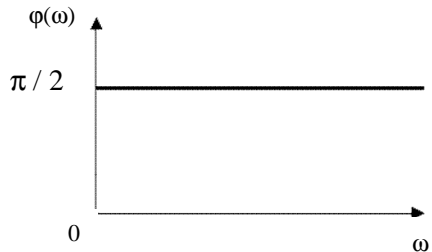


Рис. 6.38. ФЧХ звена чистого запаздывания

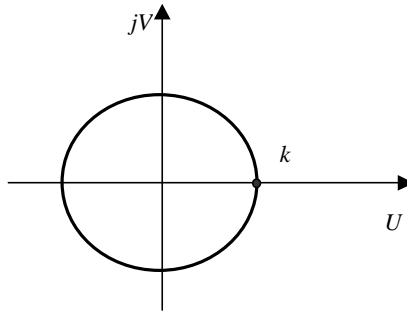


Рис. 6.39. АФЧХ звена чистого запаздывания

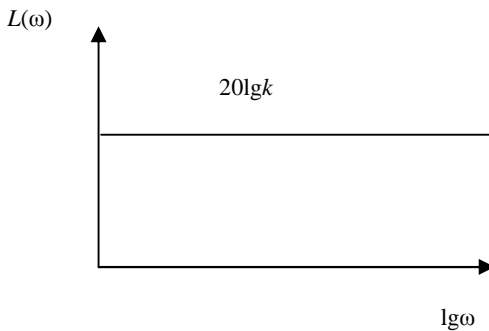


Рис. 6.40. ЛАХ звена чистого запаздывания

7. ПОНЯТИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ. ТОЧНОСТЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ

7.1. Понятие устойчивости систем автоматического управления

Одной из важнейших характеристик АСУ является ее устойчивость.

Устойчивость АСУ – свойство системы возвращаться в состояние равновесия после прекращения изменения воздействия, выведшего систему из этого состояния.

Неустойчивая АСУ не возвращается в состояние равновесия, а непрерывно удаляется от него.

От устойчивости АСУ зависит ее работоспособность. Система, не обладающая устойчивостью, не способна выполнять функции управления и имеет нулевую или даже отрицательную эффективность. Неустойчивая система может привести управляемый объект в аварийное состояние. Поэтому проблема устойчивости систем является одной из центральных в теории автоматического управления.

Проявлением, по которому можно судить об устойчивости или неустойчивости системы, является характер изменения ее сигналов во времени, например управляемой величины $x(t)$. Если управляемая величина $x(t)$ после прекращения изменения, например, задающего воздействия $x_3(t)$ становится с течением времени постоянной (рис. 7.1, а), то система ведет себя *устойчиво*. Если же управляемая величина $x(t)$ возрастает, то система ведет себя *неустойчиво* (рис. 7.1, б).

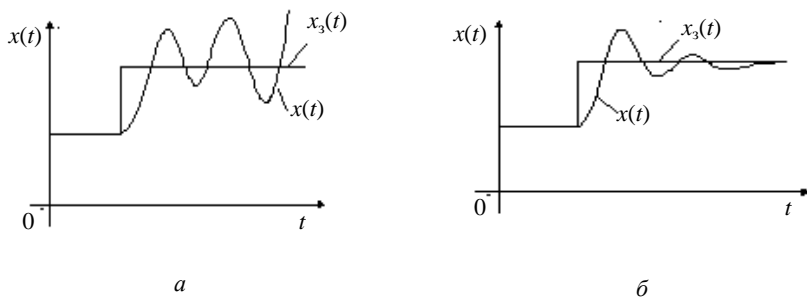


Рис. 7.1. Графики изменения сигналов АСУ во времени:
а – устойчивая АСУ; б – неустойчивая АСУ

Неустойчивость АСУ возникает, как правило, из-за неправильного (положительного) или очень сильного действия главной обратной связи, в результате чего в систему в режиме гармонических колебаний непрерывно поступает (закачивается) энергия. Энергия системы увеличивается. Увеличиваются и связанные с ней режимные параметры, например регулируемая величина. Такое явление в технике получило название резонанса.

Причинами неправильного действия главной обратной связи АСУ являются:

- выполнение главной обратной связи АСУ по ошибке положительной вместо отрицательной, что практически при любых параметрах делает систему неустойчивой;
- значительная инерционность элементов замкнутого контура АСУ (например, объекта управления), из-за которой в режиме колебаний системы сигнал главной обратной связи (например, управляемая величина) значительно отстает от входного сигнала (например, управляющего воздействия) и оказывается с ним в фазе. Это означает, что связь, выполненная конструктивно как отрицательная, в динамическом режиме (режиме гармонических колебаний) начинает на определенной частоте действовать как положительная. Это ведет к раскачиванию системы и нарушению ее устойчивости.

Задачами анализа устойчивости АСУ обычно являются:

- определение устойчивости или неустойчивости системы при заданных параметрах;
- определение допустимого по условиям устойчивости диапазона изменения некоторых незаданных параметров системы;
- выяснение принципиальной возможности устойчивости системы при заданной ее структуре.

7.2. Общее математическое условие устойчивости

Согласно физическому определению устойчивость определяется характером движения системы, когда воздействия, выведшие ее из состояния равновесия, прекратили действовать или изменяться во времени. Такое движение системы называют *свободным*. Оно происходит за счет внутренней энергии самой системы и зависит только от ее свойств (параметров).

Свободное движение линейной или линеаризованной АСУ описывается однородным дифференциальным уравнением

$$a_0 \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x(t) = 0, \quad (7.1)$$

где $x(t)$ – свободная составляющая выходной (управляемой) величины системы.

Вынужденная составляющая выходной величины, зависящая от вида внешнего воздействия и, соответственно, правой части уравнения, на устойчивость системы не влияет.

С математической точки зрения:

- *система устойчива*, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени стремится к нулю;
- *система неустойчива*, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени неограниченно возрастает;
- *система находится на границе устойчивости*, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени не стремится ни к нулю, ни к бесконечности.

Решение уравнения (7.1)

$$x(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{p_k t}, \quad (7.2)$$

где C_k – постоянные, зависящие от начальных условий;
 p_k – корни характеристического уравнения

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (7.3)$$

Корни характеристического уравнения могут быть действительными ($p_k = \alpha_k$), мнимыми ($p_k = j\beta_k$) и комплексными ($p_k = \alpha_k \pm j\beta_k$). Комплексные корни всегда попарно сопряжены между собой: если существует корень с положительной мнимой частью, то обязательно существует корень с такой же по модулю, но отрицательной мнимой частью.

Переходная составляющая (7.2) при времени $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю лишь в том случае, если каждое слагаемое вида $C_k \exp(p_k t)$ стремится к нулю. Характер этой функции времени зависит от вида корня p_k . На рис. 7.2 изображены возможные случаи расположения корней p_k на комплексной плоскости и соответствующие им функции $x_k(t)$, которые показаны внутри окружностей.

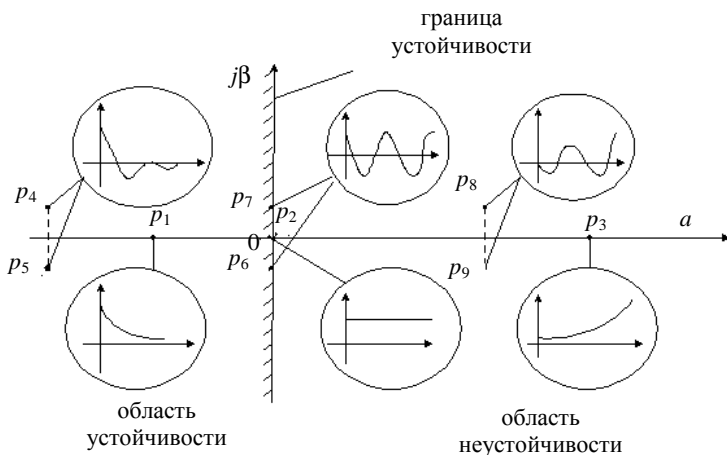


Рис. 7.2. Графики влияния корней характеристического уравнения АСУ на составляющие ее свободного движения

Анализ рис. 7.2 позволяет сформулировать *общее математическое условие устойчивости*: для устойчивости линейной АСУ необходимо и достаточно, чтобы действительные части всех корней характеристического уравнения системы были отрицательными (или чтобы все корни характеристического уравнения системы располагались в левой части комплексной плоскости).

Устойчивость системы зависит только от вида корней характеристического уравнения и не зависит от характера внешних воздействий на систему, т. е. устойчивость – внутреннее свойство системы, присущее ей вне зависимости от внешних условий. Если хотя бы один корень имеет положительную действительную часть (располагается в правой части комплексной плоскости), то система будет неустойчивой.

Мнимая ось $j\beta$ является границей устойчивости в плоскости корней. Если характеристическое уравнение имеет пару чисто мнимых корней ($p_k = +j\beta_k$, $p_{k+1} = -j\beta_k$), а все остальные корни находятся в левой части комплексной плоскости, то в системе устанавливаются незатухающие гармонические колебания с круговой частотой $\omega = |\beta_k|$. В этом случае система находится на колебательной границе устойчивости.

Если характеристическое уравнение имеет нулевой корень ($\beta = 0$), то система находится на аperiодической границе устойчивости. Если таких корней два, то система неустойчива.

Применяя сформулированное условие для оценки устойчивости реальных АСУ, следует учитывать, что линейные уравнения вида (7.1), как правило, получаются в результате упрощений и линеаризации исходных нелинейных уравнений. В какой мере оценка устойчивости по линеаризованному уравнению справедлива для реальной системы и не окажут ли существенное влияние на результат анализа отброшенные при линеаризации члены разложения, исследовал русский математик А. М. Ляпунов в 1892 г. в работе «Общая задача об устойчивости движения». Он сформулировал и доказал следующую теорему: если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один нулевой корень или одну пару мнимых корней, то судить об устойчивости реальной системы по линеаризованному уравнению нельзя. Отброшенные при линеаризации малые члены могут сделать систему неустойчивой, поэтому устойчивость реальной системы необходимо оценивать по исходному нелинейному уравнению.

Характеристическое уравнение АСУ можно составлять не только по дифференциальному уравнению (7.1) ее свободного движения, но и по ее алгоритмической схеме с известными передаточными функциями звеньев.

Пример. Получить характеристическое уравнение разомкнутой АСУ, алгоритмическая схема которой приведена на рис. 7.3, а. Ее уравнение движения

$$X(p) = W(p)X_3(p). \quad (7.4)$$

Представив передаточную функцию системы как

$$W(p) = \frac{K(p)}{D(p)}, \quad (7.5)$$

где $K(p)$ и $D(p)$ – входной и собственный операторы, уравнение движения приводят к виду:

$$X(p) = \frac{K(p)}{D(p)} X_3(p). \quad (7.6)$$

Полагая в уравнении (7.6) задающее воздействие $X_3(p) = 0$, записывают уравнение свободного движения АСУ

$$D(p)X(p) = 0, \quad (7.7)$$

откуда искомое характеристическое уравнение *разомкнутой* АСУ

$$D(p) = 0. \quad (7.8)$$

Получено характеристическое уравнение *типовой замкнутой* АСУ, алгоритмическая схема которой приведена на рис. 7.3, б.

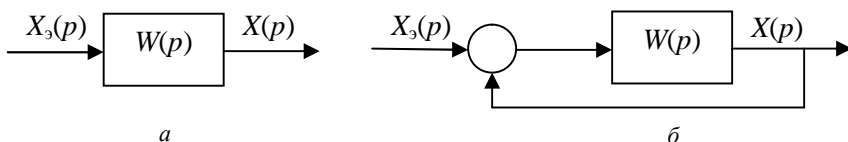


Рис. 7.3. Алгоритмические схемы АСУ:
а – разомкнутой; б – типовой замкнутой

Уравнение движения

$$X(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} X_3(p), \quad (7.9)$$

или с учетом обозначения (7.5)

$$X(p) = \frac{K(p)}{D(p) + K(p)} X_3(p). \quad (7.10)$$

Полагая в уравнении (7.10) $X_3(p) = 0$, записывают уравнение свободного движения АСУ

$$[D(p) + K(p)] X(p) = 0. \quad (7.11)$$

Тогда искомое характеристическое уравнение типовой замкнутой АСУ

$$D(p) + K(p) = 0. \quad (7.12)$$

7.3. Критерии устойчивости автоматической системы управления

Для суждения об устойчивости линейной АСУ достаточно определить знаки действительных частей корней характеристического уравнения. В ТАУ разработан ряд правил, с помощью которых можно судить о знаках действительных частей корней, не решая характеристическое уравнение и не находя числовые значения самих корней. Эти правила получили название *критериев устойчивости*.

Различают алгебраические и частотные критерии устойчивости.

Алгебраические критерии устанавливают необходимые и достаточные условия отрицательности вещественных частей корней в форме ограничений, накладываемых на определенные комбинации коэффициентов характеристического уравнения системы.

Частотные критерии определяют связь между устойчивостью системы и формой ее частотных характеристик.

Наибольшее распространение в инженерной практике нашли алгебраические критерии Гурвица и Рауса.

7.3.1. Анализ устойчивости по критерию Гурвица

Критерий был сформулирован и доказан в 1895 г. немецким математиком А. Гурвицем, который решал чисто математическую задачу исследования устойчивости линейного дифференциального уравнения по просьбе словацкого ученого А. Стодолы, занимавшегося вопросами регулирования турбин.

Применительно к задачам ТАУ критерий Гурвица можно сформулировать так: автоматическая система управления, описываемая характеристическим уравнением

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0, \quad (7.13)$$

устойчива, если при $a_0 > 0$ положительны все определители $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ вида:

$$\Delta_j = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & a_{2i-1} \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & a_{2i-2} \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & a_{2i-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & a_{i-2} & a_i \end{vmatrix}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (7.14)$$

Если хотя бы один из определителей (7.14), называемых определителями Гурвица, отрицателен, то система неустойчива.

Определители Гурвица составляют следующим образом: на главной диагонали записывают все коэффициенты характеристического уравнения от a_1 до a_i (в порядке возрастания индекса), затем в каждом столбце выше диагональных коэффициентов записывают коэффициенты с последовательно возрастающими индексами, а ниже – с последовательно убывающими индексами; на место с коэффициентами с индексами больше n или меньше нуля проставляют нули. При этом каждый i -й определитель имеет размер $i \times i$.

Так как последний столбец определителя Δ_n содержит всегда только один элемент a_n , отличный от нуля, то согласно известному свойству определителей

$$\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}. \quad (7.15)$$

Для характеристических уравнений первой и второй степеней условия устойчивости сводятся к требованию положительности всех коэффициентов.

Для уравнений третьей и четвертой степеней помимо положительности всех коэффициентов характеристического уравнения необходима положительность определителя Δ_{n-1} .

Условия устойчивости для систем с характеристическим уравнением третьей степени:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; \Delta_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0.$$

Условия устойчивости для систем с характеристическим уравнением четвертой степени:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0; \Delta_3 = a_3(a_1 a_2 + a_3 a_0) - a_4 a_1^2 > 0.$$

7.3.2. Анализ устойчивости по критерию Найквиста

Критерий устойчивости Найквиста основан на использовании АФЧХ разомкнутой системы.

Для расчета частотных характеристик разомкнутых систем пользуются частотными передаточными функциями разомкнутых систем. Строится график АФЧХ (рис. 7.4) в координатах $U(\omega)$ и $jV(\omega)$. Для этого рассчитываются $U(\omega)$ и $V(\omega)$ или $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ . Длина вектора, соединяющего начало координат с графиком АФЧХ, равна значению $A(\omega)$ при частоте ω , а угол поворота от оси U равен $\varphi(\omega)$ при частоте ω .

Формулировки критерия Найквиста

1. Если система в разомкнутом состоянии устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты от нуля до бесконечности не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$.

2. Если система в разомкнутом состоянии находится на границе устойчивости (является астатической), то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы, дополненная дугой бесконечно большого радиуса против часовой стрелки до действительной полуоси, не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$.

3. Если система в разомкнутом состоянии неустойчива, то для устойчивости в замкнутом состоянии необходимо и достаточно,

чтобы АФЧХ разомкнутой системы охватывала точку с координатами $(-1, j0)$ в положительном направлении $k/2$ раз, где k – число корней характеристического уравнения с положительной действительной частью.

Для упрощения расчетов $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ пользуются следующими правилами.

Модуль дробной частотной передаточной функции равен отношению модуля числителя к модулю знаменателя.

Модуль произведения равен произведению модулей.

Аргумент дробной частотной передаточной функции равен разности аргументов числителя и знаменателя.

Аргумент произведения равен сумме аргументов.

При анализе устойчивости пользуются также логарифмическими амплитудными (ЛАХ) и фазовыми (ЛФХ) характеристиками. Изучить этот вопрос, а также вопросы применения других критериев устойчивости и вопросы построения областей устойчивости можно в литературе [5, 14].

Разомкнутая система устойчива, если устойчивы все отдельные звенья системы после приведения ее структурной схемы к одноконтурному виду. Устойчивость отдельных звеньев определяют по любому из критериев устойчивости, например по критерию Гурвица.

На рис. 7.4 и 7.5 приведен возможный вид АФЧХ разомкнутых систем при их анализе по критерию устойчивости Найквиста.

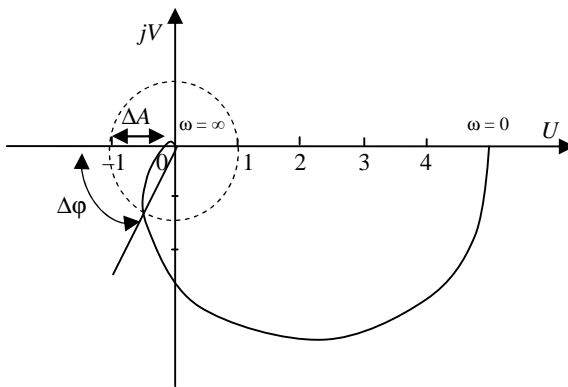


Рис. 7.4. Пример АФЧХ устойчивой разомкнутой системы

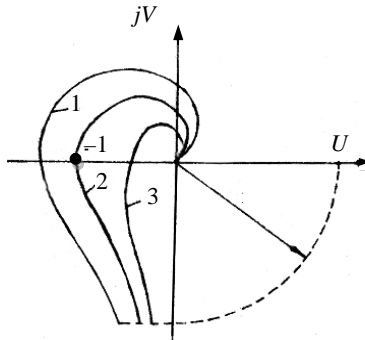


Рис. 7.5. Пример АФЧХ разомкнутой системы с астатизмом 1-го порядка, находящейся на границе устойчивости:
 1 – замкнутая система устойчива; 2 – замкнутая система неустойчива;
 3 – замкнутая система находится на границе устойчивости

7.4. Определение запасов устойчивости

При оценке устойчивости систем недостаточно одного факта устойчивости. Необходимо также оценивать величину *запаса устойчивости*, т. е. степени удаленности системы от границы устойчивости. Система, которая теоретически является устойчивой, но находится очень близко к границе устойчивости, при реализации может оказаться неустойчивой вследствие неточности математического описания системы, использованного при оценке устойчивости, а также приближенной практической реализации системы и неточностей при наладке, изменения во времени параметров системы в процессе ее эксплуатации.

Основное распространение в качестве меры запаса устойчивости получили вытекающие из критерия Найквиста две величины – запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ и запас устойчивости по амплитуде ΔA .

Запас устойчивости *по фазе* определяется величиной $\Delta\varphi$, на которую должно возрасти запаздывание по фазе, чтобы система оказалась на границе устойчивости.

Запас устойчивости *по амплитуде* определяется величиной ΔA допустимого увеличения АЧХ, при котором система окажется на границе устойчивости. Таким образом, запас по амплитуде представляет собой запас по коэффициенту передачи разомкнутой

системы по отношению к его критическому по устойчивости значению. Величины $\Delta\varphi$ и ΔA показаны на рис. 7.4.

Для определения $\Delta\varphi$ проводится дуга радиусом равным 1 до пересечения с АФЧХ.

При проектировании САУ рекомендуется выбирать $\Delta\varphi > 30^\circ$ и $\Delta A > 0,7$.

7.5. Области устойчивости систем автоматического управления

При помощи критериев устойчивости можно установить факт устойчивости или неустойчивости АСУ, все параметры которой заданы. Однако часто при проектировании и наладке АСУ возникает более общая задача анализа устойчивости – определение допустимых (по условию устойчивости) пределов изменения некоторых варьируемых параметров системы. В качестве таких параметров обычно рассматривают коэффициенты передачи и постоянные времени управляющего устройства (регулятора), которые можно целенаправленно изменять при настройке системы. Так как эти коэффициенты передачи и постоянные времени однозначно определяют коэффициенты характеристического уравнения системы, то последние также могут служить варьируемыми параметрами.

Допустимые пределы варьирования параметров системы можно определить путем построения областей устойчивости.

Область устойчивости АСУ – область в пространстве варьируемых параметров АСУ, каждой точке которой соответствуют только корни характеристического уравнения с отрицательными действительными частями (располагающиеся в левой части комплексной плоскости).

Область устойчивости выделяет из всех возможных значений варьируемых параметров лишь те значения, при которых система устойчива.

Поверхность, ограничивающая область устойчивости, называется *границей области устойчивости*.

Вид области устойчивости и ее границы определяются числом варьируемых параметров. Так, при одном варьируемом параметре α область устойчивости – отрезок прямой, а граница – точки α_1 и α_2

по концам этого отрезка (рис. 7.6, а). При двух варьируемых параметрах α и β область устойчивости – часть плоскости, а граница – например, линия AB , часть OA оси параметра α и положительная ось параметра β (рис. 7.6, б). Граница со стороны области устойчивости штрихуется.

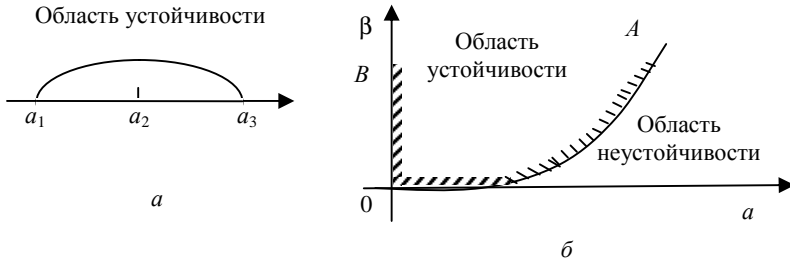


Рис. 7.6. Области устойчивости АСУ:

а – при одном варьируемом параметре; б – при двух варьируемых параметрах

7.6. Пример определения устойчивости по критерию Гурвица

Для отыскания границы области устойчивости можно воспользоваться критерием Гурвица.

Пример 1. Определить область устойчивости АСУ, описываемой характеристическим уравнением третьего порядка с одним варьируемым параметром α

$$p^3 + 3p^2 + 3p + \alpha = 0. \quad (7.18)$$

Согласно критерию Гурвица должны выполняться условия:

$$\begin{cases} a_0 = 1 > 0; \\ \Delta_1 = a_1 = 3 > 0; \\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 3 \cdot 3 - 1 \cdot \alpha > 0; \\ \Delta_3 = a_3 \Delta_2 = \alpha \Delta_2 > 0, \end{cases} \quad (7.19)$$

откуда искомая область устойчивости

$$0 < \alpha < 9. \quad (7.20)$$

Пример 2. Определить область устойчивости АСУ, описываемой характеристическим уравнением третьего порядка с двумя варьируемыми параметрами α и β

$$p^3 + 3p^2 + \beta p + \alpha = 0. \quad (7.21)$$

Согласно критерию Гурвица должны выполняться условия:

$$\begin{cases} a_0 = 1 > 0; \\ \Delta_1 = a_1 = 3 > 0; \\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 3\beta - 1 \cdot \alpha > 0; \\ \Delta_3 = a_3 \Delta_2 = \alpha \Delta_2 > 0, \end{cases} \quad (7.22)$$

откуда искомая область устойчивости

$$0 < \alpha < 3\beta. \quad (7.23)$$

В графическом виде область устойчивости представлена на рис. 7.7.

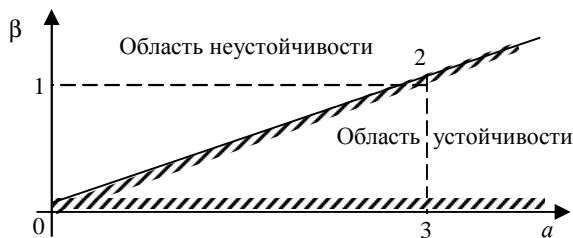


Рис. 7.7. Область устойчивости АСУ в пространстве двух параметров

7.7. Оценка качества по переходным функциям прямым методом

Существуют прямой метод оценки качества переходных процессов, интегральные методы, корневые и частотные.

Исчерпывающее представление о качестве переходного процесса дает сама кривая переходного процесса $Y(t)$. Раньше применение этого метода было ограничено из-за трудностей получения переходных процессов, в настоящее же время переходный процесс даже сложной системы можно получить путем моделирования на ЭВМ. Поэтому значение прямого метода существенно возросло.

Качество переходных процессов обычно оценивают при ступенчатых воздействиях. Для линейных систем – по переходной функции.

Следует рассмотреть основные показатели качества при их оценке по переходной функции. Возможный вид переходных функций по управляющему и возмущающему воздействиям приведен на рис. 7.8 и 7.9.

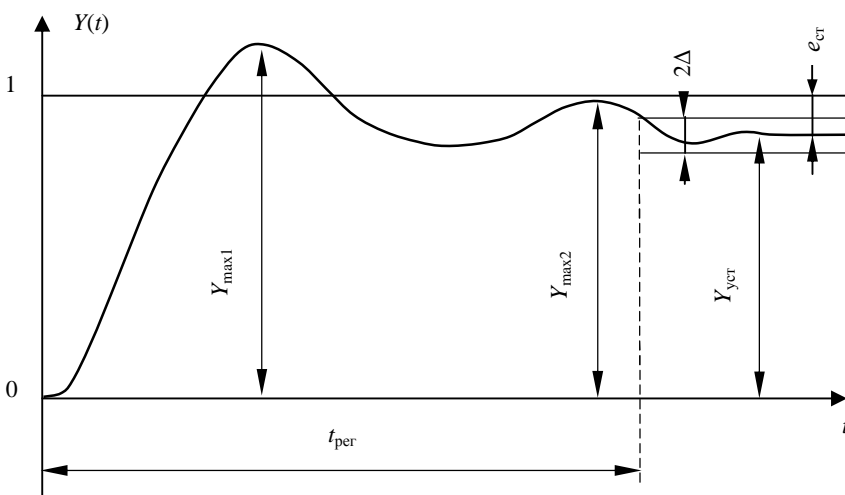


Рис. 7.8. Пример графика переходной функции САР по управляющему воздействию

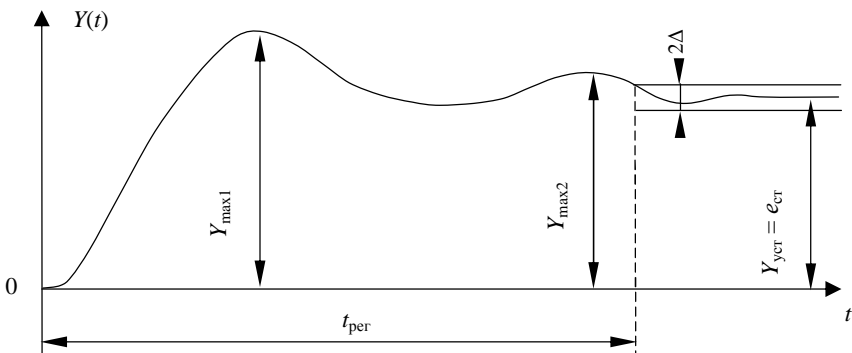


Рис. 7.9. Пример графика переходной функции САР по возмущающему воздействию

Отклонение регулируемой величины от ее установившегося значения характеризуется следующими показателями:

1. *Перерегулирование:*

$$\sigma = \frac{Y_{\max 1} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} 100 \%, \quad (7.24)$$

где $Y_{\max 1}$ — максимальное значение регулируемой величины в переходном процессе;

$Y_{\text{уст}}$ — установившееся значение регулируемой величины.

Если специальных требований к системе нет, то нормальным считается перерегулирование $\sigma < 30 \%$. Перерегулирование характеризует запас устойчивости системы. При $\sigma < 30 \%$ в большинстве случаев запас устойчивости достаточен.

Для переходных процессов по возмущающему воздействию определяется максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения, приходящееся на единицу возмущающего воздействия $F(t)$:

$$\sigma = \frac{Y_{\max 1} - Y_{\text{уст}}}{F(t)}. \quad (7.25)$$

2. *Быстродействие системы* оценивается временем регулирования. Время регулирования $t_{\text{пер}}$ определяется как интервал времени

от начала переходной функции до момента, когда отклонение регулируемой величины от ее нового установившегося значения становится меньше определенной достаточно малой величины Δ :

$$|Y(t) - Y_{уст}| < \Delta. \quad (7.26)$$

Обычно в качестве Δ берут от 1 % до 5 % от нового установившегося значения регулируемой величины для переходной функции по управляющему воздействию или от 1 % до 5 % от максимального отклонения регулируемой величины для переходной функции по возмущающему воздействию.

3. *Колебательность переходного процесса* определяется числом N перерегулирований для переходной функции по управляющему воздействию или числом колебаний N для переходной функции по возмущающему воздействию за время переходного процесса.

Обычно приемлемым числом колебаний считается $N < 2...3$. Для рассматриваемого примера $N = 1$.

Колебательность также оценивается отношением соседних отклонений регулируемой величины от установившегося значения:

$$C = \frac{Y_{\max 2} - Y_{уст}}{Y_{\max 1} - Y_{уст}}. \quad (7.27)$$

Чем меньше колебательность, тем лучше качество управления.

Иногда колебательность оценивается декрементом затухания $d = Ln \frac{1}{C}$. Применяются и другие оценки декремента затухания, например отношение соседних отклонений от $Y_{уст}$.

Перерегулирование и максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения также служат оценкой колебательности.

4. *Статическая ошибка системы* по управляющему и возмущающему воздействиям определяется как

$$e_{ст} = Y_3 - Y_{уст}, \quad (7.28)$$

где Y_3 – заданное значение регулируемой величины (для данного примера $Y_3 = 1$ для переходной функции по управляющему воздействию, $Y_3 = 0$ для переходной функции по возмущающему воздействию).

Статическая ошибка характеризует точность системы, но не качество переходных процессов. Здесь она рассматривается в связи с прямым методом оценки качества регулирования.

7.8. Интегральные критерии качества переходных процессов

Интегральные критерии позволяют оценивать качество переходных процессов в среднем от их начала до окончания (теоретически до времени, равного бесконечности).

Наиболее часто используют следующие интегральные критерии:

$$J_1 = \int \Delta Y(t) dt \rightarrow \min; \quad (7.29)$$

$$J_{1.1} = \int_0^{\infty} |\Delta Y(t)| dt; \quad (7.30)$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} (\Delta Y(t))^2 dt \rightarrow \min; \quad (7.31)$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} \left[(\Delta Y(t))^2 + T^2 \left(\frac{d\Delta Y}{dt} \right)^2 \right] dt \rightarrow \min, \quad (7.32)$$

где $\Delta Y(t) = Y_{уст} - Y(t)$ – отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения.

Смысл применения этих критериев заключается в следующем. При изменении управляющего воздействия на систему идеальный переходный процесс должен мгновенно повторять изменение управляющего воздействия (для статических систем – с некоторой статической ошибкой). При изменении возмущающего воздействия в идеальной системе переходный процесс должен отсутствовать

(для статических систем – с некоторой статической ошибкой). Например, при ступенчатом воздействии идеальная система должна мгновенно перейти в новое установившееся состояние. На практике такой мгновенный переход невозможен из-за инерционности системы и переходные процессы имеют вид, аналогичный представленным на рис. 7.10 и 7.11.

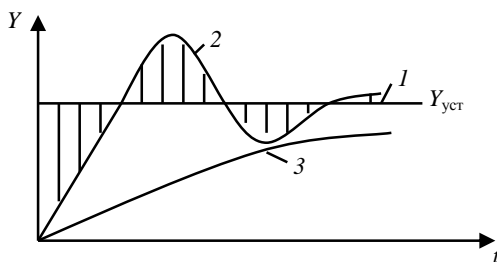


Рис. 7.10. График переходных процессов при изменении управляющего воздействия на систему:
1 – идеальный; 2, 3 – реальные

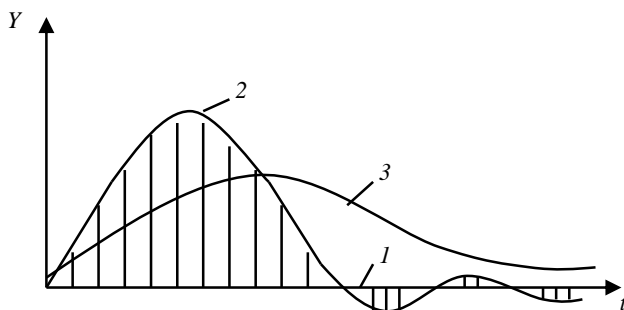


Рис. 7.11. График переходных процессов при изменении возмущающего воздействия:
1 – установившееся значение; 2, 3 – реальные переходные процессы

Близость переходных процессов к идеальным можно характеризовать площадью, ограниченной идеальным и реальным переходными процессами. На рис. 7.10 и 7.11 для процессов вида 2 эта площадь заштрихована. Критерий J_1 представляет собой эти площади, но может быть применен только в тех случаях, когда известно, что переходные процессы монотонные (имеют вид 3),

поскольку в случае колебательных процессов площади разного знака вычитаются друг из друга. Это обстоятельство ограничивает применение критерия J_1 .

Наиболее часто используют квадратичный интегральный критерий качества переходных процессов J_2 . Недостатком этого критерия является то, что при выборе параметров систем по этому критерию переходные процессы обычно обладают большой колебательностью и перерегулированием. Поэтому в тех случаях, когда такой переходный процесс неприемлем, используют интегральный критерий J_3 .

Разницу между критериями J_2 и J_3 можно пояснить следующим образом [5]. В случае использования J_2 идеальным переходным процессом, при стремлении к которому $J_2 \rightarrow 0$, является ступенька с высотой $Y_{уст}$ (см. рис. 7.10). В случае же использования критерия J_3 идеальным переходным процессом, к которому стремятся, минимизируя J_3 , является экспонента $(1 - e^{-t/T}) Y_{уст}$. Поэтому переходный процесс системы, параметры которой выбраны по критерию J_3 , будет более медленным, но с меньшим перерегулированием. Замедление процесса тем больше, чем больше взята величина T .

Существуют готовые зависимости, выражающие приведенные критерии через коэффициенты передаточной функции системы. Это позволяет использовать их при синтезе систем.

С появлением ЭВМ интегральные критерии начали применять для выбора оптимальных параметров настройки систем регулирования путем моделирования на ЭВМ. При моделировании оценки интегральных критериев могут быть непосредственно вычислены, а параметры системы – подобраны экспериментально в процессе моделирования, что существенно облегчило процесс выбора оптимальных параметров. Наиболее часто при моделировании используют критерий J_2 . При синтезе путем моделирования на ЭВМ недостаток критерия J_2 легко устраняется введением ограничений, например на перерегулирование: $\sigma \leq \sigma_{доп}$. Критерий J_3 более сложен в применении, и при моделировании его не используют.

Кроме интегральных методов широкое применение нашли корневые и частотные критерии качества переходных процессов.

Частотные критерии позволяют судить о качестве переходных процессов по частотным характеристикам системы. *Корневые* кри-

теории позволяют судить о качестве переходных процессов по значениям полюсов и нулей передаточной функции системы. Изучить эти вопросы можно по литературе, посвященной теории автоматического управления и регулирования, например [5, 14, 15].

7.9. Статическая точность линейных систем по управляющему и возмущающему воздействиям

7.9.1. Понятия статических и астатических звеньев и систем

Статическим звеном называют звено, не содержащее интегрирующих звеньев, последовательно соединенных со всеми другими звеньями, входящими в звено.

Статические звенья имеют статические характеристики.

Передаточная функция линейного статического звена имеет вид:

$$W_c = \frac{k_0 + k_1 p + \dots + k_m p^m}{T_n^n p^n + T_{n-1}^{n-1} p^{n-1} + \dots + T_1 p + 1}. \quad (7.33)$$

Астатическим звеном называют звено, содержащее интегрирующие звенья, последовательно соединенные со всеми другими звеньями, входящими в звено.

Передаточная функция линейного астатического звена имеет вид:

$$W_a = \frac{k_0 + k_1 p + \dots + k_m p^m}{T_n^n p^n + T_{n-1}^{n-1} p^{n-1} + \dots + T_1 p + 1} \frac{1}{p^k} = W_c \frac{1}{p^k}, \quad (7.34)$$

где k – степень астатизма звена (количество интегрирующих звеньев).

Статической системой называют систему в разомкнутом состоянии, представляемую статическим звеном:

$$W_{c.p} = W_c. \quad (7.35)$$

Астатической системой называют систему в разомкнутом состоянии, представляемую астатическим звеном:

$$W_{a.p} = W_c \frac{1}{p^L}, \quad (7.36)$$

где L – степень астатизма системы.

7.9.2. Оценка точности в статических режимах

В статических режимах точность оценивают статическими ошибками по управляющему e_y и возмущающему e_F воздействиям, которые находятся по передаточным функциям с учетом вида передаточных функций разомкнутых систем.

Для *статических систем*:

$$e_y = \frac{1}{1 + W_{c.p}} \Big|_{p=0} y_3 = \frac{1}{1 + k_{\text{раз}}} y_3; \quad (7.37)$$

$$e_F = \frac{W_F}{1 + W_{c.p}} \Big|_{p=0} F = \frac{k_F}{1 + k_{\text{раз}}} F, \quad (7.38)$$

где $k_{\text{раз}}$ – коэффициент передачи разомкнутой системы (k_0 для общего вида уравнения);

k_F – коэффициент передачи звена W_F .

Случай, когда звено W_F является астатическим, не рассматривается, поскольку ошибка превращается в бесконечность, система оказывается неработоспособной и не может быть реализована в таком виде.

Для *астатических систем*:

$$e_y = \frac{1}{1 + W_{a.p}} \Big|_{p=0} y_3 = 0; \quad (7.39)$$

$$e_F = \frac{W_F}{1 + W_{a.p}} \Big|_{p=0} F = 0 \text{ при } L > k; \quad (7.40)$$

$$e_F = -\frac{W_F}{1 + W_{a.p}} \Big|_{p=0} F = -\frac{k_F}{k_{\text{раз}}} \text{ при } L = k. \quad (7.41)$$

Случай, когда $L < k$, не рассматривается, поскольку ошибка превращается в бесконечность, система оказывается неработоспособной и не может быть реализована в таком виде.

7.9.3. Оценка точности при гармонических воздействиях

Пусть управляющее воздействие или возмущающее воздействие на систему изменяются по гармоническому закону:

$$Y_3 = A_Y \sin \omega t; \quad (7.42)$$

$$F = A_F \sin \omega t. \quad (7.43)$$

Тогда ошибка системы также будет меняться по гармоническому закону:

$$e_Y = A_{Y_e} \sin(\omega t + \phi_Y); \quad (7.44)$$

$$e_F = A_{F_e} \sin(\omega t + \phi_F), \quad (7.45)$$

где A_{Y_e} и A_{F_e} – амплитуды ошибок по управляющему и возмущающему воздействиям.

Амплитуды ошибок могут быть найдены как произведения Y_3 и F на модули соответствующих передаточных функций) для ошибок:

$$A_{Y_e} = |W_{Y_e}(j\omega)| Y_3; \quad (7.46)$$

$$A_{Fe} = |W_{Fe}(j\omega)| F. \quad (7.47)$$

Для следящих систем важным показателем также является разность фаз между заданным и действительными значениями регулируемой величины:

$$\varphi(\omega) = \arg W_Y(j\omega). \quad (7.48)$$

Чем меньше значение $\varphi(\omega)$, тем лучше качество регулирования.

7.9.4. Оценка точности при стационарных случайных воздействиях

При случайных воздействиях $F(t)$ или $Y_3(t)$ точность оценивается средним квадратом ошибки:

$$e^2(t) = M [e^2(t)] = m_e^2 + D_e, \quad (7.49)$$

где m_e – среднее значение ошибки;

D_e – дисперсия ошибки.

В случае центрированного случайного процесса точность оценивается только дисперсией D_e .

8. ТИПОВЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

8.1. Виды типовых линейных законов регулирования

Законом регулирования называют математическую зависимость, в соответствии с которой управляющее воздействие на объект формировалось бы безынерционным регулятором в функции от ошибки системы.

Наиболее часто используют следующие линейные законы регулирования, которые иногда называют типовыми линейными законами регулирования.

Пропорциональный (П-закон) – управляющее воздействие X_y на объект формируется пропорционально ошибке e :

$$X_y = K_p e; \quad (8.1)$$

$$W_\Phi(p) = \frac{X_y(p)}{e(p)} = K_p, \quad (8.2)$$

где W_Φ – передаточная функция безынерционного регулятора;

K_p – коэффициент передачи регулятора.

Интегральный закон (И-закон) – управляющее воздействие на объект формируется пропорционально интегралу ошибки:

$$X_y = K_i \int_0^t e dt = \frac{1}{T_u} \int_0^t e dt; \quad (8.3)$$

$$W_\Phi(p) = \frac{X_y(p)}{e(p)} = \frac{K_i}{p} = \frac{1}{T_u p}, \quad (8.4)$$

где T_u – постоянная интегрирования.

Пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон) – управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и пропорционально интегралу ошибки:

$$X_y = K_p e + K_i \int_0^t e dt = K_p \left(e + \frac{1}{T_u} \int_0^t e dt \right); \quad (8.5)$$

$$W_\Phi(p) = \frac{X_y(p)}{e(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} \right) = \frac{K_p (T_u p + 1)}{T_u p}. \quad (8.6)$$

Пропорционально-дифференциальный закон (ПД-закон) – управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и пропорционально производной ошибки:

$$X_y = K_p e + K_d \frac{de}{dt} = K_p \left(e + T_d \frac{de}{dt} \right); \quad (8.7)$$

$$W_\Phi(p) = \frac{X_y(p)}{e(p)} = K_p + K_d p = K_p (1 + T_d p), \quad (8.8)$$

где T_d – постоянная дифференцирования.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон) – управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке, пропорционально интегралу ошибки и пропорционально производной ошибки:

$$X_d = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right); \quad (8.9)$$

$$\begin{aligned} W_\Phi(p) &= \frac{X_y(p)}{e(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = \\ &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) = \frac{K_p (T_d T_i p^2 + T_i p + 1)}{T_i p}. \end{aligned} \quad (8.10)$$

8.2. Свойства систем с типовыми линейными законами регулирования

Промышленностью выпускаются регулирующие блоки (регуляторы), которые позволяют реализовать типовые линейные законы регулирования (как правило, в приближенном виде).

П-закон обеспечивает хорошее быстродействие, но при статическом объекте управления система работает со статической ошибкой.

И-закон позволяет избавиться от статической ошибки по управляющему воздействию и при статическом объекте от статической ошибки по возмущающему воздействию, но быстродействие системы невысокое.

ПИ-закон сочетает положительные свойства систем с П-законом и И-законом, поэтому обеспечивает хорошее быстродействие и отсутствие статических ошибок.

Введение регулирования по производной в ПД-законе подавляет колебательность, повышает устойчивость, однако не позволяет избавиться полностью от статических ошибок.

ПИД-закон сочетает положительные свойства, обеспечиваемые рассмотренными законами. Системы с ПИД-законом по сравнению с системами с другими типовыми законами обладают повышенным быстродействием, меньшей колебательностью и отсутствием статических ошибок.

Динамические свойства системы при изменении коэффициента передачи регулятора K_i и постоянной интегрирования $T_{и}$ изменяются следующим образом (рис.).

При увеличении коэффициента K_p быстродействие системы сначала увеличивается, затем уменьшается за счет увеличения колебательности. Колебательность и перерегулирование увеличиваются с увеличением K_p . При больших K_p система становится неустойчивой.

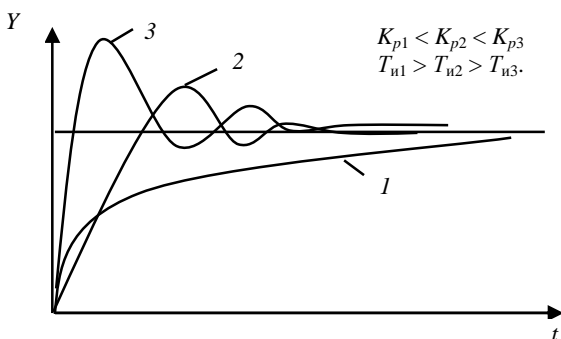


Рис. График переходных процессов системы с различными коэффициентами передачи и постоянными интегрирования

Такой же характер носит изменение динамических качеств системы при увеличении коэффициента передачи K_i (уменьшение постоянной интегрирования T_i).

Значения K_p и T_i , при которых начинается уменьшение быстродействия, а затем система становится неустойчивой, зависят от динамических свойств системы в целом.

Введение дифференциальной составляющей в закон регулирования позволяет подавить колебательность и, следовательно, увеличить допустимые значения K_p и T_i , увеличить быстродействие. Для систем с ПД-законом дифференциальная составляющая позволяет снизить статическую ошибку за счет увеличения допустимых значений K_p по перегулированию, колебательности и запасу устойчивости. Однако чрезмерное увеличение постоянной дифференцирования T_d приводит к снижению быстродействия.

Таким образом, задача синтеза системы автоматического регулирования с заданными показателями качества может быть решена путем выбора закона регулирования и подбора коэффициента передачи K_p и постоянных интегрирования и дифференцирования T_i и T_d , например путем моделирования на ЭВМ.

9. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

9.1. Основные понятия синтеза

Все математические задачи, решаемые в теории автоматического управления, можно объединить в два больших класса:

- задачи анализа;
- задачи синтеза.

В *задачах анализа* полностью известна структура системы, заданы все (как правило) параметры системы, требуется оценить какое-либо ее статическое или динамическое свойство. К задачам анализа относятся определение устойчивости и оценка качества управления системы.

Задачи синтеза можно рассматривать как обратные задачам анализа: в них требуется определить структуру и параметры системы

по заданным показателям качества управления. Простейшими задачами синтеза являются задачи определения передаточного коэффициента разомкнутой АСУ по заданной ошибке или условию минимума интегральной оценки.

Синтез АСУ – процедура определения структуры и параметров системы по заданным показателям качества управления.

В общем случае при проектировании системы необходимо определить алгоритмическую и функциональную структуры системы, т. е. решить задачу полного синтеза.

Определение *алгоритмической* структуры (*теоретический синтез*) производится с помощью математических методов и на основании требований, записанных в четкой математической форме.

Определение *функциональной* структуры (*технический синтез*) заключается в выборе конкретных физических элементов и согласования их между собой по статическим и энергетическим характеристикам. Эта процедура пока не имеет строгой математической основы (т. е. не формализована), поэтому относится к области инженерного творчества.

С учетом того, что не любой элемент алгоритмической структуры может иметь отображение в виде физического блока функциональной структуры, т. е. может быть реализован, задачу синтеза в большинстве случаев невозможно решать путем определения сначала алгоритмической структуры АСУ, а затем по ней – функциональной структуры. Поэтому задачу синтеза в большинстве случаев решают следующим образом. Сначала, исходя из известности объекта управления (ОУ), требований к назначению и условиям работы АСУ, по каталогам серийного оборудования выбирают функционально необходимые элементы системы:

- регулирующий орган (РО);
- исполнительное устройство (ИУ);
- датчики (Д).

Эти элементы АСУ вместе с ОУ образуют *неизменяемую часть* функциональной структуры системы (рис. 9.1).

Затем на основании требований к статическим и динамическим свойствам АСУ определяют *изменяемую часть* функциональной структуры системы, в которую входят:

- усилительно-преобразующий блок (УПБ);
- корректирующие устройства (КУ).

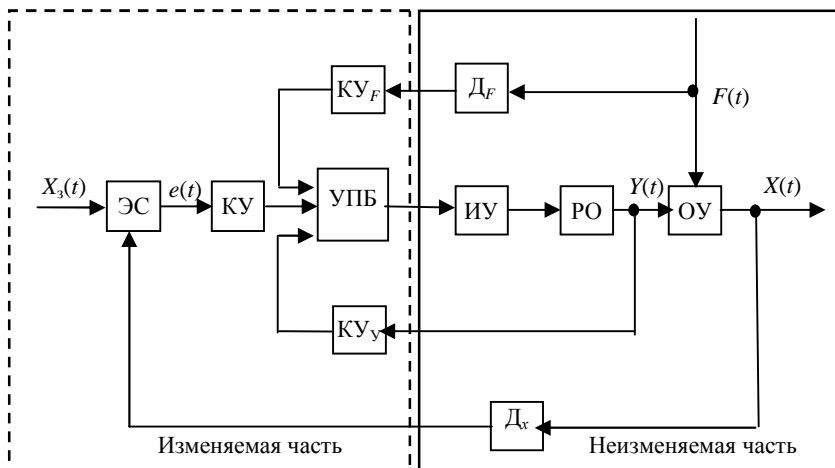


Рис. 9.1. Функциональная структура синтезируемой системы

Таким образом, процедуры определения алгоритмической и функциональной структур тесно переплетаются друг с другом. Окончательное решение о структуре АСУ принимается на основе компромисса между качеством управления с одной стороны, и простотой и надежностью с другой.

Заключительным этапом проектирования АСУ является *параметрическая оптимизация* – определение настроечных параметров выбранного регулятора.

После решения задачи синтеза обычно выполняют анализ синтезированной системы, т. е. проверяют, обладает ли система необходимыми показателями устойчивости и качества управления.

Применение на всех этапах синтеза и анализа АСУ *цифровых вычислительных машин* позволяет рассмотреть большое количество вариантов структур и параметров и тем самым существенно ускорить решение задачи синтеза.

9.2. Общие принципы синтеза алгоритмической структуры АСУ

Для решения задачи синтеза алгоритмической структуры типовой одноконтурной АСУ (см. рис. 9.1) должны быть известны:

- передаточная функция объекта управления $W_o(p)$;
- возмущение, действующее на выходе объекта, $X_b(p)$.

Результатом решения задачи синтеза алгоритмической структуры должна быть передаточная функция регулятора $W_p(p)$.

Следует решить задачу синтеза алгоритмической структуры для некоторых частных случаев в порядке повышения сложности.

9.3. Синтез автоматической системы управления при отсутствии возмущающего воздействия

В простейшем случае, когда возмущающее воздействие на объект отсутствует ($X(p) = 0$), управление можно осуществлять по разомкнутой схеме (рис. 9.2, а) при передаточной функции регулятора

$$W_p(p) = \frac{1}{W_o(p)}, \quad (9.1)$$

т. к. передаточная функция АСУ

$$W(p) = W_p(p)W_o(p) = 1. \quad (9.2)$$

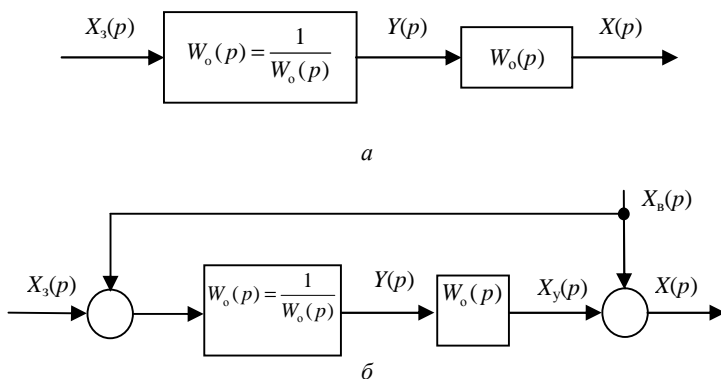


Рис. 9.2. Алгоритмические схемы идеальной АСУ:
а – разомкнутая; б – замкнутая

Это означает мгновенное воспроизведение выходной величиной задающего воздействия

$$X(p) = X_3(p). \quad (9.3)$$

Такой переходный процесс называют *идеальным*, а алгоритмическую структуру, обеспечивающую его, – *идеальной*.

9.4. Синтез алгоритмической структуры АСУ при наличии возмущающего воздействия

Если на объект действует возмущение $X_b(p)$, которое поддается измерению, то теоретически можно синтезировать идеальную разомкнутую АСУ (рис. 9.2, а) с полной компенсацией возмущения, подав его с обратным знаком на вход регулятора с передаточной функцией (9.4). В этом случае при $X_3(p) = 0$ регулируемая величина

$$\begin{aligned} X(p) &= X_b(p) - W_p(p) W_o(p) X_b(p) = \\ &= X_b(p) - \frac{1}{W_o(p)} W_o(p) X_b(p) = 0. \end{aligned} \quad (9.4)$$

Поэтому полезная составляющая $X_y(p)$ на выходе объекта будет полностью уравнивать возмущение $X_b(p)$.

Однако возмущение $X_b(p)$, как правило, измерить не удастся и АСУ приходится строить по замкнутой схеме (с обратной связью). Для отыскания структуры идеальной замкнутой системы можно использовать идею косвенного измерения возмущения $X_b(p)$ с помощью модели объекта $W_{ом}(p)$ (рис. 9.2, б). Если

$$W_{ом}(p) = W_o(p), \quad (9.5)$$

то вычисляемый на выходе модели объекта сигнал

$$X_{вм}(p) = X(p) - X_{ym}(p) \quad (9.6)$$

является косвенно измеренным возмущением $X_b(p)$, его можно ввести в регулятор с передаточной функцией (9.2) и таким образом снова получить идеальную разомкнутую структуру с положительной обратной связью (рис. 9.3, *a*). В ней в соответствии с правилами структурных преобразований сигнал $W_{ym}(p)$ можно перенести на вход регулятора и приложить к сумматору 2 (рис. 9.3, *б*). Тогда регулятор с передаточной функцией $1 / W_o(p)$ окажется охваченным внутренней положительной обратной связью, а сигнал после сумматора 1 будет соответствовать сигналу ошибки

$$e(p) = X_s(p) - X(p). \quad (9.7)$$

Последнее означает, что АСУ стала замкнутой и работает по принципу отрицательной обратной связи с регулятором (см. рис. 9.3, *б*), имеющим передаточную функцию

$$W_p(p) = \frac{1}{1 - \frac{W_o(p)}{W_{om}(p)}}. \quad (9.8)$$

При точном совпадении объекта управления и его модели ($W_o(p) = W_{om}(p)$) регулятор будет работать как пропорциональный с коэффициентом $k_n = \infty$, что соответствует нулевым ошибкам по каналам задания и возмущения.

Техническая реализация безынерционного (идеального) регулятора невозможна. Однако такая структура является идеальной, к ней необходимо стремиться при синтезировании высококачественных систем управления. В соответствии с идеальной структурой (рис. 9.3, *б*) можно сформулировать *фундаментальный принцип* структурно-параметрической оптимизации АСУ с обратной связью: регулятор должен содержать динамическое звено с передаточной функцией, равной или близкой обратной передаточной функции объекта управления.

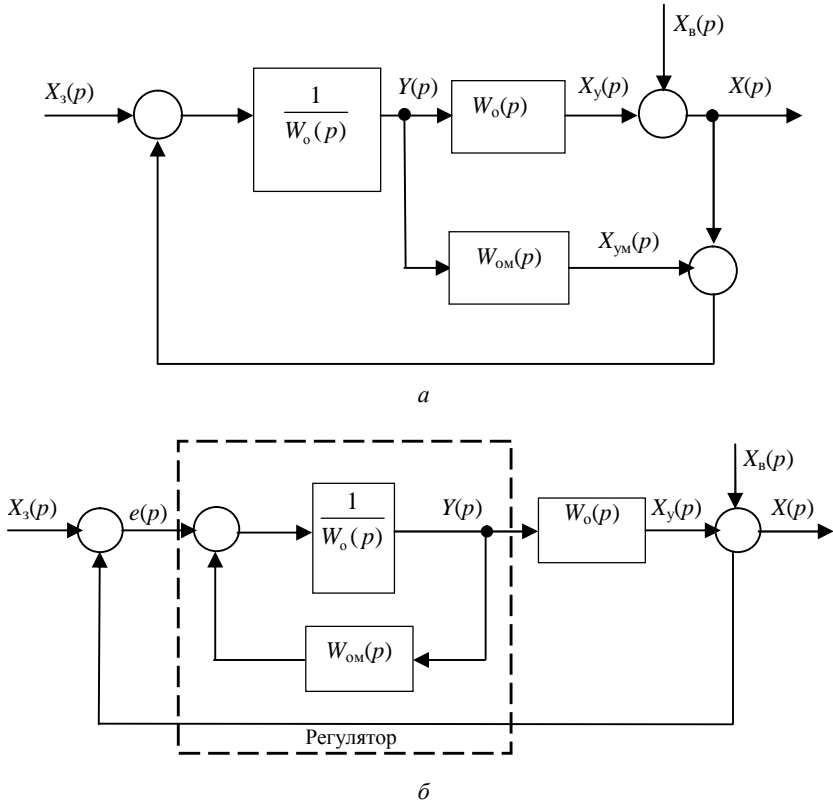


Рис. 9.3. Алгоритмические схемы идеальной замкнутой АСУ

На практике наиболее часто приходится решать задачу синтеза АСУ с инерционными объектами управления с запаздыванием, которые можно описать обобщенной передаточной функцией

$$W_o(p) = W'_o(p) e^{-p\tau_o}, \quad (9.9)$$

где $W'_o(p)$ – дробно-рациональная функция, характеризующая инерционную часть объекта управления;

τ_o – чистое запаздывание объекта управления.

Следует определить структуру и передаточную функцию *идеального регулятора* для инерционных объектов управления с запаздыванием.

Подставив значение передаточной функции $W_o(p)$ из выражения (9.9) в формулу (9.8), получают передаточную функцию идеального регулятора для инерционных объектов управления с запаздыванием

$$W_p(p) = e^{p\tau_0} \frac{1}{1 - \frac{e^{p\tau_0}}{W_o'(p)} W_{om}(p)} \frac{1}{W_o'(p)}. \quad (9.10)$$

Смножитель $e^{p\tau_0}$ соответствует *идеальному упредителю*, и его точная реализация технически невозможна. Поэтому с целью упрощения искомой структуры регулятора и облегчения его технической реализации полагают, что для объектов управления с чистым запаздыванием τ_0 идеальная АСУ воспроизводит задающее воздействие с запаздыванием τ_0 :

$$\frac{X(p)}{X_3(p)} = e^{-p\tau_0}. \quad (9.11)$$

С другой стороны, применяя правило структурного преобразования к алгоритмической схеме АСУ (рис. 9.4), записывают отношение

$$\frac{X(p)}{X_3(p)} = \frac{W_p(p)W_o(p)}{1 + W_p(p)W_o(p)}. \quad (9.12)$$

Приравняв правые части выражений (9.11) и (9.12) с учетом значения передаточной функции $W_o(p)$ из выражения (9.9), записывают уравнение

$$e^{-p\tau_0} = \frac{W_p(p)W_o'(p)e^{-p\tau_0}}{1 + W_p(p)W_o'(p)e^{-p\tau_0}}. \quad (9.13)$$

Решив это уравнение, получают искомую передаточную функцию идеального регулятора (*регулятора Ресвика*)

$$W_p(p) = \frac{1}{1 - \frac{1}{W_o'(p)} W_o'(p) e^{-p\tau_o}} \cdot \frac{1}{W_o'(p)}. \quad (9.14)$$

Этой передаточной функции соответствует алгоритмическая схема АСУ (рис. 9.4), которая уже не содержит упредителя.

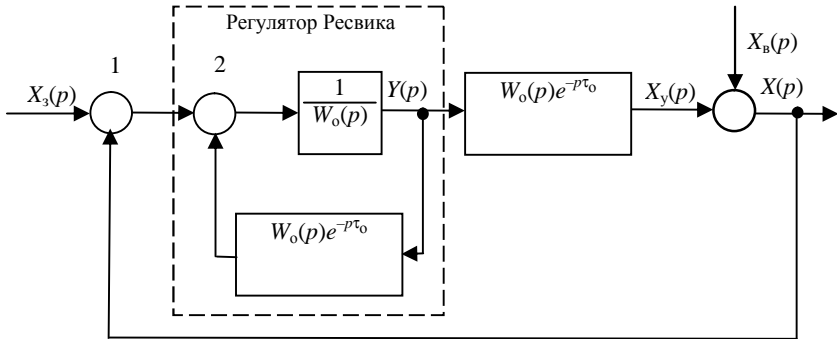


Рис. 9.4. Алгоритмическая схема идеальной АСУ с объектом с запаздыванием

Передаточная функция по каналу возмущения в такой АСУ согласно (9.11)

$$\frac{X(p)}{X_b(p)} = \frac{1}{1 + W_p(p)W_o(p)e^{-p\tau_o}} = \frac{1}{1 + \frac{W_o(p)e^{-p\tau_o}}{1 - e^{-p\tau_o}} W_o'(p)} = 1 - e^{-p\tau_o}. \quad (9.15)$$

Это означает, что действие возмущения $X_b(p)$ мгновенно компенсируется системой через время τ_o .

Ранее было показано, что инерционные статические объекты управления с *S-образной* переходной характеристикой можно представить в виде моделей первого или второго порядка с запаздыванием.

Если представить первоначально объект управления моделью первого порядка, тогда при запаздывании τ'_o модели объекта, равном чистому запаздыванию τ_o реального объекта, и подставленном

в выражение (9.14) значения передаточной функции модели передаточная функция регулятора

$$W_p(p) = \frac{T'_0 p + 1}{\left[1 - e^{-p\tau'_0}\right] k_0}. \quad (9.16)$$

При относительно медленно изменяющихся воздействиях можно принять

$$e^{-p\tau} \approx 1 - p\tau'_0. \quad (9.17)$$

Тогда, учитывая это равенство в выражении (9.16), получают искомую передаточную функцию регулятора

$$W_p(p) = \frac{T'_0 p + 1}{p\tau'_0 k_0} = \frac{T'_0}{k_0 \tau'_0} + \frac{1}{k_0 \tau'_0} \frac{1}{p} = k_n + k_n \frac{1}{p}, \quad (9.18)$$

где

$$k_n = \frac{T'_0}{k_0 \tau'_0}; \quad (9.19)$$

$$k_n = \frac{1}{k_0 \tau'_0}. \quad (9.20)$$

Такую передаточную функцию имеет ПИ-регулятор с настроечными параметрами k_n и k_n .

Представив объект управления более точной моделью второго порядка и проведя аналогичные рассуждения, получают искомую передаточную функцию регулятора

$$W_p(p) = \frac{2T'_0}{k_0 \tau'_0} + \frac{1}{k_0 \tau'_0} \frac{1}{p} + \frac{(T'_0)^2}{k_0 \tau'_0} p = k_n + k_n \frac{1}{p} + k_n p, \quad (9.21)$$

где

$$k_{\text{п}} = \frac{2T'_0}{k_0 \tau'_0}; \quad (9.22)$$

$$k_{\text{и}} = \frac{1}{k_0 \tau'_0}; \quad (9.23)$$

$$k_{\text{д}} = \frac{(T'_0)^2}{k_0 \tau'_0}. \quad (9.24)$$

Такую передаточную функцию имеет ПИД-регулятор с настройными параметрами $k_{\text{п}}$, $k_{\text{и}}$, $k_{\text{д}}$.

9.5. Выбор типа регулятора и его настроечных параметров

На основании полученных общих соотношений между параметрами объекта управления и регулятора можно сформулировать *рекомендации по выбору типа регулятора и его настроечных параметров*:

- для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых действительно близка звену первого порядка (не просто аппроксимирована таким звеном), целесообразно применять ПИ-регулятор;
- для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых имеет порядок $n \geq 2$, наилучшим регулятором является ПИД-регулятор.

Эмпирические формулы в табл. 9.1 обобщают результаты экспериментальных исследований по определению настроечных параметров типовых регуляторов для объектов с запаздыванием (при $\tau_0 / T_0 = 0 \dots 1$). Параметры определены путем моделирования систем при ступенчатом изменении задающего x_3 воздействия. Обеспечиваемым показателем качества АСУ является перерегулирование σ (0 % или 20 %) на выходе объекта регулирования.

Настроечные параметры типовых регуляторов

Тип регулятора	Настроечные параметры					
	k_n		k_i		k_d	
	$\sigma = 0 \%$	$\sigma = 20 \%$	$\sigma = 0 \%$	$\sigma = 20 \%$	$\sigma = 0 \%$	$\sigma = 20 \%$
П	$\frac{0,3 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,7 T_o}{k_o \tau_o}$	0	0	0	0
ПИ	$\frac{0,35 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,29}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6}{k_o \tau_o}$	0	0
ПИД	$\frac{0,6 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,95 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,7}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,3 T_o}{k_o}$	$\frac{0,45 T_o}{k_o}$

Если необходимо обеспечить колебательный характер переходного процесса в АСУ, при котором амплитуда каждого последующего колебания должна быть в четыре раза меньше амплитуды предыдущего колебания, т. е. *степень затухания*

$$\Psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{A_1 - \frac{A_1}{4}}{A_1} = 0,75, \quad (9.25)$$

что соответствует нижней границе, при которой качество управления еще признается удовлетворительным, то следует воспользоваться рекомендациями по выбору настроечных параметров регуляторов, приведенных в табл. 9.2.

Проведенные исследования позволили также сформулировать следующие *общие выводы о влиянии настроечных параметров на показатели качества регулирования*:

- увеличение коэффициента k_n пропорциональной части регулятора приводит к увеличению перерегулирования σ , времени t_n переходного процесса и уменьшению степени затухания Ψ ;
- увеличение коэффициента k_i интегральной части регулятора приводит к уменьшению времени t_n переходного процесса и увеличению перерегулирования σ ;

- увеличение коэффициента k_d дифференциальной части регулятора приводит к уменьшению времени t_n переходного процесса и увеличению перерегулирования σ .

Таблица 9.2

Настроечные параметры типовых регуляторов

Тип регулятора	Настроечные параметры		
	k_n	k_i	k_d
П	$\frac{\tau_o + T_o}{k_o \tau_o}$	0	0
ПИ	$\frac{\tau_o + T_o}{1,1 k_o \tau_o}$	$\frac{\tau_o + T_o}{3,66 k_o \tau_o^2}$	0
ПИД	$\frac{\tau_o + T_o}{0,8 k_o \tau_o}$	$\frac{\tau_o + T_o}{1,6 k_o \tau_o^2}$	$\frac{\tau_o + T_o}{1,6 k_o}$

9.6. Синтез многоконтурной АСУ подчиненного регулирования

Для управления сложными технологическими объектами, например электроприводами механизмов собственных нужд электрических станций, применяют *многоконтурные системы* с несколькими внутренними обратными связями по промежуточным регулируемым величинам. Так, на рис. 9.5 приведена алгоритмическая схема с двумя внутренними обратными связями по промежуточным регулируемым величинам $X_1(p)$ и $X_2(p)$. Каждая обратная связь образует контур регулирования своей величины $X(p)$. Причем вторым контуром охватывается первый, а регулятор второго контура вырабатывает задающее воздействие $X_{31}(p)$ для первого контура. Принцип построения многоконтурной АСУ с таким каскадным включением регуляторов называют *принципом подчиненного регулирования*.

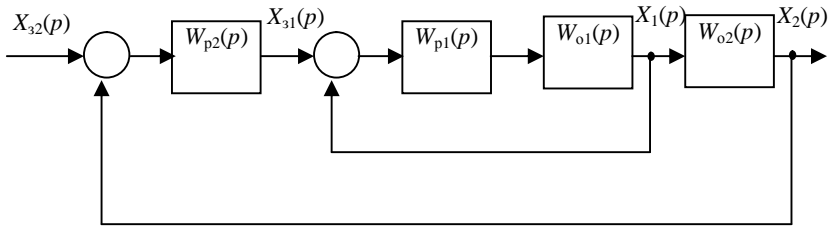


Рис. 9.5. Алгоритмическая схема двухконтурной АСУ подчиненного регулирования

Определение настроечных параметров регуляторов АСУ, построенной по принципу подчиненного регулирования, осуществляют путем последовательной оптимизации контуров начиная с внутреннего (первого) с объектом регулирования, имеющим передаточную функцию $W_{o1}(p)$ (см. рис. 9.5). После определения настроечных параметров регулятора первого контура, а следовательно, и передаточной функции $W_{p1}(p)$, переходят к определению настроечных параметров регулятора второго контура. В качестве объекта регулирования рассматривают соединение собственного объекта второго контура, имеющего передаточную функцию $W_{o2}(p)$, и звена, эквивалентного замкнутому первому контуру, с передаточной функцией

$$W_{o2s}(p) = W_{o2}(p) \frac{W_{p1}(p)W_{o1}(p)}{1 + W_{p1}(p)W_{o1}(p)}. \quad (9.26)$$

Полученный эквивалентный объект управления может быть представлен в виде модели первого или второго порядка, и процедура определения настроечных параметров регулятора второго контура может быть проведена по методике, рассмотренной для одноконтурной АСУ.

Синтез АСУ подчиненного регулирования с *тремя и более* контурами проводится аналогично описанному, т. е. путем последовательной оптимизации контуров начиная с внутреннего.

10. НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

10.1. Особенности нелинейных систем

Нелинейной называется система, которая содержит хотя бы одно звено, описываемое нелинейным уравнением.

Нелинейным называется звено, описываемое нелинейным алгебраическим или дифференциальным уравнением.

Нелинейные звенья подразделяются на статические (безынерционные) и динамические. Статическое нелинейное звено описывается алгебраическим уравнением $Z_{\text{вых}} = Z(X_{\text{вх}})$, т. е. полностью определяется своей нелинейной статической характеристикой.

Динамическое звено описывается нелинейным дифференциальным уравнением $Y_{\text{вых}} = F\left(X_{\text{вх}}, \frac{dX_{\text{вх}}}{dt}, \frac{d^2 X_{\text{вх}}}{dt^2} + \dots\right)$.

Причиной нелинейности динамических характеристик звена являются нелинейные операции над производными в математическом описании какого-либо устройства системы.

Различают звенья существенно и несущественно нелинейные.

Несущественно нелинейными звеньями называют звенья, имеющие непрерывно-дифференцируемые (гладкие) характеристики (непрерывную производную dz/dx).

Для таких звеньев можно применять методы линейной теории, ограничившись рассмотрением малых отклонений от установившегося режима и линеаризовав нелинейную характеристику в области этих отклонений.

Существенно нелинейные звенья имеют ярко выраженную нелинейность характеристики, которая не является непрерывно дифференцируемой. Однако создание большого класса систем связано с необходимостью использовать существенно нелинейные элементы в объектах и управляющих устройствах. Эти системы требуют специальных методов исследования.

10.2. Типовые нелинейные звенья

Выделяют ряд типовых нелинейных звеньев, которыми могут быть описаны многие физические элементы систем автоматики.

Основные типовые нелинейные звенья:

1. *Зона нечувствительности* (рис. 10.1, а).

Такой характеристикой обладают многие датчики, а также ряд схем электронных, магнитных, пневматических и гидравлических усилителей в области малых входных сигналов. Характеристика реального элемента на рис. 10.1, а показана штриховой линией. Характеристика типового звена описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| \leq X_a; \\ K(X - X_a) & \text{при } X > X_a; \\ K(X + X_a) & \text{при } X < -X_a. \end{cases} \quad (10.1)$$

2. *Ограничение (или насыщение)* (рис. 10.1, б).

Подобными характеристиками обладают практически все реальные усилители (электронные, магнитные, пневматические, гидравлические), ограниченные по выходной мощности в области больших входных сигналов. Характеристика реального элемента на рис. 10.1, б показана штриховой линией. Характеристика типового звена описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} KX & \text{при } |X| \leq X_6; \\ Z_6 \text{sign} X & \text{при } |X| > X_6. \end{cases} \quad (10.2)$$

3. *Ограничение с зоной нечувствительности* (рис. 10.1, в).

Эта характеристика объединяет две предыдущие и описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| < X_a; \\ K(X - X_a) & \text{при } X_a < X < X_6; \\ K(X + X_a) & \text{при } -X_a > X > -X_6; \\ Z_6 \text{sign} X & \text{при } |X| > X_6. \end{cases} \quad (10.3)$$

4. *Двухпозиционное реле с зоной неоднозначности (гистерезисом)* (рис. 10.1, *з*).

Характеристика двухзначна в области петли гистерезиса. На этом участке значение выходной величины зависит от предшествующего состояния элемента. Подобными характеристиками обладают электромагнитные промежуточные реле, электронные реле и промышленные двухпозиционные регуляторы. Величина $2a$ называется шириной зоны неоднозначности.

5. *Двухпозиционное реле без зоны неоднозначности (или идеальное двухпозиционное реле)* (рис. 10.1, *д*).

Характеристика этого звена является предельным случаем предыдущей при отсутствии гистерезиса и описывается уравнением

$$Z = Z_n \text{sign} X.$$

6. *Трехпозиционное реле с зонами неоднозначности d* (рис. 10.1, *е*).

Такой характеристикой обладают трехпозиционные поляризованные реле, некоторые гидравлические распределители, промышленные трехпозиционные регуляторы. Величину $2a$ называют зоной нечувствительности, d называют также дифференциалами.

7. *Трехпозиционное реле без зон неоднозначности (или идеальное трехпозиционное реле)* (рис. 10.1, *ж*).

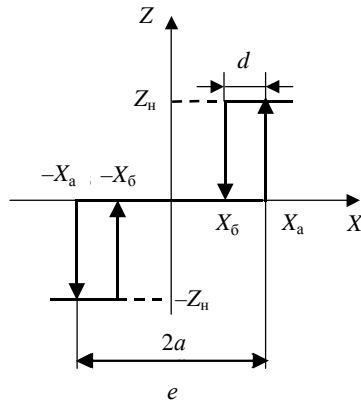
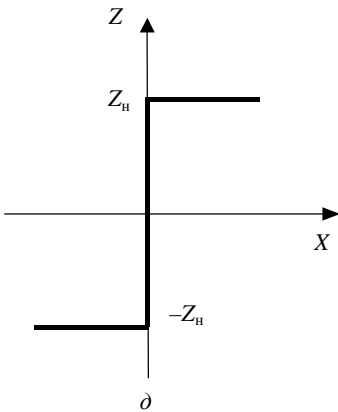
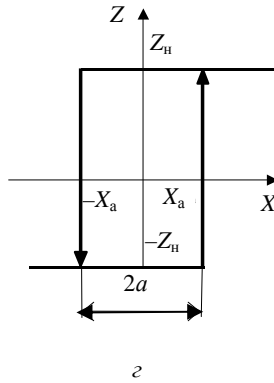
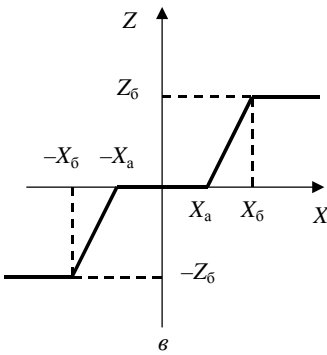
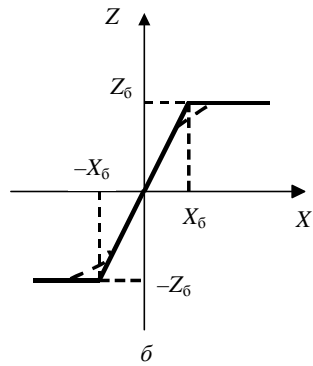
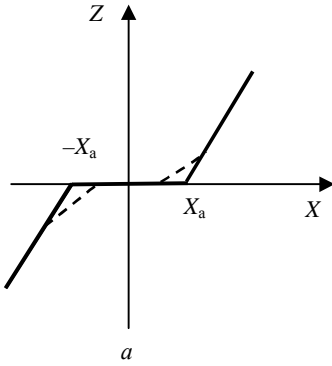
Характеристика этого звена является предельным случаем предыдущей при отсутствии (или пренебрежении) зонами неоднозначности и описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| \leq X_a; \\ Z_n \text{sign} X & \text{при } |X| > X_a. \end{cases} \quad (10.4)$$

8. *Люфт (зазор)* (рис. 10.1, *з*).

Наиболее часто встречающаяся нелинейность в механических системах, связанная с наличием зазоров в передачах. Зависимость между положениями ведущего X и ведомого Z элементов многозначна. Каждому положению ведомого элемента соответствует множество положений ведущего элемента в пределах зоны люфта.

Характеристики реальных элементов могут быть смещены относительно начала координат, однако это не влияет на их принадлежность к соответствующим типовым звеньям.



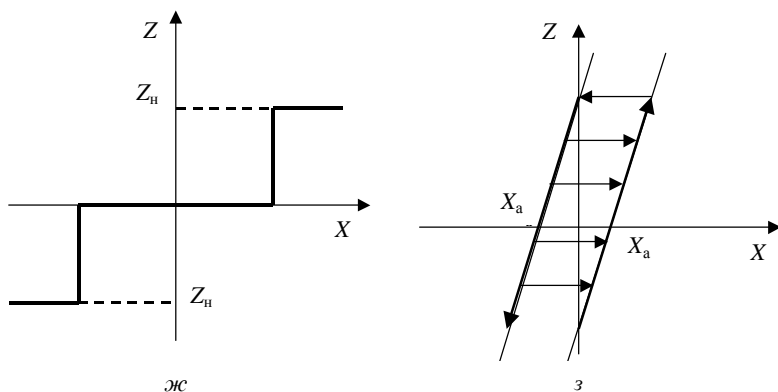


Рис. 10.1. Типовые нелинейные звенья

Динамические процессы нелинейной системы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Динамические свойства нелинейных систем разнообразнее, чем линейных. В них возможны незатухающие колебания, называемые автоколебаниями. Условия движения и его характер зависят от начальных условий и внешних возмущений.

В нелинейных системах возможна устойчивость в малом, в большом и в целом. Структурные схемы нелинейных систем, как правило, содержат нелинейные и линейные звенья.

Общей теории нелинейных систем не создано из-за ограниченных возможностей аналитического математического аппарата. Однако для исследования нелинейных систем разработаны методы, позволяющие в каждом частном случае оценить поведение системы. К таким относят, например, методы фазовой плоскости, гармонической линеаризации, «припасовывания» граничных значений, исследования устойчивости А. М. Ляпунова, В. М. Попова и др. [3, 5, 12, 14, 16].

С появлением ЭВМ широкое применение получило использование моделирования на ЭВМ для исследования нелинейных систем.

Имеются специальные программы для персональных цифровых ЭВМ (ПЭВМ), позволяющие моделировать нелинейные системы на основе моделей отдельных нелинейных звеньев непосредственно по структурной схеме системы. Это обстоятельство значительно упростило исследования нелинейных систем, расширило возможности

их анализа и синтеза без существенного упрощения исходного математического описания. Методы, основанные на моделировании, начали постепенно вытеснять традиционные теоретические методы исследования нелинейных и линейных систем.

10.3. Позиционные системы автоматического регулирования

Позиционной называют систему, в которой управляющее воздействие на объект ступенчато изменяется в зависимости от уровня ошибки.

Соответственно, *позиционным* называют *закон регулирования*, когда управляющее воздействие на объект принимает ряд постоянных дискретных значений (изменяется ступенчато) в зависимости от ошибки системы.

Позиционные системы относятся к наиболее простым и распространенным *релейным системам*.

Двухпозиционной САР называется система, в которой управляющее воздействие на объект приобретает два значения.

Трехпозиционной САР называется система, в которой управляющее воздействие на объект приобретает три значения.

Существуют также четырехпозиционные системы и т. д.

Примерами позиционных систем являются системы регулирования температуры в холодильнике, температуры подошвы утюга. Эти системы являются двухпозиционными, поскольку управляющее воздействие на объект принимает два значения. Например, при пониженной температуре подошвы утюга питание нагревательного элемента включается, при повышенной – выключается.

В сельском хозяйстве позиционное регулирование применяется в системах регулирования микроклимата животноводческих помещений, регулирования температуры инкубаторов, температуры теплоносителя зерновых сушилок и т. д.

Следует рассмотреть работу позиционных систем на примерах САР температуры сушильной камеры с одним нагревательным элементом EK (двухпозиционная) и с двумя – EK_1 и EK_2 (трехпозиционная).

Схема двухпозиционной САР изображена на рис. 10.2.

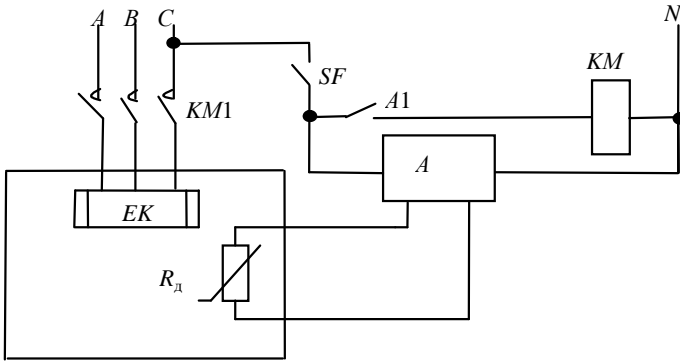


Рис. 10.2. Принципиальная схема двухпозиционной САР температуры сушильной камеры:
EK – нагревательный элемент; *A* – регулирующий блок;
R_д – датчик (термометр сопротивления);
A1 – контакт выходного реле регулирующего блока

При составлении структурной схемы (рис. 10.3) нагреватель *EK* отнесен к объекту управления. Коэффициент передачи датчика перенесен в релейную характеристику регулирующего блока, поэтому сигнал *e* ошибки имеет размерность температуры.

Воздух в сушильной камере нагревается элементом *EK*. Температура воздуха Θ регулируется двухпозиционным регулятором *A*. При включении системы температура в камере меньше заданной, ошибка положительна и превышает половину зоны неоднозначности *a*. Реле на выходе регулирующего блока *A* включается, и его замыкающий контакт *A1* включает магнитный пускатель *KM*, который своими контактами *KM1* запитывает нагревательный элемент *EK*. Начинается нагрев камеры. При повышении температуры до заданной Θ_z плюс половина зоны неоднозначности *a*, когда сигнал *e* ошибки станет равен *a*, реле на выходе регулирующего блока выключится, контакт *A1* разомкнется, магнитный пускатель *KM* выключится и обесточит нагревательный элемент *EK*. В результате температура в сушильной камере начинает снижаться. Реле снова включится, когда сигнал ошибки станет равен $+a$.

Процесс нагрева и охлаждения воздуха в сушильной камере повторяется. В сушильной камере устанавливается режим периодического нагрева и охлаждения.

Такие установившиеся режимы работы называют *автоколебательными*. Автоколебательные режимы часто возникают в нелинейных системах. В частности, они характерны для позиционных систем. На рис. 10.4 изображен процесс регулирования температуры в сушильной камере после включения системы.

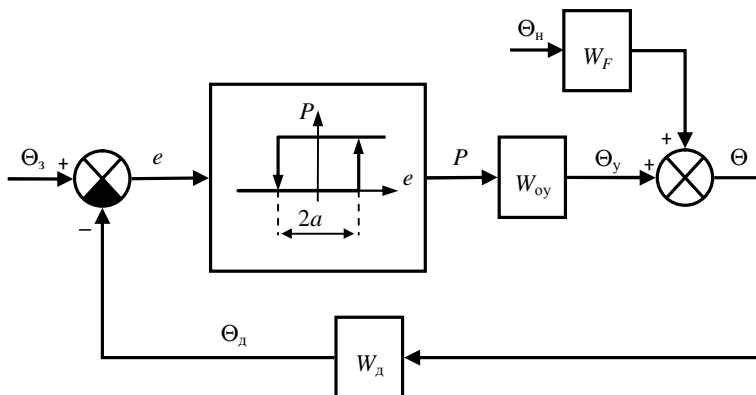


Рис. 10.3. Структурная схема двухпозиционной САР температуры сушильной камеры:

Θ_3 – заданная температура; e – сигнал ошибки; P – мощность нагревателя; Θ_n – температура наружного воздуха (возмущающее воздействие); Θ_y – приращение температуры в камере от работы нагревателя; Θ – температура в камере;

Θ_d – сигнал датчика; $2a$ – ширина зоны неоднозначности регулятора; W_{oy} – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию; W_F – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию; W_d – передаточная функция датчика

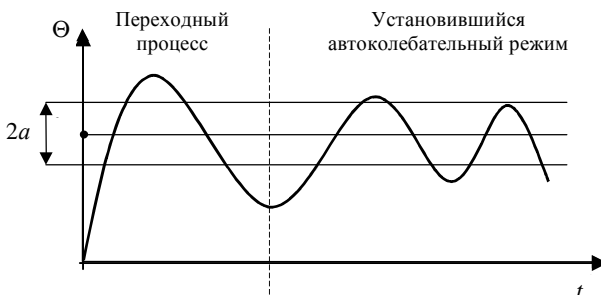


Рис. 10.4. Процесс регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемый двухпозиционной системой

Размах автоколебаний больше ширины зоны неоднозначности $2a$, что обусловлено инерционностью датчика и объекта управления. В данном примере за счет инерционности датчика сигнал ошибки отстает от температуры в камере, поэтому реле срабатывает позже. Кроме того, снижение (повышение) температуры начинается не сразу, а после того как нагревательный элемент несколько охладится (нагреется).

При увеличении возмущающего воздействия (в данном случае – температуры наружного воздуха) автоколебания несколько смещаются вверх, при снижении – вниз.

Показателями качества регулирования для двухпозиционных систем являются отклонение регулируемой величины от заданного значения (в данном случае – от заданной температуры Θ_3) и частота автоколебаний. Быстродействие системы определяется временем установления автоколебаний.

Параметрами настройки регулятора являются заданное значение регулируемой величины (в данном случае – Θ_3) и ширина зоны неоднозначности $2a$.

Исследование режимов работы позиционных систем проводится методами «припасовывания», гармонического баланса и фазовой плоскости. Наиболее точным, удобным и наименее трудоемким методом исследования является моделирование на ЭВМ. В процессе таких исследований и определяются параметры настройки регулятора.

Следует рассмотреть пример устройства, структуру и режимы работы трехпозиционных систем. Принципиальная и структурная схемы трехпозиционной САР температуры сушильной камеры приведены на рис. 10.5 и 10.6.

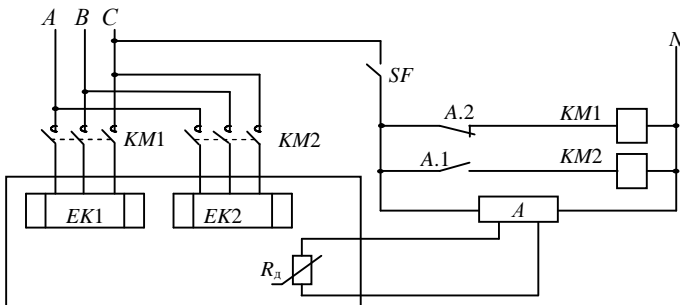


Рис. 10.5. Принципиальная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры:
 EK1, EK2 – нагревательные элементы; A – регулирующий блок;
 R_d – датчик температуры (термометр сопротивления);
 A.1, A.2 – контакты выходных реле регулирующего блока

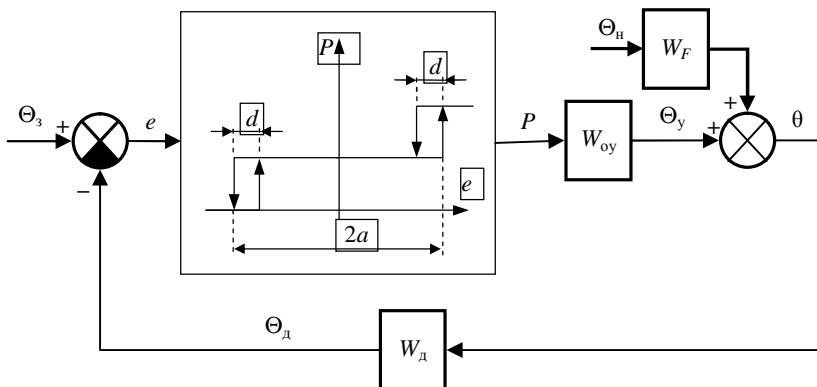


Рис. 10.6. Структурная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры:

Θ_3 – заданная температура; e – сигнал ошибки;

P – мощность нагревателя; $\Theta_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха;

Θ_y – приращение температуры в камере от работы нагревателей;

Θ – температура в камере; Θ_d – сигнал датчика; $2a$ – ширина зоны нечувствительности; d – зоны неоднозначности (дифференциалы);

W_{oy} – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию;

W_F – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию;

W_d – передаточная функция датчика

После включения системы срабатывает 1-е реле регулирующего блока A , его контакт $A.1$ замыкается. Второе реле регулирующего блока не включено и контакт $A.2$ замкнут, поэтому пускатели $KM1$ и $KM2$ запитывают оба нагревателя $EK1$ и $EK2$. Температура в сушильной камере быстро растет. Когда температура входит в зону нечувствительности $2a$ плюс дифференциал d , ошибка становится меньше $a-d$ и 1-е реле отключается, пускатель $KM1$ обесточивает нагревательный элемент $EK1$. Далее возможны три варианта работы системы:

1. Если мощности 2-го нагревательного элемента $EK2$ не хватает для дальнейшего повышения температуры или удержания ее в зоне нечувствительности, температура начинает снижаться. После выхода из зоны нечувствительности нагревательный элемент $EK1$ опять включается и температура начинает подниматься. В результате возникают автоколебания около нижней зоны неоднозначности d (рис. 10.7, график 1).

2. Если мощности 2-го нагревательного элемента $EK2$ хватает для удержания температуры в зоне нечувствительности, то в системе устанавливается статический установившийся режим (рис. 10.7, график 2).

3. Если мощности 2-го нагревателя хватает для дальнейшего повышения температуры, то после выхода температуры из зоны нечувствительности срабатывает 2-е реле, размыкается контакт $A.2$ и пускатель $KM2$ обесточивает нагревательный элемент $EK2$. Температура начинает понижаться. После входа температуры в зону нечувствительности, когда ошибка становится меньше $a-d$, 2-е реле выключается, контакт $A.2$ замыкается, пускатель запитывает нагревательный элемент $EK2$, температура начинает повышаться. Процесс нагрева и охлаждения периодически повторяется. В результате возникают автоколебания около верхней границы зоны неоднозначности (рис. 10.7, график 3).

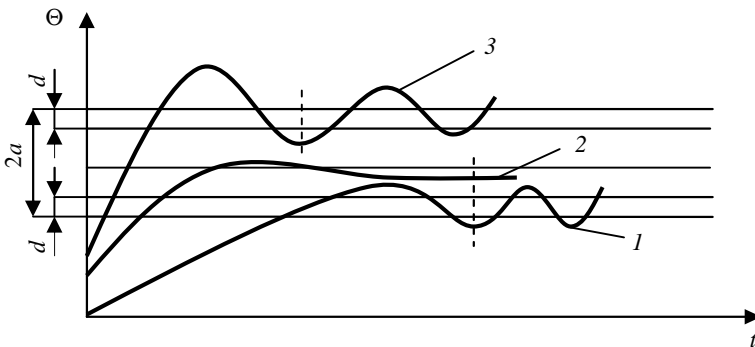


Рис. 10.7. Графики процесса регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемого трехпозиционной системой:

- 1 – режим автоколебаний около нижней зоны неоднозначности d ;
- 2 – статический установившийся режим;
- 3 – режим автоколебаний около верхней зоны неоднозначности

В работающей системе переход из одного режима в другой происходит при изменении возмущающего воздействия (в данном примере – при изменении температуры наружного воздуха). При повышении температуры автоколебания смещаются вверх, при понижении – вниз.

Если система неправильно разработана или настроена, например при установке слишком узкой зоны нечувствительности,

в трехпозиционной системе могут возникать трехпозиционные автоколебания (рис. 10.8). При этом режим работы сходен с режимом работы двухпозиционной системы. Как правило, такая работа системы неприемлема с технологической точки зрения. Например, в системах управления температурой животноводческих помещений это приведет к недопустимой разнице между температурой воздуха, подаваемого в помещение, и температурой воздуха в помещении. Кроме того, повышается амплитуда колебаний температуры. Многопозиционное регулирование применяют в основном по технологическим соображениям.

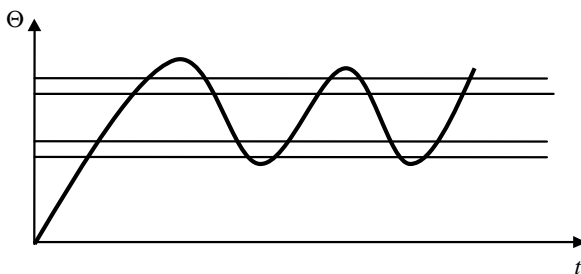


Рис. 10.8. Режим трехпозиционных автоколебаний в трехпозиционной системе

Параметрами настройки регулятора трехпозиционной системы являются заданное значение регулируемой величины (в данном случае – Θ_3) и ширина зоны нечувствительности $2a$. В некоторых современных регуляторах можно также изменять дифференциалы d .

Параметрами качества регулирования являются отклонения регулируемой величины от заданного значения, частота и амплитуда автоколебаний. Быстродействие системы определяется временем перехода системы в установившийся режим работы.

10.4. Импульсные системы

Импульсными называют системы, в которых хотя бы одна из величин, характеризующих состояния системы, квантуется по времени.

Импульсные САУ содержат в своем составе один или несколько импульсных элементов (ИЭ) и непрерывную часть (НЧ). Функ-

циональная схема импульсной системы может иметь, например, вид, представленный на рис. 10.9.

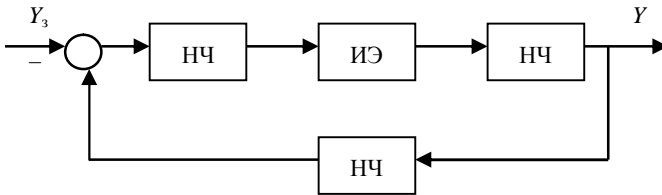


Рис. 10.9. Пример функциональной схемы импульсной системы

Преобразование непрерывного сигнала в импульсный называется импульсной модуляцией.

Существует три вида импульсной модуляции: амплитудно-импульсная (АИМ), широтно-импульсная (ШИМ) и время-импульсная (ВИМ). Время-импульсная модуляция, в свою очередь, подразделяется на фазоимпульсную (ФИМ) и частотно-импульсную (ЧИМ).

При *амплитудно-импульсной модуляции* (рис. 10.10) амплитуда (высота) A импульсов изменяется в зависимости от изменения входного непрерывного сигнала X . Период T следования импульсов и их длительность τ остаются неизменными.

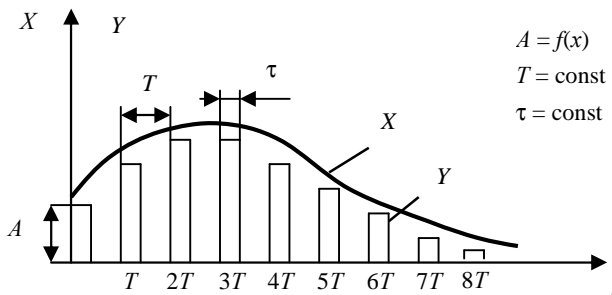


Рис. 10.10. Амплитудно-импульсная модуляция:

X – входной непрерывный сигнал; Y – выходной импульсный сигнал

При *широтно-импульсной модуляции* (рис. 10.11) длительность τ следования импульсов изменяется в зависимости от изменения

входного непрерывного сигнала X . Период T следования импульсов и их амплитуда (высота) A остаются неизменными.

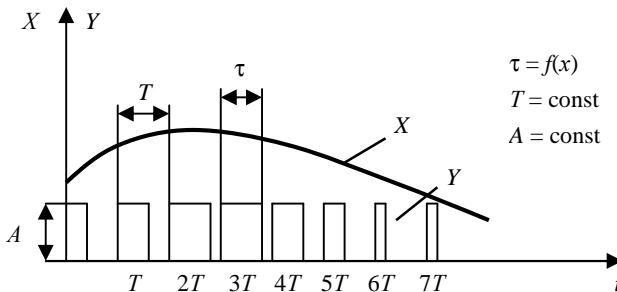


Рис. 10.11. Широтно-импульсная модуляция:

X – входной непрерывный сигнал; Y – выходной импульсный сигнал

При *фази́мпульсной модуляции* (рис. 10.12) сдвиг по времени (по фазе) α импульсов относительно моментов времени квантования $0, T, 2T, 3T, \dots$ изменяется в зависимости от изменения входного непрерывного сигнала X . Период T следования импульсов, их длительность τ и амплитуда (высота) A остаются неизменными.

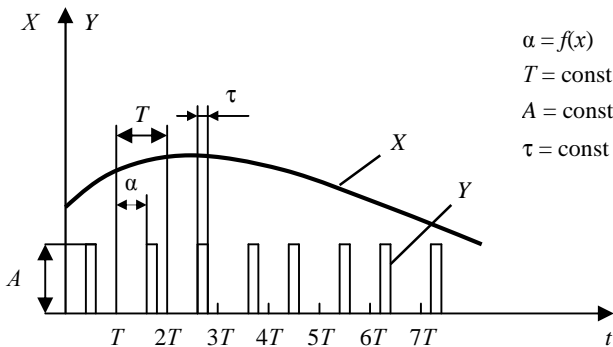


Рис. 10.12. Фази́мпульсная модуляция:

X – входной непрерывный сигнал; Y – выходной импульсный сигнал

При *частотно-импульсной модуляции* (рис. 10.13) частота следования ω (период T) импульсов изменяется в зависимости от изменения входного непрерывного сигнала X . Длительность импульсов τ и их амплитуда (высота) A остаются неизменными.

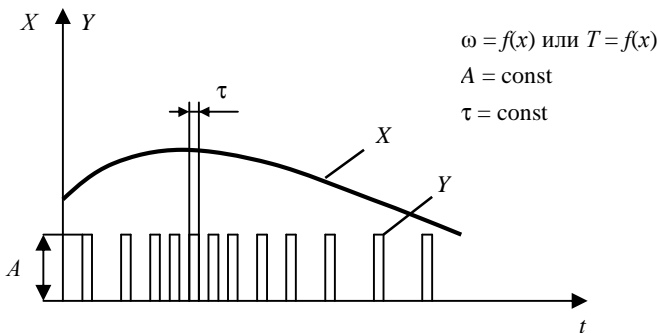


Рис. 10.13. Частотно-импульсная модуляция:
 X – входной непрерывный сигнал; Y – выходной импульсный сигнал

В системы автоматического управления и регулирования импульсные элементы вводятся для повышения надежности, точности, помехозащищенности, упрощения систем, управления скоростью исполнительных механизмов постоянной скорости путем импульсного прерывания сигнала, управляющего движением исполнительного механизма, и т. д.

Импульсные элементы легко сопрягаются с цифровыми устройствами. Кроме того, импульсные элементы вводятся в системы автоматического регулирования с объектами управления, обладающими большим транспортным запаздыванием для прерывания изменения управляющего воздействия на объект, что существенно улучшает динамические качества таких систем.

Подробно с математическим описанием и методами исследования импульсных систем можно ознакомиться в литературе по автоматическому управлению и регулированию, например [5, 14]. Универсальным методом исследования является моделирование на ЭВМ.

Раздел II. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

11. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

11.1. Понятие технических средств автоматизации

Любая система управления должна выполнять следующие функции:

- сбор информации о текущем состоянии технологического объекта управления (ОУ);
- определение критериев качества работы ОУ;
- нахождение оптимального режима функционирования ОУ и оптимальных управляющих воздействий, обеспечивающих экстремум критериев качества;
- реализация найденного оптимального режима на ОУ.

Эти функции могут выполняться обслуживающим персоналом или ТСА.

Типовые средства автоматизации могут быть: техническими; аппаратными; программно-техническими; общесистемными.

К *техническим* средствам автоматизации (ТСА) относят:

- датчики;
- исполнительные механизмы;
- регулирующие органы (РО);
- линии связи;
- вторичные приборы (показывающие и регистрирующие);
- устройства аналогового и цифрового регулирования;
- программно-задающие блоки;
- устройства логико-командного управления;
- модули сбора и первичной обработки данных и контроля состояния технологического объекта управления (ТОУ);
- модули гальванической развязки и нормализации сигналов;
- преобразователи сигналов из одной формы в другую;
- модули представления данных, индикации, регистрации и выработки сигналов управления;

- буферные запоминающие устройства;
- программируемые таймеры;
- специализированные вычислительные устройства, устройства допроцессорной подготовки.

К *программно-техническим* средствам автоматизации относят:

- аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;
- управляющие средства;
- блоки многоконтурного, аналогового и аналого-цифрового регулирования;
- устройства многосвязного программного логического управления;
- программируемые микроконтроллеры;
- локально-вычислительные сети.

В системах автоматического управления в качестве сигналов обычно используются электрические и механические величины (например, постоянный ток, напряжение, давление сжатого газа или жидкости, усилие и т. п.), т. к. они позволяют легко осуществлять преобразование, сравнение, передачу на расстояние и хранение информации.

В одних случаях сигналы возникают непосредственно вследствие протекающих при управлении процессов (изменения тока, напряжения, температуры, давления, наличия механических перемещений и т. д.), в других случаях они вырабатываются чувствительными элементами или датчиками.

Элементом автоматики называется простейшая конструктивно законченная в функциональном отношении ячейка (устройство, схема), выполняющая определенную самостоятельную функцию преобразования сигнала (информации) в системах автоматического управления:

- преобразование контролируемой величины в сигнал, функционально связанный с информацией об этой величине (чувствительные элементы, датчики);
- преобразование сигнала одного рода энергии в сигнал другого рода энергии: электрической в неэлектрическую, неэлектрической в электрическую, неэлектрической в неэлектрическую (электро-механические, термоэлектрические, электропневматические, фотоэлектрические и другие преобразователи);
- преобразование сигнала по значению энергии (усилители);

- преобразование сигнала по виду, т. е. непрерывного в дискретный и наоборот (аналого-цифровые, цифро-аналоговые и другие преобразователи);
- преобразование сигнала по форме, т. е. сигнала постоянного тока в сигнал переменного и наоборот (модуляторы, демодуляторы);
- функциональное преобразование сигналов (счетно-решающие элементы, функциональные элементы);
- сравнение сигналов и создание командного управляющего сигнала (элементы сравнения);
- выполнение логических операций с сигналами (логические элементы);
- распределение сигналов по различным цепям (распределители, коммутаторы);
- хранение сигналов (элементы памяти, накопители);
- использование сигналов для воздействия на управляемый процесс (исполнительные элементы).

Комплексы различных технических устройств и элементов, входящих в состав системы управления и соединенных электрическими, механическими и другими связями, на чертежах изображают в виде различных схем: электрических, гидравлических, пневматических и кинематических.

Схема служит для получения концентрированного и достаточно полного представления о составе и связях любого устройства или системы.

11.2. Классификация технических средств автоматизации

По выполняемым функциям основные элементы автоматики подразделяются на датчики, усилители, стабилизаторы, реле, распределители, двигатели и другие узлы (генераторы импульсов, логические элементы, выпрямители и т. д.).

По роду физических процессов, используемых в основе устройств, элементы автоматики делятся на электрические, ферромагнитные, электротепловые, электромашинные, радиоактивные, электронные, ионные и др.

Датчик (измерительный преобразователь, чувствительный элемент) – устройство, предназначенное для того, чтобы функ-

ционально преобразовать информацию, поступающую на его вход в виде некоторой физической величины, в другую физическую величину на выходе, более удобную для воздействия на последующие элементы (блоки).

Усилитель – элемент автоматики, осуществляющий количественное преобразование (чаще всего усиление) поступающей на его вход физической величины (тока, мощности, напряжения, давления и т. п.).

Стабилизатор – элемент автоматики, обеспечивающий постоянство выходной величины при колебаниях входной величины в определенных пределах.

Реле – элемент автоматики, в котором при достижении входной величины x определенного значения выходная величина y изменяется скачком.

Распределитель (шаговый искатель) – элемент автоматики, осуществляющий поочередное подключение одной величины к ряду цепей.

Исполнительные устройства – электромагниты с втяжным и поворотным якорями, электромагнитные муфты, а также электродвигатели, относящиеся к электромеханическим исполнительным элементам автоматических устройств.

Электродвигатель – устройство, обеспечивающее преобразование электрической энергии в механическую и преодолевающее при этом значительное механическое сопротивление со стороны перемещаемых устройств.

Каждый из элементов характеризуется какими-либо свойствами, которые определяются соответствующими характеристиками. Некоторые из этих характеристик являются общими для большинства элементов.

11.3. Основные характеристики

Главной общей характеристикой элементов является *коэффициент преобразования (коэффициент передачи)*, представляющий собой отношение выходной величины элемента y к входной величине x , или отношение приращения выходной величины Δy или dy к приращению входной величины Δx или dx .

В первом случае $k = y / x$ называется статическим коэффициентом преобразования, во втором $k' = \Delta y / \Delta x \approx dy / dx$ при $\Delta x \rightarrow 0$ – динамическим коэффициентом преобразования.

Связь между значениями x и y определяется функциональной зависимостью; значения коэффициентов k и k' зависят от формы характеристики элемента или вида функции $y = f(x)$, а также от того, при каких значениях величин подсчитываются k и k' .

В большинстве случаев выходная величина изменяется пропорционально входной и коэффициенты преобразования равны между собой: $k = k' = \text{const}$.

Величина, представляющая собой отношение относительного приращения выходной величины $\Delta y / y$ к относительному приращению входной величины $\Delta x / x$, называется *относительным коэффициентом преобразования* $\Delta\eta$.

Например, если изменение входной величины на 2 % вызывает изменение выходной величины на 3 %, то относительный коэффициент преобразования $\Delta\eta = 1,5$.

Применительно к различным элементам автоматики коэффициенты преобразования k' , k , $\Delta\eta$ и η имеют определенный физический смысл и свое название.

Применительно к датчику коэффициент преобразования называется чувствительностью (статической, динамической, относительной). Желательно, чтобы ее значение было как можно больше.

Для усилителей коэффициент преобразования принято называть коэффициентом усиления.

Для большинства усилителей (в т. ч. электрических) величины x и y являются однородными, поэтому коэффициент усиления представляет собой безразмерную величину.

При работе элементов выходная величина y может отклоняться от требуемого значения за счет изменения их внутренних свойств (износа, старения материалов и т. п.) или за счет изменения внешних факторов (колебания напряжения питания, окружающей температуры и др.), при этом происходит изменение характеристики элемента. Это отклонение называется погрешностью, которая может быть абсолютной и относительной.

Абсолютной погрешностью (ошибкой) называется разность между полученным значением выходной величины y' и расчетным (желаемым) ее значением $\Delta y = y' - y$.

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности Δy к номинальному (расчетному) значению выходной величины y .

В процентах относительная погрешность определяется как

$$Y = \frac{\Delta y}{y} 100 \%$$

В зависимости от причин, вызывающих отклонение, различают температурную, частотную, токовую и другие погрешности. Иногда пользуются приведенной погрешностью, под которой понимается отношение абсолютной погрешности к наибольшему значению выходной величины. В процентах приведенная погрешность $\gamma_{\text{прив}} = \Delta y \cdot 100 / y_{\text{max}}$. Если абсолютная погрешность постоянна, то приведенная погрешность также постоянна.

Погрешность, вызванная изменением характеристик элемента со временем, называется *нестабильностью* элемента.

Порогом чувствительности называется минимальная величина на входе элемента, которая вызывает изменение выходной величины (т. е. уверенно обнаруживается с помощью данного датчика).

Появление порога чувствительности вызывают как внешние, так и внутренние факторы (трение, люфты, гистерезис, внутренние шумы, помехи и др.).

При наличии релейных свойств характеристика элемента может приобретать реверсивный характер. В этом случае она также обладает порогом чувствительности и зоной нечувствительности.

Динамический режим работы элементов

Динамическим режимом называется процесс перехода элементов и систем из одного установившегося состояния в другое, т. е. такое условие их работы, когда входная величина x , а следовательно, и выходная величина y изменяются во времени.

Процесс изменения величин x и y начинается с некоторого порогового времени $t = t_{\text{п}}$ и может протекать в инерционном и безынерционном режимах.

При наличии инерционности наблюдается запаздывание изменения y по отношению к изменению x . Тогда при скачкообразном изменении входной величины от 0 до x_0 выходная величина y достигает установившегося $Y_{\text{уст}}$ не сразу, а по завершении промежутка

времени, в течение которого происходит переходный процесс. Переходный процесс может быть апериодическим (неколебательным) затухающим или колебательным затухающим. Время $t_{уст}$ (время установления), в течение которого выходная величина u достигает установившегося значения, зависит от инерционности элемента, характеризуемой постоянной времени T . Установление выходной величины u тем продолжительнее, чем больше значение T .

Время установления $t_{уст}$ выбирается в зависимости от необходимой точности измерения датчика и составляет обычно $(3...5)T$, что дает ошибку в динамическом режиме не более 5 %...10 %.

Степень приближения Δu обычно оговаривается и в большинстве случаев составляет от 1 % до 10 % от установившегося значения.

Разность между значениями выходной величины в динамическом и статическом режимах называется динамической погрешностью. Желательно, чтобы ее значение было как можно меньше.

В электромеханических и электромашинных элементах инерционность в основном определяется механической инерцией движущихся и вращающихся частей.

В электрических элементах инерционность определяется электромагнитной инерцией или другими подобными параметрами.

12. ДАТЧИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. ПОНЯТИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА, РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА

12.1. Понятия первичного измерительного преобразователя и датчика

Датчиком называется устройство, предназначенное для преобразования (информации, поступающей на его вход в виде некоторой физической величины, в другую функциональную величину, удобную для использования в последующих элементах автоматической системы). Следовательно, датчик в общем виде можно представить

состоящим из чувствительного и преобразующего элементов или только из чувствительного элемента.

Функциональные схемы различных датчиков показаны на рис. 12.1.

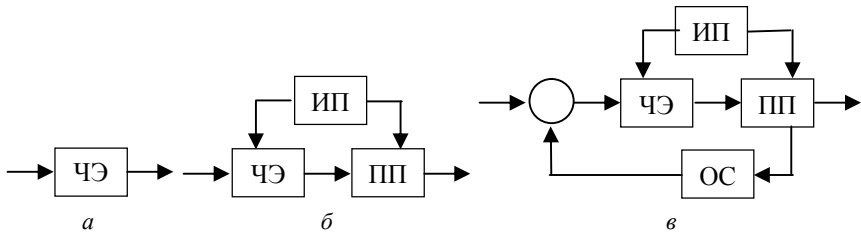


Рис. 12.1. Функциональные схемы датчиков:

a – с непосредственным преобразованием; *б* – с промежуточным преобразованием; *в* – с промежуточным преобразованием и операционной системой

Чувствительный элемент датчика иногда называют первичным преобразователем (воспринимающим или измерительным органом). Первичный преобразователь, как правило, реагирует на отклонение управляемой величины от установленного значения и передает это отклонение в форме определенного сигнала на другие преобразователи.

Большинство известных в автоматике и телемеханике датчиков преобразуют неэлектрическую контролируемую величину x в электрическую величину y (например, механическое перемещение в индуктивность или напряжение, температуру в ЭДС и т. п.) или неэлектрическую величину в неэлектрическую (например, механическое перемещение в давление воздуха или жидкости и др.). Следовательно, по роду энергии выходной величины различают электрические и неэлектрические датчики.

Все электрические датчики по принципу действия или производимого ими преобразования сигналов подразделяются на параметрические, преобразующие неэлектрические величины в электрические (сопротивление R , емкость C , индуктивность L), и генераторные, преобразующие неэлектрические величины в ЭДС. Наличие постороннего источника энергии – обязательное условие работы параметрического датчика.

К параметрическим датчикам относятся: контактные, реостатные, потенциометрические, тензодатчики, терморезисторы, емкостные, индуктивные, электронные, фоторезисторные и др.; к генераторным –

термоэлектрические (термопары), индукционные, пьезоэлектрические, вентильные фотоэлементы.

У *генераторных датчиков* (см. рис. 12.1, а) в чувствительном (воспринимающем) органе ИЭ происходит непосредственное преобразование контролируемой величины x в выходную y за счет энергии входной величины x . Эти датчики просты, поскольку не нуждаются во вспомогательном источнике питания. Преобразование входной величины x в выходную y осуществляется.

В состав *параметрических датчиков* (см. рис. 12.1, б), кроме первичного преобразователя УЭ, входят промежуточный преобразователь ПП и вспомогательный источник питания ИП. У этих датчиков контролируемая величина преобразуется первичным преобразователем УЭ за счет энергии источника ИП в промежуточную величину x_n , а затем при помощи преобразователя ПП доводится до удобной формы и определенного значения выходного сигнала y .

Наиболее сложны и совершенны *датчики с операционной системой (ОС)* (см. рис. 12.1, в). Схемы с ОС применяются в основном для определения свойств вещества и обнаружения дефектов в материалах по отражению акустических или электромагнитных волн высокой частоты, а также в оптических и радиоизотопных датчиках.

Классификация датчиков:

– по принципу действия: оптические (фотодатчики); магнитоэлектрические (на основе эффекта Холла); пьезоэлектрические; тензопреобразователи; емкостные; потенциметрические; индуктивные.

– по характеру выходного сигнала: дискретные; аналоговые; цифровые; импульсные.

– по среде передачи сигналов: проводные; беспроводные.

– по измеряемому параметру: датчики давления; расхода; уровня; температуры; концентрации; перемещения; угла поворота; фотодатчики и др.

12.2. Статическая и динамическая характеристики датчиков

Выбирая датчики, нужно учитывать следующие их характеристики: функциональную зависимость между входным и выходным

сигналами – статическую характеристику датчика; чувствительность; порог чувствительности – наименьшее изменение входной величины, вызывающее изменение величины выходного сигнала; погрешности датчика (основная и дополнительная); динамические характеристики, определяющие поведение датчика при быстрых изменениях входной величины.

Статическая характеристика показывает зависимость выходной величины y и от входной величины x (рис. 12.2):

$$y = f(x).$$

Чувствительность, или коэффициент преобразования, представляет собой отношение выходной величины y к входной величине x . Для датчиков с линейной статической характеристикой (рис. 12.2, *a*) чувствительность постоянна:

$$k_c = \frac{y}{x}. \quad (12.1)$$

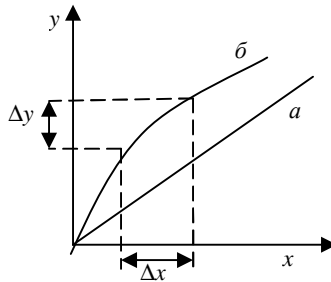


Рис. 12.2. Статические характеристики датчиков:
a – линейная; *b* – нелинейная

Для датчиков с нелинейной характеристикой (см. рис. 12.2, *b*) чувствительность называют дифференциальной и для разных точек характеристики определяют по формуле

$$k_n = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (12.2)$$

Динамическая характеристика (инерционность) определяет, как быстро датчик реагирует на изменения входного сигнала.

Динамическая характеристика обычно определяется значениями постоянной времени T и временем запаздывания τ .

12.3. Понятия исполнительного устройства, исполнительного механизма, регулирующего органа

Электрическим исполнительным механизмом в системах управления называют устройство, предназначенное для перемещения рабочего органа в соответствии с сигналами, поступающими от управляющего устройства. Рабочими органами могут быть различного рода дроссельные заслонки, клапаны, задвижки, шиберы, направляющие аппараты и другие регулирующие и запорные органы, способные производить изменение количества энергии или рабочего вещества, поступающего в объект управления. Перемещение рабочих органов может быть как поступательным, так и вращательным в пределах одного или нескольких оборотов. Следовательно, исполнительный механизм с помощью рабочего органа осуществляет непосредственное воздействие на управляемый объект.

В общем случае электрический исполнительный механизм состоит из электропривода, редуктора, узла обратной связи, датчика указателя положения выходного элемента и конечных выключателей. В качестве электропривода в исполнительных механизмах используются либо электромагниты, либо электродвигатели с понижающим редуктором для снижения значения скорости перемещения выходного элемента до величины, обеспечивающей возможность непосредственного соединения этого элемента (вала или штока) с рабочим органом.

Узлы обратной связи предназначены для введения в контур регулирования воздействия, пропорционального величине перемещения выходного элемента исполнительного механизма, а следовательно, и сочлененного с ним рабочего органа. С помощью конечных выключателей производится отключение электропривода исполнительного механизма при достижении рабочим органом своих конечных положений во избежание возможных повреждений механических звеньев, а также для ограничения перемещения рабо-

чего органа. Как правило, мощность сигнала, вырабатываемого регулирующим устройством, бывает недостаточной для непосредственного перемещения рабочего органа, поэтому исполнительный механизм можно рассматривать как усилитель мощности, в котором слабый входной сигнал, усиливаясь во много раз, передается на рабочий орган.

12.4. Классификация исполнительных устройств

Все электрические исполнительные механизмы, нашедшие широкое применение в различных отраслях современной техники автоматизации производственных процессов, можно разделить на две основные группы: электромагнитные и электродвигательные.

К первой группе относятся прежде всего *соленоидные электроприводы*, предназначенные для управления различного рода регулирующими и запорными клапанами, вентилями, золотниками и т. п. Сюда же можно отнести *исполнительные механизмы с различными видами электромагнитных муфт*. Характерная особенность электрических исполнительных механизмов этой группы состоит в том, что необходимое для перестановки рабочего органа усилие создается за счет электромагнита, являющегося неотъемлемой частью исполнительного механизма. Для целей регулирования соленоидные механизмы обычно применяются только в системах двухпозиционного регулирования.

В системах автоматического управления в качестве исполнительных элементов часто используются электромагнитные муфты, которые подразделяются на муфты трения и муфты скольжения.

Ко второй группе, наиболее распространенной в настоящее время, относятся *электрические исполнительные механизмы с электродвигателями различных типов и конструкций*.

12.4.1. Электродвигательные исполнительные механизмы

Электродвигательные исполнительные механизмы обычно состоят из двигателя, редуктора и тормоза (последнего в некоторых случаях может не быть). Сигнал управления поступает одновременно к двига-

телю и тормозу, механизм растормаживается и двигатель приводят в движение выходной орган. При исчезновении сигнала двигатель выключается, а тормоз останавливает механизм. Простота схемы, малое число элементов, участвующих в формировании регулирующего воздействия, и высокие эксплуатационные свойства сделали исполнительные механизмы с управляемыми двигателями основой для создания исполнительных устройств современных промышленных систем автоматического регулирования.

Не получили широкого распространения исполнительные механизмы с неуправляемыми двигателями, которые содержат управляемую электрическим сигналом механическую, электрическую либо гидравлическую муфту. Характерной их особенностью является то, что двигатель в них работает непрерывно все время работы системы регулирования, а сигнал управления от регулирующего прибора передается рабочему органу через управляемую муфту.

Исполнительные механизмы с управляемыми двигателями, в свою очередь, можно разделить по способу построения системы управления на механизмы с контактным и бесконтактным управлением. Включение, отключение и реверсирование электродвигателей исполнительных механизмов с контактным управлением производится с помощью различной релейной или контактной аппаратуры. Это определяет основную отличительную особенность исполнительных механизмов с контактным управлением: скорость выходного органа не зависит от величины управляющего сигнала, подаваемого на вход исполнительного устройства, а направление перемещения определяется знаком (или фазой) этого сигнала. Поэтому исполнительные механизмы с контактным управлением относят обычно к исполнительным устройствам с постоянной скоростью перемещения рабочего органа.

Для получения средней переменной скорости перемещения выходного органа исполнительного механизма при контактном управлении широко используется импульсный режим работы его электродвигателя. В большинстве исполнительных механизмов, предназначенных для работы в схемах с контактным управлением, используются реверсивные электродвигатели. Применение электродвигателей, вращающихся только в одну сторону, ограничено.

Бесконтактные электрические исполнительные механизмы отличаются повышенной надежностью и позволяют относительно просто получать как постоянную, так и переменную скорость

перемещения выходного органа. Для бесконтактного управления исполнительными механизмами используются электронные, магнитные или полупроводниковые усилители, а также их сочетание. При работе управляющих усилителей в релейном режиме скорость перемещения выходного органа исполнительных механизмов постоянна.

Как электрические исполнительные механизмы с контактным управлением, так и бесконтактные можно подразделять также по следующим признакам.

По назначению:

- однооборотные; с вращательным движением выходного вала;
- многооборотные; с поступательным движением выходного вала;
- прямоходные.

По характеру действия:

- позиционного действия;
- пропорционального действия.

По исполнению:

- в нормальном исполнении;
- в специальном исполнении (пылеводозащищенном, взрывозащищенном, тропическом, морском и т. п.).

12.4.2. Пневматические исполнительные механизмы

Классификация пневматических исполнительных механизмов представлена на рис. 12.3.

Пневматические исполнительные механизмы имеют следующие характерные особенности: простота управления и обслуживания, дешевизна, высокая надежность, пожаробезопасность, отсутствие загрязнений. К их недостаткам можно отнести трудность поддержания заданной скорости и осуществления позиционного управления, низкую выходную мощность, необходимость вводить в конструкции смазку и предупреждать коррозию.

Отсюда следует, что использование воздуха предпочтительно в тех случаях, когда нет необходимости в устройствах с высокой выходной мощностью, имеются ограничения в окружающей среде при эксплуатации, нельзя рассчитывать на достаточно высокий уровень квалификации механиков и специалистов на производстве, существуют ограничения в отношении стоимости и т. д.

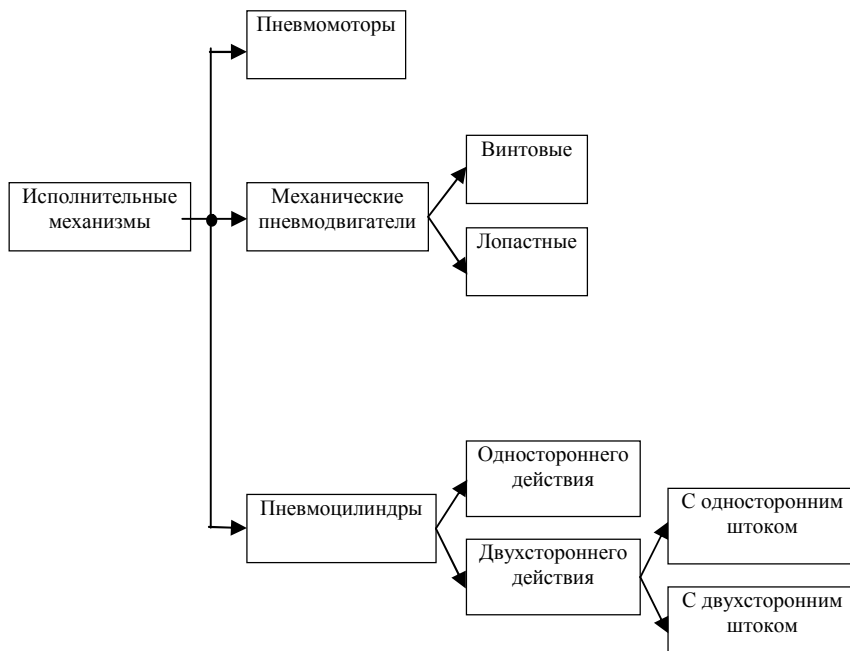


Рис. 12.3. Классификация пневматических исполнительных механизмов

Пневматические исполнительные механизмы подразделяются на устройства прямолинейного и вращательного движения. При использовании цилиндров необходимо обратить внимание на следующие моменты: нагрузка обязательно должна быть приложена в осевом направлении; при монтаже должно быть обеспечено отсутствие перекосов в цилиндре; необходимо предусматривать запас хода и выходной мощности; требуется подбор смазочных средств; необходимы надлежащий выбор температуры окружающей среды, использование чистого воздуха и удаление грязи из трубопроводов.

При техническом обслуживании основными вопросами являются регулярный осмотр и замена трущихся деталей с изношенными поверхностями и уплотнений, т. к. главной причиной снижения выходной мощности цилиндра является течь через уплотнения и из-за износа деталей.

При использовании сильфонных цилиндров необходима особая осторожность, поскольку сильфон легко повреждается при скручивании вала. Не следует также прокручивать вал вручную.

12.4.3. Гидравлические исполнительные механизмы

В современных промышленных роботах широко применяют гидравлические исполнительные механизмы. Это объясняется тем, что устройства гидравлического типа имеют ряд преимуществ, в частности легкость, компактность, возможность использования высокого давления, небольшой коэффициент сжатия, высокую частоту собственных колебаний, легкость регулирования давления и расхода, простоту усиления; они удобны в обслуживании, простоты в остановке, смазке и др.). К недостаткам же относятся: необходимость в автономном энергетическом блоке; изменение вязкости под влиянием температуры, что вызывает изменение потерь давления в трубопроводе, и изменение характеристик из-за внутренних утечек; горючесть масла; необходимость трубопроводов и проверки рабочей жидкости; как правило, большие затраты в начальный период и т. д.

В промышленных роботах гидравлические исполнительные механизмы чаще всего используются следующим образом. Прямое движение осуществляется с помощью гидроцилиндров (одноштоковых, двустороннего действия, моментных гидроцилиндров и зубчатых реек). Движения поворота осуществляются с помощью установленных шарнирно гидроцилиндров, гидромоторов и редукторов, гидроцилиндров и реечных передач, а также цепных передач. Имеется множество видов гидравлических исполнительных механизмов, включая конструкции возвратно-поступательного движения и вращения.

При применении гидравлических исполнительных механизмов в позиционных системах управления с сервомеханизмами следует обратить особое внимание на следующие моменты:

1) желательно уменьшение трения, т. к. в противном случае увеличивается зона нечувствительности и ухудшается точность остановки. Кроме того, если разница между статическим и динамическим трением чрезмерно велика, может наблюдаться прерывистое движение и ухудшаются возможности управления;

2) допустимы только небольшие внутренние утечки, т. к. при повышенной утечке снижается возможность стабильной остановки и падает КПД;

3) требуются хорошие характеристики при низких скоростях. Для промышленных роботов минимальное число оборотов на низких скоростях должно быть достаточно низким, а движение – плавным. Необходим широкий диапазон изменения скоростей от низких до высоких;

4) исполнительные механизмы применяются как устройства, заменяющие человека, поэтому от них требуются такие же или большие быстродействия и подвижность. Вследствие этого необходимо выбирать устройства, имеющие хорошие частотные характеристики. Кроме того, при расчете занимаемой при установке механизмов площади требуются также малогабаритность и небольшой вес. Исполнительные механизмы используются как одно из звеньев в системе производственного оборудования, поэтому должны быть достаточно прочными. От исполнительных механизмов как автоматических устройств требуется непрерывная надежная работа в течение 24 ч. Необходимо предусмотреть возможность форсированного режима эксплуатации, частых пусков и остановок, прямого и обратного хода и т. д.

12.4.4. Электромагнитные реле

Магнитоэлектрическое реле по устройству аналогично магнитоэлектрическому измерительному прибору. Обмотка реле выполнена в форме рамки и помещена в поле постоянного магнита. Рамка, когда по ней проходит ток, поворачивается, преодолевая сопротивление пружины, и управляет электрическими контактами. Магнитоэлектрическое реле работает на постоянном токе и является наиболее чувствительным. Оно создает малое давление на контакты и поэтому может управлять лишь нагрузкой малой мощности. Электродинамическое реле по принципу действия подобно магнитоэлектрическому, но в нем магнитное поле создается специальной обмоткой возбуждения, размещенной на магнитопроводе.

Электродинамическое реле работает как на постоянном, так и на переменном токе. Входом реле могут служить обе обмотки. Обычно эти реле работают на переменном токе, развивая на контактах усилие

$$F = kI_1I_2\cos\varphi, \quad (12.3)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

I_1, I_2 – значения тока в обмотках реле;

φ – угол между векторами токов.

Следовательно, это реле можно использовать как реле сдвига фаз, срабатывающее при определенном угле.

Индукционное реле использует явление взаимодействия переменного магнитного потока, создаваемого обмоткой реле, и тока, который индуцируется в подвижном диске, цилиндре или короткозамкнутой рамке. Индукционные реле работают только на переменном токе. Они имеют одну или две обмотки, в которые подают входные сигналы. Под действием входных сигналов создается усилие вращения, определяемое по формуле. Индукционные реле проще, чем электродинамические, и находят широкое применение в устройствах автоматической защиты электроустановок в качестве реле мощности, фазы, тока и частоты.

Ферромагнитные реле реагируют на изменение магнитных величин (магнитного потока, напряженности магнитного поля) или магнитных характеристик ферромагнитных материалов (магнитной проницаемости, остаточной индукции и т. п.).

Электронные и ионные реле реагируют непосредственно на силу тока или на значение напряжения, под действием которых происходит скачкообразное изменение проводимости электронных, полупроводниковых или ионных приборов.

Электротепловые реле реагируют на изменение тепловых величин (температуры, теплового потока и т. д.). Принцип их действия основан на использовании изменения свойств материалов под воздействием температуры: линейного или объемного расширения, перехода веществ из твердого в жидкое или из жидкого в газообразное состояние, изменение плотности или вязкости газов, изменение удельного сопротивления или диэлектрической проницаемости материалов и т. д.

Резонансные реле используют явление резонанса в электрических колебательных системах и применяются в частотных устройствах защиты и телемеханики.

Реле в общем виде содержит первичный преобразователь, на который воздействуют сигналы, подаваемые извне, исполнительный орган, предназначенный для передачи сигналов от реле во внешнюю цепь, и замедляющий орган, обеспечивающий замедление действия реле и РО, при помощи которого изменяют параметры срабатывания реле. В различных конструкциях реле эти органы могут быть или явно выражены, или объединены друг с другом. Реле, которые при воздействии внешних физических явлений скачкообразно изменяют свои параметры (сопротивление, емкость, индуктивность или ЭДС) без видимого разрыва электрических управляемых цепей, называют бесконтактными. Примерами бесконтактных реле могут служить магнитный усилитель в релейном режиме и логические элементы.

Электрическое реле в общем случае является и промежуточным элементом, приводящим в действие одну или несколько управляемых электрических цепей при воздействии на него определенных электрических сигналов.

Реле выдержки времени предназначены для создания определенной временной задержки при передаче сигнала от одного элемента автоматики к другому. Реле выдержки времени изготавливают с электрическими, механическими, пневматическими, гидравлическими и другими устройствами замедления. Наибольшее распространение получили реле с электрическими устройствами замедления, реагирующие на сигналы постоянного или переменного тока.

Для создания сравнительно небольшой выдержки времени (до 0,5 с) часто применяют простейшие схемные решения, замедляющие нарастание или спадание токов в обмотке электромагнитного реле постоянного тока при помощи резисторов (рис. 12.4, *а*), полупроводниковых диодов (рис. 12.4, *б*), конденсаторов (рис. 12.4, *в*), дросселей и короткозамкнутых витков (рис. 12.4, *г*).

На рис. 12.4 показаны схемы замедления срабатывания и отпускания электромагнитного реле *KV*. При большом числе витков обмотки реле весьма эффективны методы шунтирования обмотки активным сопротивлением или диодом. Сущность метода замедления на отпускание состоит в том, что ЭДС самоиндукции, возникающая

в обмотке реле после его отключения ключом, поддерживает протекание тока в прежнем направлении.

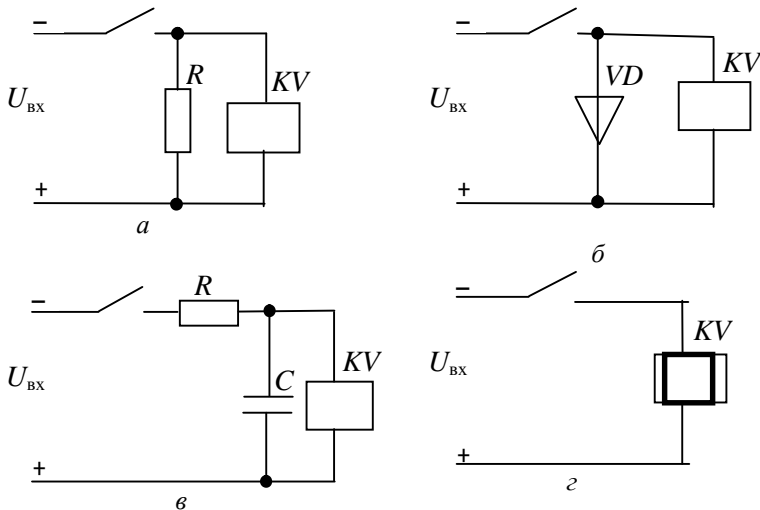


Рис. 12.4. Схемы замедления срабатывания и отпускания электромагнитного реле KV

Электромагнитные шаговые искатели, называемые также шаговыми распределителями, представляют собой электромагнитный многопозиционный и многорядный переключатель – важный аппарат телемеханических и вычислительных устройств, широко используемый в устройствах связи и автоматических системах с большим числом ОУ.

Шаговые искатели служат для последовательного во времени переключения электрических цепей и применяются чаще всего с целью поочередного подключения ряда выходных электрических цепей к одному входу или наоборот. Они могут быть контактными и бесконтактными (электронные, полупроводниковые, магнитные). Наибольшее применение в автоматике находят контактные шаговые искатели с электромагнитным приводом.

По принципу действия кинематической системы электромагнитные шаговые искатели разделяют на вращательные типа ШИ и подъемно-вращательные типа ДШИ, называемые также декадно-шаговыми.

В *электронных реле* используют различные полупроводниковые приборы и вакуумные электронные лампы, а в ионных – тиратроны тлеющего разряда (ионные приборы с холодным катодом). Эти реле представляют собой разновидности несимметричных триггеров, рассматриваемых в курсе «Электроника». Обычно электронное реле представляет собой усилитель постоянного тока, охваченный положительной обратной связью. Эти реле отличаются от других большой чувствительностью (мощность срабатывания – 10...12 Вт), высоким коэффициентом усиления, малой инерционностью и отсутствием контактных и подвижных элементов.

12.5. Основные характеристики исполнительных устройств

Несмотря на различия в принципе действия и конструкции, реле характеризуются рядом общих параметров.

Параметр срабатывания – минимальное значение входного сигнала, при котором происходит срабатывание реле, т. е. переключение его контактов. Электрические реле выполняют на токи срабатывания от десятков микроампер (электронные реле) до десятков ампер (электромагнитные реле). Параметр срабатывания характеризует чувствительность реле.

Параметр отпускания – максимальное значение входного сигнала, при котором происходит возврат реле в исходное состояние. Параметры срабатывания и отпускания реле связаны между собой *коэффициентом возврата*, который равен отношению параметра отпускания к параметру срабатывания.

Коэффициент возврата электромагнитных реле находится в пределах от 0,4 до 0,9, а у электронных может достигать 0,98...0,99.

Рабочий параметр – установившееся значение физической величины в рабочем номинальном режиме реле; Отношение рабочего параметра к параметру срабатывания называется *коэффициентом запаса при срабатывании*.

Отношение параметра отпускания к рабочему параметру называется *коэффициентом запаса*. Коэффициент запаса при срабатывании всегда больше единицы, а при возврате – всегда меньше единицы.

При подаче напряжения на обмотку реле оно срабатывает не мгновенно, а через некоторый промежуток времени, называемый

временем срабатывания реле. Отпускание реле после снятия напряжения или снижения его значения до значения параметра отпускания происходит не сразу, а через промежуток времени, называемый *временем отпускания реле*. Эти замедления объясняются тем, что вследствие большой индуктивности обмоток реле ток возрастает и спадает не мгновенно, а постепенно.

Время трогания $t_{тр}$ – это время, в течение которого подвижные части реле находятся в покое, а значение тока возрастает до значения тока $I_{ср}$ срабатывания реле. В промежуток времени от срабатывания ($t_{ср}$) до трогания ($t_{тр}$) подвижные части реле переходят из одного устойчивого положения в другое, т. е. реле срабатывает. Затем ток возрастает до номинального значения. При снятии напряжения ток реле постепенно уменьшается до значения $I_{отп}$, при котором подвижные части реле возвращаются в исходное состояние. Следовательно, отключение реле занимает период $t_{отп}$. Время перехода подвижных частей реле из одного состояния в другое очень мало, и им обычно пренебрегают. Основное время занимает процесс нарастания тока до значения срабатывания и его уменьшения после отключения до значения отпускания (рис. 12.5).

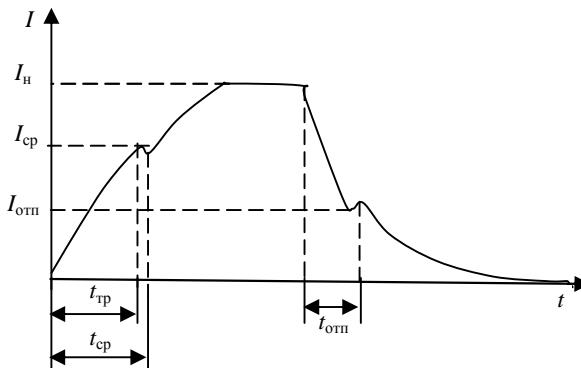


Рис. 12.5. Диаграмма изменения тока при срабатывании реле

По времени срабатывания реле делят на быстродействующие ($t_{ср} = 50$ мс), нормальнодействующие ($t_{ср} = 50...150$ мс) и медленнодействующие ($t_{ср} = 0,15...1,00$ с). Реле с временем срабатывания менее 1 мс называют безынерционными, а с $t_{ср} > 1$ с – реле выдержки времени.

13. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

13.1. Омические первичные преобразователи: потенциометрические, тензометрические

Принцип действия омических (резистивных) датчиков основан на изменении их активного сопротивления при изменении длины l , площади сечения S или удельного сопротивления ρ :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (13.1)$$

Омические датчики делятся на потенциометрические, тензометрические, угольные.

Омические (реостатные) первичные преобразователи используют в датчиках контроля и измерения линейных и угловых перемещений, сил и моментов, колебаний и вибраций, ускорений и других неэлектрических величин. К ним относят контактные, потенциометрические, угольные, тензометрические и другие первичные преобразователи, принцип действия которых основан на изменении омического сопротивления специальных элементов под действием измеряемой входной величины. Общим их достоинством является простота конструкции, безынерционность, стабильность, большой коэффициент чувствительности и значительная мощность на выходе.

Контактные датчики, замыкая или размыкая свои контакты, преобразуют механическое воздействие в электрический импульс переменного или постоянного тока. К контактам последовательно подключают сигнальные лампы, реле, усилители, измерительные приборы и другие устройства (преобразователи). При помощи контактных первичных преобразователей П датчики измеряют и контролируют усилия, промежуточные и предельные перемещения (рис. 13.1, *а*), конфигурации и размеры (рис. 13.1, *б*) изделий или отдельных узлов установки. Зона нечувствительности рассматриваемых датчиков определяется начальным зазором между контактами.

Контактные датчики могут быть однопредельными (рис. 13.1, *а*) и многопредельными (рис. 13.1, *б*) – для измерения величин, изменяющихся в значительных пределах. Основные недостатки контактных первичных преобразователей – сложность обеспечения непрерывного контроля и ограниченный срок службы контактной системы.

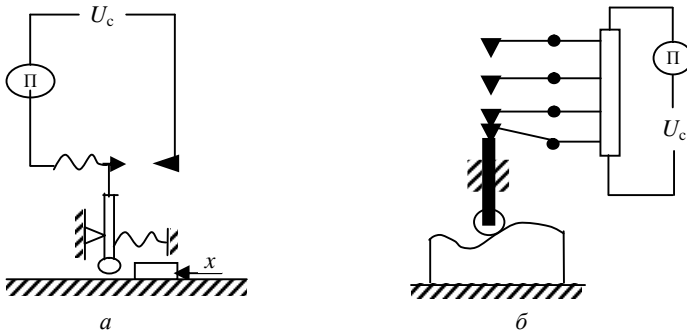


Рис. 13.1. Схемы контактных датчиков:
а – однопредельных; *б* – многопредельных

Потенциометрические измерительные преобразователи предназначены для преобразования линейных или угловых перемещений в напряжения постоянного или переменного тока.

При автоматизации различных технологических процессов потенциометрический измерительный преобразователь выполняет функции преобразования механического перемещения в пропорциональный электрический сигнал. Простота преобразования различных физических величин в перемещение позволяет использовать потенциометрические измерительные преобразователи в приборах для измерения уровня расхода, давления, силы, веса и т. п., а также в системах для непосредственной передачи угла поворота, в следящих системах, регуляторах, устройствах обработки данных, цифровых индикаторах.

В системах автоматики наибольшее распространение получили проволочные потенциометрические измерительные преобразователи.

В качестве материала для каркасов используются пластмассы, текстолит, гетинакс, керамика и другие изоляционные материалы.

Применяются также алюминиевые каркасы с изоляционной оксидной пленкой. Алюминиевый каркас обладает высокой теплопроводностью и позволяет увеличивать плотность тока в обмотке, а следовательно, повысить чувствительность датчика.

Для точных потенциметрических преобразователей в качестве материала обмотки применяются сплавы на основе благородных материалов. К ним относятся: платиноиридиевые, платиномедные, золотоникелевые и палладийсеребряные. Диаметр проволоки для точных датчиков выбирается в пределах от 0,03 до 0,10 мм.

Для грубых потенциметрических преобразователей обмотка изготавливается из сплавов неблагородных металлов (константан, манганин, нихром). Диаметр проволоки – 0,1...0,3 мм.

Щетки движков точных преобразователей выполняются в виде нескольких проволочек. В более грубых роль подвижного контакта выполняют пластинчатые пружины.

Входным сигналом потенциметрического преобразователя (рис. 13.2, *a*) является перемещение контактной щетки. Выходным сигналом является напряжение, снимаемое со щеток потенциметра.

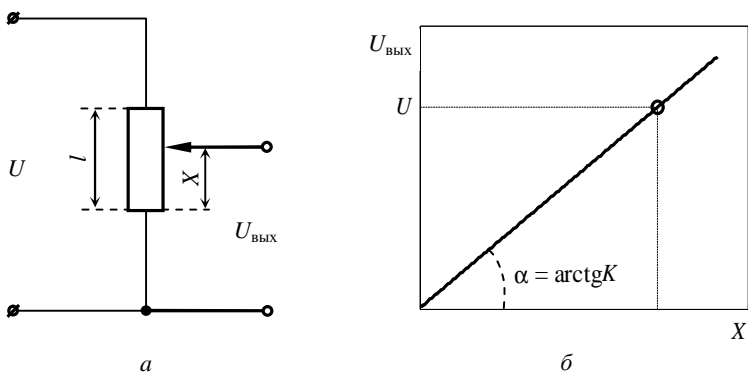


Рис. 13.2. Потенциметрический датчик:
a – схема включения; *б* – статическая характеристика

К зажимам обмотки реостата подключается напряжение U постоянного или переменного тока неизменного значения. При перемещении движка выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ меняется про-

порционально входной величине X . Таким образом осуществляется преобразование перемещения в напряжение (см. рис. 13.2, б):

$$U_{\text{вых}} = \frac{U}{R} r = \frac{U}{l} X = kX, \quad (13.2)$$

где R – полное сопротивление преобразователя;

r – сопротивление части обмотки;

l – длина намотки обмотки;

k – коэффициент преобразования (чувствительность) в режиме холостого хода.

Для преобразователя углового перемещения в режиме холостого хода функция преобразования равна:

$$U_{\text{вых}} = k\phi, \quad (13.3)$$

где ϕ – угол поворота движка от нулевого положения, рад.

Таким образом, статическая характеристика линейных потенциометров при отсутствии нагрузки представляет собой прямую, проходящую через начало координат под углом

$$\alpha = \text{arctg}k. \quad (13.4)$$

Из приведенной статической характеристики следует, что рассмотренные преобразователи относятся к одноктактным элементам, т. е. не реагируют на знак входного сигнала. В ряде случаев необходимы преобразователи, учитывающие знак входного сигнала, – *двухтактные* измерительные преобразователи. Их можно построить на основе одноктактных потенциметрических преобразователей, если снимать выходной сигнал с движка и средней точки потенциометра или с диагонали мостовой схемы, образованной двумя потенциметрическими датчиками со средней точкой.

Два возможных варианта включения потенциметрических датчиков по двухтактной схеме приведены на рис. 13.3, а, б. Их статические характеристики 1 и 2 (рис. 13.3, в) имеют разную

крутизну. Это объясняется тем, что при включении преобразователей по мостовой схеме (рис. 13.3, б) изменение входного сигнала обрабатывается двумя движками, смещающимися в разные стороны от средней точки, что приводит к появлению удвоенного выходного напряжения по сравнению со схемой, представленной на рис. 13.3, а.

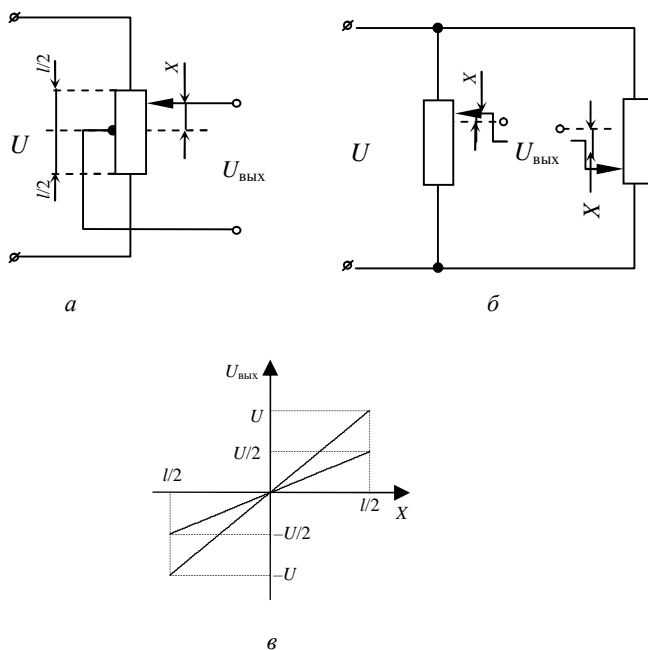


Рис. 13.3. Варианты включения потенциметрического датчика:
 а – с использованием средней точки; б – по мостовой схеме;
 в – статические характеристики 1 и 2, соответствующие схемам включения

Реальные характеристики реостатных преобразователей значительно отличаются от рассмотренных идеальных из-за различных погрешностей: дискретности выходного сопротивления, отклонения функции преобразования от расчетной, вызванного непостоянством диаметра намоточного провода и его удельного электрического сопротивления, изменения температуры преобразователя, влияния сопротивления нагрузки и других факторов.

При перемещении движка сопротивление включенной части потенциометра изменяется дискретно с шагом, равным сопротивлению одного витка:

$$\Delta R = \frac{R}{w}, \quad (13.5)$$

где R – сопротивление реостата, Ом;
 w – число витков обмотки.

Соответственно изменяется и выходное напряжение. Это явление определяет два фактора: порог чувствительности и зону нечувствительности. Если рассматривать их относительно входного перемещения, то численно они будут равны диаметру провода обмотки типа «виток к витку» или шагу намотки III при расположении витков с зазором.

Абсолютная погрешность дискретности или зона нечувствительности в зависимости от формы представления характеристики (в функции сопротивления, перемещения или напряжения) будет определяться выражениями:

$$\Delta X = \frac{L}{2w};$$
$$\Delta U = \frac{R}{2w}. \quad (13.6)$$

Выражения для относительных погрешностей примут вид:

$$\delta R = \delta U = \delta X = \frac{1}{2w}. \quad (13.7)$$

В реальных конструкциях линейных реостатных преобразователей число витков составляет около 2000 (минимально около 200), а погрешность дискретности равна 0,02 %...0,03 %. Суммарная погрешность, вызванная непостоянством электрических параметров преобразователя, достигает 0,03 %...0,10 %. Температурная

погрешность, определяемая прежде всего изменением сопротивления намоточного провода с температурой, не превышает обычно 0,1 % на 10 °С.

Наибольшую погрешность может обусловить неправильно выбранный режим работы преобразователя – малое сопротивление нагрузки. Реостатный преобразователь с подключенной нагрузкой R_H (рис. 13.4, а) можно представить эквивалентной схемой (рис. 13.4, б) ненагруженного преобразователя.

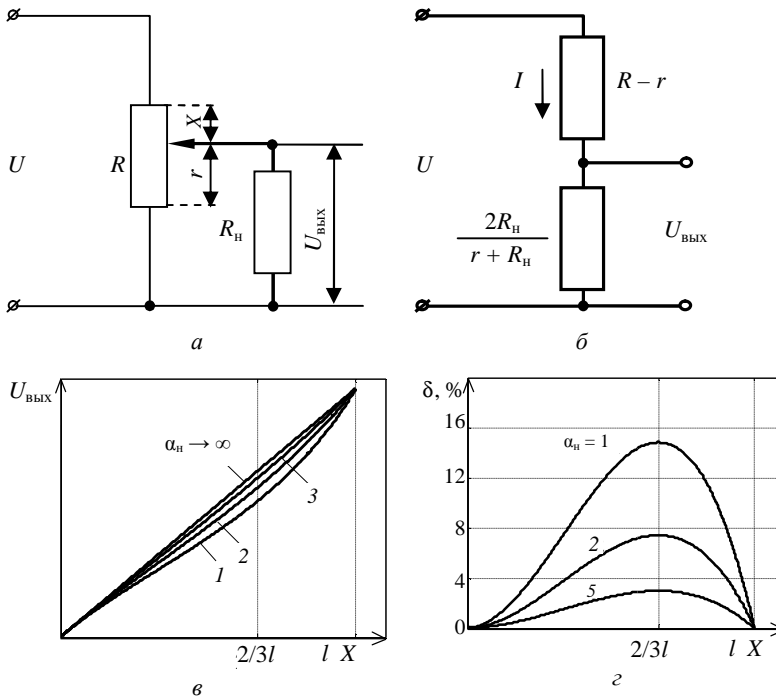


Рис. 13.4. Потенциометрический датчик:
 а – схема включения с нагрузкой; б – эквивалентная схема;
 в – статические характеристики; г – графики погрешностей

Для эквивалентной схемы справедливы следующие соотношения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I \frac{R_H r}{R_H + r};$$

$$I = \frac{U}{R - r + \frac{R_H}{R_H + r}}. \quad (13.8)$$

Подставив второе выражение в первое, получают:

$$U_{\text{вых}} = \frac{UR_H r}{RR_H + Rr - r^2}. \quad (13.9)$$

Из полученного выражения видно, что статическая характеристика $U_{\text{вых}} = f(r)$ зависит от сопротивления нагрузки и определяет методическую погрешность. Существенное значение имеет соотношение R_H и R . Можно рассмотреть два случая:

- R_H значительно больше R ;
- R_H соизмеримо с R реостата.

Выражение (13.9) можно представить в виде:

$$U_{\text{вых}} = \frac{Ur}{R + \frac{R}{R_H}k - \frac{r^2}{R_H}}. \quad (13.10)$$

Для $R_H > R$ величинами $\frac{R}{R_H}r$, $\frac{r^2}{R_H}$ можно пренебречь по сравнению с R .

Тогда:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U}{R}r = U_{\text{вых}_0}. \quad (13.11)$$

Аналогичный результат можно получить, приняв $R_H \rightarrow \infty$, и прийти к режиму холостого хода, т. е. отсутствию нагрузки на выходе преобразователя.

Для $R_{\text{н}} = R$ абсолютная погрешность от несовпадения идеальной и реальной статической характеристик определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_{\text{вых}_0} - U_{\text{вых}} = \frac{Ur}{R} - \frac{UR_{\text{н}}r}{RR_{\text{н}} + Rr - r^2} = \\ &= U \frac{r^2(R-r)}{R^2R_{\text{н}} + R^2r - Rr^2} \approx U \frac{r^2(r-r)}{R^2R_{\text{н}}}. \end{aligned} \quad (13.12)$$

Относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} = \frac{r^2(R-r)}{R^2R_{\text{н}}}. \quad (13.13)$$

Чтобы определить максимальную погрешность, производную приравнивают к нулю:

$$\frac{d\delta}{dr} = \frac{2rR - 3r^2}{R^2R_{\text{н}}} = 0, \quad (13.14)$$

что справедливо при условии $2rR - 3r^2 = 0$, откуда получают:

$$r = \frac{2}{3}R. \quad (13.15)$$

Следовательно, преобразователь имеет наибольшую погрешность при отклонении движка на $\frac{2}{3}$ общей длины l . Подставив выражение (13.15) в (13.12), получают формулу для расчета максимальной погрешности:

$$\delta = \frac{\left(\frac{2}{3}R\right)^2 \left(R - \frac{2}{3}R\right) 2rR - 3r^2}{R^2R_{\text{н}}} = \frac{4R}{27R_{\text{н}}} = \frac{4}{27\alpha_{\text{н}}}, \quad (13.16)$$

где $\alpha_n = \frac{R_n}{R}$ – коэффициент нагрузки.

Из выражения (13.16) и приведенных статических характеристик преобразователя при различных коэффициентах нагрузки α_n (см. рис. 13.4, в, з) следует, что с увеличением сопротивления нагрузки относительная погрешность уменьшается. В общем случае необходимо, чтобы коэффициент нагрузки был как можно больше, однако на практике его выбирают в пределах 10...100. Выходное напряжение преобразователя при подключении нагрузки падает из-за шунтирования сопротивлением R_n части r сопротивления потенциометра R .

Несмотря на недостатки, присущие потенциометрическим измерительным преобразователям (невысокая надежность, особенно при работе в условиях вибрации, перегрузок, обусловленная наличием скользящего контакта, сравнительно небольшая чувствительность и большой порог чувствительности), они получили широкое применение в устройствах автоматики благодаря ряду достоинств по сравнению с другими типами измерительных преобразователей:

- простота конструкции, малый вес, габариты;
- возможность работы на постоянном токе;
- возможность получения линейной статической характеристики с высокой точностью;
- стабильность характеристики;
- отсутствие фазового сдвига выходного напряжения при работе на переменном токе.

Угольные датчики основаны на принципе изменения собственного электрического сопротивления под действием приложенных сил.

Простейший датчик этого типа (рис. 13.5, а) представляет собой угольный столб, набранный из графитовых дисков. Диски расположены между контактными шайбами. Электрическое сопротивление угольного столба складывается из относительно небольшого собственного сопротивления дисков и основного сопротивления перехода между дисками, которое в значительной степени зависит от того, насколько плотно прилегают диски друг к другу, т. е. от усилия сжатия, действующего на диски.

На рис. 13.5, б показаны кривые изменения сопротивления R , Ом, и выходного тока $I_{\text{н}}$, А, датчика в зависимости от усилия сжатия F , Н. Сопротивление угольного датчика

$$R = R_0 + \frac{\alpha}{F}, \quad (13.17)$$

а значение тока во вторичном приборе

$$I = \frac{U}{R + R_0 + \frac{\alpha}{F}}, \quad (13.18)$$

где R_0 – постоянная величина, равная сопротивлению столба при F , Ом;

α – постоянный коэффициент.

Чувствительность угольного датчика, Ом/Н:

$$k = \frac{dR}{dF} = -\frac{\alpha}{F^2}. \quad (13.19)$$

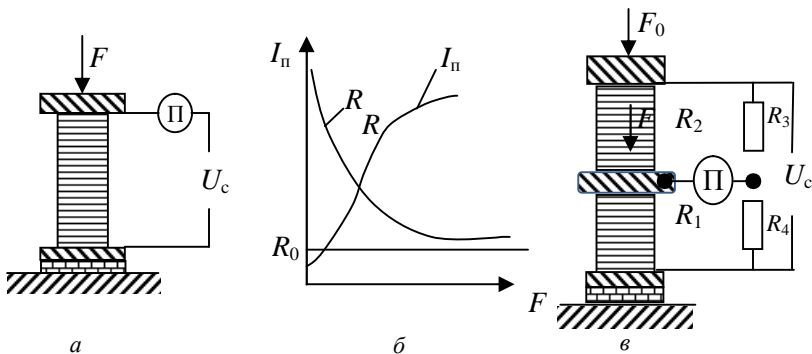


Рис. 13.5. Угольные датчики:
 а – простейший угольный датчик;
 б – статическая характеристика угольного датчика;
 в – дифференциальный угольный датчик

Для повышения чувствительности таких датчиков применяют мостовые схемы включения угольных столбов (см. рис. 13.5, *в*). Входное усилие F вызывает в одном плече моста уменьшение сопротивления R_1 в результате сжатия, а во втором – увеличение R_2 . Такие датчики называют дифференциальными. Чтобы рабочая точка находилась на характеристике, близкой к линейной части, на угольный столб постоянно действует некоторое усилие сжатия F_0 .

Основные недостатки угольных датчиков: нестабильность сопротивления, наличие гистерезиса и нелинейность характеристики. Наибольшая нелинейность статической характеристики простейшего угольного датчика соответствует области малых усилий. У дифференциального датчика характеристика близка к линейной.

В работе *тензометрических первичных преобразователей* используется зависимость электрического сопротивления материала от его деформации. Тензодатчики представляют собой тонкую проволоку (рис. 13.6, *а*, *б*), определенным образом уложенную и обклеенную с двух сторон пленкой. Тензопреобразователи приклеивают прочным клеем к испытываемой детали. При деформации детали изменяется электрическое сопротивление проволоки в результате изменения ее геометрических размеров и удельного сопротивления. Изменение сопротивления ΔR проволоки при ее сжатии и растяжении связано с относительной деформацией $\varepsilon = \Delta l / L$.

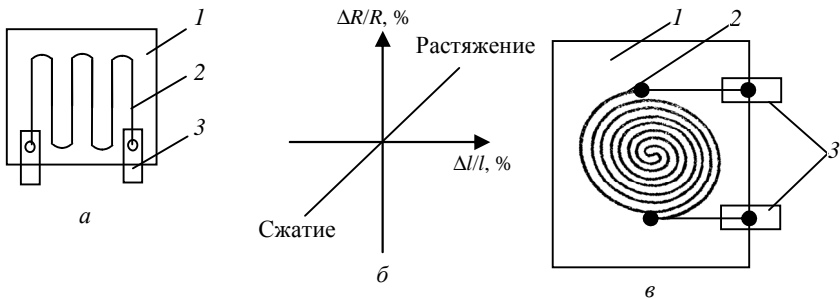


Рис. 13.6. Тензометрические первичные преобразователи:
а – петлевой; *б* – статическая характеристика тензопреобразователя; *в* – преобразователь для измерения кольцевых деформаций;
 1 – пленка; 2 – проволока; 3 – выводы

Коэффициент чувствительности определяется уравнением

$$k = 1 + 2\mu + \frac{1\Delta\rho}{\varepsilon\rho} = \frac{\Delta R}{R}, \quad (13.20)$$

где l – длина проволоки;

ε – коэффициент Пуассона (для металлов – 0,24...0,40);

ρ – удельное сопротивление металла;

$\Delta R / R$ – относительное изменение удельного сопротивления проволоки при ее деформации.

Поскольку при работе первичного преобразователя деформации подвергается лишь часть его длины (например, исключаются участки закругления на рис. 13.6, *a*), то чувствительность датчика k меньше коэффициента, характеризующего чувствительность самого материала тензопреобразователя.

Размеры тензопреобразователей по длине – от 2 до 150 мм, по ширине – от 3 до 60 мм, сопротивление – от 100 до 200 Ом. Обычно тензопреобразователи включают в мостовую схему и они образуют тензодатчик.

К недостаткам датчиков такого типа следует отнести некоторую температурную погрешность и малую чувствительность. Термокомпенсация измерительных схем и применение высокочувствительных вторичных приборов с усилителями позволяют в значительной мере преодолеть эти недостатки. Наибольшее распространение получили нихромовые и константановые проволочные тензопреобразователи, для которых $k = 1,9...2,2$.

В последние годы вместо металлических тензосопротивлений предложены полупроводниковые тензолиты – тонкие стержни прямоугольного сечения из монокристалла кремния. Их преимущество – высокий коэффициент чувствительности ($k = 125$), недостатки – зависимость их сопротивления от температуры.

13.2. Электромагнитные первичные преобразователи

Принцип действия электромагнитных преобразователей основан на изменении индуктивности L магнитной системы под воздействием входной величины (перемещения, деформации, уровня, давления и т. п.). По виду преобразования электромагнитные устройства делятся на четыре группы: индуктивные, трансформаторные, магнитоупругие и индукционные.

Индуктивные датчики основаны на изменении индуктивного сопротивления электромагнитного дросселя при перемещении одной из его подвижных деталей, обычно якоря. Они широко применяются для измерения малых угловых и линейных механических перемещений, деформаций, контроля размеров деталей, а также для управления следящими устройствами.

Следует рассмотреть работу *однотактного* индуктивного преобразователя (рис. 13.7, а).

Выходной сигнал получают в виде переменного напряжения, снимаемого с сопротивления нагрузки R_n , включенного в цепь обмотки 2, помещенной на сердечнике 1. Питание осуществляется переменным напряжением U (с частотой от 50 до нескольких тысяч герц). Под действием входного сигнала перемещается якорь 3 и изменяется зазор δ . Выходное напряжение датчика

$$U_{\text{вых}} = IR_n. \quad (13.21)$$

Среднее значение тока в рабочей цепи преобразователя определяется по формуле

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{(R_n + R_0)^2 + (\omega L)^2}}, \quad (13.22)$$

где R – суммарное активное сопротивление цепи, Ом;

X_L – реактивное сопротивление цепи, Ом;

R_0 – сопротивление обмотки, Ом;

ω – круговая частота, рад/с.

Индуктивность обмотки L является функцией размера зазора с магнитным сопротивлением r_δ :

$$L = \frac{\omega^2}{r_\delta} = \frac{\mu_0 S w^2}{\delta}, \quad (13.23)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха в зазоре;
 S – площадь поперечного сечения зазора, м²;
 w – число витков обмотки.

Учитывая, что на практике для индуктивных преобразователей выполняется условие $R \ll X_L$, получают:

$$U_{\text{вых}} = \frac{UR_n}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega\mu_0 S w^2}{\delta}\right)^2}} \approx \frac{UR_n \delta}{\omega\mu_0 S w^2} = k\delta. \quad (13.24)$$

Коэффициент преобразования $k = \frac{UR_n}{\omega\mu_0 S w^2}$ – величина посто-

янная, поэтому статическая характеристика $U_{\text{вых}} = f(\delta)$ должна представлять собой прямую, проходящую через начало координат (рис. 13.7, б, штриховая линия). Реальная характеристика преобразователя, показанная сплошной линией, отличается от идеальной. Это объясняется тем, что при малых значениях δ допущение $r_m \ll r_\delta$ становится неверным, т. к. магнитное сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи r_m становится соизмеримым с магнитным сопротивлением зазора r_δ ; при больших значениях δ падает индуктивность обмотки L и реактивное сопротивление X_L становится соизмеримым с активным сопротивлением магнитной цепи, т. е. $R \approx X_L$. Это несоблюдение принятых в начале рассмотрения допущений и приводит к искажению статической характеристики.

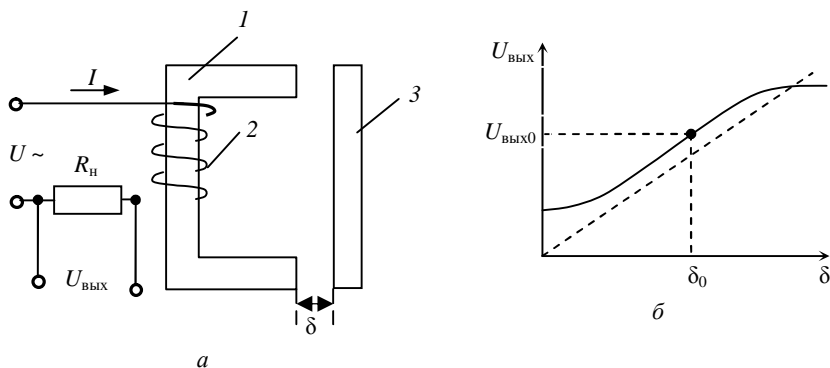


Рис. 13.7. Схема (а) и статическая характеристика (б) однофазного индуктивного преобразователя:
1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – ярлык

К достоинствам нереверсивного индуктивного датчика следует отнести: высокую чувствительность, надежность и долговечность, отсутствие контактных устройств, значительную величину выходной мощности (до сотен вольт-ампер), простоту конструкции и эксплуатации.

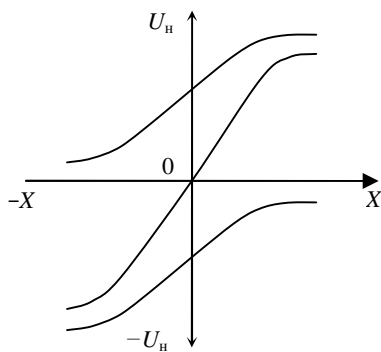
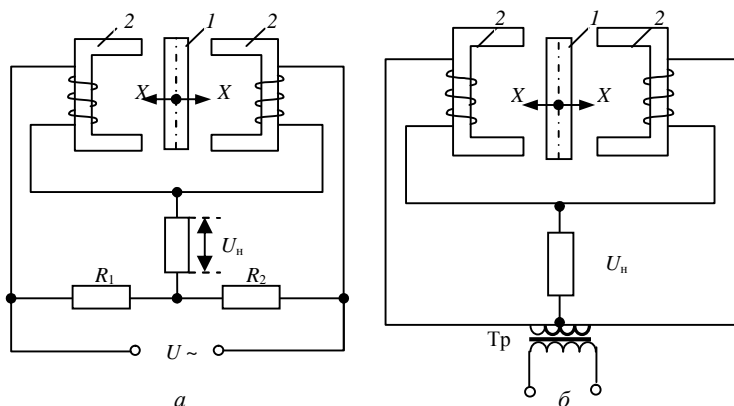
Основными недостатками рассмотренного датчика являются: наличие напряжения на выходе при нулевом воздушном зазоре $U_{x.х}$, нелинейность реальной статической характеристики; возникновение больших усилий (до нескольких килограммов) между ярком и сердечником дросселя, которые необходимо преодолевать. От перечисленных недостатков в значительной степени свободны реверсивные датчики, которые имеют чувствительность вдвое большую, чем нереверсивные датчики.

Реверсивные датчики включаются по дифференциальной (рис. 13.8, а) или мостовой схеме (рис. 13.8, б) и состоят из двух нереверсивных датчиков, имеющих общий ярлык 1. Усилие, действующее на ярлык, равно разности сил притяжения со стороны сердечников 2. В среднем положении ярлыка при наличии полной симметрии реверсивного датчика результирующее усилие равно нулю, а в других положениях ярлыка оно небольшое.

Реальная статическая характеристика реверсивного датчика (кривая III) приведена на рис. 13.8, в. Она получена путем алгебраического суммирования ординат характеристик нереверсивных датчиков (кривые I и II). За начало отсчета перемещений берут

среднее положение якоря, при котором схема уравновешена и падение напряжения на нагрузке $U_n = 0$. При небольших отклонениях якоря напряжение U_n возрастает практически линейно. При изменении знака перемещения (переход якоря через среднее положение в противоположную сторону) фаза напряжения U_n меняется на 180° .

В настоящее время применяется большое количество индуктивных датчиков, отличающихся друг от друга по конструктивному и схемному исполнению. В автоматике наибольшее распространение получил *дифференциальный датчик*, включающийся с помощью разделительного трансформатора Тр (рис. 13.8, б).



в

Рис. 13.8. Реверсивный индуктивный датчик с переменным зазором:
 а – дифференциальная схема включения; б – мостовая схема включения;
 в – статические характеристики

К достоинствам рассмотренных реверсивных датчиков можно отнести: большую, чем у неревверсивных датчиков, линейность статической характеристики; меньшую зависимость характеристики от колебаний напряжения, температуры и т. п.

Основным недостатком реверсивных датчиков является сложность регулировки (балансировки) датчика.

Индукционные датчики преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в ЭДС индукции. В этих датчиках используется явление электромагнитной индукции, заключающееся в том, что во всяком контуре, внутри которого с течением времени меняется магнитный поток, наводится (индуцируется) ЭДС.

По закону электромагнитной индукции величина наводимой ЭДС определяется скоростью изменения магнитного потока:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (13.25)$$

где e – мгновенное значение ЭДС, В;

w – число витков в контуре (катушке);

Φ – магнитный поток через площадь одного витка в контуре, Вб.

Чувствительность индукционных датчиков зависит от числа витков катушки.

В связи с тем, что наводимая ЭДС зависит от скорости изменения магнитного потока, индукционные датчики применяют для измерения скорости линейных и угловых перемещений, ускорений, параметров колебаний (амплитуды и частоты).

Из индукционных датчиков наибольшее применение нашли *тахогенераторы*, предназначенные для измерения угловой скорости и выполненные в виде генераторов постоянного или переменного тока небольшой мощности (1...100 Вт).

Тахогенератор постоянного тока по принципу действия и конструктивному выполнению является электрической коллекторной машиной (рис. 13.9, а), работающей в генераторном режиме и состоящей из вращающейся части якоря 3 и неподвижной части – статора. На статоре укладывается обмотка возбуждения

или устанавливается постоянный магнит I . В последнем случае наводимая ЭДС зависит только от частоты вращения якоря:

$$E_{\text{ТГ}} = k_{\text{ТГ}}\omega, \quad (13.26)$$

где $k_{\text{ТГ}}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных параметров тахогенератора, В·с/рад;

ω – угловая частота вращения якоря, рад/с.

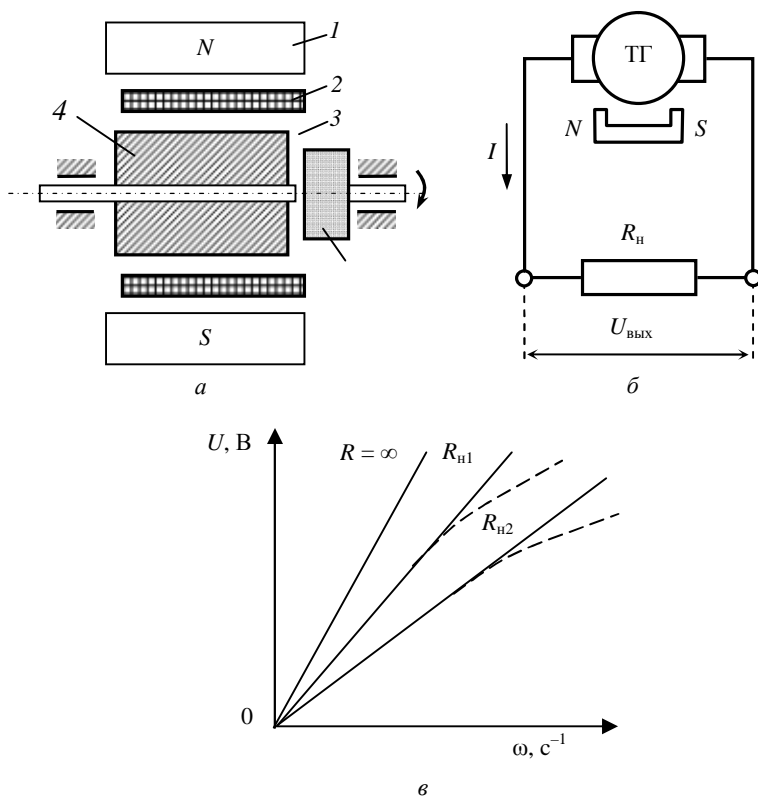


Рис. 13.9. Тахогенератор постоянного тока:
 а – устройство; б – принципиальная схема включения;
 в – статическая характеристика;
 1 – магнит постоянный; 2 – обмотка; 3 – якорь в виде тонкостенного цилиндра; 4 – сердечник ферромагнитный; 5 – коллектор

Пропорциональная зависимость $E_{\text{ТГ}}$ от частоты вращения ω справедлива только для ненагруженного тахогенератора ($R_{\text{H}} = \infty$). При работе тахогенератора на нагрузку R_{H} напряжение на его зажимах определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = E_{\text{ТГ}} - I_{\text{H}}R_{\text{я}}, \quad (13.27)$$

где $I_{\text{H}} = \frac{E_{\text{ТГ}}}{R_{\text{я}} - R_{\text{H}}}$;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом.

При больших значениях R_{H} ток I_{H} мал, падение напряжения $I_{\text{H}}R_{\text{я}}$ также мало, и частота вращения может быть определена довольно точно. Если сопротивление нагрузки R_{H} мало, то линейная зависимость между $U_{\text{вых}}$ и ω нарушается (см. рис. 13.9, в).

Если поток создается током возбуждения, то его можно изменять, тогда ЭДС тахогенератора будет зависеть и от частоты вращения, и от тока возбуждения. При ненасыщенной магнитной цепи магнитный поток можно считать прямо пропорциональным силе тока возбуждения $I_{\text{а}}$.

Это позволяет использовать тахогенератор с независимым возбуждением для умножения двух величин, из которых одна выражена током возбуждения, а другая – частотой вращения.

Тахогенераторы постоянного тока имеют значительные погрешности, обусловленные температурной нестабильностью (изменением сопротивления обмоток и магнитной проницаемости) и нестабильностью щеточного контакта.

К тахогенераторам переменного тока относятся асинхронные (двухфазные) и синхронные. *Асинхронный тахогенератор* – мало-мощный двухфазный асинхронный двигатель с полым тонкостенным ротором и двумя обмотками на статоре: возбуждения и сигнальной (генераторной). Обмотку возбуждения подключают к сети, а генераторную – к измерительному прибору или усилительной схеме. С помощью асинхронных тахогенераторов можно измерять ускорение. В этом случае на обмотку возбуждения подается постоянное напряжение питания, тогда напряжение, снимаемое с сигнальной

обмотки, будет пропорционально второй производной от угла поворота ротора.

Асинхронные тахогенераторы имеют ряд преимуществ по сравнению с тахогенераторами постоянного тока: простота устройства, эксплуатационная надежность, отсутствие коллектора и щеток, высокое быстродействие (малая электромеханическая постоянная времени).

Асинхронные тахогенераторы находят также применение в схемах счетно-решающих устройств и в автоматических системах регулирования для осуществления обратных связей по скорости.

Синхронные тахогенераторы применяются относительно редко, т. к. им свойственны существенные недостатки.

13.3. Емкостные первичные преобразователи

Емкостные первичные преобразователи представляют собой конденсаторы, у которых под действием входных величин изменяется либо расстояние между обкладками, либо площадь обкладок, либо диэлектрическая проницаемость межоблабочного пространства. В последнее десятилетие разработаны конденсаторы (вариконды), у которых диэлектрическая проницаемость зависит от внешних воздействий: электрической напряженности, частоты, температуры, давления, радиационных излучений.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon F}{d}, \quad (13.28)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха);

ε – диэлектрическая проницаемость материала;

F – действующая площадь пластин;

d – толщина диэлектрика (или зазора).

В основе работы – свойство конденсатора изменять свою емкость при изменении состава и распределения материала диэлектрика,

разделяющего пластины конденсатора. Конденсатор помещен в жидкость, которая может свободно проникать в пространство между пластинами (рис. 13.10).

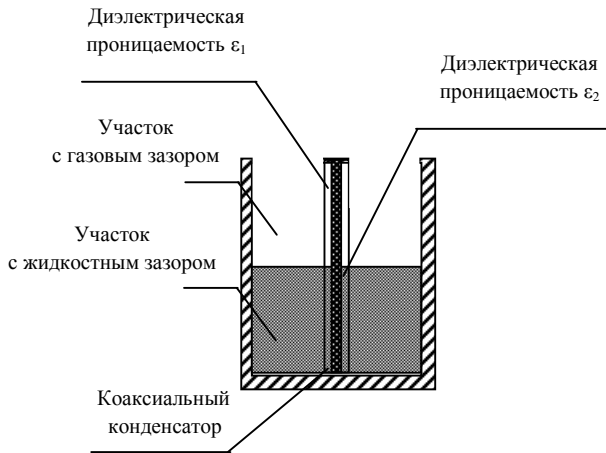


Рис. 13.10. Емкостный первичный преобразователь

В емкостном датчике изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкости конденсатора.

Емкостные датчики получили широкое распространение там, где необходимо контролировать появление слабопроводящих жидкостей, например воды. Это датчики влажности, уровня жидкости, датчики дождя в автомобилях.

Конструктивные схемы емкостных преобразователей выполняются в различных вариантах в зависимости от области применения. При измерении уровней жидких и сыпучих тел находят применение цилиндрические или плоские конденсаторы, емкость которых характеризуется уровнем и зависит от диэлектрических проницаемостей жидкости, изоляции и воздуха.

Достоинством емкостных преобразователей является потребность в весьма малых усилиях для перемещения подвижной части (ротора) емкостного датчика; малое потребление энергии; простота изготовления; использование дешевых материалов; отсутствие контактов (в отдельных случаях – один токосъем с помощью кольца

и щетки); высокая точность и стабильность работы систем с емкостными датчиками; возможность широкой регулировки приборов с некоторыми типами емкостных датчиков.

13.4. Фотоэлектрические первичные преобразователи

Широкое применение при автоматизации различных производственных процессов находят фотоэлектрические устройства, преобразующие световой поток в электрический сигнал. В настоящее время выпускают три вида таких преобразователей: с внешним фотоэффектом (вакуумные или газонаполненные); с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления) и вентильные (полупроводниковые).

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом (рис. 13.11, а) представляют собой вакуумную или газонаполненную лампу, на внутреннюю стенку которой нанесен фоточувствительный слой, являющийся катодом. Под действием светового потока в катод возникают свободные электроны, которые под действием электрического поля перемещаются к аноду, создавая внутри фотоэлемента ток (фототок).

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (рис. 13.11, б) представляют собой фотосопротивления (фоторезисторы), принцип действия которых состоит в том, что свободные электроны, образующиеся под действием светового потока в слое светочувствительного проводника 2, остаются (перераспределяются) в веществе, резко изменяя его сопротивление.

Светочувствительный материал наносится на изоляционную подложку 3 и сверху покрыт защитной тонкой прозрачной лаковой пленкой 1. Наиболее часто применяются сернисто-кадмиевые (ФС-К), сернисто-свинцовые (ФС-А), сернисто-висмутовые (ФС-Б) и селенисто-кадмиевые (ФС-Д) фоторезисторы.

Фотоэлементы с вентильным фотоэффектом (рис. 13.11, в) работают на использовании явления, происходящего в $p-n$ -переходе под воздействием светового потока. Они состоят из металлического основания 5, выполняющего роль нижнего электрода, слоя полупроводника 4, запирающего слоя 3, полупрозрачного слоя металла 2 и контактного кольца 1.

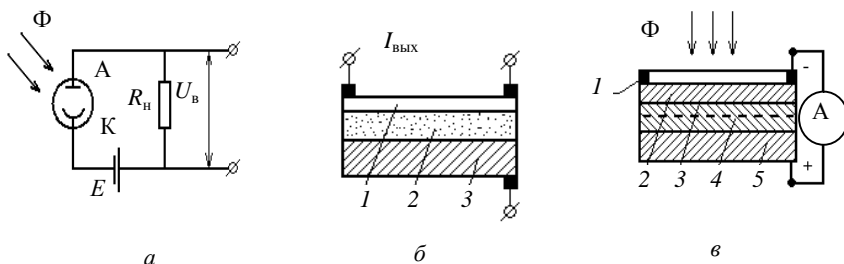


Рис. 13.11. Фотоэлектрические устройства:
 а – фотоэлементы с внешним фотоэффектом;
 б – фотоэлементы с внутренним фотоэффектом;
 в – фотоэлементы с вентильным фотоэффектом

Фотоумножители лишены этих недостатков. Это специальные усилители, которые обычно объединяют в единую конструкцию с фотоэлементом. В многокаскадном фотоумножителе к эмиттерам Э1...Э5 прикладываются напряжения, возрастающие по мере приближения эмиттеров к аноду (рис. 13.12). Вследствие этого между катодом К и первым эмиттером Э1, а также между всеми парами соседних эмиттеров создается разность потенциалов, под действием которой первичные электроны, испускаемые катодом, с возрастающими скоростями поочередно попадают на эмиттеры и выбивают все большее число вторичных электронов. Выбитые из последнего эмиттера электроны снимаются анодом А во внешнюю цепь, в которой появляется ток, во много раз превышающий ток катода (в 107...108 раз).

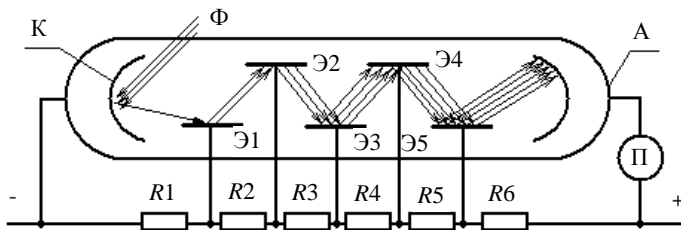


Рис. 13.12. Схема включения многокаскадного фотоумножителя

Фотодиод – полупроводниковый приемник лучистой энергии, в котором происходит направленное движение носителей тока при воздействии энергии оптического излучения.

Режим работы фотодиода с внешним источником питания называют *фотопреобразовательным*, а без него – *фотогенераторным*. В принципиальной схеме включения фотодиода в фотопреобразовательном режиме (рис. 13.13) на его p – n -переход подается напряжение запирающей полярности. При освещении происходит генерация носителей электрического заряда, которые под действием электрического поля разделяются и на границе p – n -перехода создают разность потенциалов. Фотопреобразовательный режим дает значительное повышение светочувствительности, недоступное для обычных вентильных фотоэлементов.

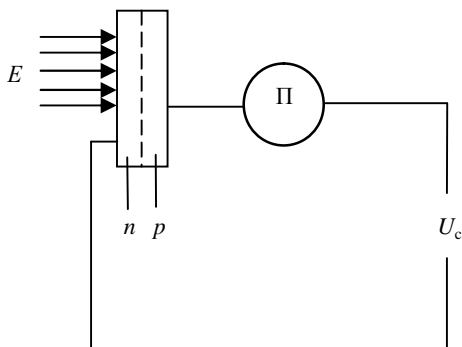


Рис. 13.13. Фотодиод

Светодиод представляет собой полупроводниковую пластинку с излучающим p – n -переходом, свечение которого вызывается рекомбинацией носителей тока (электронов и дырок) при приложении напряжения в прямом направлении. Соединяя светодиод с фотодиодом, можно получить миниатюрные датчики различных контролируемых величин.

Оптрон – преобразователь электрических и оптических сигналов с одновременным их усилением, который представляет собой соединение по определенной схеме фоторезистора с электролюминесцентным элементом.

Связь между фоторезистором Φ и электролюминесцентным элементом \mathcal{E} может быть оптической (рис. 13.14, *а*), электрической (рис. 13.14, *б*) или смешанной (рис. 13.14, *в*).

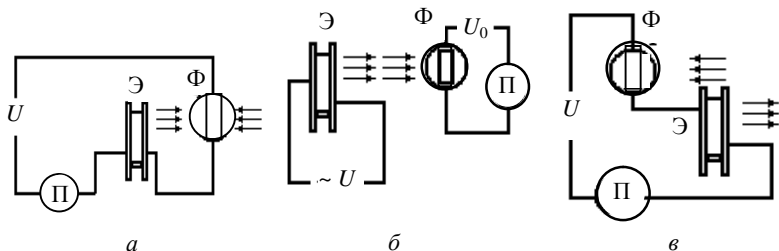


Рис. 13.14. Схемы оптронов

13.5. Датчики температуры

Температуру нагретого тела, жидкости, газа определяют изменением физических параметров самой контролируемой среды или находящегося с ней в тепловом контакте специального элемента, воспринимающего изменение температуры.

В практике в качестве датчиков температуры используют обычно такие первичные преобразователи, которые существенно изменяют свои физические свойства в зависимости от температуры и незначительно подвержены влиянию других факторов, например влажности, атмосферного давления, состава среды и т. п. В датчиках температуры широко применяют элементы, обладающие по возможности наибольшими значениями коэффициента теплового линейного или объемного расширения, температурного коэффициента сопротивления, термо-ЭДС, изменения интенсивности радиационных излучений, изменения давления, плотности и вязкости различных веществ в зависимости от температуры.

Классификация датчиков по принципу действия первичных измерительных преобразователей

1. Жидкостные.
2. Манометрические:
 - мембранные;
 - сильфонные.
3. Биметаллические.
4. Дилатометрические.
5. Термометры сопротивления:
 - металлические;
 - полупроводниковые (термисторы, позисторы).

6. Термоэлектрические (термопары).
7. Диоды и транзисторы как преобразователи температуры.
8. Пирометры.

К датчикам, использующим принцип теплового расширения жидкостей и газов, относятся жидкостные объемные и контактные термометры, а также манометрические термодатчики.

Жидкостные датчики преобразуют изменение температуры $\Delta\Theta$ в изменение высоты Δh столба жидкости в капилляре:

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{S_k}, \quad (13.29)$$

где $\Delta V = V(\beta - 3\alpha)\Delta\Theta$ – изменение объема жидкости (β – температурный коэффициент линейного расширения жидкости; V – первоначальный объем жидкости; α – температурный коэффициент линейного расширения материала ампулы и капилляра);

S_k – сечение капилляра.

Высота столба жидкости влияет на состояние контактов, на изменение омического, индуктивного, емкостного сопротивлений или интенсивности светового потока.

Жидкостные датчики просты по устройству, но недолговечны и не обеспечивают необходимой точности в условиях вибрации.

В *манометрических датчиках* тепловое изменение объема жидкости или газа (ртуть, ацетон, эфир, спирт, азот, инертные газы, различные смеси и соединения) преобразуется в перемещение специальных мембран, сильфонов или манометрических трубок.

Существенным недостатком датчиков рассматриваемого типа является значительная инерционность, погрешность составляет 1,0 %...2,5 %, диапазон измерений ограничивается предельными значениями параметров рабочего тела (например, значениями температуры замерзания и кипения рабочей жидкости).

К датчикам, в основу действия которых положено свойство твердых тел изменять свои линейные размеры при изменении температуры, относятся биметаллические и дилатометрические реле температуры.

У *биметаллического термореле* воспринимающим органом служит биметаллическая, т. е. двойная (из двух разных металлов), спираль. Пластины спирали при нагреве удлиняются неодинаково, поэтому она изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом теплового расширения и по достижении определенной температуры замыкает контакты. Существенный недостаток подобного биметаллического термореле заключается в том, что его контакты срабатывают недостаточно четко и вследствие этого подгорают. В усовершенствованной конструкции реле биметаллическая пластина, изгибаясь, освобождает пружину, которая обеспечивает резкое срабатывание контактной системы.

У *дилатометрического датчика* стержень из металла с малым коэффициентом температурного расширения расположен внутри трубки, изготовленной из металла с большим коэффициентом теплового расширения, и одним концом жестко к ней прикреплен. Для уменьшения тепловой инерции в стенках трубки просверлены отверстия. При изменении температуры изменяется длина трубки, вследствие чего происходит перемещение внутреннего стержня, со свободным концом которого связана указательная стрелка.

Из-за больших погрешностей и ряда других недостатков биметаллических и дилатометрических термодатчиков область их применения весьма ограничена – в основном защита электродвигателей от перегрева. Ток электродвигателя пропускают либо по самой биметаллической пластине, либо по расположенным рядом с ней нагревательным виткам.

К датчикам, использующим зависимость электрического сопротивления первичных преобразователей (металлов и полупроводников) от температуры, относятся *термометры сопротивления (терморезисторы)*. Их широко применяют в технике для измерения температур в пределах от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обладая теми же достоинствами, что и термопары, они, кроме того, позволяют получить на выходе большую мощность и хорошо согласуются со вторичными приборами.

У металлических терморезисторов (рис. 13.15) проволока 1, изготавливаемая из чистых металлов (медь, железо, никель, платина), намотана на изоляционный каркас 2 и закрыта защитным кожухом 3. Выводы 5 закреплены в изоляционной колодке 4. В практике используют платиновые термометры сопротивления (ТСП) на номинальное

сопротивление 10, 46 и 100 Ом для измерения температур от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и медные термометры сопротивления (ТСМ) на номинальное сопротивление 53 и 100 Ом для измерения температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

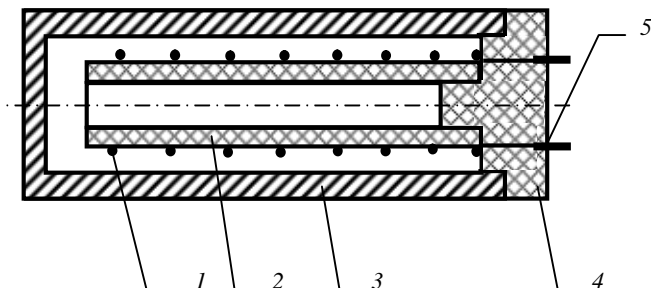


Рис. 13.15. Термометр сопротивления металлический

Сопротивление платинового термометра определяется в указанных интервалах температур по формуле

$$R_{\Theta} = R_0(1 + A\Theta + B\Theta_0). \quad (13.30)$$

где A, B – постоянные коэффициенты;

Θ – значение температуры окружающей среды;

Θ_0 – значение начальной температуры.

Сопротивление медной проволоки, Ом, определяется при температурах от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ по формуле

$$R_{\Theta} = R_0[1 + \alpha(\Theta - \Theta_0)], \quad (13.31)$$

где R_{Θ} – сопротивление проволоки при температуре Θ ;

R_0 – сопротивление проволоки при начальной температуре Θ_0 ;

α – температурный коэффициент сопротивления, составляющий для металлов $(3,7...6,5) \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Чувствительность, Ом/град., медного термометра сопротивления

$$k = \frac{dR_{\Theta}}{d\Theta} = R_{\Theta}\alpha. \quad (13.32)$$

Намотку термометров выполняют в основном безындукционным (бифилярным) способом на каркас, который затем заливают эпоксидной смолой или помещают в защищенные от механических повреждений чехлы.

Преимущества термометров сопротивления – высокая точность измерений, стабильность характеристик во времени. Недостаток – необходимость использовать в схемах измерения измерительные мосты с электронными усилителями.

Полупроводниковые терморезисторы, получившие в последнее время преимущественное распространение, обладают значительно большей чувствительностью, чем металлические.

Серийно выпускаются две группы терморезисторов: с отрицательным и положительным температурным коэффициентом сопротивления. Первые получили название термисторов, вторые – позисторов.

У *термисторов* первичный преобразователь изготовлен из медно-марганцевых или кадмиево-марганцевых полупроводниковых порошков со специальными добавками.

Зависимость сопротивления термистора от температуры определяется уравнением

$$R_{\Theta} = R_{\infty} e^{\frac{B}{\Theta}}, \quad (13.33)$$

где R_{∞} – сопротивление термистора при температуре $\Theta \rightarrow \infty$, Ом;

B – постоянный коэффициент, характеризующий термочувствительность полупроводникового резистора.

Чувствительность, Ом/град., полупроводникового резистора

$$k = \frac{dR_{\Theta}}{d\Theta} = R_0 \alpha. \quad (13.34)$$

В формуле (13.34) температурный коэффициент α термистора выражается как

$$\alpha = -\frac{B}{\Theta^2}. \quad (13.35)$$

Чтобы рассчитать температурную характеристику, достаточно знать координаты двух ее точек: $(R_1; \Theta_1)$ и $(R_2; \Theta_2)$.

Обычно $\Theta_1 = 293$ К, т. к. при этой температуре в паспортах показывается номинальное сопротивление $R_1 = R_n$.

В связи с тем, что при прохождении тока через термистор в нем выделяется тепло, его сопротивление принимает значение, соответствующее температуре нагрева (температура среды плюс температура перегрева).

Из-за нелинейности температурной характеристики вольт-амперная характеристика термистора также нелинейна.

Для каждой точки этой характеристики можно записать уравнение энергетического баланса

$$UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} = b(\Theta - \Theta_0), \quad (13.36)$$

где b – коэффициент рассеяния тепла от рабочего тела термистора.

Используя выражения (13.29) и (13.30), можно записать уравнения вольт-амперной характеристики в параметрическом виде:

$$U = \sqrt{bR_1(\Theta - \Theta_0)e^{\frac{B}{\Theta} - \frac{B}{\Theta_1}}}; \quad (13.37)$$

$$I = \sqrt{\frac{b}{R_1}(\Theta - \Theta_0)e^{\frac{B}{\Theta} - \frac{B}{\Theta_1}}}. \quad (13.38)$$

Уравнения вольт-амперной характеристики показывают, что она зависит от температуры окружающей среды Θ_0 и коэффициента рассеяния b . Последний зависит от условий теплообмена, т. е. от свойств окружающей среды, что используют для построения соответствующих датчиков. Иногда термисторы снабжают электрическими подогревателями. Такие термисторы называют подогревными. По значению сопротивления судят о значении тока подогрева или, наоборот, током подогрева управляют сопротивлением термистора.

Позисторы (термисторы с положительным температурным коэффициентом) изготавливают из титаната бария со специально подобранными примесями, которые придают ему свойства полупроводника с сильной зависимостью сопротивления от температуры.

Положительный температурный коэффициент позисторов в 3...4 раза больше, чем у термистора, а их постоянная времени в 5...6 раз меньше. Кроме того, их отличает своеобразие температурных характеристик и наличие так называемого *варисторного эффекта*, который выражается в уменьшении сопротивления позистора с увеличением приложенного напряжения. Варисторный эффект оказывает существенное влияние на температурные характеристики позистора.

Исследования показали, что дать общее уравнение температурной характеристики позистора для всего температурного диапазона не представляется возможным и не требуется. Автором предложено разделить температурную характеристику на два участка: первый от 0 °С до температуры Θ_k точки Кюри (около 75 °С), при которой наблюдается резкий рост сопротивления позистора, второй – от температуры Θ_k до 320 °С.

Тогда первый участок описывается уравнением

$$R = A e^{B(\Theta - \Theta_0)} + R_n, \quad (13.39)$$

а второй

$$R = \alpha(\Theta - \Theta_k)^b R_k, \quad (13.40)$$

где A , B , α – постоянные коэффициенты, определяемые по экспериментальным точкам;

R_n , R_k – сопротивления позистора при начальной температуре Θ_n и температуре Θ_k точки Кюри соответственно.

Полупроводниковые терморезисторы в соответствии с их основными свойствами широко применяют в датчиках температуры, скорости движения воздуха и жидкости, уровня жидкости и сыпучих материалов, влажности и других параметров (по изменению условий теплообмена). Большие значения сопротивления полупро-

водниковых резисторов и их температурного коэффициента сопротивления дают возможность практически не считаться с сопротивлениями проводов и контактов. Это обеспечивает высокую точность измерений на расстоянии.

В термоэлектрических первичных преобразователях и датчиках используют термоэлектрические явления, возникающие в твердых телах в результате взаимодействия тепловых и электрических процессов, – Зеебека, Пельтье и Томсона.

Явление Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, соединения которых поддерживают при разных температурах, возникает так называемая термо-ЭДС.

Явление Пельтье и аналогичное явление Томсона заключается в поглощении или выделении тепла (кроме джоулевого тепла) при прохождении тока через контакт или проводник, вдоль которого существует перепад температуры.

Среди этих датчиков наибольшее применение получили термопары, предназначенные для дистанционного измерения и контроля температуры в широких пределах (от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2000\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Металлическая термопара состоит из двух специально подобранных проволок, одни концы которых спаяны или сварены (рис. 13.16, а), а другие подключаются к вторичному прибору (рис. 13.16, б). Если спаянный конец нагреть, то на свободных (холодных) концах появляется термо-ЭДС E , значение которой пропорционально разности температур нагретого Θ_r и свободных концов Θ_x и зависит от материала проволок (рис. 13.16, а):

$$E = \alpha (\Theta_r - \Theta_x).$$

В качестве материалов используют благородные металлы – платину, родий, золото и их сплавы, а также сталь, никель, хромель, копель, алюмель, константан.

Наибольшее распространение получили термопары: хромель-копель с пределами измерения температуры до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$; медь-копель – от $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$; железо-константан – от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$; платина-родий – от $-300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$; вольфрам-рений – до $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и др.

Для определения температуры Θ по значению ЭДС E термопары пользуются экспериментальными градуировочными кривыми термопар, отражающими зависимость $E = f(\Theta)$.

Полупроводниковые термопары получают все большее распространение в современной автоматике. Если для металлов значения термо-ЭДС составляют всего 0,006...0,060 мВ/град., то для полупроводниковых термопар они доходят до 0,1...1,0 мВ/град. (кривая II), превосходя первые в десятки раз.

Скоростные термопары предназначены для измерения скорости изменения температуры. Такая термопара составлена из двух последовательно соединенных термопар. Один их спай помещен в термоизоляционную гильзу, а второй открыт. Термопары соединены не только последовательно, но и встречно, поэтому, когда контролируемая температура неизменна, термо-ЭДС каждого спая взаимно равны и направлены навстречу одна другой. Термо-ЭДС открытого спая следует за изменением температуры практически безынерционно, а термо-ЭДС спая, помещенного в гильзу, из-за тепловой инерционности гильзы меняется с большим замедлением. Вследствие этого на выходе появляется разность термо-ЭДС, значение которой пропорционально скорости, а знак соответствует знаку изменения температуры. Для того чтобы характеристика термопары $E = f(\Theta)$ проходила через начало координат, температуру свободных концов стабилизируют и поддерживают $\Theta_0 = 0^\circ\text{C}$. Благодаря этому показания вторичного прибора (милливольтметра) зависят только от температуры контролируемой среды и не зависят от температуры точек присоединения прибора. При работе термопары с усилителем последний должен иметь малое входное сопротивление, примерно равное сопротивлению термопары.

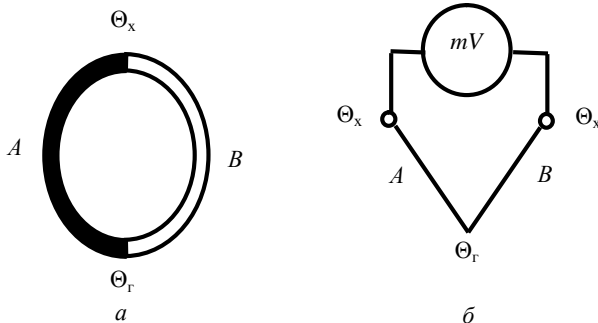


Рис. 13.16. Термопара (термоэлектрический преобразователь)

Термопары обладают существенными преимуществами перед другими датчиками температуры. Для них характерны большая

эксплуатационная надежность, высокая точность измерений, простота конструкции, малая инерционность, возможность дистанционного наблюдения за температурой нескольких точек и ее записи при помощи вторичного прибора.

В ряде случаев в качестве первичных преобразователей температуры используют полупроводниковые диоды и триоды.

Температурный коэффициент германиевых диодов и триодов вдвое больше, а кремниевых – того же порядка, что и у термисторов, наиболее чувствительных к температуре. Кроме того, сопротивление полупроводниковых элементов, подобно варисторам, зависит от приложенного напряжения. Из-за двойной зависимости сопротивления полупроводниковых элементов их называют также нелинейными сопротивлениями типа термистор-варистор.

Для измерения температур от 700 °С до 6000 °С и выше применяют *пирометр* – оптический прибор, который дистанционно замеряет температуру поверхности нагретых тел и сред по энергетической яркости их излучения в достаточно узком диапазоне длин волн (1,5 мкм и менее).

Имеются так называемые *радиационные* и *цветовые* пирометры для измерения более низких температур от –100 °С до 4000 °С. У радиационных пирометров мерой температуры объекта является понижение температуры лучеприемника, излучающего энергию на холодный объект.

Цветовой пирометр замеряет температуру объекта также на расстоянии по относительному распределению спектральной плотности энергетической яркости его излучения в видимой и инфракрасной области спектра.

В целом пирометры – относительно сложные и дорогие установки, которые в сельском хозяйстве применяют только для научно-исследовательских целей.

13.6. Датчики положения и уровня

Датчики уровня – это устройства, позволяющие отслеживать количество жидкого или сыпучего вещества по уровню его поверхности в некоторой емкости.

По принципу действия датчики уровня бывают: емкостные; поплавковые; радарного типа; ультразвуковые; гидростатические; вибрационные.

В *емкостных датчиках уровня* (рис. 13.10) при изменении уровня жидкости изменяется суммарная емкость конденсатора.

Достоинства – надежность, долговечность, т. к. нет подвижных элементов. Недостаток – показания сильно зависят от температуры.

В *поплавковых (дискретных) датчиках уровня* (рис. 13.17) вдоль направляющей вслед за уровнем жидкости перемещается поплавок, содержащий постоянный магнит. Внутри направляющей имеются герконовые реле. Приближение поплавок к герконовому реле вызывает его срабатывание. Датчик сообщает, достиг ли уровень жидкости конкретной отметки.

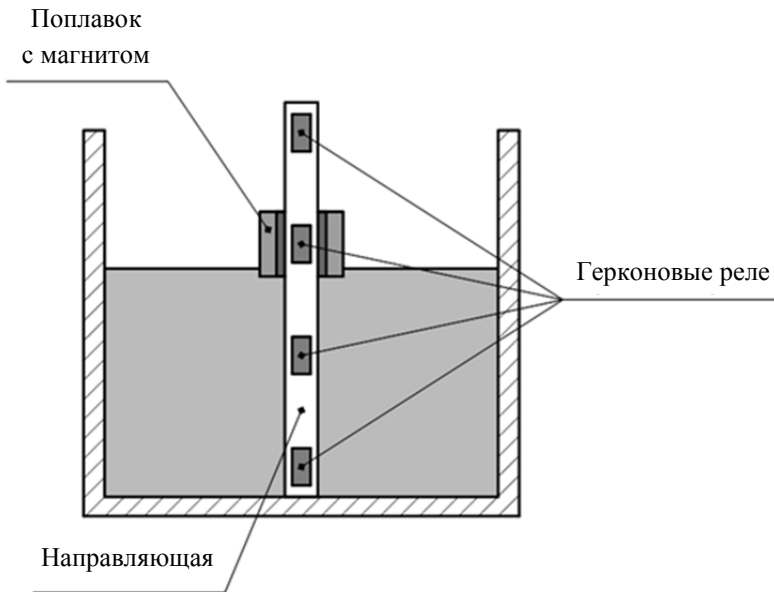


Рис. 13.17. Поплавковые датчики уровня

В *ультразвуковых датчиках уровня* (рис. 13.18) встроенные электронные схемы генерируют ультразвуковой импульс, который

проходит через воздух в резервуаре. Импульс отражается от границы жидкость/воздух назад к сенсору. За счет измерения времени, за которое возвращается отраженный сигнал, вычисляется расстояние до жидкости в резервуаре.

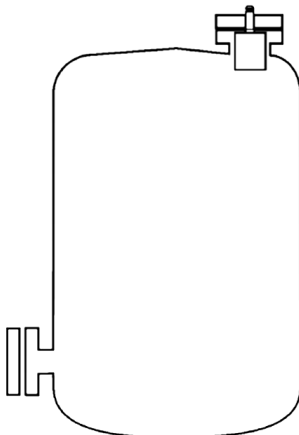


Рис. 13.18. Ультразвуковой датчик уровня

Гидростатические датчики уровня (рис. 13.19) представляют собой датчик давления, который находится на дне резервуара и измеряет давление воды. Данное давление прямо пропорционально уровню воды. Гидростатические датчики измеряют текущее значение уровня. Применяются для измерения уровня как чистой воды, так и воды сточных вод.



Рис. 13.19. Гидростатический датчик уровня

Вибрационный датчик уровня (рис. 13.20) состоит из вилки (чувствительного элемента) и преобразователя. Принцип работы: вибрационная вилка вибрирует под пьезоэлектрическим воздействием на своей механической резонансной частоте (измеряется встроенной электроникой). Если зонд покроется загружаемым материалом (жидкостью или сыпучими продуктами), то это приведет к изменению частоты и амплитуды колебаний, что зафиксирует электроника.



Рис. 13.20. Вибрационный датчик уровня

13.7. Датчики давления, расхода и количества

Для измерения давления пара, газов в котельных, кормоцехах, теплицах используются преобразователи давления, которые различаются по принципу действия, назначению и классу точности.

Давлением называется физическая величина, характеризующая интенсивность нормальных (перпендикулярных к поверхности) сил, с которыми одно тело действует на поверхность другого.

Приборы для измерения давления жидкости и газов называются *манометрами*. По виду измеряемого давления манометры подразделяются на следующие группы:

- манометры – приборы для измерения избыточного давления с верхним пределом от 60 кПа до 1000 МПа;
- вакуумметры – приборы для измерения вакуумметрического давления (разрежения) с пределом измерений до 100 кПа;

– мановакуумметры – приборы для измерения избыточного и вакуумметрического давления с верхними пределами избыточного давления от 0,06 МПа до 2,40 МПа и вакуумметрического давления до 100 кПа;

– напоромеры – приборы для измерения избыточного давления, не превышающего 40 кПа;

– тягонапоромеры – мановакуумметры с пределами измерений, не превышающими 20 кПа;

– манометры для измерения абсолютного давления;

– дифференциальные манометры – приборы для измерения разности двух значений давления, из которых ни одно не является барометрическим;

– микроманометры – дифференциальные манометры с верхним пределом измерения, не превышающим 4 кПа.

Расходом вещества называют количество вещества (массы или объема), проходящее через определенное сечение трубопровода в единицу времени. Приборы или комплекты приборов, определяющие расход вещества в единицу времени, называются расходомерами.

Средства измерения уровня применяются в сельском хозяйстве для измерения уровня зерна и комбикормов в бункерах, воды в водонапорных башнях и т. д.

Механические преобразователи применяют в комплекте с электрическими преобразователями перемещения. Уровнемеры с указательными стеклами основаны на принципе сообщающихся сосудов и предназначены для визуального контроля уровня. В поплавковых уровнемерах используется выталкивающая сила жидкости, действующая на поплавок. В буйковых уровнемерах используется изменение силы тяжести поплавка (буйка), средняя плотность которого больше плотности жидкости, в зависимости от глубины погружения буйка в жидкость.

Измерение уровня гидростатическими уровнемерами сводится к измерению давления столба жидкости манометром или дифманометром. Принцип действия электрических уровнемеров состоит в измерении электропроводности, емкости, резонансной частоты и других параметров первичных преобразователей уровня, зависящих от уровня контролируемой среды.

В гидростатических методах главной является погрешность, вызванная изменением плотности измеряемой жидкости от температуры.

Для уменьшения этой погрешности создаются измерительные системы, одновременно измеряющие гидростатическое давление жидкости и ее плотность и корректирующие затем показания уровнемера в соответствии с плотностью.

При выборе схемы измерения уровня гидростатическим методом следует учитывать особенности измерительных преобразователей систем измерения уровней. Например, для одной и той же схемы измерения уровня в барабане парогенератора гидростатическим методом применение мембранных дифманометров вместо поплавковых существенно уменьшает погрешности измерения уровня, т. к. объем жидкости в мембранных дифманометрах значительно меньше, чем в поплавковых.

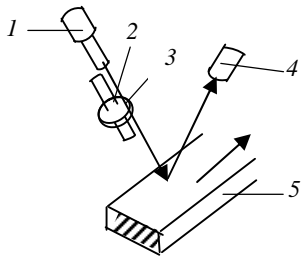
Пневмометрический метод измерения уровня основан на измерении давления воздуха (инертного газа), уравнивающего гидростатическое давление столба жидкости.

Наиболее простыми являются поплавковые уровнемеры, но они не могут применяться при высоких давлениях. Буйковые уровнемеры могут работать при повышенном давлении, но применение как поплавковых, так и буйковых уровнемеров затруднено в агрессивных средах и в средах с выпадающими осадками. Технические характеристики некоторых типов поплавковых и буйковых уровнемеров приведены в изданиях [4, 11].

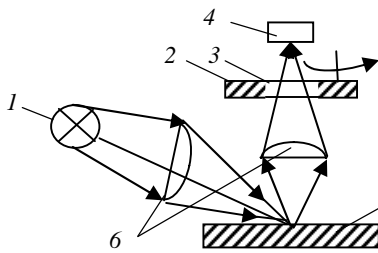
Радиоизотопные уровнемеры применяются в тех случаях, когда непосредственный контакт с измеряемой средой невозможен. Наиболее перспективными являются емкостные и высокочастотные уровнемеры, которые могут использоваться для измерения жидких и сыпучих сред.

13.8. Датчики влажности

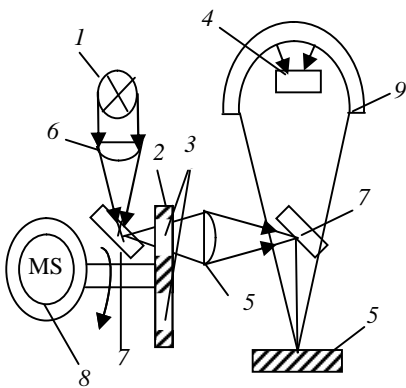
Оптические схемы первичных преобразователей ИК-влажнометров приведены на рис. 13.21. Различие этих схем состоит в последовательности получения анализирующего излучения на опорной и измерительных длинах волн, использовании различных способов приема отраженного или прошедшего излучения устройств, контактирующих с контролируемым объектом.



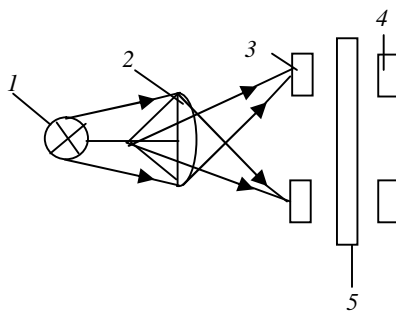
a



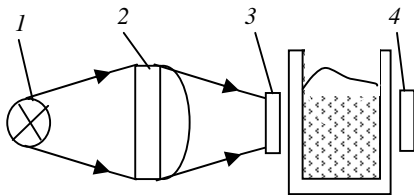
b



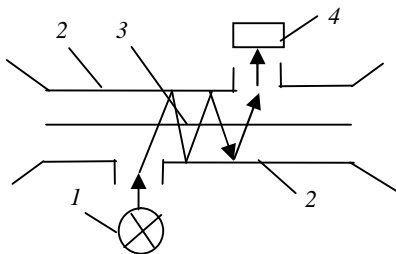
c



d



e



f

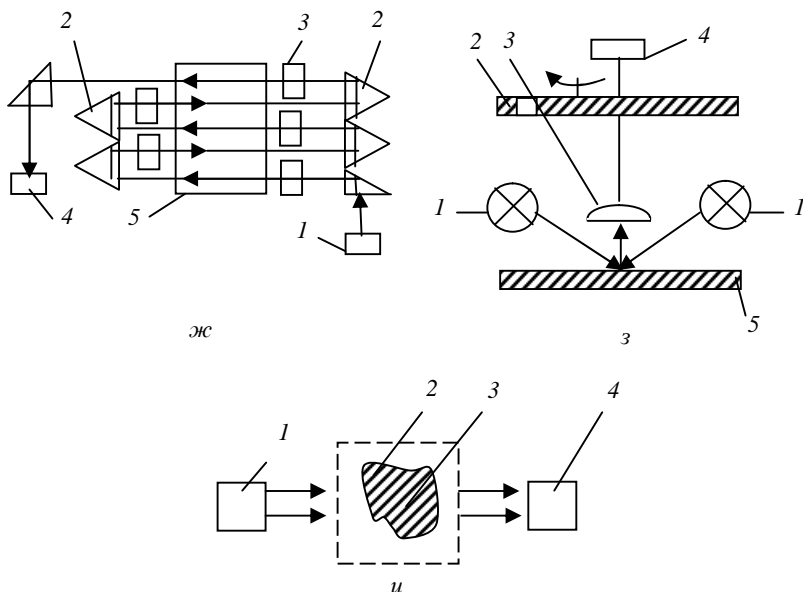


Рис. 13.21. Оптические схемы первичных преобразователей влагомеров:
a...г – преобразователи влагомеров, основанных на приеме отраженного излучения;
д...и – преобразователи влагомеров, основанных на приеме прошедшего через объект излучения

Структурная базовая схема первичного преобразователя (см. рис. 13.21) включает излучатель *1* для облучения контролируемого объекта, фотоприемник *4* для приема отраженных или прошедших через объект *5* потоков излучения и преобразования их в фотоэлектрический сигнал, светофильтр *3* (см. рис. 13.21, *a...д*) для выделения анализирующего излучения на опорной и измерительной длинах волн и модулятор *2* (см. рис. 13.21, *a...в*) для поочередного включения светофильтров *3* с целью придания параметрам излучения определенной временной зависимости.

На рис. 13.21, *в* показан привод модулятора *2* от синхронного двигателя *8*, при вращении которого световой луч, идущий от излучателя *1* через линзы *6*, прерывается и поворотным зеркалом *7* направляется на объект *5*. Отраженные от объекта потоки собираются вогнутым зеркалом *9* и фокусируются на светочувствительную поверхность фотоприемника *4*.

В других оптических преобразователях для направления потоков излучения на объект и фокусировки прошедшего или отраженного потока используются различные устройства. В схеме на рис. 13.21, *г* – бипризма 2; на рис. 13.21, *д* – линза 2; на рис. 13.21, *е* – зеркала 2 и 3; на рис. 13.21, *ж* – призма 2 и коллиматор 3; на рис. 13.21, *з* – линза 3. В преобразователе, показанном на рис. 13.21, *и* поток излучения от излучателя 1 проходит на фотоприемник 4 через влагосорбирующее вещество 2, помещенное в специальный корпус 3.

ИК-влагомеры могут быть одно-, двух- и трехволновыми.

Одноволновые ИК-влагомеры просты, но имеют ряд недостатков, основной из которых – зависимость результата измерения от свойств контролируемого материала. Эти недостатки исключаются введением второй длины волны – опорной.

Двухволновые ИК-влагомеры позволяют исключить такие факторы, как влияние неинформативных параметров контролируемого объекта, нестабильность фотоприемника, старение источника излучения и фотоприемника.

Если контролируемая среда многокомпонентная (например, при контроле влажности химических веществ), то для исключения влияния различных компонентов среды вводят дополнительно еще одну опорную длину волны. Трехволновые влагомеры в основном применяются в лабораторных исследованиях. Следует также отметить, что увеличение числа используемых длин волн анализирующего излучения значительно усложняет прибор, снижает его надежность, а в ряде случаев приводит к неоправданным затратам.

ИК-влагомеры можно подразделить на влагомеры твердых веществ и влагомеры жидкостей. В свою очередь, влагомеры твердых веществ можно делить на влагомеры, основанные на приеме: отраженного потока излучения; прошедшего через контролируемый объект потока излучения; как отраженного, так и прошедшего потока излучения одновременно.

13.9. Датчики состава и свойств веществ

Из-за невозможности использования химических методов в поточных линиях разрабатываются различные первичные преобразователи

и датчики экспрессного контроля и сортировки сельскохозяйственной продукции, работающие на электрических, оптических, радиоизотопных, ультразвуковых и других методах. Эти датчики и приборы называют аналитическими, и их пока в основном используют в специальных лабораториях.

Датчик жирности молока работает на принципе измерения емкостной проводимости, поскольку относительная диэлектрическая проницаемость жировых шариков молока составляет единицы, а воды – десятки единиц (81 при $\Theta = 20^\circ\text{C}$).

Разработан емкостный датчик жирности молока, включенный в контур ударного возбуждения измерительной схемы. Абсолютная погрешность измерения при жирности молока до 3% составляет $\pm(0,1...0,2)\%$, а при большей жирности $\pm(0,3...0,4)\%$. Такая точность недостаточна для расчета между молочными фермами и потребителями молока, т. к. используемые химические методы позволяют определять жирность с погрешностью до 0,1%, но ее достаточно для контроля жирности молока отдельных коров на фермах. На основе такого датчика создано устройство автоматического контроля с непрерывной регистрацией не только жирности, но и динамики ее изменения в последовательных порциях удоя, интенсивности молоковыведения, времени доения и количества молока, надоенного от отдельной коровы (рис. 13.22).

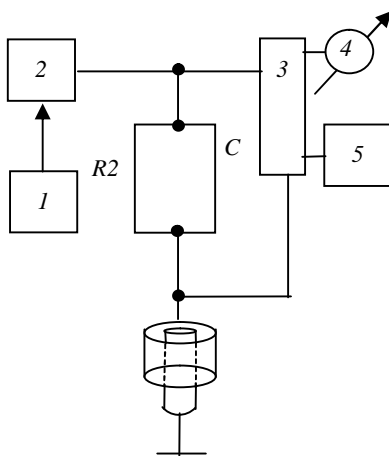


Рис. 13.22. Емкостный датчик жирности молока

Устройство состоит из блока питания 1, высокочастотного генератора 2, электронного вольтметра 3, показывающего микроамперметра 4, самопишущего милливольтметра 5. Коаксиальный датчик 6 встраивается в мерную камеру устройства для зоотехнического учета молока УЗМ-1, которая во время дойки периодически заполняется молоком и освобождается от него под действием вакуума.

Напряжение 2 от генератора подается через *RC*-цепочку на датчик, а вольтметр замеряет падение напряжения на *RC*-цепи, которое пропорционально протекающему через датчик току, т. е. полной проводимости датчика. Проводимость датчика растет по мере его заполнения молоком, а при полностью заполненном датчике зависит от жирности молока. Затем поплавков закрывает молоку доступ и оно быстро выливается из датчика. Таким образом, на ленте самописца получаются периодические кривые линии (выбросы), амплитуда которых обратно пропорциональна жирности молока, а частота, следовательно, пропорциональна интенсивности молоковыведения, число выбросов – удою, а общая длина записи – времени доения.

На рис. 13.23, *а, б* приведены схемы электростатических классификаторов семян. Очищенные от примеси семена по транспортеру 1 попадают в зону электронного заземления электрода 2 и отрицательно заряженных электродов 4 (рис. 13.23, *а*).

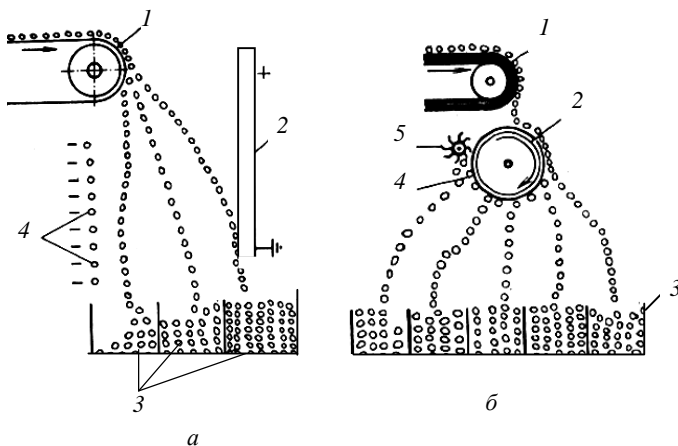


Рис. 13.23. Электростатические классификаторы семян

Вследствие неоднородности количественного и качественного состава отдельных зерен, а также их посевных качеств (энергии прорастания, всхожести и т. п.) семена под действием электрических сил разделяются в электрокоронном поле на фракции и падают в соответствующие приемные бункеры 3 классификатора семян.

На рис. 13.23, б показан барабанный электростатический классификатор. На барабан 2 намотана в один слой двухпроводная изолированная обмотка 4, которая подключена к источнику переменного напряжения порядка 500...700 В. Семена, падая с транспортера 1 на обмотку 4, притягиваются к ней, а затем под действием силы тяжести и центробежных сил отрываются с нижней части барабана 2 и попадают в различные секции бункера 3 в зависимости от внутренних свойств. Щетка 5 служит для удаления с обмотки 4 прилипшей сорной примеси.

Широкие возможности определения качественных показателей семян, овощей и фруктов, молока и яиц, мяса и других продуктов имеют оптические методы измерения.

Для обнаружения местных повреждений на плодах и клубнеплодах (например, пятен на яблоках, гнили на клубнях картофеля) применяют сканирующие датчики. На рис. 13.24, а, б показаны сканирующие датчики, разработанные для обнаружения механических повреждений и парши на яблоках.

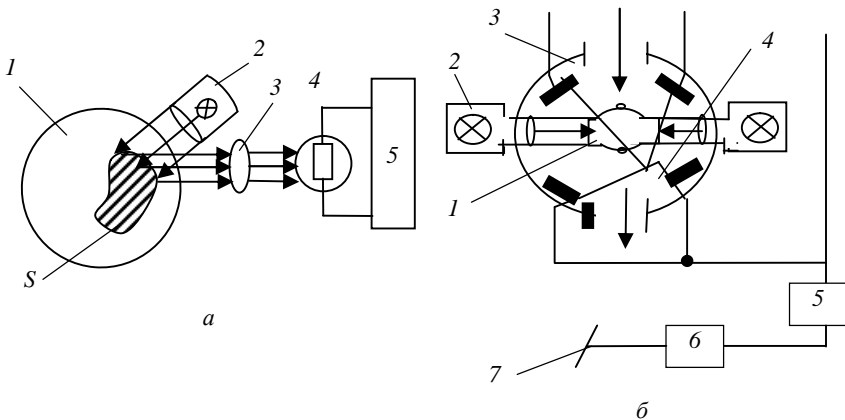


Рис. 13.24. Схемы способов контроля качества плодов и клубней:
а – интегральный; б – с фотометрической камерой

14. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

14.1. Цифровые системы

Цифровыми называют системы, в которых хотя бы одна из величин, характеризующих состояние системы, квантуется по времени и уровню.

В цифровых вычислительных устройствах информация о переменных представлена и обрабатывается в виде цифрового двоичного кода.

Для преобразования присутствующих в системе нецифровых (аналоговых) сигналов в цифровой код систему снабжают специальными устройствами, которые называют *аналого-цифровыми преобразователями (АЦП)*. Для обратного преобразования – *цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП)*.

Пример функциональной схемы цифровой системы автоматического регулирования показан на рис. 14.1.

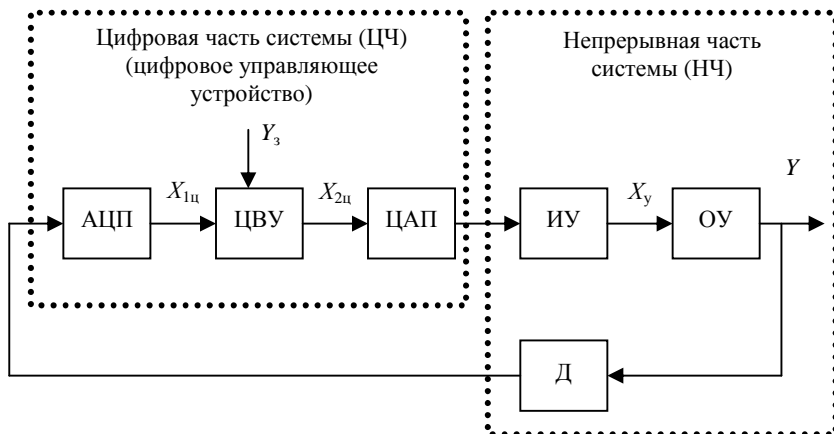


Рис. 14.1. Пример функциональной схемы цифровой системы автоматического регулирования:
 $X_{1ц}$, $X_{2ц}$ – цифровые сигналы; ИУ – исполнительное устройство;
ОУ – объект управления; Д – датчик;
ЦВУ – цифровое вычислительное устройство

В рассматриваемом примере на АЦП поступает аналоговый сигнал датчика. Этот сигнал преобразуется АЦП в цифровой сигнал $X_{1ц}$. Закон регулирования формируется в ЦВУ в виде цифрового сигнала $X_{2ц}$ и затем преобразуется ЦАП в аналоговый сигнал, управляющий исполнительным устройством ИУ. Заданное значение Y_3 управляемой величины вводится в ЦВУ в виде цифрового кода.

В системах могут применяться цифровые датчики, тогда сигнал с датчика непосредственно вводится в ЦВУ. Управляющее воздействие Y_3 может вводиться с аналогового задатчика, тогда сигнал Y_3 вводится в ЦВУ через АЦП.

На рис. 14.1 приведен пример функционального состава одномерной системы автоматического регулирования. В настоящее время на базе цифровых управляющих устройств реализуются системы автоматического управления всех классов – замкнутые и разомкнутые, одномерные и многомерные, обыкновенные и адаптивные и т. д.

Функционально цифровую систему делят на цифровую часть (ЦЧ) и непрерывную часть (НЧ). Непрерывная часть – условное название, поскольку сигналы там могут носить как непрерывный, так и релейный и импульсный характер.

14.2. Структура современных контроллеров

В современных системах управления широко применяются микропроцессоры, микроконтроллеры и другие средства вычислительной техники. Такая элементная база позволяет унифицировать аппаратные средства, а также реализовать сложные алгоритмы управления, обеспечивающие высокие качественные характеристики для широкого круга технических объектов.

Структура аппаратных средств типовой микропроцессорной системы управления приведена на рис. 14.2. Система содержит микроЭВМ, в состав которой входят микропроцессор, память, а также устройства связи с объектом (интерфейсы), которые обеспечивают преобразование цифровых кодов на выходе микроЭВМ в сигналы, воспринимаемые объектом управления, а также преобразование выходных сигналов датчиков в двоичные коды, поступающие в микроЭВМ. Такое управляющее устройство с некоторым

тактом (интервалом квантования) на основании информации о текущем состоянии объекта, а также командных сигналов рассчитывает управляющее воздействие.

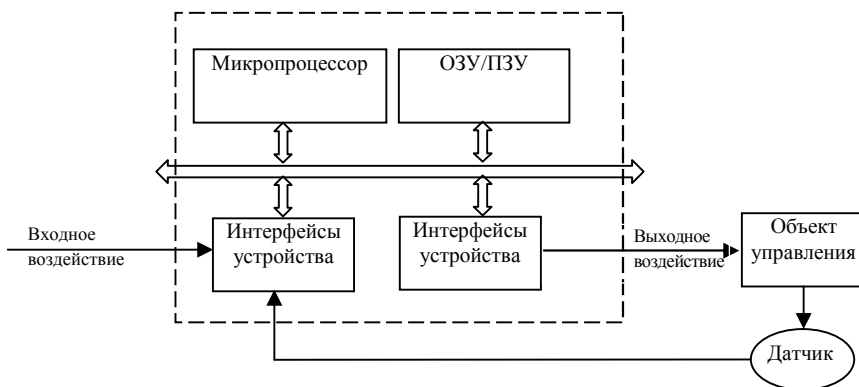


Рис. 14.2. Система управления на базе микроЭВМ

При построении систем управления на базе микропроцессоров и микроЭВМ следует учитывать следующие особенности программной реализации алгоритмов управления:

- запаздывание, вносимое микроЭВМ;
- временное и амплитудное квантование сигналов;
- возможности реализации сложных логических и вычислительных процедур, обеспечивающих адаптацию к изменениям параметров объектов и возмущающих воздействий.

14.3. Программируемые логические контроллеры (ПЛК): классификация, характеристики, программирование

Компьютеризированные системы автоматического управления, автоматизации, контроля базируются на ПЛК, технологическом оборудовании со встроенными микропроцессорными системами, ПК со специальным ПО и коммуникационных промышленных системах, посредством которых контроллеры соединяются между собой, с ПК, с сенсорами (датчиками), исполнительными устройствами и т. д.

В большинстве случаев такие системы автоматизации являются смешанными с децентрализованной (распределенной) архитектурой. В них ПЛК и ПК выполняют различные задачи, причем ПЛК ближе к ТП, а ПК находятся на более высоком уровне и служат в основном для визуализации и обработки данных.

Таким образом, следует рассматривать КСУ как распределенную систему с децентрализованной иерархической архитектурой, основными компонентами которой являются:

- ПЛК – осуществляет непосредственное управление технологическим процессом (физическим объектом);
- ПК – для диспетчерского управления (промышленные – для жестких условий эксплуатации, офисные – для более мягких);
- различные устройства для специфических задач управления;
- коммуникационная система для подключения устройств между собой.

Слово «контроллер» произошло от английского *control* (управление). Контроллером в системах автоматизации называют устройство, выполняющее управление физическими процессами по записанному в него алгоритму с использованием информации, получаемой от датчиков и выводимой в исполнительные устройства.

Жесткие ограничения на стоимость и огромное разнообразие целей автоматизации привели к невозможности создания универсального ПЛК, как это случилось с офисными компьютерами. Область автоматизации выдвигает множество задач, в соответствии с которыми и развивается рынок, содержащий сотни непохожих друг на друга контроллеров, различающихся десятками параметров.

Каждый производитель выпускает несколько типов ПЛК разной мощности и стоимости, чтобы увеличить прибыль за счет сегментирования рынка. Выбор оптимального для конкретной задачи контроллера основывается обычно на соответствии функциональных характеристик контроллера решаемой задаче при условии минимальной его стоимости. Учитываются также другие важные характеристики (температурный диапазон, надежность, бренд изготовителя, наличие сертификатов и т. п.).

Для классификации огромного разнообразия существующих в настоящее время контроллеров необходимо рассмотреть их существенные различия.

Основным показателем ПЛК является количество каналов ввода-вывода. По этому признаку ПЛК делятся на следующие группы:

- нано-ПЛК (менее 16 каналов, в основном дискретных) небольшой вычислительной мощности. Область применения таких контроллеров – сбор данных и системы противоаварийной защиты. Например, контроллеры семейства MicroLogix (Allen-Bradley), Direct Logic DL05 (Kooyo), Nano (Schneider Electric);

- микро-ПЛК (от 16 до 100 каналов). Эти контроллеры имеют достаточно развитый аналоговый ввод/вывод, выполняют операции с плавающей точкой и функции ПИД-регулирования. К этой группе контроллеров можно отнести SLC 500 (Allen-Bradley), Direct Logic DL205 (Kooyo), Smart (PEP Modular Computer), Simatic S7-200 (Siemens);

- средние (от 100 до 500 каналов дискретного, аналогового и скоростного типа). Применяются для автоматизации объектов средней сложности. Это, например, контроллеры Fanuc 90-30 (GE Fanuc), PLC-5 (Allen-Bradley), Premium (Schneider Electric), Direct Logic DL405 (Kooyo) и др.;

- большие (более 500 каналов). Обладают высокой вычислительной мощностью, позволяют реализовывать сложные алгоритмы (адаптивное, оптимальное управление), применяемые при автоматизации непрерывных технологических процессов. Наиболее яркими представителями этой группы контроллеров являются ControlLogix (Allen-Bradley), Simatic S7-400 (Siemens), Fanuc 90-70 (GE Fanuc), VME (PEP Modular Computers).

По расположению модулей ввода-вывода ПЛК бывают:

- моноблочными – устройство ввода-вывода не может быть удалено из контроллера или заменено на другое. Конструктивно контроллер представляет собой единое целое с устройствами ввода-вывода (например, одноплатный контроллер). Моноблочный контроллер может иметь, например, 16 каналов дискретного ввода и 8 каналов релейного вывода;

- модульные – состоящие из общей корзины (шасси), в которой располагаются модуль центрального процессора и сменные модули ввода-вывода. Состав модулей выбирается пользователем в зависимости от решаемой задачи. Типовое количество слотов для сменных модулей – от 8 до 32;

- распределенные (с удаленными модулями ввода-вывода) – модули ввода-вывода выполнены в отдельных корпусах, соединяются с модулем контроллера по сети (обычно на основе интерфейса RS-485) и могут быть расположены на расстоянии до 1,2 км от процессорного модуля;

- не содержащие в своем составе модулей ввода-вывода. Примерами контроллеров без модулей ввода-вывода являются коммуникационные контроллеры, которые выполняют функцию межсетевого шлюза, или координаторы, получающие данные от контроллеров нижнего уровня иерархии АСУ ТП.

Перечисленные конструктивные типы контроллеров часто комбинируются, например моноблочный контроллер может иметь несколько съемных плат, а моноблочный и модульный контроллеры могут быть дополнены удаленными модулями ввода-вывода, чтобы увеличить общее количество каналов.

Многие контроллеры имеют набор сменных процессорных плат разной производительности. Это позволяет расширить круг потенциальных пользователей системы без изменения ее конструктива.

По конструктивному исполнению и способу крепления подразделяют контроллеры:

- панельные (для монтажа на панель или дверцу шкафа);
- для монтажа на DIN-рейку внутри шкафа;
- для крепления на стене;
- стоечные – для монтажа в стойке;
- бескорпусные (обычно одноплатные) для применения в специализированных конструктивах производителей оборудования (ОЕМ – Original Equipment Manufacturer).

По области применения контроллеры делятся на следующие типы:

- универсальные общепромышленные;
- для управления роботами;
- для управления позиционированием и перемещением;
- коммуникационные;
- регуляторы;
- телеметрические;
- специализированные.

По способу программирования контроллеры бывают:

- программируемые с лицевой панели контроллера;
- программируемые программатором (ноутбук или ПК);
- программируемые с помощью карт памяти.

Контроллеры могут программироваться на следующих языках: на классических алгоритмических языках (С, С#, Visual Basic); на языках МЭК 61131-3. В первом приближении в качестве характеристик контроллеров можно выделить пять обобщенных показателей: характеристика процессора; характеристика каналов ввода-вывода, поддерживаемых контроллерами; коммуникационные возможности; эксплуатационные характеристики; программное обеспечение.

14.4. Применение контроллеров для автоматизации технологических процессов

Использование микропроцессоров и микроЭВМ существенно повышает уровень автоматизации процессов управления в технических системах. Функциональная гибкость, высокая надежность, малые габариты и стоимость микропроцессорных средств обусловили целесообразность их применения в различной аппаратуре, в т. ч. в системах локальной автоматики. В связи с этим существенно изменился процесс проектирования цифровых систем управления. Это вызвано как использованием более сложных функциональных компонентов, так и применением новых архитектурных решений, основанных на замене некоторых аппаратных средств программными модулями. Поэтому проектирование современных средств автоматизации требует от разработчика знания вычислительной техники и программирования на качественно новом уровне, с учетом специфики объектов управления в технических системах.

В то же время при проектировании цифровых систем управления на базе микроЭВМ разработчику приходится решать задачи, многие из которых возникают и при проектировании классической вычислительной техники. Среди них – организация процессорных элементов и обеспечение их взаимодействия с памятью, построение каналов обмена информацией между микроЭВМ и внешними устройствами, согласование функционирования элементов системы, имеющих различную скорость работы.

14.5. Современные интерфейсы для связи микропроцессорных систем управления

Передача информации между компьютерами существует с момента возникновения вычислительной техники. Она позволяет организовать совместную работу отдельных компьютеров, решать одну задачу с помощью нескольких компьютеров, специализировать каждый из компьютеров на выполнении какой-либо одной функции, совместно использовать ресурсы и решать множество других проблем. Способов и средств обмена информацией за последнее время предложено множество: от простейшего переноса файлов с помощью дискеты до всемирной компьютерной сети Internet, способной связать все компьютеры мира.

Чаще всего термин «локальные сети» (*LAN – Local Area Network*) понимают буквально, т. е. как сети, имеющие небольшие, локальные размеры и соединяющие близкорасположенные компьютеры. Однако некоторые локальные сети легко обеспечивает связь на расстоянии нескольких километров или десятков километров. В то же время по глобальной сети (*WAN – Wide Area Network* или *GAN – Global Area Network*) могут связываться компьютеры, находящиеся на соседних столах в одной комнате. Близкорасположенные компьютеры могут также связываться с помощью кабеля, соединяющего разъемы внешних интерфейсов (*RS232-C, Centronics*), или без кабеля по инфракрасному каналу. Но такие связи не называют локальной сетью.

Неверно и определение локальной сети как малой сети, которая связывает небольшое количество компьютеров. Действительно, в реальности наиболее часто локальная сеть связывает от двух до нескольких десятков компьютеров. Но предельные возможности некоторых локальных сетей гораздо выше: максимальное число абонентов может достигать тысячи. Некоторые авторы определяют локальную сеть как «систему для непосредственного соединения многих компьютеров». При этом подразумевается, что информация передается от компьютера к компьютеру без посредников и по единой среде передачи. Однако говорить о единой среде передачи в современной локальной сети не приходится. Например, в пределах одной сети могут использоваться как электрические кабели различных типов, так и оптоволоконные кабели. Определение

передачи «без посредников» также не соответствует действительности, ведь в современных локальных сетях используются разнообразные концентраторы, коммутаторы, маршрутизаторы, мосты, которые производят довольно сложную обработку передаваемой информации.

Наиболее точно определить как локальную такую сеть, которая позволяет пользователям не замечать связи. Компьютеры, связанные локальной сетью, объединяются в один виртуальный компьютер, ресурсы которого могут быть доступны всем пользователям, причем этот доступ не менее удобен, чем к ресурсам, входящим непосредственно в каждый отдельный компьютер. Под удобством в первую очередь понимается высокая реальная скорость доступа, при которой обмен информацией между приложениями осуществляется незаметно для пользователя. При таком определении ни медленные глобальные сети, ни медленная связь через последовательный или параллельный порты не подпадают под понятие локальной сети. Из такого определения следует, что скорость передачи по локальной сети должна обязательно расти по мере роста быстродействия наиболее распространенных компьютеров. Если сравнительно недавно приемлемой считалась скорость обмена в 1...10 Мбит/с, то сейчас среднескоростной считается сеть, работающая на скорости 100 Мбит/с и активно разрабатываются средства для скорости 1000 Мбит/с и большее. При меньших скоростях передачи связь будет чрезмерно замедлять работу объединенного сетью виртуального компьютера.

Таким образом, главное отличие локальной сети от любой другой – высокая скорость обмена. Также принципиально необходим низкий уровень ошибок передачи. Быстро переданная, но искаженная ошибками информация бессмысленна. Поэтому локальные сети обязательно используют специально прокладываемые качественные линии связи.

Принципиальное значение имеет и такая характеристика сети, как возможность работы с большими нагрузками, т. е. с большой интенсивностью обмена (с большим трафиком). Если механизм управления обменом, используемый в сети, неэффективен, то компьютеры могут чрезмерно долго ждать своей очереди на передачу, и даже если передача будет производиться затем на высочайшей скорости и полностью безошибочно, то для пользователя сети это

все равно обернется неприемлемой задержкой доступа ко всем сетевым ресурсам. Любой механизм управления обменом может работать гарантированно только тогда, когда заранее известно, сколько компьютеров (абонентов, узлов) может быть подключено к сети. При включении чрезмерного числа абонентов забуксует вследствие перегрузки любой механизм. Наконец, сетью в истинном смысле этого слова можно назвать такую систему передачи данных, которая позволяет объединять до нескольких десятков компьютеров, но не два, как в случае связи через стандартные порты.

Таким образом, можно сформулировать следующие отличительные признаки локальной сети:

- высокая скорость передачи, большая пропускная способность;
- низкий уровень ошибок передачи (высококачественные каналы связи). Допустимая вероятность ошибок передачи данных должна быть порядка $10^{-8} \dots 10^{-7}$;
- эффективный быстродействующий механизм управления обменом;
- ограниченное, точно определенное число компьютеров, подключаемых к сети.

При таком определении понятно, что глобальные сети отличаются от локальных тем, что рассчитаны на неограниченное число абонентов и используют, как правило, не слишком качественные каналы связи и сравнительно низкую скорость передачи, а механизм управления обменом в них не может быть гарантированно быстрым.

В глобальных сетях важнее не качество связи, а сам факт ее существования. Нередко выделяют еще один класс компьютерных сетей – городские сети (*MAN – Metropolitan Area Network*), которые обычно ближе к глобальным сетям, хотя иногда имеют некоторые черты локальных сетей – например, высококачественные каналы связи и сравнительно высокие скорости передачи. Городская сеть может быть действительно локальной, со всеми ее преимуществами.

14.6. Последовательная и параллельная передача данных

Последовательная передача данных

Обмен данными с вычислительными устройствами (ВУ) по последовательным линиям связи характерен для медленнодействующих

или удаленных периферийных устройств. Применение последовательных линий связи обусловлено тем, что линии связи просты по своей организации, а функции автоматического преобразования из последовательного в параллельный формат реализуются аппаратно с помощью программируемого последовательного интерфейса. Для процессора такой интерфейс выглядит устройством параллельного ввода-вывода.

Передача данных по линии может происходить в соответствии со стандартом RS-232, который описывает назначение и параметры 25 линий, однако на практике использует только часть из них – обычно 3...5 линий. Величиной скорости передачи является бод, который определяет количество переданных битов в секунду. Для повышения помехозащищенности при передаче данных на значительные расстояния уровни сигналов в линии связи не соответствуют уровням TTL, а имеют амплитуду от -2 до $+12$ В.

Параллельная передача данных

Параллельная передача данных между интерфейсом и ВУ является наиболее простым способом обмена. Все биты данных передаются одновременно, за один такт. Такой способ обеспечивает высокую скорость обмена, но требует большого числа линий связи (нерационален, например, для подключения удаленных устройств). Однако в связи с сильными взаимными наводками между параллельными линиями не удастся передавать данные с большой частотой. Поэтому в современных вычислительных системах даже для соединения внутренних узлов все чаще используют последовательный интерфейс (например, шину PCI Express).

В настоящее время параллельные интерфейсы стали обязательными компонентами практически всех микропроцессорных систем (рис. 14.3).

Например, в персональном компьютере параллельным является порт LPT. Для организации параллельной передачи данных помимо шины данных, в которой количество линий равно числу одновременно передаваемых битов данных, используется минимальное количество управляющих сигналов.

Примечания:

- обычно программирование интерфейса осуществляется операционной системой или программой монитора, которая запускается при включении питания с адреса 0000H;

- операцию установки и сброса битов порта С можно выполнить и при помощи логических команд, однако этот способ нерационален;
- управление отдельными линиями порта С требуется для формирования управляющих сигналов (стробирующих импульсов), а также для управления внешними устройствами типа реле (необходимо изменить состояние только одного бита).

14.7. Современные протоколы передачи информации (RS-232, RS-485, CAN, USB)

Последовательный интерфейс RS-232

Широко используемый последовательный интерфейс синхронной и асинхронной передачи данных, определяемый стандартом EIA RS-232-C и рекомендациями V.24 CCITT (рис. 14.3), изначально создавался для связи компьютера с терминалом. В настоящее время применяется самым различным образом.

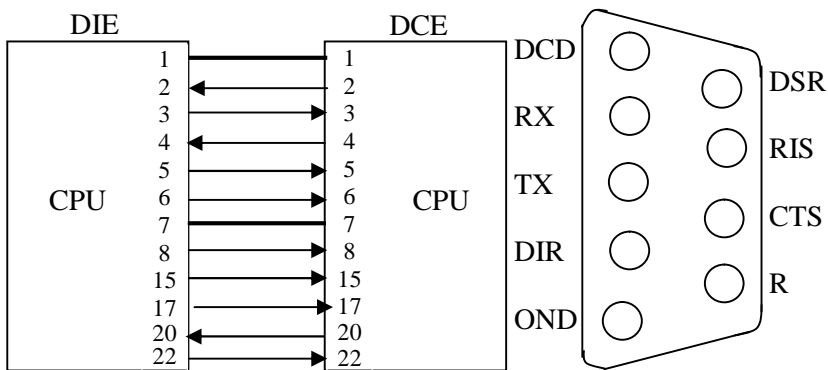


Рис. 14.3. Последовательный интерфейс передачи данных

Интерфейс RS-232-C соединяет два устройства. Линия передачи первого устройства соединяется с линией приема второго и наоборот (полный дуплекс).

Для управления соединенными устройствами используется программное подтверждение (введение в поток передаваемых данных соответствующих управляющих символов). Возможна организация аппаратного подтверждения путем организации дополнительных

RS-232 линий для обеспечения функций определения статуса и управления. Характеристики приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Характеристики интерфейса RS-232

Параметр	Описание
Стандарт	EIA RS-232_C, ССITТ V.24
Скорость передачи	115 Кбит/с (максимум)
Расстояние передачи	15 м (максимум)
Характер сигнала	Несимметричный по напряжению
Количество драйверов	1
Схема соединения	Полный дуплекс, от точки до точки

Интерфейс RS-232C предназначен для подключения к компьютеру стандартных внешних устройств (принтера, сканера, модема, мыши и др.), а также для связи компьютеров между собой. Основными преимуществами использования RS-232C по сравнению с Centronics являются возможность передачи на значительно большие расстояния и гораздо более простой соединительный кабель. В то же время работать с ним сложнее.

Данные в RS-232C передаются в последовательном коде по-байтно. Каждый байт обрамляется стартовым и стоповыми битами. Данные могут передаваться как в одну, так и в другую сторону (дуплексный режим). Компьютер имеет 25-контактный (DB25P) или 9-контактный (DB9P) разъем для подключения RS-232C. Назначение контактов разъема приведено в табл. 14.2.

Таблица 14.2

Порядок обмена по интерфейсу RS-232C

Наименование порта	Направление	Описание	Контакт (25-контактный разъем)	Контакт (9-контактный разъем)
DCD	IN	Carrie Detect (Определение несущей)	8	1
RXD	IN	Receive Data (Принимаемые данные)	3	2

Наименование порта	Направление	Описание	Контакт (25-контактный разъем)	Контакт (9-контактный разъем)
TXD	OUT	Transmit Data (Передаваемые данные)	2	3
DTR	OUT	Data Terminal Ready (Готовность терминала)	20	4
GND	–	System Ground (Корпус системы)	7	5
DSR	IN	Data Set Ready (Готовность данных)	6	6
RTS	OUT	Request to Send (Запрос на отправку)	4	7
CTS	IN	Clear to Send (Готовность приема)	5	8
RI	IN	Ring Indicator (Индикатор)	22	9

Назначение сигналов:

FG – защитное заземление (экран);

TxD – данные, передаваемые компьютером в последовательном коде (логика отрицательная);

RxD – данные, принимаемые компьютером в последовательном коде (логика отрицательная);

RTS – сигнал запроса передачи. Активен все время передачи;

CTS – сигнал сброса (очистки) для передачи. Активен все время передачи. Говорит о готовности приемника;

DSR – готовность данных. Используется для задания режима модема;

SG – сигнальное заземление, нулевой провод;

DCD – обнаружение несущей данных (детектирование принятого сигнала);

DTR – готовность выходных данных;

RI – индикатор вызова. Говорит о приеме модемом сигнала вызова по телефонной сети.

Наиболее часто используются трех- или четырехпроводная связь (для двунаправленной передачи). Схема соединения для четырехпроводной линии связи показана на рис. 14.4.

Для двухпроводной линии связи в случае только передачи из компьютера во внешнее устройство используются сигналы SG и TxD. Все 10 сигналов интерфейса задействуются только при соединении компьютера с модемом.

Формат передаваемых данных показан на рис. 14.5. Собственно данные (5, 6, 7 или 8 бит) сопровождаются стартовым битом, битом четности и одним или двумя стоповыми битами. Получив стартовый бит, приемник выбирает из линии биты данных через определенные интервалы времени. Важно, чтобы тактовые частоты приемника и передатчика были одинаковыми, допустимое расхождение – не более 10 %). Скорость передачи по RS-232C может выбираться из ряда: 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19 200, 38 400, 57 600, 115 200 бит/с.

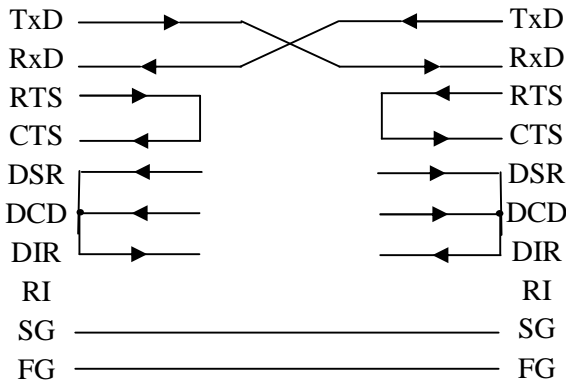


Рис. 14.4. Схема 4-проводной линии связи для RS-232C

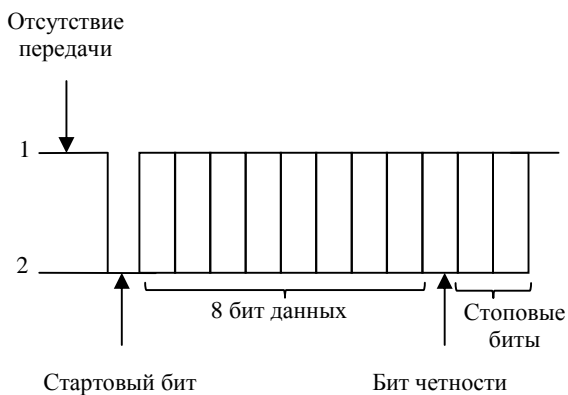


Рис. 14.5. Формат данных RS-232C

Все сигналы RS-232C передаются специально выбранными уровнями, обеспечивающими высокую помехоустойчивость связи (рис. 14.6).

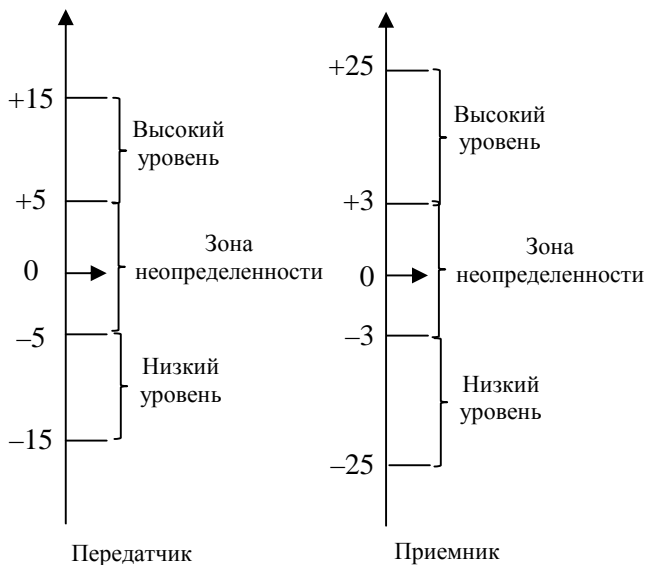


Рис. 14.6. Уровни сигналов RS-232C на передающем и принимающем концах линии связи

Данные передаются в инверсном коде (логической единице соответствует низкий уровень, логическому нулю – высокий уровень). Для подключения произвольного УС к компьютеру через RS-232C обычно используют трех- или четырехпроводную линию связи (рис. 14.7), но можно задействовать и другие сигналы интерфейса. Обмен по RS-232C осуществляется с помощью обращений по специально выделенным для этого портам COM1 (адреса 3F8h...3FFh, прерывание IRQ4), COM2 (адреса 2F8h...2FFh, прерывание IRQ3), COM3 (адреса 3E8h...3EFh, прерывание IRQ10), COM4 (адреса 2E8h...2EFh, прерывание IRQ11). Форматы обращений по этим адресам можно найти в описаниях микросхем контроллеров последовательного обмена UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), например i8250, KP580BB51.

Интерфейс RS-485

RS-485 передает цифровую информацию между многими объектами. Скорость передачи данных может достигать 10 Мбит/с, а иногда и превышать эту величину. RS-485 предназначен для передачи этой информации на значительные расстояния, и 1000 м соответствуют его возможностям. Расстояние и скорость передачи данных, с которыми RS-485 может успешно использоваться, зависят от многих моментов при разработке схемы межсоединений системы.

RS-485 спроектирован как балансная система (рис. 14.7). Это означает, что, помимо земляного, имеется два провода, которые используются для передачи сигнала. Система называется балансной, потому что сигнал на одном проводе является идеально точной противоположностью сигнала на втором проводе. Если один провод передает высокий уровень, другой будет передавать низкий уровень, и наоборот (рис. 14.8).

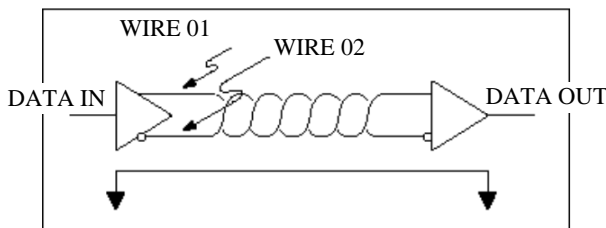


Рис. 14.7. RS-485

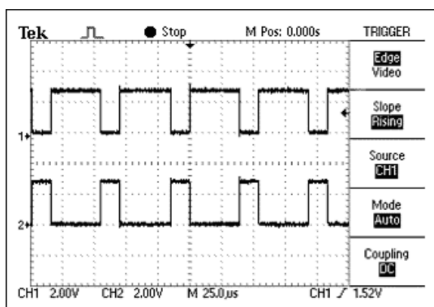


Рис. 14.8. Передача сигналов

Несмотря на то что RS-485 может успешно осуществлять передачу с использованием различных типов передающей среды, он должен использоваться с проводкой, обычно называемой «витая пара».

Витая пара – это пара проводов, имеющих равную длину и свитых вместе. Использование передатчика, отвечающего требованиям спецификации RS-485, с кабелем на основе витой пары, уменьшает два главных источника проблем для разработчиков быстродействующих территориально распределенных сетей – излучаемые электромагнитные помехи и индуцируемые электромагнитные помехи (наводка).

Излучаемые электромагнитные помехи

Как показано на рис. 14.9, всякий раз, когда для передачи информации используются импульсы с крутыми фронтами, в сигнале присутствуют высокочастотные составляющие. Эти крутые фронты нужны при более высоких скоростях, чем способен обеспечить RS-485.

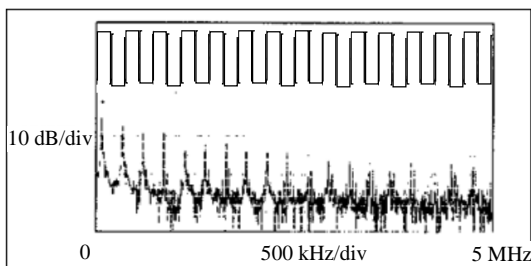


Рис. 14.9. Форма сигнала последовательности прямоугольных импульсов с частотой 125 кГц и ее БПФ

Полученные в итоге высокочастотные компоненты этих крутых фронтов вместе с длинными проводами могут привести к излучению электромагнитных помех (ЕМІ). Балансная система, использующая линии связи на основе витой пары, уменьшает этот эффект, делая систему неэффективным излучателем. Поскольку сигналы на линиях равны, но инверсны, то излучаемые от каждого провода сигналы будут также иметь тенденцию быть равными, но инверсными. Это создает эффект подавления одного сигнала другим, что, в свою очередь, означает отсутствие электромагнитного излучения. Однако это основано на предположении, что провода имеют точно одинаковую длину и точно одинаковое расположение. Поскольку невозможно одновременно иметь два абсолютно одинаково расположенных провода, они должны быть расположены так близко друг к другу, насколько возможно. Скручивание проводов помогает нейтрализовать любое остаточное электромагнитное излучение из-за конечного расстояния между двумя проводами.

Индукцируемые электромагнитные помехи

Проблема индуцируемых электромагнитных помех подобна проблеме излучаемых, но наоборот. Межсоединения, используемые в системе на основе RS-485, также действуют как антенна, которая получает нежелательные сигналы. Эти нежелательные сигналы могут исказить полезные, что, в свою очередь, может привести к ошибкам в данных. По той же причине, по которой витая пара помогает предотвращать излучение электромагнитных помех, она также помогает снизить влияние наводимых электромагнитных помех. Поскольку два провода расположены вместе и скручены, шум, наведенный на одном проводе, будет иметь тенденцию быть тем же самым, что и наведенный на втором проводе. Этот тип шума называют синфазным. Поскольку приемники RS-485 предназначены для обнаружения сигналов, которые являются противоположностью друг друга, они могут легко подавлять шум, который является общим для обоих проводов.

Волновое сопротивление витой пары

В зависимости от геометрии кабеля и материалов, используемых в изоляции, витая пара будет обладать соответствующим волновым сопротивлением (характеристическим импедансом), которое обычно

определяется ее производителем. Спецификация RS-485 рекомендует, чтобы волновое сопротивление было равно 120 Ом.

Рекомендация этого импеданса необходима для вычисления наихудшей нагрузки и диапазонов синфазных напряжений, определенных в спецификации RS-485. Спецификация не диктует этот импеданс в интересах гибкости. Если по каким-либо причинам не может использоваться 120-омный кабель, рекомендуется, чтобы наихудший вариант нагрузки (допустимое число передатчиков и приемников) и наихудшие диапазоны синфазных напряжений были повторно рассчитаны, чтобы удостовериться, что проектируемая система будет работать.

Согласующие резисторы

При высоких частотах и больших расстояниях должное внимание должно быть уделено эффектам, возникающим в линиях связи. Следует кратко рассмотреть технику согласования в ее простейшей форме в той степени, в которой она имеет отношение к RS-485.

Согласующий резистор – это резистор, который установлен на концах кабеля (рис. 14.10). Предпочтительно, чтобы сопротивление согласующего резистора было равно волновому сопротивлению кабеля.

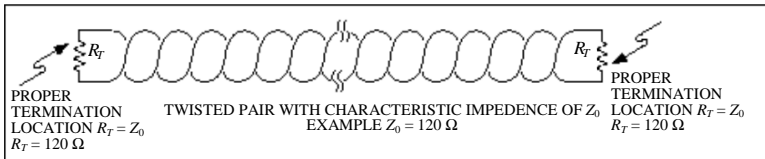


Рис. 14.10. Схема установки согласующего резистора

Согласующие резисторы должны иметь сопротивление, равное волновому сопротивлению витой пары, и размещаться на дальних концах кабеля. Если сопротивление согласующих резисторов не равно волновому сопротивлению кабеля, произойдет отражение, т. е. сигнал вернется по кабелю обратно. Это описывается уравнением $(R_T - Z_0) / (Z_0 + R_T)$, где Z_0 – сопротивление кабеля, а R_T – номинал согласующего резистора. В силу допустимых отклонений в кабеле и резисторе некоторое отражение неизбежно, значительные

расхождения могут вызвать отражения, достаточно большие для того, чтобы привести к ошибкам в данных (рис. 14.11).

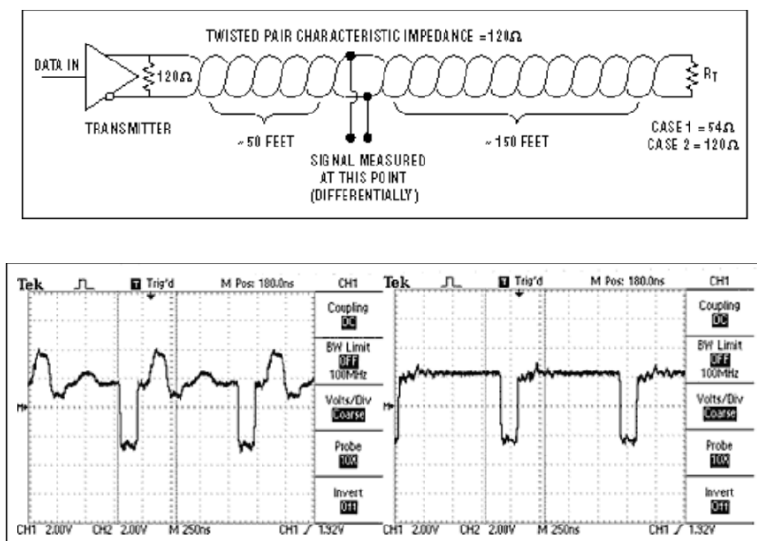


Рис. 14.11. Форма сигнала, полученного с использованием согласующих резисторов

Согласно схеме (см. рис. 14.11) сигнал слева был получен с устройства MAX3485 и 54-омного согласующего резистора на 120-омную витую пару. Сигнал справа был получен при корректном согласовании с помощью 120-омного резистора.

14.8. Принципы построения сети микропроцессорных устройств управления

Под *топологией* (компоновкой, конфигурацией, структурой) компьютерной сети обычно понимается физическое расположение компьютеров сети друг относительно друга и способ их соединения линиями связи.

Понятие топологии относится прежде всего к локальным сетям, в которых структуру связей можно легко проследить. В глобальных

сетях структура связей обычно скрыта от пользователей и не важна, т. к. каждый сеанс связи может производиться по собственному пути.

Топология определяет требования к оборудованию, тип используемого кабеля, возможные и наиболее удобные методы управления обменом, надежность работы, возможности расширения сети. Выбирать топологию пользователю сети приходится нечасто, но знать об особенностях основных топологий, их достоинствах и недостатках необходимо.

Существует три основные топологии сети:

- шина (*bus*) – все компьютеры параллельно подключаются к одной линии связи и информация от каждого компьютера одновременно передается всем остальным компьютерам (рис. 14.12);

- звезда (*star*) – к одному центральному компьютеру присоединяются остальные периферийные компьютеры, причем каждый из них использует отдельную линию связи (рис. 14.13);

- кольцо (*ring*) – каждый компьютер передает информацию только одному компьютеру, следующему в цепочке, а получает информацию только от предыдущего в цепочке компьютера, и эта цепочка замкнута в кольцо (рис. 14.14).

На практике нередко используют другие сетевые топологии, а также комбинации базовых, но большинство сетей ориентированы на эти три.

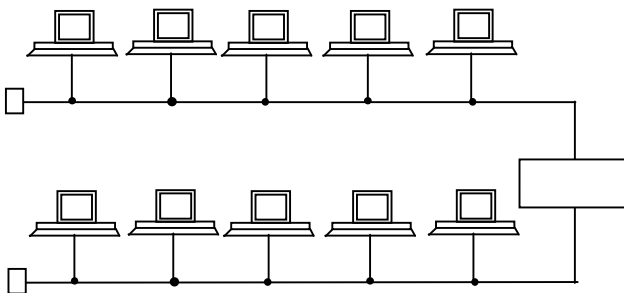


Рис. 14.12. Соединение сегментов сети типа «шина» с помощью репитера

Топология «шина» (или «общая шина») своей структурой предполагает идентичность сетевого оборудования компьютеров, а также равноправие всех абонентов. При таком соединении компьютеры могут передавать только по очереди, т. к. линия связи

единственная. В противном случае передаваемая информация будет искажаться в результате наложения (конфликта, коллизии). Таким образом, в шине реализуется режим полудуплексного (*half duplex*) обмена (в обоих направлениях, но по очереди, а не одновременно).

В топологии «шина» отсутствует центральный абонент, через которого передается вся информация, что увеличивает ее надежность (при отказе любого центра перестает функционировать вся управляемая этим центром система). Добавление новых абонентов в шину довольно просто и обычно возможно даже во время работы сети. В большинстве случаев при использовании шины требуется минимальное количество соединительного кабеля по сравнению с другими топологиями. Однако нужно учесть, что к каждому компьютеру (кроме двух крайних) подходит два кабеля, что не всегда удобно.

Так как разрешение возможных конфликтов в данном случае ложится на сетевое оборудование каждого отдельного абонента, аппаратура сетевого адаптера при топологии «шина» сложнее, чем при других топологиях. Но из-за широкого распространения сетей с топологией «шина» (Ethernet, Arcnet) стоимость сетевого оборудования не слишком высока. Для шины несущественны отказы отдельных компьютеров, т. к. остальные компьютеры сети могут продолжать обмен. Можно предположить, что для шины несущественен и обрыв кабеля, поскольку в этом случае получают две работоспособные шины, однако из-за особенностей распространения электрических сигналов по длинным линиям связи необходимо предусматривать включение на концах шины специальных согласующих устройств – терминаторов, показанных на рис. 14.12 в виде прямоугольников. Без включения терминаторов сигнал отражается от конца линии и искажается так, что связь по сети становится невозможной. При разрыве или повреждении кабеля (например, мышами) нарушается согласование линии связи и прекращается обмен даже между теми компьютерами, которые остались соединенными между собой. Короткое замыкание в любой точке кабеля шины выводит из строя всю сеть. Любой отказ сетевого оборудования в шине трудно локализовать, т. к. все адаптеры включены параллельно и понять, какой из них вышел из строя, непросто.

При прохождении по линии связи сети с топологией «шина» информационные сигналы ослабляются и не восстанавливаются, что накладывает жесткие ограничения на суммарную длину линий связи. Кроме того, каждый абонент может получать из сети сигналы разного уровня в зависимости от расстояния до передающего абонента. Это предъявляет дополнительные требования к приемным узлам сетевого оборудования. Для увеличения длины сети с топологией «шина» часто используют несколько сегментов (каждый из которых представляет собой шину), соединенных между собой с помощью специальных восстановителей сигналов – репитеров, или повторителей (на рис. 14.12 показано соединение двух сегментов). Однако такое наращивание длины сети не бесконечно, т. к. существуют еще и ограничения, связанные с конечной скоростью распространения сигналов по линиям связи.

«Звезда» – топология с явно выделенным центром, к которому подключаются все остальные абоненты (рис. 14.13). Обмен информацией идет исключительно через центральный компьютер, на который, таким образом, ложится большая нагрузка, не позволяющая заниматься чем-либо кроме сети. Сетевое оборудование центрального абонента должно быть существенно более сложным, чем оборудование периферийных абонентов. Равноправие абонентов в данном случае отсутствует. Как правило, именно центральный компьютер является самым мощным и именно на него возлагаются все функции по управлению обменом. Никакие конфликты в сети с топологией «звезда» невозможны, т. к. управление полностью централизовано.

Если говорить об устойчивости звезды к отказам компьютеров, то выход из строя периферийного компьютера никак не отражается на функционировании оставшейся части сети, зато любой отказ центрального компьютера делает сеть полностью неработоспособной. Поэтому должны приниматься специальные меры по повышению надежности центрального компьютера и его сетевой аппаратуры. Обрыв любого кабеля или короткое замыкание в нем при топологии «звезда» нарушает обмен только с одним компьютером, а все остальные компьютеры могут продолжать работу.

В отличие от шины, в звезде на каждой линии связи находятся только два абонента: центральный и один из периферийных. Чаще всего для их соединения используется две линии связи, каждая

из которых передает информацию только в одном направлении. Таким образом, на каждой линии связи имеется только один приемник и один передатчик. Все это существенно упрощает сетевое оборудование по сравнению с шиной и избавляет от необходимости применения дополнительных внешних терминаторов. Проблема затухания сигналов в линии связи также решается в звезде проще, чем в шине, ведь каждый приемник всегда получает сигнал одного уровня.

Серьезный недостаток топологии «звезда» состоит в жестком ограничении количества абонентов. Обычно центральный абонент может обслуживать не более 8...16 периферийных абонентов. Если в этих пределах подключение новых абонентов довольно просто, то при их превышении – невозможно. Иногда в звезде предусматривается возможность наращивания, т. е. подключение вместо одного из периферийных абонентов еще одного центрального абонента (в результате получается топология из нескольких соединенных между собой звезд).

Существует также топология «пассивная звезда», которая похожа на звезду только внешне (рис. 14.13). В настоящее время она распространена гораздо больше, чем активная звезда, и используется в самой популярной на сегодняшний день сети Ethernet.

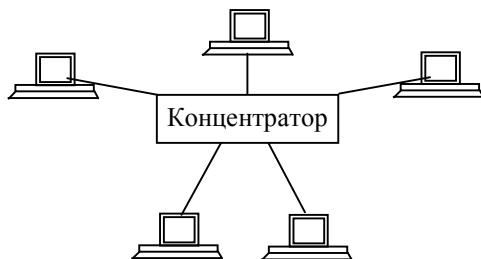


Рис. 14.13. Топология «пассивная звезда»

В центре сети с данной топологией помещается не компьютер, а концентратор, или хаб (*hub*), выполняющий ту же функцию, что и репитер. Он восстанавливает входящие сигналы и пересылает их в другие линии связи. Хотя схема прокладки кабелей подобна активной звезде, фактически это шинная топология, т. к. информация от каждого компьютера одновременно передается ко всем остальным

компьютерам, а центрального абонента не существует. Пассивная звезда дороже обычной шины, поскольку в этом случае обязательно требуется и концентратор. Однако она предоставляет целый ряд дополнительных возможностей, связанных с преимуществами звезды. Именно поэтому в последнее время пассивная звезда все больше вытесняет истинную шину, которая считается малоперспективной топологией.

Можно выделить также промежуточный тип топологии между активной и пассивной звездой. В этом случае концентратор не только ретранслирует поступающие на него сигналы, но и производит управление обменом, однако сам в обмене не участвует. Большое достоинство звезды (как активной, так и пассивной) состоит в том, что все точки подключения собраны в одном месте. Это позволяет легко контролировать работу сети, локализовать неисправности сети путем простого отключения от центра тех или иных абонентов (что невозможно, например, в случае шины), а также ограничивать доступ посторонних лиц к жизненно важным для сети точкам подключения.

К каждому периферийному абоненту в случае звезды может подходить как один кабель (по которому идет передача в обоих направлениях), так и два кабеля (каждый из них передает в одном направлении), причем вторая ситуация встречается чаще. Общим недостатком для всех топологий типа «звезда» является значительно больший, чем при других топологиях, расход кабеля. Например, если компьютеры расположены в одну линию, то при выборе топологии «звезда» понадобится в несколько раз больше кабеля, чем при топологии «шина». Это может существенно повлиять на стоимость сети в целом.

«Кольцо» – топология, в которой каждый компьютер соединен линиями связи только с двумя другими: от одного он только получает информацию, а другому только передает (рис. 14.14).

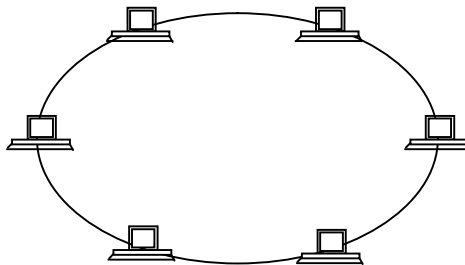


Рис. 14.14. Топология «кольцо»

На каждой линии связи, как и в случае звезды, работает только один передатчик и один приемник. Это позволяет отказаться от применения внешних терминаторов. Важная особенность кольца состоит в том, что каждый компьютер ретранслирует (восстанавливает) проходящий к нему сигнал, т. е. выступает в роли репитера, поэтому затухание сигнала во всем кольце не имеет значения, важно только затухание между соседними компьютерами кольца. Четко выделенного центра в данном случае нет, все компьютеры могут быть одинаковыми. Однако довольно часто в кольце выделяется специальный абонент, который управляет обменом или контролирует обмен. Наличие такого управляющего абонента снижает надежность сети, т. к. его выход из строя парализует весь обмен. То есть компьютеры в кольце не являются полностью равноправными (в отличие, например, от шинной топологии). Информацию от компьютера, ведущего передачу в данный момент, одни из них обязательно получают раньше, а другие – позже. На этой особенности топологии и строятся методы управления обменом по сети, рассчитанные на кольцо. В этих методах право на следующую передачу (или, как еще говорят, на захват сети) переходит последовательно к следующему по кругу компьютеру. Подключение новых абонентов в кольцо обычно безболезненно, хотя и требует обязательной остановки работы всей сети на время подключения. Как и в случае топологии «шина», максимальное количество абонентов в кольце может быть велико (до тысячи и больше). Кольцевая топология обычно является самой устойчивой к перегрузкам, она обеспечивает уверенную работу с самыми большими потоками передаваемой по сети информации, т. к. в ней, как правило, нет конфликтов (в отличие от шины), а также отсутствует центральный абонент (в отличие от звезды). Так как сигнал в кольце проходит через все компьютеры сети, выход из строя хотя бы одного из них (или же его сетевого оборудования) нарушает работу всей сети в целом. Точно так же любой обрыв или короткое замыкание в любом из кабелей кольца делает работу всей сети невозможной. Кольцо наиболее уязвимо к повреждениям кабеля, поэтому в этой топологии обычно предусматривают прокладку двух (или более) параллельных линий связи, одна из которых находится в резерве.

В то же время крупное преимущество кольца состоит в том, что ретрансляция сигналов каждым абонентом позволяет существенно увеличить размеры сети в целом (порой до нескольких десятков километров). Кольцо в этом отношении существенно превосходит любые другие топологии.

Недостатком кольца по сравнению со звездой можно считать то, что к каждому компьютеру сети необходимо подвести два кабеля. Иногда топология «кольцо» выполняется на основе двух кольцевых линий связи, передающих информацию в противоположных направлениях. Цель подобного решения – увеличение (желательно вдвое) скорости передачи информации. К тому же при повреждении одного из кабелей сеть может работать с другим кабелем, хотя предельная скорость при этом уменьшится.

Раздел III. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

№ 1. ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С РАЗОМКНУТЫМ И ЗАМКНУТЫМ ПРИНЦИПАМИ УПРАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучить фундаментальные принципы автоматического управления; исследовать работу системы с разомкнутым и замкнутым принципами управления.

Задание:

1. Исследовать работу системы с разомкнутым и замкнутым принципами управления.
2. Составить функциональные схемы системы с разомкнутым и замкнутым принципами управления.
3. Сделать вывод об использовании принципов управления в системах.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется лабораторная установка НТЦ 09.11 с расположенной на ней схемой исследуемой системы (рис. 1, 2). Для коммутации исследуемой схемы с источниками входных сигналов используется комплект шнуров с наконечниками.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, в которой аналоговый сигнал датчика температуры преобразуется в сигнал, который при допустимых значениях температуры имеет значение 0, а при превышении температуры значение 1 (рис. 1).
2. Изобразить функциональную схему исследуемой разомкнутой системы управления.

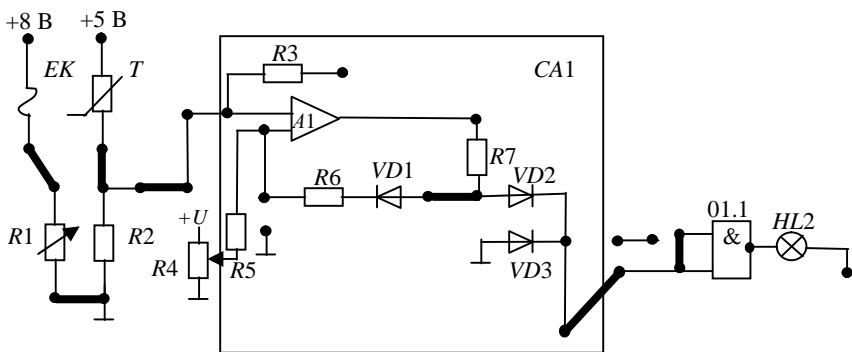


Рис. 1. Схема системы с разомкнутым принципом управления

3. Дополнить схему таким образом, чтобы нагрев автоматически отключался или уменьшался при достижении верхней предельной температуры. Обратную связь осуществить с помощью транзистора VT1, либо с помощью реле K2 (рис. 2).

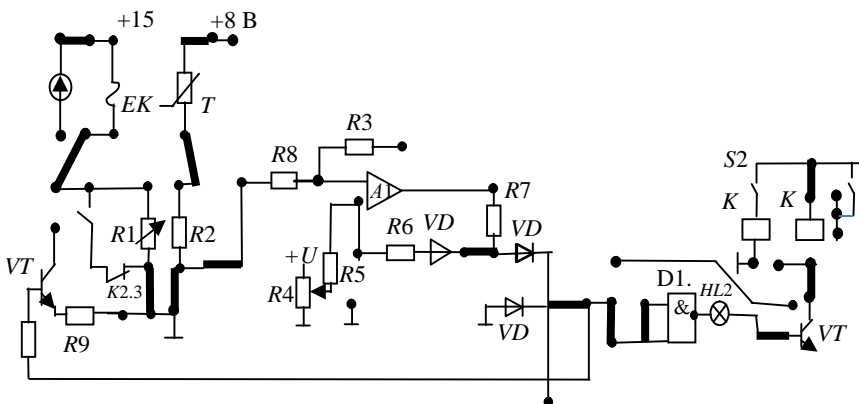


Рис. 2. Схема системы с замкнутым принципом управления

4. Изобразить функциональную схему исследуемой замкнутой системы управления.

5. Сделать вывод об использовании принципов управления в системах автоматического управления.

Содержание отчета

1. Схема системы автоматического управления с разомкнутым принципом управления.
2. Функциональная схема системы автоматического управления с разомкнутым принципом управления.
3. Схема системы автоматического управления с замкнутым принципом управления.
4. Функциональная схема системы автоматического управления с замкнутым принципом управления.
5. Вывод об использовании принципов управления в системах автоматического управления.

Контрольные вопросы

1. Что такое система автоматического управления?
2. Каковы преимущества и недостатки систем с разомкнутым и замкнутым принципами управления?
3. Что такое система с замкнутым управлением?
4. Что такое система с разомкнутым управлением?
5. Что представляет собой функциональная схема?
6. По каким правилам составляется функциональная схема?

№ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ И ПОЛУЧЕНИЕ ИХ СТАТИЧЕСКИХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Цель работы: освоить методики получения математического описания, статических и частотных характеристик линейных звеньев.

Задание:

1. Изучить математическое описание линейных звеньев.
2. Получить опытным путем статическую характеристику звена на лабораторной установке.
3. Рассчитать статическую характеристику звена.
4. Построить полученные статические характеристики опытным и расчетным путем в одних координатах.
5. Сделать вывод о соответствии полученных статических характеристик опытным и расчетным путем.

6. Рассчитать частотные характеристики звена.
7. Построить полученные частотные характеристики опытным и расчетным путем в одних координатах.
8. Сделать вывод о соответствии полученных частотных характеристик опытным и расчетным путем.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

На панели лабораторных работ (рис. 1) лабораторной установки расположена схема исследуемого звена (рис. 2). Для измерения входного U_1 и выходного U_2 сигналов звена используется двухканальный электроннолучевой осциллограф. Для коммутации исследуемой схемы с источниками входных сигналов используется комплект проводов с наконечниками.

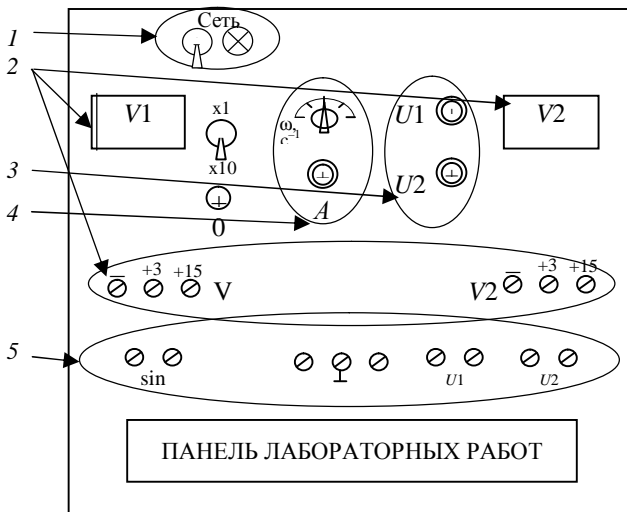


Рис. 1. Лабораторная установка:

- 1 – тумблер и сигнальная лампа «Сеть» для включения и индикации наличия питания; 2 – вольтметры V1 и V2 с пределами измерений 15 В или 3 В; 3 – ручки регулирования уровней напряжения для первого источника U_1 , для второго U_2 ;
- 4 – переключатель выбора частоты ω , c^{-1} ,
- и ручка плавного регулирования амплитуды напряжения A ;
- 5 – гнезда выходов генератора синусоидального напряжения \sin и гнезда выходов первого U_1 и второго U_2 источников питания

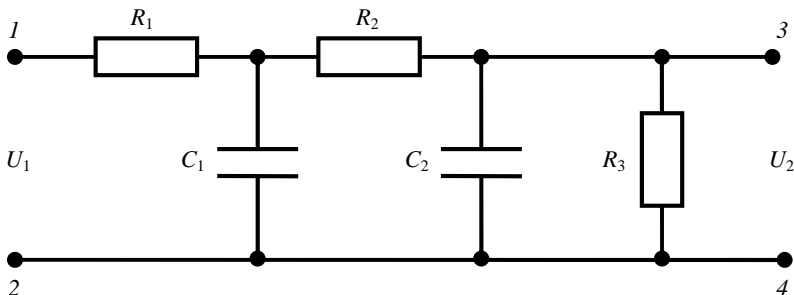


Рис. 2. Исследуемая схема:
 U_1 – входное воздействие; U_2 – выходная величина

Порядок выполнения работы

1. Получение статической характеристики звена

1. Проводом с наконечниками соединить гнездо « U_1 » панели лабораторных работ с гнездом «1» исследуемой схемы.

2. Подключить первый канал двухканального осциллографа ко второму гнезду « U_1 » и гнезду «1». Второй канал осциллографа подключить к точкам «3» и «4».

3. Включить стенд и осциллограф.

4. Для снятия данных статической характеристики, вращая ручку « U_1 », подавать на схему последовательно напряжение U_1 : –6; –4; –2; 0; 2; 4; 6 В, определяя значение поданных напряжений по экрану осциллографа. После окончания переходного процесса для каждого значения U_1 по экрану осциллографа определить выходные напряжения U_2 . Данные опытов занести в табл. 1.

5. Построить экспериментальную статическую характеристику $U_2 = f(U_1)$ звена. Рассчитать по ней значение коэффициента передачи $K = \Delta U_2 / \Delta U_1$. Его значение занести в табл. 1.

6. Рассчитать коэффициент передачи звена $K_{\text{рас}} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$.

7. Расчетное значение коэффициента $K_{\text{рас}}$ занести в табл. 1.

Результаты измерений и расчетов для построения экспериментальной и расчетной статических характеристик звена

Величины	Значения						
$U_1, \text{В}$	-6	-4	-2	0	2	4	6
$U_2, \text{В}$							
$U_{2p}, \text{В}$							
K							
$K_{\text{рас}}$							

8. Рассчитать статическую характеристику $U_2 = K_{\text{рас}}U_1$. Результаты занести в табл. 1.

9. В одних координатах с экспериментальной характеристикой звена построить расчетную статическую $U_{2p} = K_{\text{рас}}U_1$.

Сделать вывод о соответствии экспериментальной и расчетной статических характеристик друг другу.

II. Получение частотных характеристик звена

1. Рассчитать значения постоянных коэффициентов по формулам:

$$T_2^2 = \frac{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}{R_1 + R_2 + R_3};$$

$$T_1 = \frac{R_1 R_2 C_1 + R_1 R_3 C_1 + R_1 R_3 C_2 + R_2 R_3 C_2}{R_1 + R_2 + R_3};$$

$$K = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

2. Рассчитать АЧХ по формуле

$$A(\omega) = \sqrt{U^2 + V^2} = \frac{K}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega)^2}}.$$

Результаты расчетов для всех частот занести в табл. 2.

3. Рассчитать ФЧХ по формуле

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\left(\frac{V}{U}\right) = -\operatorname{arctg}\left(\frac{T_1\omega}{1-T_2^2\omega^2}\right).$$

Результаты расчетов для всех частот занести в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений и расчетов для построения экспериментальных и расчетных частотных характеристик звена

Величины	Значения						
$\omega, \text{с}^{-1}$	0						∞
$A_p(\omega)$							
$\varphi_p(\omega)$							

4. Построить теоретические (расчетные) АЧХ, ФЧХ и АФЧХ.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента и расчетов (табл. 1).
3. Графики экспериментальной и расчетной статических характеристик.
4. Вывод о соответствии экспериментальной статической характеристики расчетной.
5. Результаты расчетов (табл. 2).
6. Графики расчетных АЧХ, ФЧХ и АФЧХ.
7. Вывод о влиянии значения частоты на АЧХ и ФЧХ.

Контрольные вопросы

1. Что такое звено, линейное звено?
2. Что представляет собой статическая характеристика?

3. Что такое АЧХ, ФЧХ, АФЧХ?
4. Как называется график АФЧХ? Как он строится?
5. Какова методика получения статических и частотных характеристик линейных звеньев теоретическим и экспериментальным методами?

№ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ

Цель работы: освоить методику моделирования статических и частотных характеристик линейных звеньев.

Задание:

1. Создать компьютерную модель исследуемого звена в Simulink для получения статической характеристики.
2. Построить график статической характеристики, полученной путем моделирования.
3. Создать компьютерную модель исследуемого звена в Simulink для получения частотных характеристик.
4. Построить графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ, полученных путем моделирования.
5. Сделать вывод о соответствии полученных характеристик экспериментальным.


Аппаратура, используемая в лабораторной работе

В данной лабораторной работе для компьютерного моделирования заданной электрической схемы используется система компьютерного моделирования (СКМ) MATLAB и входящий в ее состав пакет моделирования Simulink.

1. Для запуска Simulink необходимо сначала запустить MATLAB из главного меню Windows Пуск → Все программы → Matlab6.5 либо путем двойного щелчка мышью по соответствующей иконке на рабочем столе. Основное окно MATLAB показано на рис. 1. Данное окно содержит три подокна: Command Window – окно для ввода формул и команд; Command History – окно, отображающее

ранее введенные команды; окно **Workspase**, отображающее рабочее пространство, т. е. используемые в работе переменные, константы, массивы и другие объекты, а также их размеры в байтах. В начале работы все три подокна пусты.

2. Запустить пакет Simulink из MATLAB одним из двух способов:

- в окне ввода команд **Command Window** в строке ввода (справа от знака `>>`) набрать `simulink` и нажать на клавишу ввода;
- на панели инструментов MATLAB левой клавишей мыши нажать на кнопку Simulink .

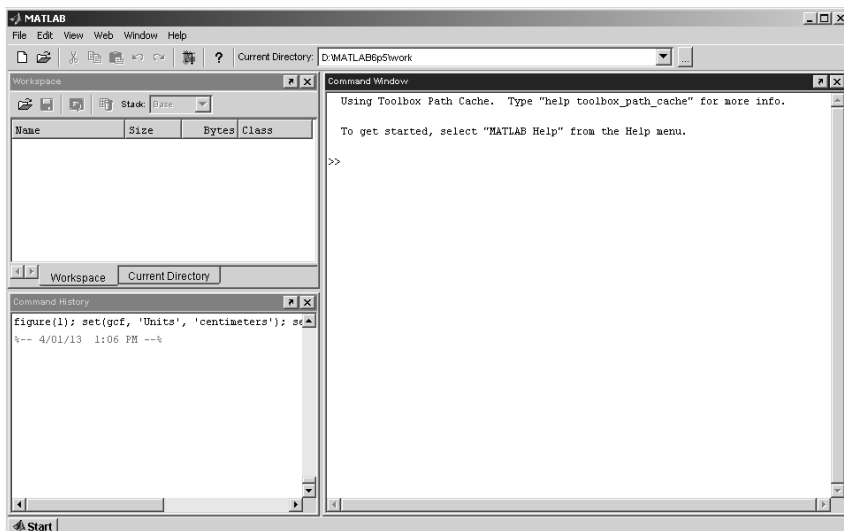



Рис. 1. Вид основного окна системы компьютерного моделирования MATLAB

В результате откроется **Simulink Library Brouser** – окно интегрированного обозревателя (браузера) библиотеки стандартных блоков Simulink (рис. 2). В данном окне содержится дерево компонентов библиотеки блоков Simulink. Библиотека блоков включает следующие основные разделы:

- **Continuous** – линейные непрерывные блоки;
- **Discontinuities** – нелинейные блоки;
- **Discrete** – дискретные блоки;
- **Math operations** – блоки математических операций;

- Signal routing – блоки преобразования сигналов;
- Sinks – регистрирующие блоки (приемники сигналов);
- Sources – источники сигналов.

Для просмотра того или иного раздела библиотеки достаточно выделить его мышью – в правой части окна Simulink Library Browser появится набор пиктограмм блоков активного раздела библиотеки.

3. Для создания новой модели необходимо в меню окна Simulink Library Browser выполнить команду File → New → Model, или нажать на клавиатуре комбинацию клавиш Ctrl+N, или левой клавишей мыши на панели инструментов окна Simulink Library Browser нажать на соответствующую кнопку . В результате на экране появится новое пустое окно редактирования графической модели моделируемой системы или устройства.

Вид данного окна, имеющего по умолчанию имя untitled, также показан на рис. 2.

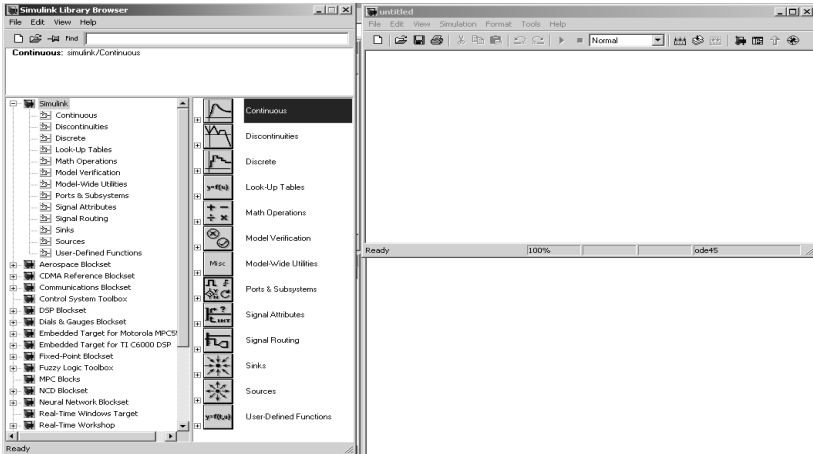


Рис. 2. Окно браузера библиотек Simulink

Порядок выполнения работы

1. Построение компьютерной модели заданной схемы в Simulink

Запустить систему компьютерного моделирования (СКМ) MATLAB и входящий в ее состав пакет моделирования Simulink.

Открыть окно создания новой модели. В этом окне создать графическую модель заданной электрической цепи. Приблизительный вид создаваемой графической модели показан на рис. 3.

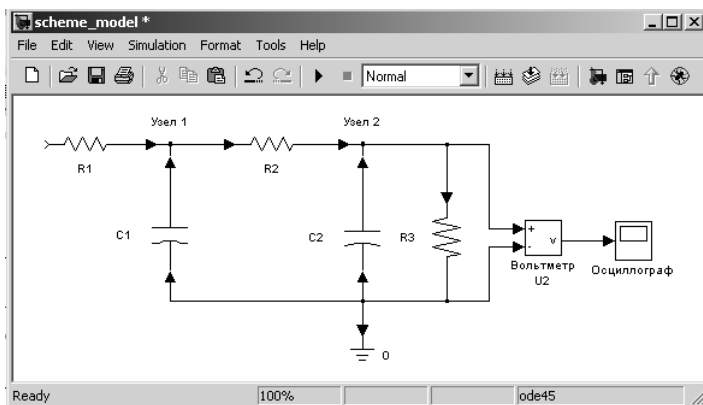


Рис. 3. Графическая модель заданной электрической цепи

1. Сопротивление R_1 . В окне Simulink Library Browser в библиотеке SimPowerSystems на вкладке Elements найти блок Series RLC Branch, выделить его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащить данный компонент в окно редактирования модели untitled. Данный блок представляет собой последовательное соединение активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C , однако, задав соответствующие параметры блока, можно моделировать каждый из этих трех элементов в отдельности. Необходимо задать параметры блока. Для этого левой клавишей мыши следует дважды щелкнуть по нему. В появившемся окне Block Parameters: Series RLC Branch нужно ввести следующие значения параметров: для параметра Resistance R (Ohms) – значение сопротивления R_1 ; для параметра Inductance L (H) – нулевое значение индуктивности 0; для параметра Capacitance C (F) – значение электрической емкости inf, равное бесконечности. Нажатием на кнопки Apply и ОК закрепить введенные параметры блока. В результате значок блока изменится и примет вид, соответствующий только одному активному сопротивлению. Название блока по умолчанию автоматически задано как Series RLC Branch и от-

бражается под ним. Для задания названия блока следует щелкнуть левой клавишей мыши по надписи **Series RLC Branch**, войти в строку редактирования надписи и заменить надпись **Series RLC Branch** на **R1**; выход из строки редактирования надписи осуществляется щелчком левой клавиши мыши по свободному пространству окна **untitled**.

2. Конденсатор C_1 . Для моделирования конденсатора также используется блок **Series RLC Branch**. Как и в предыдущем случае, нужно выделить его левой клавишей мыши в окне **Simulink Library Browser** в библиотеке **Sim Power Systems** на вкладке **Elements** и перетащить данный блок в окно редактирования модели **untitled**. Для задания параметров блока левой клавишей мыши выполнить двойной щелчок по нему и в появившемся окне **Block Parameters: Series RLC Branch** задать следующие значения параметров: для параметра **Resistance R (Ohms)** – нулевое значение сопротивления 0; для параметра **Inductance L (H)** – нулевое значение индуктивности 0; для параметра **Capacitance C (F)** – значение электрической емкости, соответствующее значению емкости C_1 на лабораторном стенде. Нажатием на кнопки **Apply** и **OK** закрепить введенные параметры блока. В результате значок блока изменится и примет вид, соответствующий только одному конденсатору. Для задания названия блока щелкнуть левой клавишей мыши по надписи **Series RLC Branch**, войти в строку редактирования надписи и заменить надпись **Series RLC Branch** на **C1**; для выхода из строки редактирования надписи щелкнуть левой клавишей мыши по свободному пространству окна **untitled**. Для поворота значка конденсатора, чтобы он располагался вертикально, необходимо щелкнуть по нему один раз правой клавишей мыши и в появившемся всплывающем меню выбрать сначала пункт **Format** → **Rotate block**, а затем точно так же – пункт **Format** → **Flip block**.

3. Сопротивление R_2 , R_3 и емкость C_2 задать аналогично.

4. Для соединения блоков **R1**, **C1** и **R2** используется блок **T connector**, расположенный на вкладке **Connectors** в библиотеке **Sim Power Systems** в окне **Simulink Library Browser**. Следует перетащить его левой клавишей мыши в окно редактирования модели **untitled**, щелкнуть по нему правой клавишей мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Format** → **Show name**, в результате

над значком элемента появится его название **T connector**, заданное автоматически. Нужно изменить название блока с **T connector** на **Узел 1**, а затем выполнить соединение элементов: подвести курсор мыши к выходу блока **R1** и, нажав на левую клавишу мыши, соединить выход **R1** с левым входом блока **Узел 1**. Аналогичным образом соединить выход блока **C1** с нижним входом блока **Узел 1**, а выход **Узел 1** – с входом блока **R2**.

5. Соединение блоков **R2**, **C2** и **R3** выполнить таким же образом, с использованием еще одного блока **T connector**, которому присвоить название **Узел 2**.

6. Выход блока **R3** соединить со входом блока **C1**. По получившейся соединительной линии щелкнуть правой клавишей мыши, во всплывающем окне выбрать пункт **Signal Properties** и в появившемся окне в поле **Signal name** в качестве названия сигнала ввести **0** (эта линия, *нулевая*, соответствует нулевому потенциалу). После этого левой клавишей мыши соединить вход блока **C2** с нулевой линией. Далее на вкладке **Connectors** в библиотеке **Sim Power Systems** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **Ground (input)** и перетащить его в окно редактирования модели **untitled**. Отобразить название блока, щелкнув по нему правой клавишей мыши и выбрав пункт **Format → Show name** всплывающего меню, и изменить название с **Ground (input)** на **0**. После этого вход блока **0** левой клавишей мыши соединить с нулевой линией.

7. Вольтметр. На вкладке **Measurements** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **Voltage Measurement** (блок измерения напряжения) и перетащить его в окно **untitled**. Начальное название элемента изменить на **Вольтметр U2**. Вход «+» вольтметра соединить с линией между блоками **Узел 2** и **R3**, а вход «-» с нулевой линией.

8. Осциллограф. На вкладке **Sinks** в библиотеке **Simulink** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **Scope** и перетащить его в окно **untitled**. Название блока **Scope** заменить на **Осциллограф**. Выход блока **Вольтметр U2** соединить со входом блока **Осциллограф**. Двойным щелчком левой клавиши мыши на значке блока **Осциллограф** открыть окно **Осциллограф**, моделирующее экран реального осциллографа (рис. 4).

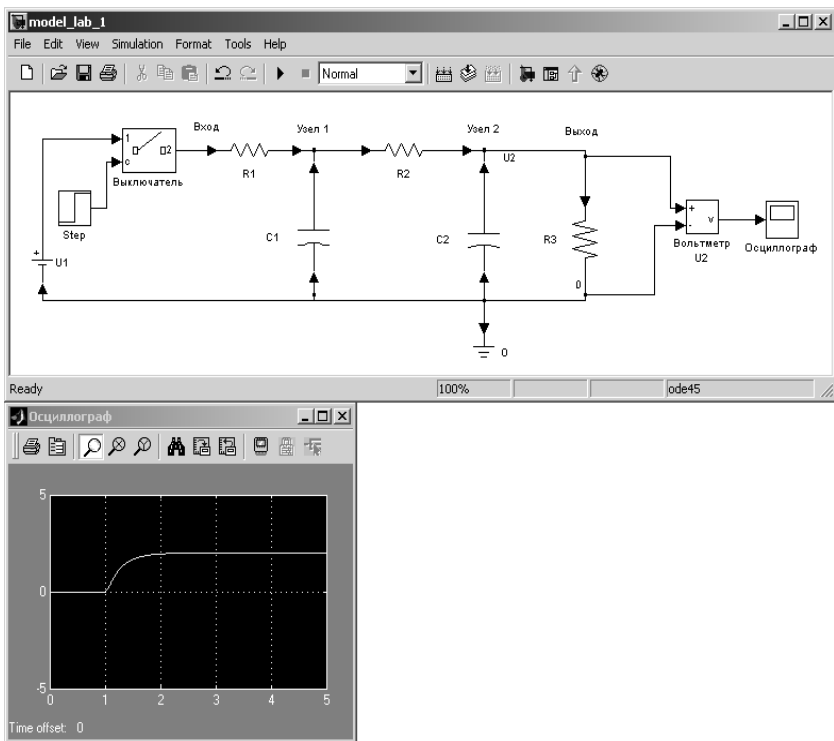


Рис. 4. Получение статической характеристики звена

9. Источник постоянного напряжения. На вкладке **Electrical Sources** в библиотеке **Sim Power Systems** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **DC Voltage Source** (источник постоянного напряжения) и перетащить его в окно **untitled**. Название блока **DC Voltage Source** изменить на **U1**. Вход блока **U1** соединить с нулевой линией.

10. Выключатель. Для замыкания электрической цепи использовать блок **Breaker** (выключатель) на вкладке **Elements** в библиотеке **Sim Power Systems** в окне **Simulink Library Browser**. Данный элемент моделирует устройство включения и выключения тока. Выключатель **Breaker** может управляться внешним управляющим сигналом, подаваемым на управляющий вход «с». Замыкание входного и выходного контактов выключателя «1» и «2» выполняется при подаче на вход «с» единичного сигнала,

а размыкание – при подаче нулевого сигнала. Устройство имеет встроенную искрогасящую RC-цепь, включенную параллельно контактам выключателя.


11. Перетащить блок **Breaker** в окно **untitled** и изменить название с **Breaker** на **Выключатель**. Двойным щелчком левой клавишей мыши по значку блока открыть окно задания его параметров и для параметра **Snubber resistance Rom (Ohms)** (сопротивление выключателя в разомкнутом состоянии) вместо значения 10^6 ввести **inf** (бесконечность), после чего нажать на кнопки **Apply** и **OK**. Входной контакт выключателя «1» соединить с выходом источника напряжения U_1 , а выходной контакт «2» – со входом блока резистора **R1**.

12. Ступенчатое входное воздействие. Для замыкания выключателя используется блок **Step** на вкладке **Sources** в библиотеке **Simulink**. Данный блок моделирует ступенчатое изменение сигнала. Перетащить его левой клавишей мыши в окно **untitled** и соединить с управляющим входом «с» выключателя. Выполнить двойной щелчок левой клавиши мыши по блоку **Step** и открыть окно задания его параметров. В соответствии с заданными по умолчанию значениями параметров сигнал на выходе блока будет изменяться от начального значения (**Initial value**) 0 до конечного значения (**Final value**) 1 в момент времени (**Step time**) 1 с от начала процесса моделирования. Оставить все параметры блока **Step** без изменения и нажать на кнопку **OK**.

13. Сохранить созданную модель, выбрав в меню окна редактирования модели **untitled** пункт **File** → **Save as...** Вид окна с созданной моделью электрической цепи и окна осциллографа показан на рис. 4.

II. Получение статической характеристики звена

1. Выполнить моделирование схемы. Для этого сначала задать значение постоянного напряжения U_1 , подаваемого на вход цепи. Двойным щелчком левой кнопки мыши на блоке источника напряжения U_1 открыть окно задания его параметров и в поле для параметра **Amplitude (V)** – напряжение источника в вольтах – ввести значение 2. Подтвердить ввод нажатием на кнопки **Apply** и **OK**.

2. В меню окна редактирования модели выбрать пункт **Simulation** → **Simulation parameters**, в появившемся окне задания параметров моделирования на вкладке **Solver** в поле **Stop time** (время окончания моделирования, вводится в секундах) ввести значение 5, а на вкладке **Workspace I/O** отключить флажок **Limit data point to last**. Нажать на кнопки **Apply** и **OK**. В окне осциллографа в меню быстрого доступа нажать на кнопку **Parameters**  (справа от значка принтера) и в появившемся окне параметров осциллографа на вкладке **Data history** отключить флажок **Limit data point to last**. Нажать на кнопки **Apply** и **OK**.

3. В меню окна редактирования модели выбрать пункт **Simulation** → **Start**, в результате чего начнется *процесс моделирования*. При этом на экране появится предупреждающее сообщение о том, что созданная модель содержит нелинейные элементы (это относится к блоку выключателя **Breaker**), поэтому для корректного моделирования Simulink запрашивает разрешение пользователя на использование компьютерных методов решения дифференциальных уравнений «ode23tb» либо «ode15s». Следует нажать на кнопку **OK**.

Результатом моделирования является график изменения напряжения U_2 на выходе цепи, отображаемый в окне осциллографа (см. рис. 4). Как видно из графика, в момент времени $t = 1$ с от начала моделирования замыкается выключатель и постоянное входное напряжение 2 В подается на вход электрической цепи. В цепи начинается переходный процесс, после окончания которого значение выходного напряжения U_2 принимает некоторое установившееся значение.

4. Для определения статической характеристики звена следует изменять значения постоянного входного напряжения U_1 от -6 до $+6$ В с шагом 2 В и для каждого значения U_1 путем моделирования определить соответствующее установившееся значение выходного напряжения U_2 .

Данные опытов занести в таблицу. Построить статическую характеристику $U_2 = f(U_1)$ звена по результатам компьютерного моделирования. Рассчитать по ней значение коэффициента передачи $K_{\text{км}} = \Delta U_2 / \Delta U_1$ и занести в таблицу.

Данные для построения статической характеристики звена

Величины	Значения						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
$U_1, \text{В}$							
$U_{2\text{км}}, \text{В}$							
$K_{\text{км}}$							

III. Получение АЧХ и ФЧХ звена

1. Для моделирования подачи гармонического напряжения на вход исследуемой электрической цепи необходимо изменить разработанную модель (см. рис. 4) следующим образом.

1.1. Удалить блоки: блок **U1** источника постоянного напряжения, блок **Выключатель**, блок **Step** подачи ступенчатого управляющего сигнала. Удалить блок из схемы можно одним из двух способов:

- выделить данный блок однократным щелчком *правой* клавиши мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Clear**;
- выделить данный блок однократным щелчком *левой* клавиши мыши и затем нажать на клавишу **Delete**.

1.2. На место удаленных блоков нужно вставить *источник переменного гармонического напряжения*. Для этого на вкладке **Electrical Sources** в библиотеке **Sim Power Systems** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **AC Voltage Source** (источник переменного напряжения) и перетащить его в окно с моделируемой схемой. Название блока **AC Voltage Source** изменить на **U1**. Вход блока **U1** соединить с нулевой линией, а выход – со входом блока **R1**. Задать параметры источника **U1**. Двойным щелчком левой клавиши мыши по нему открыть окно задания параметров блока **Block parameters: U1** и в полях **Peak amplitude (V)** и **Frequency (Hz)** ввести значения амплитуды (в вольтах) и частоты (в герцах) гармонического сигнала соответственно. Подтвердить ввод нажатием на кнопки **Apply** и **OK**.

1.3. Запустить процесс моделирования (пункт меню **Simulation** → **Start**). В окне осциллографа отобразится гармонический сигнал – изменение напряжения **U2** на выходе цепи (см. рис. 4).

2. Для получения частотных характеристик исследуемой цепи используется специальный блок **Powergui**, расположенный в библиотеке

Sim Power Systems. Данный блок содержит в себе несколько полезных инструментов для выполнения анализа электрических схем (расчет схемы векторным методом, расчет установившегося режима в схеме, расчет частотных характеристик и т. д.). Поместить блок Powergui в окно с исследуемой схемой (на рис. 5 он обозначен как Powergui-Continuous). Выполнить по нему двойной щелчок левой клавиши мыши, в результате чего откроется окно (название окна совпадает с именем файла созданной модели), отображающее все инструменты анализа, входящие в блок Powergui. Для открытия инструмента LTI-Viewer выполнить щелчок левой клавишей мыши по кнопке Use LTI-Viewer, а затем – по кнопке Open new LTI-Viewer.

LTI-Viewer (анализатор линейных стационарных систем) – инструмент для анализа линейных стационарных систем (LTI – linear time-invariant). Анализируемая электрическая схема, как следует из ее математического описания, является линейной схемой. Кроме того, т. к. емкости резисторов и сопротивления конденсаторов неизменны во времени, а следовательно, неизменны во времени и коэффициенты K , T_1 , T_2 , то данная электрическая схема является также стационарной.

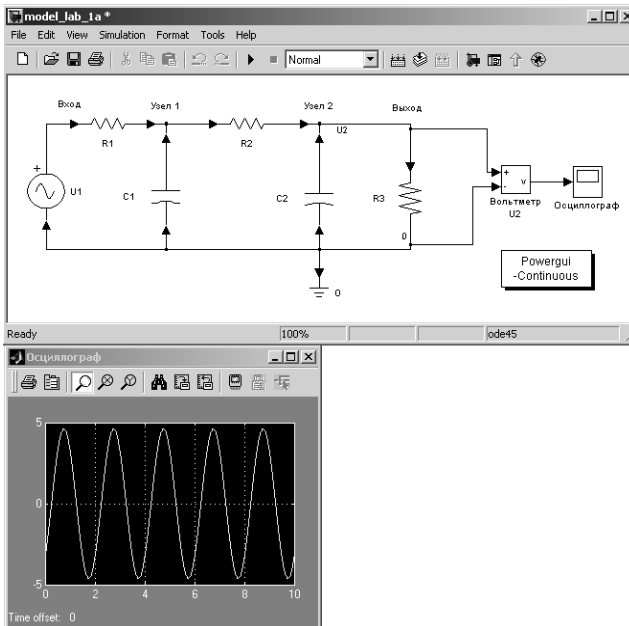


Рис. 5. Получение частотных характеристик звена

2.1. В открывшемся окне инструмента LTI-Viewer по умолчанию показан рассчитанный автоматически график переходной функции анализируемой схемы. Для отображения графиков АЧХ и ФЧХ щелкнуть правой клавишей мыши один раз по белому полю с графиком и во всплывающем меню выбрать пункт Plot Types → Bode. Верхний из двух появившихся графиков – график АЧХ, а нижний – ФЧХ системы. Щелкнуть по одному из графиков правой клавишей мыши и во всплывающем меню поставить галочку в пункте Grid – отображение сетки на графиках. Повторив щелчок правой клавиши мыши, выбрать пункт Properties всплывающего меню и на вкладке Units задать единицы измерения по осям графиков: для частоты в поле Frequency in выбрать значение Hz (в герцах), для отношения амплитуд сигналов на входе и выходе схемы в поле Magnitude in вместо децибел выбрать значение absolute.

2.2. Для получения графика АФЧХ исследуемой схемы щелкнуть по одному из графиков правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать пункт Plot Types → Nyquist. Далее повторить щелчок правой клавишей мыши по полученному графику и в пункте меню Show → Negative Frequencies убрать галочку.

2.3. Полученные графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ перенести в отчет и сравнить с полученными ранее экспериментальными и расчетными графиками.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемого звена, созданная в Simulink для моделирования статической характеристики.
3. Результаты компьютерного моделирования (табл.).
4. График статической характеристики.
5. Компьютерная модель исследуемого звена, созданная в Simulink для моделирования частотных характеристик.
6. Графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ, полученных путем моделирования.
7. Вывод о соответствии полученных характеристик экспериментальным и расчетным методам.

Контрольные вопросы

1. Что такое типовое воздействие? Какие существуют типовые воздействия? Какие из них были использованы при выполнении лабораторной работы?

2. Что такое переходный и установившийся режимы работы звена (системы)?

3. Что такое временные характеристики систем и звеньев? Что представляют собой переходная функция и импульсная переходная функция?

№ 4. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ГЛАДКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Цель работы: освоить методику линеаризации гладких нелинейных характеристик звеньев систем автоматизации на примере моста как устройства сравнения.

Задание:

1. Изучить методы линеаризации.
2. Получить линеаризованное уравнение моста аналитическим методом.
3. Опытным путем получить статическую характеристику моста.
4. Построить график статической характеристики моста.
5. Получить линеаризованное уравнение моста графоаналитическим методом.
6. Сделать вывод о соответствии линеаризованных статических характеристик.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется лабораторный стенд содержащий схему резистивного моста (рис.). Для имитации датчика (R_d) и задатчика (R_3) используются магазины сопротивлений. Для коммутации магазинов сопротивлений в мост и соединения моста с вольтметрами стенда используются провода с наконечниками.

Значение сопротивления $R_{д0}$ датчика, при котором будет проводиться линеаризация, указывается преподавателем.

Порядок выполнения работы

I. Линеаризация моста аналитическим методом

Включить стенд и измерить напряжение питания моста $U_{п}$ (рис.) с помощью вольтметра стенда. Рассчитать коэффициент передачи $K_{м}$ моста по формуле $K_{м} = -\frac{U_{п}R_2}{(R_2 + R_{д0})^2}$. Выключить стенд. Записать линеаризованное уравнение моста.

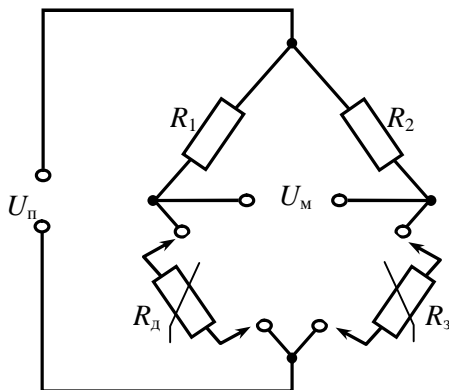


Рис. 1. Схема исследуемого резистивного моста

II. Линеаризация моста по экспериментальным данным

1. Подсоединить к схеме на панели лабораторных работ магазины, имитирующие датчик и задатчик (рис.). Подсоединить выход моста ($U_{м}$) к вольтметру стенда. Установить на соответствующем магазине сопротивление $R_{д0}$.

2. Включить питание лабораторной установки и сбалансировать мост магазином, имитирующим задатчик. Убедиться, что мост балансируется при соответствующем сопротивлении задатчика. Для этого

рассчитать R_3 по формуле $R_3 = \frac{R_2 R_{д0}}{R_1}$, при $R_d = R_{д0}$. Совпадение

результатов подтвердит, что задатчик действительно задает соответствующее значение регулируемой величины.

3. Изменяя сопротивление R_d датчика от 0 до 4 кОм через 200 Ом и от 4 кОм до 9 кОм через 1 кОм, записать значения напряжения U_m на выходе мостовой схемы. Результаты занести в таблицу.

4. По полученным данным построить график статической характеристики мостовой схемы. Провести касательную в точке баланса моста, перенести координаты в точку линеаризации. Рассчитать коэффициент K_m моста как отношение $K_m = \frac{\Delta U_m}{\Delta R_d}$ для касательной.

Таблица

Экспериментальная зависимость напряжения на выходе моста от изменения сопротивления датчика

R_d , Ом				...			
U_m , В				...			

5. Записать линеаризованное уравнение моста.

6. Построить на этом же графике график линеаризованной статической характеристики моста, полученной аналитическим методом.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Расчет коэффициента передачи моста аналитическим методом.
3. Линеаризованное уравнение моста, полученное аналитическим методом.
4. Расчет значения R_3 при $R_d = R_{д0}$.
5. Экспериментальные данные (табл.).
6. Графики нелинейной статической характеристики и линеаризованных статических характеристик, полученных двумя методами.
7. Расчет коэффициента передачи моста на основе графоаналитического метода.

8. Линеаризованное уравнение моста, полученное графоаналитическим методом.

9. Вывод о соответствии линеаризованных статических характеристик, полученных аналитическим и графоаналитическим методами.

Контрольные вопросы

1. Что такое линеаризация непрерывно дифференцируемых (гладких) характеристик элементов автоматики?

2. Какие существуют методы линеаризации гладких нелинейных характеристик?

3. Каков порядок линеаризации аналитическим методом?

4. Каков порядок линеаризации путем графоаналитической обработки экспериментально полученной нелинейной характеристики?

№ 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Цель работы: освоить методику приближенной идентификации по виду переходной функции.

Задание:

1. Изучить методы идентификации объектов управления и средств автоматизации.

2. Получить данные для построения переходной функции сушильного шкафа.

3. По полученной переходной функции провести идентификацию.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

В качестве объекта идентификации используется сушильный шкаф. Лабораторная установка состоит из двух сушильных шкафов, в каждом из которых установлены два термометра сопротивления ТСМ-50М и термопара ТХК-008. Один из термометров сопротивления шкафа используется как датчик температуры в шкафу. Другой термометр сопротивления и термопара установлены

для проведения их исследований и в этой лабораторной работе не используются.

Для измерения температуры в шкафах применен милливольтметр типа Ш451/1, к которому и подключены датчики температуры в шкафах.

Включение питания стенда производится автоматическим выключателем QF , включение питания милливольтметра – тумблером $SA1$. Трехпозиционным тумблером $SA4$ производится подключение установленных в первом или втором шкафу датчиков к милливольтметру.

Остальная аппаратура лабораторной установки в данной работе не используется.

Порядок выполнения работы

1. Снятие данных экспериментальной переходной функции

1. Выбрать полностью остывший сушильный шкаф, в котором температура равна температуре в помещении. Закрыть его дверцу.

2. Трехпозиционным тумблером $SA4$ подключить датчик выбранного шкафа к милливольтметру Ш451/1.

3. Включить питание стенда выключателем QF , затем питание милливольтметра – тумблером $SA1$.

4. Включить тумблером сушильный шкаф, засечь время и принять его за 0. Измерять нарастание температуры Θ в шкафу через каждые 2...4 мин. Результаты измерений заносить в табл. 1. Измерения проводить, пока температура в шкафу изменяется.

Таблица 1

Данные для построения экспериментальной и расчетной переходных функций

t, c									
$\Theta, ^\circ C$									
$\Theta_p, ^\circ C$									

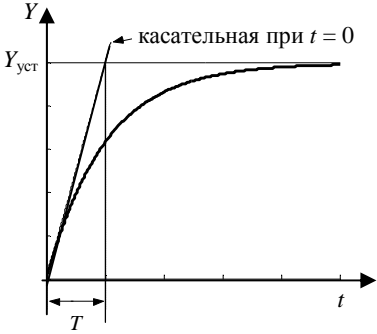
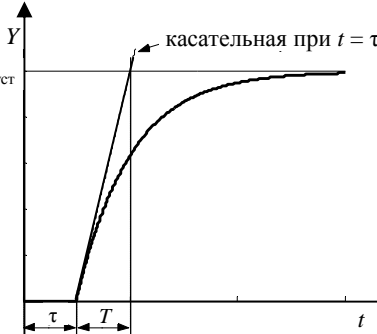
5. Построить экспериментальную переходную функцию, входное воздействие $U_{вх} = 220 В$.

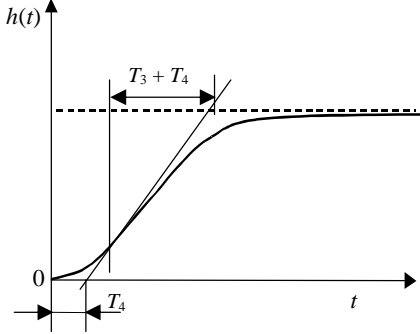
II. Выбор вида звена, которым приблизительно описывается сушильный шкаф, и оценок численных значений параметров передаточной функции этого звена

1. Сравнивая экспериментальную переходную функцию с теоретическими переходными функциями, приведенными в табл. 2, определить, какому звену лучше всего соответствует экспериментальная переходная функция. Записать название этого звена и общий вид его передаточной функции.

Таблица 2

Переходные функции типовых линейных звеньев

Описание звена	Вид переходной функции
<p>Апериодическое звено 1-го порядка:</p> $W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$ <p>– передаточная функция;</p> $h(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$ <p>– переходная функция</p>	
<p>Апериодическое звено 1-го порядка с чистым запаздыванием:</p> $W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$ <p>– передаточная функция;</p> $h(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \tau; \\ K \left(1 - e^{-\frac{(t-\tau)}{T}} \right) & \text{при } t \geq \tau \end{cases}$ <p>– переходная функция</p>	

Описание звена	Вид переходной функции
<p>Апериодическое звено 2-го порядка:</p> $W(s) = \frac{K}{(T_3s + 1)(T_4s + 1)}$ <p>передаточная функция;</p> $h(t) = K \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right)$ <p>при $T_3 > T_4$ переходная функция</p>	 <p>График показывает зависимость выходной функции $h(t)$ от времени t. Кривая начинается с нуля, имеет начальную точку перегиба и асимптотически приближается к постоянному значению. Тонкая линия обозначает время запаздывания T_4. Горизонтальная пунктирная линия обозначает суммарное время $T_3 + T_4$, которое является временем, необходимым для достижения 90% от установившегося значения.</p>

Примечание. Иногда апериодическое звено 2-го порядка приблизительно представляют апериодическим звеном 1-го порядка с чистым запаздыванием. В этом случае время τ чистого запаздывания и постоянную времени T определяют, как показано в табл. 2 (обведено тонкой линией). Если $T_3 < T_4$, то объект может быть представлен апериодическим звеном 1-го порядка или 2-го порядка с чистым запаздыванием.

2. Путем графоаналитической обработки экспериментальной переходной функции, как показано в табл. 2, определить параметры выбранной передаточной функции. Коэффициент передачи рассчитать как отношение

$$K = \frac{\Delta\Theta}{U_{\text{вх}}},$$

где $\Delta\Theta$ – полное изменение температуры в переходном процессе;
 $U_{\text{вх}} = 220 \text{ В}$ – скачок входного воздействия.

3. Записать найденные численные значения параметров.

4. Построить по приведенным в табл. 2 выражениям расчетную переходную функцию Θ_p выбранного звена на одном графике с экспериментальной переходной функцией, сравнить их. Если

максимальное расхождение кривых не более 5 % от изменения температуры $\Delta\Theta$, то считать, что выбор сделан правильно. В противном случае повторить п. 2...4.

5. При расчете и построении теоретической переходной функции следует учитывать, что ее нулевому значению соответствует начальная температура в опыте и величина воздействия равна $1(t)$ 220, поэтому ординаты для выражений в табл. 2 следует увеличить в 220 раз.

6. Расчетные значения переходной функции для характерных точек привести в табл. 1 в графе Θ_p , град.

Содержание отчета

1. Результаты выполнения п. I: результаты эксперимента (табл. 1); график экспериментальной переходной функции.

2. Результаты выполнения п. II: передаточная функция звена, переходная функция которого лучше всего соответствует экспериментальной переходной функции; найденные параметры этой передаточной функции; расчетная переходная функция найденного звена, построенная на одном графике с экспериментальной переходной функцией (расчетные точки для построения привести в табл. 1).

3. Вывод: наименование звена, которым описывается сушильный шкаф; численные значения параметров передаточной функции; степень соответствия экспериментальной и теоретической переходных функций в выбранном для оценки сечении (показать на графике), %; дифференциальное уравнение, которым описывается сушильный шкаф.

Контрольные вопросы

1. Что такое идентификация?
2. Какова методика идентификации линейных объектов по переходной функции?
3. Каким дифференциальным уравнением описывается исследуемый сушильный шкаф?

№ 6 (УСРС). ИЗУЧЕНИЕ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ПРЯМЫМ МЕТОДОМ

Цель работы: получить навыки определения параметров качества регулирования по переходным функциям САР (оценки качества переходных процессов).

Задание:

1. Определить перерегулирование системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
2. Определить быстродействие системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
3. Определить колебательность системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
4. Определить статическую точность системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
5. Сделать вывод о качестве регулирования.

Пример выполнения работы

1. Зарисовать переходные функции для управляющего и возмущающего воздействий и подписать их.
2. Определить параметры качества переходных процессов.

Для переходной функции по управляющему воздействию *перерегулирование*

$$\sigma_y = \frac{Y_{\max 1} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} 100 \%,$$

где $Y_{\max 1}$ – максимальное значение регулируемой величины в переходном процессе;

$Y_{\text{уст}}$ – установившееся значение регулируемой величины.

Для данного примера

$$\sigma_y = \frac{1,18 - 0,92}{0,92} 100 \% = 28 \%$$

Если нет специальных требований к системе, то нормальным считается перерегулирование $\sigma \leq 30 \%$. Перерегулирование также характеризует запас устойчивости системы. При $\sigma \leq 30 \%$ в большинстве случаев запас устойчивости достаточен.

Для переходных процессов по возмущающему воздействию определяется максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения, приходящееся на единицу возмущающего воздействия $F(t)$:

$$\sigma_F = \frac{Y_{\max} - Y_{\text{уст}}}{F(t)}$$

В данном примере при $F(t) = 1(t)$

$$\sigma_F = \frac{0,12 - 0,08}{1(t)} = 0,04.$$

Быстродействие системы оценивается временем регулирования. Время регулирования $t_{\text{рег}}$ определяется как интервал времени от начала переходной функции до момента, когда отклонение регулируемой величины от ее нового установившегося значения становится меньше определенной достаточно малой величины Δ :

$$|Y(t) - Y_{\text{уст}}| \leq \Delta.$$

Обычно в качестве Δ берут от 1 % до 5 % от нового установившегося значения регулируемой величины для переходной функции по управляющему воздействию.

Для переходной функции по возмущающему воздействию, если статическая ошибка по возмущающему воздействию отсутствует

(астатические системы), в качестве Δ берут от 1 % до 5 % от максимального отклонения регулируемой величины от установившегося значения, поскольку в этом случае установившиеся значения равны 0. Если статическая ошибка не равна 0 (статические системы или астатические при равенстве астатизма системы астатизму звена W_F), Δ определяют так же, как и для переходных функций по управляющему воздействию.

Принимается $\Delta = 0,05 Y_{уст}$.

В данном примере для переходной функции по управляющему воздействию

$$\Delta = 0,05 \cdot 0,92 = 0,046,$$

$t_{пер} \approx 102$ (рис. 1).

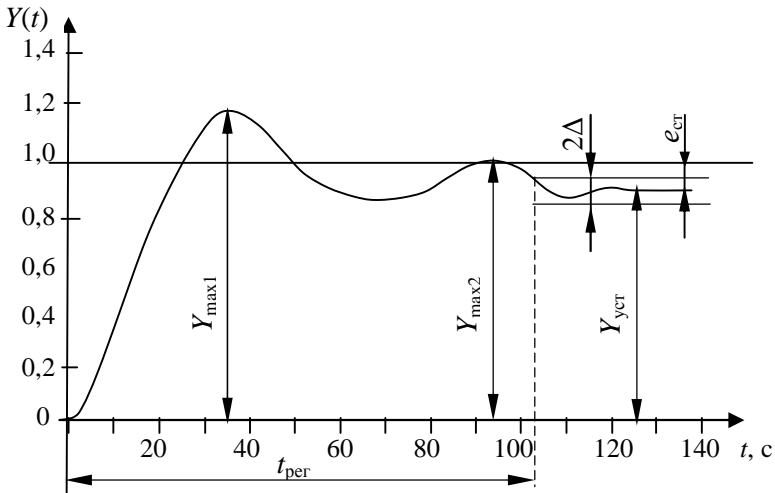


Рис. 1. Переходная функция по управляющему воздействию

Для переходной функции по возмущающему воздействию:

$$\Delta = 0,05 \cdot 0,08 \approx 0,004,$$

$t_{пер} \approx 102$ (рис. 2).

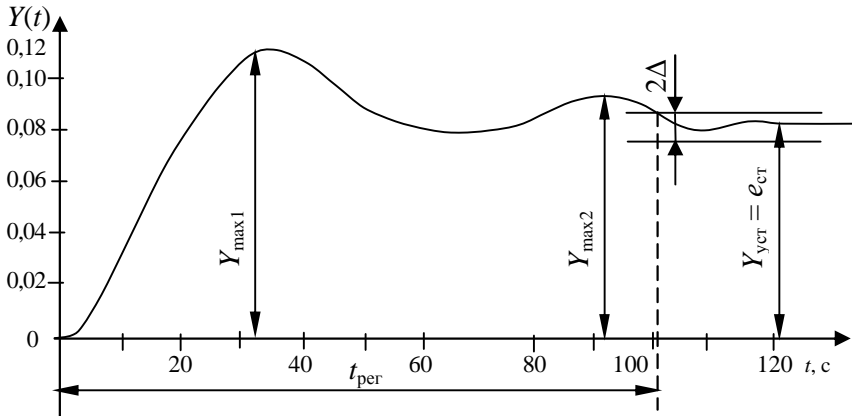


Рис. 2. Переходная функция по возмущающему воздействию

Колебательность переходного процесса определяется числом N перерегулирований для переходной функции по управляющему воздействию или числом колебаний N для переходной функции по возмущающему воздействию за время переходного процесса.

Обычно приемлемым числом колебаний считается $N < 2...3$. Для рассматриваемого примера $N = 2$.

Колебательность также оценивается отношением соседних отклонений регулируемой величины от установившегося значения

$$C = \frac{Y_{\max 2} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\max 1} - Y_{\text{уст}}}$$

Чем меньше колебательность, тем лучше качество управления.

Иногда колебательность оценивается декрементом затухания $d = Ln \frac{1}{C}$. Применяются и другие оценки декремента затухания, например, отношение соседних отклонений от $Y_{\text{уст}}$.

В рассматриваемом примере для переходной функции по управляющему воздействию согласно рис. 1

$$C_y = \frac{1 - 0,92}{1,19 - 0,92} = 0,3.$$

Для переходного процесса по возмущающему воздействию согласно рис. 2

$$C_F = \frac{0,09 - 0,08}{0,12 - 0,08} = 0,3.$$

По переходным функциям может быть определена также *статическая ошибка* системы по управляющему и возмущающему воздействиям:

$$e_{ст} = Y_3 - Y_{уст},$$

где Y_3 – заданное значение регулируемой величины.

Для данного примера статическая ошибка для переходной функции по управляющему воздействию

$$e_y = 1 - 0,92 = 0,08.$$

Статическая ошибка по возмущающему воздействию $e_F = 0 - 0,08 = -0,08$, поскольку переходная функция по возмущающему воздействию получена при $Y_3 = 0$.

Вывод. Для рассмотренной системы перерегулирование σ составляет 28 %, число перерегулирований в системе за время переходного процесса $N = 2$. Качество системы по этим показателям следует считать удовлетворительным. Время регулирования составляет около 102 с, максимальное отклонение регулируемой величины от ее установившегося значения, приходящееся на единицу ступенчатого возмущающего воздействия, составляет $1,8 \cdot 10^{-2}$, колебательной системы – около 0,3, изменение статической ошибки системы при изменении задающего воздействия и возмущающего воздействия составляет 8 % от изменения этих воздействий.

Качество системы по этим показателям следует считать удовлетворительным.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Графики переходных процессов.
3. Результаты расчетов перерегулирования σ , времени регулирования $t_{\text{рег}}$ и статической ошибки регулирования $e_{\text{ст}}$.
4. Вывод о качестве работы системы по полученным показателям.

Контрольные вопросы

1. Что такое переходная функция САР?
2. Что такое перерегулирование?
3. Что такое быстродействие системы?
4. Что такое колебательность?
5. Что такое статическая ошибка регулирования САР?

№ 7. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (П-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: исследовать свойства САР с П-законом регулирования.

Задание:

1. Построить компьютерную модель замкнутой САР с П-законом регулирования, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.
2. Исследовать зависимость показателей качества регулирования САР от значения коэффициента усиления П-регулятора.
3. Сделать вывод о свойствах САР с П-законом регулирования.

Аппаратура и программное обеспечение, используемые в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ. Для выполнения используется среда компьютерного моделирования MATLAB Simulink.

Порядок выполнения работы

1. Построение компьютерной модели САР с П-законом регулирования

В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 1.

Передаточные функции объекта управления имеют вид передаточной функции апериодического звена 2-го порядка как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям, что соответствует, например, математическому описанию сушильного шкафа. Таким образом, данная структурная схема представляет собой структурную схему линейной непрерывной системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу.

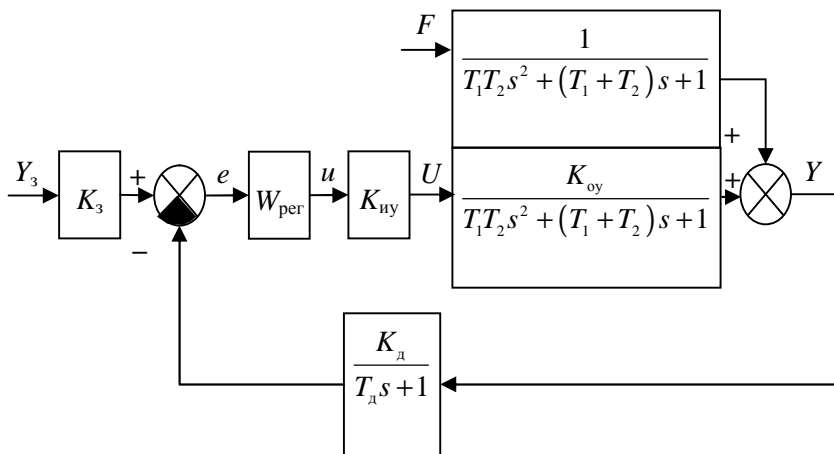


Рис. 1. Структурная схема моделируемой САР:
 Y – управляемая величина; Y_3 – заданное значение управляемой величины; e – ошибка управления; u – сигнал управления;
 U – управляющее воздействие на объект со стороны исполнительного устройства; F – возмущающее воздействие на объект

Передаточная функция датчика соответствует передаточной функции апериодического звена 1-го порядка, что характерно для датчиков температуры. Например, значения параметров передаточной функции $K_{\text{д}} = 3,9 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$, $T_{\text{д}} = 20 \text{ с}$ соответствуют термометру сопротивления Pt1000. Датчиком в данном случае может выступать

переменное сопротивление, включаемое вместе с термосопротивлением датчика в резистивную измерительную мостовую схему, на выходе которой вырабатывается сигнал (электрическое напряжение) ошибки $e(t)$.

Исполнительным устройством может служить электронный усилитель мощности, на вход которого поступает сигнал устройства управления (регулятора), а выходным сигналом является электрическая активная мощность, подаваемая на нагревательный элемент. Математическое описание исполнительного устройства соответствует описанию безынерционного звена – $K_{иу}$.

Числовые значения параметров передаточных функций элементов САР ($K_{оу}$, T_1 , T_2 , $K_d = K_3$, T_d , $K_{иу}$) задаются преподавателем.

Передаточная функция регулятора $W_{пер}$ выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае П-законом). Тогда $W_{пер} = K_p$.

Для схемы САР, изображенной на рис. 1, выражения для $W_0(s)$, $W_{oc}(s)$, $W_F(s)$:

$$W_0(s) = W_{пер}(s) K_{оу} \frac{K_{оу}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1};$$

$$W_{oc}(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1};$$

$$W_F(s) = \frac{1}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}.$$

Передаточная функция ошибки регулирования САР по задающему воздействию (т. е. связь ошибки регулирования e с изменением задающего воздействия y_3) в данном случае имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{e3}(s) &= \frac{1}{K_p K_{иу} \frac{K_{оу}}{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)} \frac{K_d}{(T_d s + 1)}} = \\ &= \frac{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_d s + 1)}{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_d s + 1) + K_p K_{иу} K_{оу} K_d}. \end{aligned}$$

Передаточная функция ошибки регулирования САР по возмущающему воздействию (связь ошибки регулирования e с изменением возмущающего воздействия F)

$$W_{eF}(s) = \frac{1}{K_p K_{иу} \frac{K_{оу}}{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)} \frac{K_d}{(T_d s + 1)}} = \frac{T_d s + 1}{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_d s + 1) + K_p K_{иу} K_{оу} K_d}.$$

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink. Ввести в МАТАВ заданные преподавателем значения параметров передаточных функций элементов САР. Для этого в окне ввода команд **Command Window** в строке ввода ввести следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> global K_iu % параметры исполнительного устройства
>> global K_p % коэффициент усиления регулятора
>> T1 = ;
>> T2 = ;
>> K_obj = ;
>> K_sens = ;
>> T_sens = ;
>> K_p = ; % начальное значение
```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров.

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 1 создать модель заданной САР в Simulink в окне редактирования модели. Для создания новой модели в меню окна **Simulink Library Browser** выполнить команду **File** → **New** → **Model**.

1. Объект управления (сушильный шкаф) математически представляет собой суммирующее звено, выполняющее функцию сложения

двух сигналов: управляющего и возмущающего воздействий. В окне **Simulink Library Browser** в библиотеке **Simulink** на вкладке **Math Operations** найти компонент **Sum**, выделить его нажатием на левую клавишу мыши и, не отпуская ее, перетащить данный компонент в окно редактирования модели **untitled**. Для задания имени компонента щелкнуть по нему один раз правой кнопкой мыши, во всплывающем меню выбрать пункт **Format → Show Name**; на появившейся снизу надписи **Sum** щелкнуть левой клавишей мыши, в строке редактирования надписи заменить надпись **Sum** на **OU** (объект управления); выйти из строки редактирования надписи щелчком левой клавишей мыши на свободном пространстве окна **untitled**. Для задания требуемого расположения входов (сверху и слева) выполнить двукратный щелчок левой клавишей мыши по самому компоненту, в появившемся диалоговом окне **Block parameters** в строке **List of sings** вместо последовательности **|++** ввести последовательность **++|**, после чего нажать на кнопки **Apply** и **OK**.

2. Передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию $W_{oy} = \frac{K_{об}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}$. В библиотеке **Simulink** на вкладке **Continuous** (компоненты с непрерывными сигналами) нажатием на левую клавишу мыши выделить компонент **Transfer Fcn** (передаточная функция) и перетащить его в окно редактирования модели (расположив слева от суммирующего компонента **OU**). Задать имя нового компонента: левой клавишей мыши щелкнуть на надписи **Transfer Fcn** под его изображением, войти в строку редактирования надписи и заменить ее на **W_ou** (передаточная функция объекта по управляющему воздействию). После этого следует задать саму передаточную функцию, для чего выполнить двойной щелчок левой клавишей мыши на изображении компонента и в окне редактирования его параметров **Block parameters** в строке **Numerator**, определяющей коэффициенты в числителе передаточной функции, вместо имеющейся там единицы ввести коэффициент преобразования объекта – **[K_obj]**, в строке **Denominator** (знаменатель), определяющей коэффициенты полинома в знаменателе передаточной функции, ввести

[(T1*T2) (T1+T2) 1], после чего нажать на кнопки **Apply** и **OK**. Соединить компонент W_{ou} с суммирующим элементом **OU**, для чего подвести курсор мыши к компоненту W_{ou} справа к указателю выхода, затем, нажав на левую клавишу мыши, соединить его с левым указателем входа компонента **OU**.

3. Передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию $W_{OF} = \frac{1}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2) s + 1}$. Выбрать компонент **Transfer**

Fcn (см. п. 2), расположить его в окне редактирования модели сверху от компонента W_{ou} . Задать имя компонента W_{of} . Задать передаточную функцию: в строке **Numerator** оставить предлагаемое по умолчанию значение коэффициента преобразования [1]; в строке **Denominator** ввести [(T1*T2) (T1+T2) 1], после чего нажать на кнопки **Apply** и **OK**. Соединить компонент W_{of} с суммирующим элементом **OU** (с верхним входом).

4. Исполнительное устройство. Как видно из структурной схемы на рис. 1, исполнительное устройство является безынерционным звеном – его передаточная функция равна константе $W_{iy}(s) = K_{iy}$. Поэтому следует выбрать компонент **Gain** (линейное усиление), находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Math Operations** и перетащить его в окно редактирования модели, расположив слева от W_{ou} . Задать имя компонента **Исп. уст-во**. Щелкнув два раза левой кнопкой мыши на самом компоненте, открыть окно редактирования его параметров **Block parameters** и в строке **Gain** ввести коэффициент усиления K_{iu} . Соединить компонент **Исп. уст-во** с входом компонента W_{ou} , по появившейся соединяющей линии-стрелке щелкнуть правой кнопкой мыши, во всплывающем меню выбрать пункт **Signal properties** и в появившемся диалоговом окне в строке **Signal name** ввести обозначение сигнала на выходе исполнительного устройства **U** (управляющее воздействие на объект), после чего нажать на кнопки **Apply** и **OK**. Обозначение **U** можно расположить сверху над стрелкой путем перетаскивания левой клавишей мыши.

5. Регулятор (устройство управления). Аналогично п. 4 выбрать компонент **Gain** на вкладке **Math Operations** и расположить его в окне редактирования модели слева от исполнительного устройства. Задать имя компонента **П-регулятор**. Ввести значение коэффициента

усиления K_p . Соединить компонент П-регулятор с входом исполнительного устройства. Ввести обозначение сигнала на выходе регулятора u (сигнал управления).

6. Устройство сравнения, находящее разность сигналов датчика и датчика и таким образом вырабатывающее сигнал ошибки e . В библиотеке Simulink на вкладке Math Operations выбрать компонент Sum, расположить его в окне редактирования модели слева от элемента П-регулятор. Щелкнув два раза по элементу левой кнопкой мыши, открыть диалоговое окно задания его параметров Block parameters и в строке List of sings вместо последовательности |++ ввести последовательность |+ -, после чего нажать на кнопки Apply и ОК. При этом сигнал, подаваемый на нижний вход данного элемента, будет вычитаться из сигнала, подаваемого на вход слева. Выход сумматора соединить со входом элемента П-регулятор. Сигнал на выходе сумматора обозначить e (*error* – сигнал ошибки регулирования).

7. Задатчик. Компонент Gain, расположенный на вкладке Math Operations, перетащить в окно редактирования модели, поместив слева от сравнивающего устройства. Задать имя компонента Задатчик. Ввести значение коэффициента преобразования K_{sens} . Соединить Задатчик с левым входом (плюсом) сравнивающего устройства. Ввести обозначение сигнала R_3 на выходе Задатчика.

8. Датчик. Для представления датчика используется компонент Transfer Fcn на вкладке Continuous. Расположив его в окне редактирования модели приблизительно под элементом исполнительного устройства, зеркально отразить его слева направо: щелкнуть по компоненту правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выполнить команду Format → Flip block. Задать имя компонента Датчик. Задать передаточную функцию: в строке Numerator ввести коэффициент $[K_{sens}]$, в строке Denominator ввести $[T_{sens} \ 1]$, подтвердить ввод данных нажатием на кнопки Apply и ОК. Соединить выход датчика с нижним входом (минусом) сумматора, линию связи обозначить как R_d . Ко входу датчика провести линию связи от выхода объекта управления ОУ.

Приблизительный вид созданной графической модели исследуемой САР температуры в сушильном шкафу показан на рис. 2.

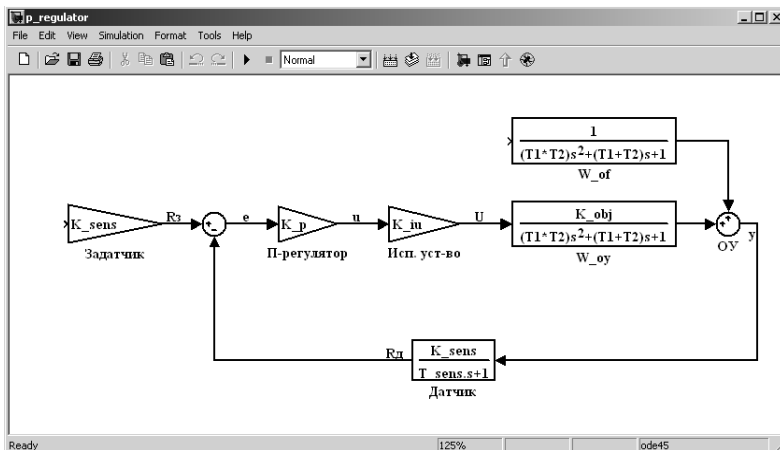



Рис. 2. Созданная графическая модель исследуемой САР с П-законом регулирования

Для сохранения построенной графической модели САР в виде файла выполнить команду меню окна редактирования модели **File** → **Save As** (также можно с помощью мыши нажать на соответствующую кнопку  на панели инструментов). Сохранить модель в файле с названием «p_regulator.mdl».


II. Исследование показателей качества регулирования для САР с П-законом регулирования

Для проведения исследования зависимости показателей качества регулирования САР от значения коэффициента усиления П-регулятора следует получить переходные функции САР при различных значениях K_p путем компьютерного моделирования.

Переходная функция САР – это график изменения управляемой величины системы при ступенчатом изменении задающего либо возмущающего воздействий. Соответственно, рассматривают обычно две переходные функции САР: переходную функцию системы по задающему воздействию и переходную функцию по возмущающему воздействию.


Для моделирования подачи на вход системы (на задатчик) ступенчатого задающего воздействия используется компонент **Step**, находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sources** (вкладка

содержит компоненты, моделирующие различные источники сигналов). Разместить данный компонент в окне редактирования модели слева от задатчика и присвоить ему подпись **Задающее воздействие**. Соединить данный компонент со входом задатчика.

Для отображения в виде графика изменений сигналов задающего воздействия и управляемой величины используется компонент **Scope**, находящийся на вкладке **Sinks** (компоненты отображения и регистрации сигналов). Расположить его в окне редактирования модели. Первоначально компонент **Scope** имеет один вход, т. е. предназначен для отображения графика только одного сигнала. Для отображения двух сигналов необходимо задать число его входов **2**. Для этого левой кнопкой мыши выполнить двойной щелчок на компоненте **Scope**, в результате откроется окно **Scope**, содержащее поле для отображения графика. В верхней части этого окна на панели инструментов выполнить левой кнопкой мыши щелчок по кнопке **Parameters**  (второй слева), в появившемся всплывающем окне задания параметров в поле **Number of axes** ввести число **2**, ввод данных подтвердить нажатием на кнопки **Apply** и **OK**. После этого в окне редактирования модели (компонент **Scope** уже имеет два входа) верхний вход **Scope** соединить с выходом элемента **Step** (задающее воздействие), а нижний вход – с выходом сумматора **OY** (объект управления).

Перед началом процесса моделирования следует задать *параметры моделирования*. Для этого в меню окна редактирования модели выполнить команду **Simulation** → **Simulation parameters**. В появившемся диалоговом окне задания параметров на вкладке **Solver** значение **Start time** (начальный момент времени) оставить равным **0.0**, значение **Stop time** (конечный момент времени) заменить на **2000.0**; на вкладке **Workspace I/O** убрать галочку в поле **Limit data points to last**; ввод данных подтвердить нажатием на кнопки **Apply** и **OK**.

Запустить *процесс моделирования*, выполнив в меню окна редактирования модели команду **Simulation** → **Start**. По окончании процесса моделирования в строке состояния окна редактирования модели появится слово **Ready** (обозначающее готовность к новым вычислениям), а в окне **Scope** отображаются графики изменения задающего воздействия (на верхнем поле) и управляемой величины (на нижнем поле). Для детального рассмотрения графиков можно

увеличить окно **Scope** до размеров всего экрана, а также нажать левой кнопкой мыши на кнопку **Autoscale**  (автоматическое масштабирование) на панели инструментов.

Для *анализа динамических характеристик линейных САУ* в Simulink имеется специальный компонент – **LTI Viewer**. С его помощью можно быстро рассчитать временные (переходная функция, импульсная переходная функция, перерегулирование, время регулирования, статическая ошибка регулирования) и частотные (АЧХ, ФЧХ, годограф Найквиста) характеристики моделируемой САУ.

Для получения с помощью компонента **LTI Viewer** переходной функции исследуемой САУ по задающему воздействию сначала в окне редактирования модели следует отключить компонент **Step** от входа системы (удалить линию, соединяющую выход **Step** и вход задатчика). Далее в этом же окне выполнить команду меню **Tools** → **Linear analysis**. В результате этого на экране появятся два новых окна: **LTI Viewer** – окно, в котором будет отображаться график переходной функции, и **Model Inputs and Outputs** – окно, содержащее входную (**Input point**) и выходную (**Output point**) метки для указания входной и выходной точек системы. Обе эти метки необходимо с помощью мыши перетащить на свободное пространство в окне редактирования модели. После этого выход **Input point** следует соединить с входом задатчика, а вход **Output point** – с выходом объекта управления **ОУ**. Далее следует перейти в окно **LTI Viewer**, щелкнуть по окну правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Plot types** → **Step**. Для получения графика переходной функции САУ выполнить в этом же окне команду меню **Simulink** → **Get Linearizes Model**. В результате в окне **LTI Viewer** появляется график переходной функции.

По полученному графику найти показатели качества регулирования **САР**:

– для определения *перерегулирования* нажать правой клавишей мыши на свободное пространство окна **LTI Viewer** с полученным графиком и во всплывающем меню выбрать пункт **Characteristics** → **Peak Response** (максимальная амплитуда). В результате на графике будет отмечена точка, соответствующая максимуму переходной функции. При наведении указателя мыши на данную точку появится всплывающая подсказка со следующей информацией: значение максимума (**Peak amplitude**), перерегулирование, выра-

женное в процентах (**Overshoot (%)**), значение соответствующего момента времени от начала моделирования (**At time (sec)**);

– для определения *времени регулирования* после щелчка правой клавишей мыши по свободной области графика во всплывающем меню выбрать пункт **Characteristics** → **Settling Time** (время регулирования);

– для определения *установившегося значения* выходной величины после щелчка правой клавишей мыши по свободной области графика во всплывающем меню выбрать пункт **Characteristics** → **Steady State** (установившееся значение).

Изменяя в указанном преподавателем интервале значение коэффициента усиления П-регулятора K_p , для каждого значения K_p следует получить переходную функцию САР и определить соответствующие значения σ , $t_{\text{рег}}$ и $e_{\text{ст}}$. Результаты отразить в таблице.

Таблица

Исследование показателей качества регулирования САР с П-законом регулирования

K_p				...			
σ , %				...			
$t_{\text{рег}}$, с				...			
$e_{\text{ст}}$...			

III. Исследование свойств САР с П-законом регулирования

По данным таблицы построить графики $\sigma = \sigma(K_p)$, $t_{\text{рег}} = t_{\text{рег}}(K_p)$, $e_{\text{ст}} = e_{\text{ст}}(K_p)$ и определить зависимость показателей качества регулирования САР – перерегулирования σ , времени регулирования $t_{\text{рег}}$ и статической ошибки регулирования $e_{\text{ст}}$ – от значения коэффициента усиления П-регулятора. Сделать вывод о том, как изменяются значения показателей качества регулирования при изменении коэффициента усиления П-регулятора K_p .

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.

3. Результаты компьютерного моделирования (табл.).
4. Графики зависимости перерегулирования σ , времени регулирования $t_{\text{рег}}$ и статической ошибки регулирования $e_{\text{ст}}$ от значения коэффициента усиления П-регулятора: $\sigma = \sigma(K_p)$, $t_{\text{рег}} = t_{\text{рег}}(K_p)$, $e_{\text{ст}} = e_{\text{ст}}(K_p)$.
5. Вывод о свойствах САР с П-законом регулирования.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой закон регулирования САР?
2. Что представляет собой пропорциональный закон регулирования?
3. Чему равна статическая ошибка регулирования при использовании П-регулятора?
4. Как изменяется значение статической ошибки регулирования САР при изменении значения K_p коэффициента усиления П-регулятора?
5. Как изменяется значение перерегулирования σ при изменении значения K_p коэффициента усиления П-регулятора?
6. Как изменяется время регулирования САР $t_{\text{рег}}$ при изменении значения K_p коэффициента усиления П-регулятора?

№ 8. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (И-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: исследовать свойства САР с И-законом регулирования.

Задание:

1. Построить компьютерную модель замкнутой САР с И-законом регулирования, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.
2. Исследовать зависимость показателей качества регулирования САР и интегрального критерия качества от значения коэффициента интегрирования И-регулятора.
3. Сделать вывод о свойствах САР с И-законом регулирования.

Аппаратура и программное обеспечение, используемые в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ. Для выполнения используется среда компьютерного моделирования MATLAB Simulink (см. лабораторную работу № 7).

Порядок выполнения работы

I. Создание компьютерной модели САР в Simulink

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink.

Вначале ввести в MATLAB заданные преподавателем значения параметров передаточных функций элементов САР. Для этого в окне ввода команд Command Window в строке ввода записать следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj
>> T1 = 80; % постоянные времени объекта, с
>> T2 = 250;
>> K_obj = 1; % коэффициент преобразования объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> K_sens = 3.9; % коэффициент преобразования датчика
>> T_sens = 20; % постоянная времени датчика, с
>> % коэффициент преобразования исполнительного устройства
>> global K_iu
>> K_iu = 1;
>> global K_i % коэффициент интегрирования регулятора
>> K_i = 0.001; % начальное значение
```

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 1 создать в Simulink модель САР с И-законом регулирования. В качестве начальной основы взять изображенную на рис. 2 модель САР, созданную при выполнении лабораторной работы № 7. В данную модель необходимо внести следующие изменения:

1. Удалить связь между выходом устройства сравнения и входом компонента П-регулятор.

2. Двойным щелчком левой кнопкой мыши по компоненту П-регулятор открыть окно задания его параметров и в строке Gain вместо K_p ввести коэффициент интегрирования K_i . Результат ввода подтвердить нажатием на кнопки Apply и ОК.

3. Название компонента П-регулятор изменить на Коэффициент интегрирования.

4. Добавить в модель компонент Integrator, находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Continuous. Значок интегратора поместить между значками устройства сравнения и коэффициента интегрирования. Выход устройства сравнения соединить со входом интегратора, а выход интегратора – со входом значка коэффициента интегрирования.

5. Сохранить измененную модель в новом файле с названием «i_regulator.mdl».

Приблизительный вид модели с внесенными изменениями показан на рис. 1.

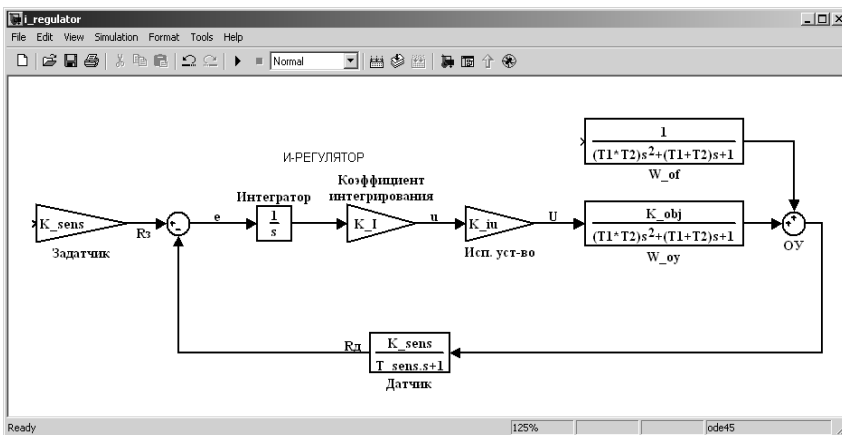


Рис. 1. Графическая модель исследуемой САР с И-законом регулирования

II. Моделирование работы, получение переходных функций САР

Последовательность действий при моделировании работы САР аналогична описанной в п. II лабораторной работы № 7.

III. Определение интегрального критерия качества регулирования

Для определения интегрального показателя качества J использовать компонент **Continuous RMS (CRMS)**, находящийся в библиотеке **NCD Blockset** на вкладке **RMS Blocks**. Данный компонент вычисляет среднее квадратическое значение непрерывного сигнала $f(t)$, поступающего на его вход:

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau-T}^t f^2(\tau) d\tau},$$

где T – интервал времени, в течение которого выполняется регистрация сигнала $f(t)$, т. е. в данном случае интервал времени моделирования работы САР.

Вход компонента **Continuous RMS** подключить к выходу устройства сравнения. Таким образом, на вход компонента **Continuous RMS** будет подаваться сигнал ошибки регулирования $e(t)$. В итоге интегральный показатель качества регулирования автоматически рассчитывается по формуле

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2(\tau) dt}.$$

Интервал времени T задается при указании параметров моделирования. Для этого нужно в окне редактирования модели выбрать пункт меню **Simulation** → **Simulation parameters...** и в появившемся окне задания параметров моделирования в ячейке **Stop time** указать момент времени окончания моделирования (момент времени начала моделирования в ячейке **Start time** оставить равным нулю).

Для отображения рассчитанного числового значения показателя J использовать компонент **Display**, находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sinks**. Перетащить данный компонент в окно редактирования модели, вход компонента **Display** соединить с выходом компонента **Continuous RMS**. Теперь при моделировании работы САР в поле компонента **Display** будет отображаться числовое значение интегрального показателя J .

В лабораторной работе необходимо исследовать зависимость интегрального показателя качества регулирования J от значения коэффициента интегрирования И-регулятора $J = J(K_i)$. Для этого необходимо, изменяя в указанном преподавателем интервале значение коэффициента интегрирования И-регулятора K_i , для каждого значения K_i получить переходную функцию САР и определить соответствующее значение J . Результаты отразить в таблице.

IV. Определение показателей качества регулирования с помощью компонента LTI Viewer

Методика использования компонента LTI Viewer для анализа работы САР описана в лабораторной работе № 7. В данной лабораторной работе необходимо исследовать зависимость показателей качества регулирования САР – перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{пер}}$ – от значения коэффициента интегрирования И-регулятора: $\sigma = \sigma(K_i)$, $t_{\text{пер}} = t_{\text{пер}}(K_i)$.

Для этого необходимо, изменяя в указанном преподавателем интервале значение коэффициента интегрирования И-регулятора K_i , для каждого значения K_i получить переходную функцию САР и определить соответствующие значения σ и $t_{\text{пер}}$. Результаты отразить в таблице.

Таблица

Значения показателей качества регулирования САР с И-законом регулирования

K_i				...			
J				...			
$\sigma, \%$...			
$t_{\text{пер}}, \text{с}$...			

По данным таблицы построить графики $\sigma = \sigma(K_i)$, $t_{\text{пер}} = t_{\text{пер}}(K_i)$, $J = J(K_i)$. Сделать вывод о том, как изменяются значения показателей качества регулирования при изменении коэффициента интегрирования И-регулятора K_i . Сравнить полученные минимальные значения перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{пер}}$ для САР с И-законом регулирования с соответствующими минимальными значениями σ и $t_{\text{пер}}$ для САР с П-законом регулирования, исследованной в предыдущей лабораторной работе.

Содержание отчета

1. Результаты выполнения п. I: созданная в Simulink компьютерная модель САР с И-законом регулирования.

2. Результаты выполнения п. II и III: результаты компьютерного моделирования (табл.); графики зависимости перерегулирования σ , времени регулирования $t_{\text{пер}}$ и интегрального показателя качества J от значения коэффициента интегрирования И-регулятора: $\sigma = \sigma(K_i)$, $t_{\text{пер}} = t_{\text{пер}}(K_i)$, $J = J(K_i)$.

Контрольные вопросы

1. Что такое интегральный закон регулирования САР?
2. Какова статическая ошибка регулирования при использовании И-регулятора?
3. Как изменяются значения перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{пер}}$ при использовании И-регулятора по сравнению с соответствующими показателями для П-регулятора?

№ 9 (УСРС). ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: изучить законы регулирования, используемые для линейных систем, и определить закон регулирования.

Задание:

1. Составить структурную схему САР.
2. Определить закон регулирования.

Пример выполнения работы

I. Составление структурной схемы САР (рис. 1)

Для этого необходимо определить состав САР температуры в климатической камере. САР температуры в климатической камере состоит из объекта управления и регулятора.

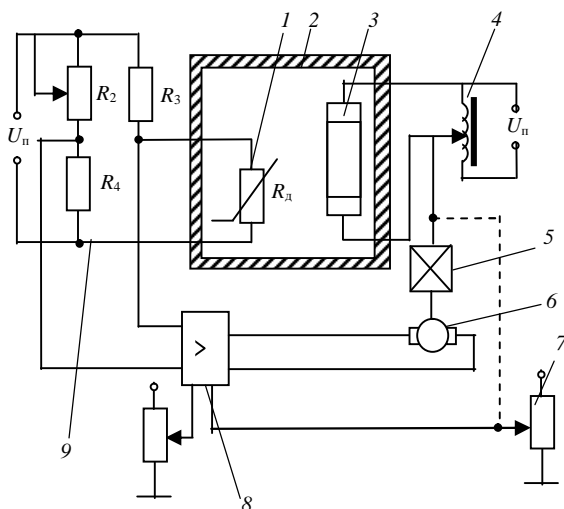


Рис. 1. Схема системы автоматического регулирования температуры в климатической камере:

- 1 – датчик (термометр сопротивления); 2 – камера климатическая;
- 3 – нагреватель электрический; 4 – автотрансформатор; 5 – редуктор;
- 6 – электродвигатель; 7 – потенциометр местной обратной связи;
- 8 – усилитель дифференциальный; 9 – схема мостовая измерительная

Объектом управления (ОУ) рассматриваемой САР является климатическая камера 2 с нагревательным элементом 3. Регулируемой величиной является температура Θ внутри камеры. Целью управления является поддержание температуры в климатической камере на постоянном заданном уровне. Управляющим воздействием на ОУ является напряжение U_n , подаваемое на нагревательный элемент 3. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры Θ_n наружного воздуха от расчетного номинального значения. Дополнительными возмущающими воздействиями могут быть, например, изменения напряжения питания моста U_n и трансформатора U .

Датчиком (Д) является термометр сопротивления R_d 1. Входной сигнал для термометра сопротивления – температура Θ в камере, выходной сигнал – величина сопротивления R_d термометра.

Задатчиком является переменное сопротивление R_2 . Задающий сигнал – величина сопротивления R_2 , которая в определенном масштабе соответствует заданному значению температуры Θ_3 в камере.

Сравнивающее устройство (СУ) – мостовая измерительная схема (М) 9, образованная сопротивлениями R_d, R_2, R_3 и R_4 . Для нее входными сигналами являются величины сопротивлений R_d и R_2 , а выходным сигналом является напряжение U_m разбаланса моста, которое в определенном масштабе соответствует ошибке регулирования.

Дифференциальный усилитель (ДУ) 8 выполняет функции устройства сравнения (вычитания) входных сигналов и усиления их разности. На вход усилителя поступают напряжение U_m разбаланса моста и напряжение U_{oc} устройства местной обратной связи. Выходной сигнал усилителя – напряжение U_y , подаваемое на электродвигатель 6.

Исполнительное устройство представляет собой исполнительный механизм, который состоит из электродвигателя (Дв) 6 и редуктора (Р) 5. Входной сигнал для электродвигателя – напряжение U_y , выходной сигнал – угол $\phi_{дв}$ поворота вала электродвигателя. Входной сигнал для редуктора – $\phi_{дв}$, выходной сигнал – угол ϕ_p поворота вала редуктора.

Устройство местной обратной связи (УОС) выполнено в виде потенциометрического датчика перемещения 6, подвижный контакт которого механически связан с валом редуктора. Входной сигнал УОС – угол ϕ_p , выходной сигнал – напряжение U_{oc} .

Регулирующим органом (РО) является автотрансформатор (АТ) 4. Входной сигнал – угол поворота ϕ_p , выходной сигнал – напряжение U_n , подаваемое на нагревательный элемент 3 объекта управления.

Для составления структурной схемы САР температуры в климатической камере следует получить передаточные функции всех элементов системы:

1. Уравнение климатической камеры как объекта управления:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 U_n + K_2 \Theta_n.$$

Изображение Лапласа этого уравнения:

$$T_1 p \Theta(p) + \Theta(p) = K_1 U_n(p) + K_2 \Theta_n(p).$$

Если к звену приложено несколько воздействий, то составляются передаточные функции отдельно по каждому воздействию, а ос-

тальные воздействия полагают равными 0. Согласно принципу суперпозиции изменение выходной величины такого звена равно сумме изменений выходных величин по каждому воздействию.

В данном случае передаточная функция климатической камеры по управляющему воздействию U_n

$$W_y(p) = \frac{\Theta(p)}{U_n(p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1}.$$

Передаточная функция климатической камеры по возмущающему воздействию Θ_n

$$W_F(p) = \frac{\Theta(p)}{\Theta_n(p)} = \frac{K_2}{T_1 p + 1}.$$

Аналогичным образом получим передаточные функции остальных элементов системы.

2. Датчик температуры (Д):

$$T_d \frac{dR}{dt} + R_d = K_d \Theta;$$

$$T_d p R_d(p) + R_d(p) = K_d \Theta(p);$$

$$W_d = \frac{R_d(p)}{\Theta(p)} = \frac{K_d}{T_d p + 1}.$$

3. Задатчик (З):

$$R = K_3 \Theta_3; \quad R_2(p) = K_3 \Theta_3(p);$$

$$W_3(p) = \frac{R_2(p)}{\Theta_3(p)} = K_3.$$

4. Сравнивающее устройство (мост) (M):

$$U_{\text{м}} = K_{\text{м}} (R_2 - R_{\text{д}}).$$

Мост состоит из двух звеньев. Первое звено осуществляет формирование сигнала ошибки системы:

$$\Delta R = R_2 - R_{\text{д}}.$$

Второе звено преобразует сигнал ΔR в пропорциональное ему напряжение $U_{\text{м}}$ разбаланса моста:

$$U_{\text{м}} = K_{\text{м}} \Delta R; \quad U_{\text{м}}(p) = K_{\text{м}} \Delta R(p);$$

$$W_{\text{м}}(p) = \frac{U_{\text{м}}(p)}{\Delta R(p)} = K_{\text{м}}.$$

5. Дифференциальный усилитель (ДУ):

$$U_{\text{у}} = K_{\text{у}} (U_{\text{м}} - U_{\text{ос}}).$$

Дифференциальный усилитель состоит из двух звеньев. Первое звено осуществляет вычитание напряжения $U_{\text{ос}}$ из напряжения $U_{\text{м}}$:

$$\Delta U = U_{\text{м}} - U_{\text{ос}}.$$

Второе звено усиливает разность ΔU :

$$U_{\text{у}} = K_{\text{у}} \Delta U; \quad U_{\text{у}}(p) = K_{\text{у}} \Delta U(p);$$

$$W_{\text{у}}(p) = \frac{U_{\text{у}}(p)}{\Delta U(p)} = K_{\text{у}}.$$

6. Двигатель (Дв):

$$T_{\text{Дв}} \frac{d^2 \varphi_{\text{Дв}}}{dt^2} + \frac{d\varphi_{\text{Дв}}}{dt} = K_{\text{Дв}} U_y ;$$

$$T_{\text{Дв}} p^2 \varphi_{\text{Дв}}(p) + p \varphi_{\text{Дв}}(p) = K_{\text{Дв}} U_y(p) ;$$

$$W_{\text{Дв}}(p) = \frac{\varphi_{\text{Дв}}(p)}{U_y(p)} = \frac{K_{\text{Дв}}}{p(T_{\text{Дв}} p + 1)} .$$

7. Редуктор (Р):

$$\varphi_p = K_p \varphi_{\text{Дв}} ; \quad \varphi_p(p) = K_p \varphi_{\text{Дв}}(p) ;$$

$$W_p(p) = \frac{\varphi_p(p)}{\varphi_{\text{Дв}}(p)} = K_p .$$

8. Устройство (потенциометр) обратной связи (УОС):

$$U_{\text{ос}} = K_{\text{п}} \varphi_p ; \quad U_{\text{ос}}(p) = K_{\text{п}} \varphi_p(p) ;$$

$$W_{\text{ос}}(p) = \frac{U_{\text{ос}}(p)}{\varphi_p(p)} = K_{\text{п}} .$$

9. Регулирующий орган (автотрансформатор) (РО):

$$U_{\text{н}} = K_{\text{в}} \varphi_p ; \quad U_{\text{н}}(p) = K_{\text{в}} \varphi_p(p) ;$$

$$W_{\text{в}}(p) = \frac{U_{\text{н}}(p)}{\varphi_p(p)} = K_{\text{в}} .$$

Структурная схема системы показана на рис. 2.

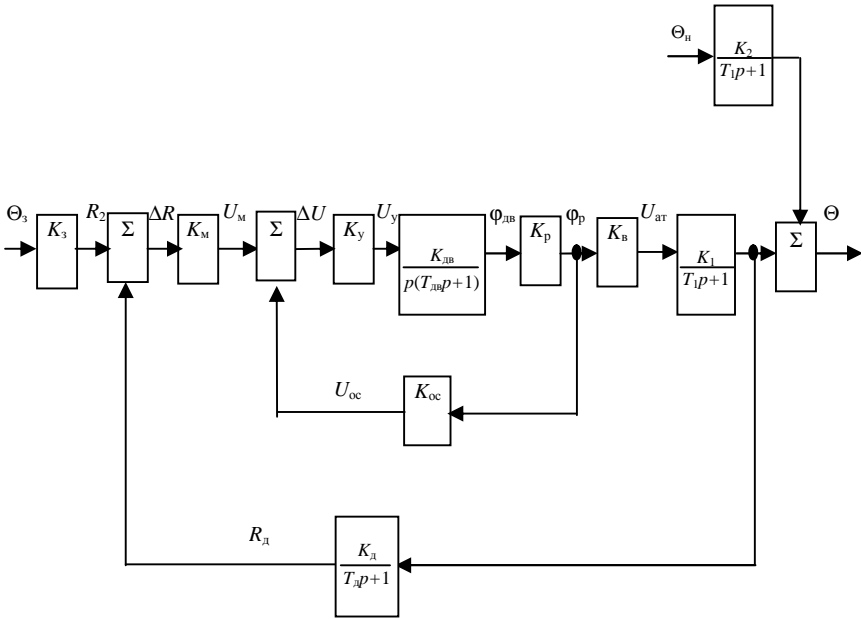


Рис. 2. Структурная схема САР температуры в климатической камере

Задатчик (3) системы является безынерционным. Его коэффициент передачи K_3 должен быть равен коэффициенту передачи K_d датчика, поскольку заданная Θ_3 и действительная Θ температуры должны вычитаться в одном масштабе. Для наглядности исследования коэффициенты K_d и K_3 можно перенести за СУ и считать, что из заданной температуры Θ_3 непосредственно вычитается измеренная датчиком температура Θ_d и формируется сигнал ошибки e . Преобразованная таким образом структурная схема показана на рис. 3.

Принимаются следующие численные значения параметров элементов САР температуры в климатической камере:

$$\begin{array}{llll}
 K_1 = 2; & K_2 = 1; & T_1 = 100 \text{ с}; & K_d = 1 \text{ Ом}/^\circ\text{C}; \\
 T_d = 1 \text{ с}; & K_M = 0,2 \text{ В/Ом}; & K_Y = 10; & K_{\text{дв}} = 1 \text{ рад с}^{-1}/\text{В}^{-1}; \\
 T_{\text{дв}} = 0,5 \text{ с}; & K_P = 0,01; & K_B = 80 \text{ В/рад}; & K_{\Pi} = 2.
 \end{array}$$

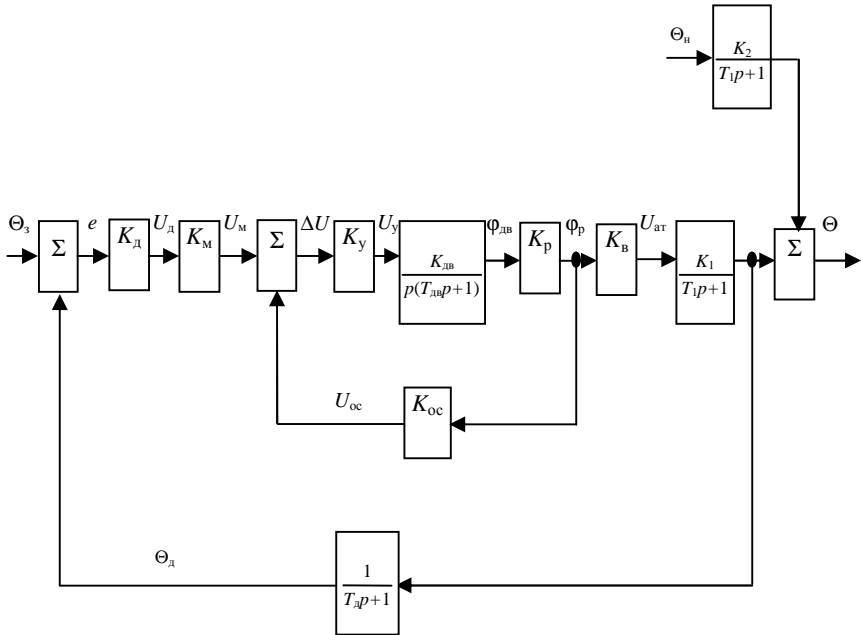


Рис. 3. Структурная схема САР температуры в климатической камере

II. Определение закона регулирования рассматриваемой САР температуры в климатической камере.

Для этого необходимо найти передаточную функцию, определяющую взаимосвязь управляющего воздействия U_n на объект и ошибки e :

$$W_{yy}(p) = \frac{U_n(p)}{e(p)}.$$

Предварительно заменить звенья, охваченные местной обратной связью (УОС) с коэффициентом передачи K_n (см. рис. 3), одним эквивалентным звеном. Передаточная функция звена или цепи последовательно соединенных звеньев, охваченных отрицательной обратной связью, определяется по формуле:

$$W_3(p) = \frac{W_n(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{W_n(p)}{1 + W_n(p)W_{oc}(p)},$$

где $W_{\text{п}}(p)$ – передаточная функция прямой цепи;
 $W_{\text{р}}(p)$ – передаточная функция разомкнутой цепи;
 $W_{\text{ос}}(p)$ – передаточная функция обратной связи.

В данном случае

$$W_{\text{з}}(p) = \frac{\Phi_{\text{р}}(p)}{U_{\text{м}}(p)} = \frac{\frac{K_{\text{у}} K_{\text{дв}} K_{\text{р}}}{p(T_{\text{дв}} p + 1)}}{1 + \frac{K_{\text{у}} K_{\text{дв}} K_{\text{р}} K_{\text{п}}}{p(T_{\text{дв}} p + 1)}} =$$

$$= \frac{\frac{1}{K_{\text{п}}}}{\frac{T_{\text{дв}}}{K_{\text{у}} K_{\text{дв}} K_{\text{р}} K_{\text{п}}} p^2 + \frac{1}{K_{\text{у}} K_{\text{дв}} K_{\text{р}} K_{\text{п}}} p + 1} = \frac{K_{\text{з}}}{T_{2\text{з}} p^2 + T_{1\text{з}} p + 1}.$$

Подставить в найденное выражение численные значения коэффициентов:

$$W_{\text{з}}(p) = \frac{0,5}{2,5p^2 + 5p + 1}.$$

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции перемножаются, поэтому

$$W_{\text{уу}}(p) = \frac{U_{\text{н}}(p)}{e(p)} = W_{\text{з}}(p) K_{\text{д}} K_{\text{м}} K_{\text{в}}.$$

Окончательно для безынерционного регулятора

$$U_{\text{н}} = K_{\text{з}} K_{\text{д}} K_{\text{м}} K_{\text{в}} e = K_{\text{уу}} e.$$

Зависимость управляющего воздействия $U_{\text{н}}$ от ошибки e показывает, что в рассматриваемой системе применен П-закон регулирования.

Примечание. Пусть УОС в системе отсутствует. Тогда передаточная функция безынерционного регулятора имеет вид:

$$W_{\text{yy}}(p) = \frac{U_{\text{н}}}{e(p)} = K_{\text{д}} K_{\text{м}} K_{\text{y}} \frac{K_{\text{дв}}}{p(T_{\text{дв}} p + 1)} K_{\text{р}} K_{\text{в}};$$

$$U_{\text{н}}(p) = K_{\text{д}} K_{\text{м}} K_{\text{y}} K_{\text{дв}} K_{\text{р}} K_{\text{в}} \frac{1}{p} e(p);$$

$$U_{\text{н}}(p) = K_{\text{д}} K_{\text{м}} K_{\text{y}} K_{\text{дв}} K_{\text{р}} K_{\text{в}} \int_0^t e dt.$$

Вывод: в рассматриваемом случае закон управления является интегральным.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Схема исследуемой системы.
3. Описание элементов схемы, их дифференциальные уравнения и передаточные функции.
4. Структурные схемы системы.
5. Расчеты по определению закона регулирования.
6. Вывод о законе регулирования.

Контрольные вопросы

1. Что такое переходная функция САР?
2. Что такое структурная схема?
3. Что такое закон регулирования системы?
4. Что такое статическая ошибка регулирования САР?

№ 10. СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: ознакомиться с методами синтеза САР.

Задание:

1. Построить компьютерную модель замкнутой САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.

2. Выполнить настройку ПИД-регулятора методом Зиглера-Никольса.

3. Выполнить настройку ПИД-регулятора с помощью реализованного в Simulink интерфейса компьютерной оптимизации и настройки САР NCD Outport.

Аппаратура и программное обеспечение, используемые в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ. Для выполнения используется среда компьютерного моделирования MATLAB Simulink (см. лабораторную работу № 7).

Порядок выполнения работы

1. Построение компьютерной модели САР с ПИД-законом регулирования

В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 1. При этом передаточная функция регулятора $W_{\text{рег}}$ выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае ПИД-законом). Числовые значения параметров передаточных функций элементов САР (K_{oy} , T_1 , T_2 , $K_{\text{д}}$, K_3 , $T_{\text{д}}$, $K_{\text{иу}}$) задаются преподавателем.

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink. Для этого в окне ввода команд Command Window в строке ввода ввести следующие команды:

```

>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> global K_iu % параметры исполнительного устройства
>> global K_p K_I K_d % коэффициенты ПИД-регулятора
>> T1 = ;
>> T2 = ;
>> K_obj = ;
>> K_sens = ;
>> T_sens = ;
>> K_iu = ;
>> K_p = 0;
>> K_I = 0;
>> K_d = 0;

```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров. Далее на основе структурной схемы САР на рис. 1 лабораторной работы № 7 создать в Simulink модель САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления. В данной модели П-регулятор необходимо заменить на ПИД-регулятор, выполнив следующие шаги:

1. Удалить компонент П-регулятор.
2. В библиотеке блоков Simulink Extras на вкладке Additional Linear выбрать компонент PID Controller (ПИД-регулятор), перетащить его в окно редактирования модели и расположить на месте удаленного значка между устройством сравнения и исполнительным устройством. Выход устройства сравнения соединить со входом ПИД-регулятора, а выход ПИД-регулятора – со входом исполнительного устройства.
3. Сохранить созданную модель в новый файл с именем «pid_regulator.mdl». Примерный вид созданной графической модели показан на рис. 1.

II. Настройка ПИД-регулятора методом Зиглера-Никольса

Начальные значения коэффициентов ПИД-регулятора должны быть равны нулю. Для этого в окне редактирования модели необходимо выполнить двойной щелчок левой клавишей мыши по значку PID Controller. В результате откроется окно задания параметров ПИД-регулятора. По умолчанию коэффициентам присвоены следующие значения: $K_p = 1$ (поле Proportional), $K_i = 1$ (поле

Integral), $K_d = 1$ (поле Derivative). Необходимо в полях Proportional и Integral ввести нулевые значения, после чего подтвердить ввод нажав на кнопки Apply и OK и запустить процесс моделирования работы САР, выбрав для этого команду меню Simulation → Start. В результате экран осциллографа (для его открытия следует щелкнуть дважды левой клавишей мыши на значке Scope) отобразит, что изменение выходной величины равно нулю. Это объясняется тем, что выходной сигнал ПИД-регулятора имеет нулевое значение.

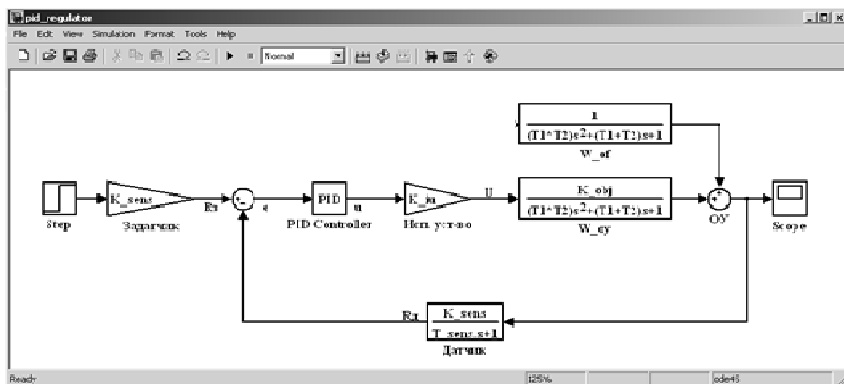


Рис. 1. Графическая модель САР с ПИД-регулятором

Далее необходимо постепенно увеличивать значение параметра Proportional в ПИД-регуляторе, для каждого нового значения выполнять моделирование работы и наблюдать на экране осциллографа за тем, какой вид имеет график переходной функции САР.

Когда система окажется на границе устойчивости и переходная функция САР будет иметь вид незатухающих колебаний (рис. 2), соответствующее значение параметра Proportional нужно запомнить. Для этого в окне ввода формул Command Window в строке ввода команд ввести следующие команды:

```
>> K_u =
```

```
>> T_u =
```

После знаков равенства нужно ввести значение параметра Proportional (для переменной K_u) и определенный по графику период незатухающих колебаний переходной функции (для переменной T_u).

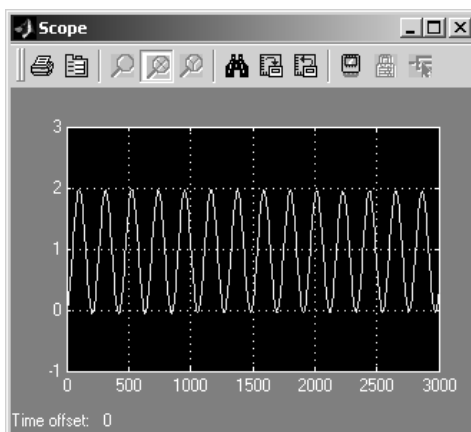


Рис. 2. Переходная функция САР в виде незатухающих колебаний

Затем в окне ввода формул Command Window в строке ввода команд ввести следующие команды:

```
>> K_p = 0.6*K_u ;
>> K_i = 2*K_u / T_u ;
>> K_d = K_u * T_u / 8 ;
```

Переменные K_p , K_i , K_d ввести в ПИД-регулятор в поля Proportional, Integral и Derivative соответственно.

Запустить моделирование работы САР, для получившейся переходной функции определить значения показателей качества – перерегулирования σ и времени регулирования t_{per} .

III. Настройка ПИД-регулятора с помощью компонента NCD Output

Инструментальный пакет Nonlinear Control Design Blockset (NCD-Blockset) предоставляет в распоряжение пользователя графический интерфейс для настройки параметров Simulink-моделей динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов.

Вначале в окно редактирования модели следует перетащить компонент NCD Output, который находится в библиотеке NCD Blockset. Вход компонента NCD Blockset соединить с выходом объекта управления ОУ. Двойным щелчком на пиктограмме NCD Output открыть рабочее окно данного блока. Рабочее окно

блока NCD Output с временными ограничениями по умолчанию показано на рис. 3.

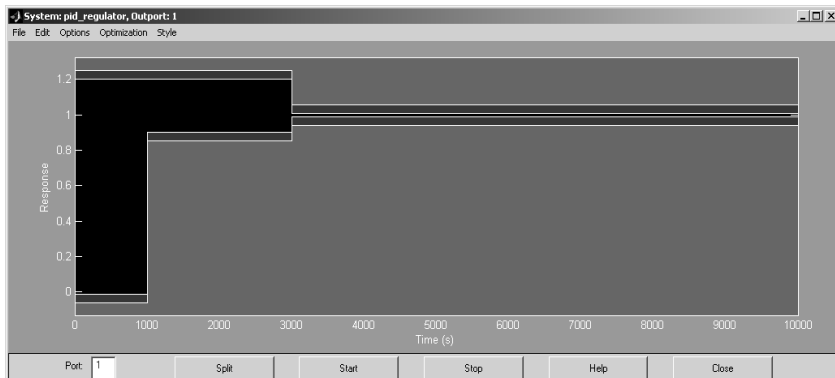


Рис. 3. Рабочее окно блока NCD Output

На рис. 3 изображено, что контролируемым сигналом является переходная характеристика, на которую накладываются следующие ограничения:

- § максимальное перерегулирование – не более 20 %;
- § время нарастания – не более 1000 с;
- § длительность переходного процесса (время регулирования) – не более 3000 с.

Для наиболее простой установки других значений временных ограничений переместить с помощью мыши вертикальные и горизонтальные линии ограничений в требуемое положение. Точную установку линий ограничения можно провести, выбрав требуемые линии с помощью щелчка левой клавиши мыши (выбранная линия становится белой) и выполнив в меню **Edit** команду **Edit constraint** (изменить ограничение). В появившемся окне редактора ограничений (**Constraint Editor**), в текстовом поле **Position editor**, необходимо задать начальную и конечную точки прямой в формате и нажать на кнопку **Done**. Окно редактора ограничений также можно открыть с помощью щелчка правой клавишей мыши по соответствующей линии.

Установить положение левой верхней границы переходного процесса по вертикали с 1.2 на 1.3 (соответствует перерегулированию $\Theta = 30\%$).

Далее необходимо указать настраиваемые параметры: K_p , K_i , K_d . Для этого выбрать команду **Parameters** в меню **Optimization** и открыть диалоговое окно задания оптимизируемых параметров и интервала дискретизации – **Optimization Parameters** (рис. 4).

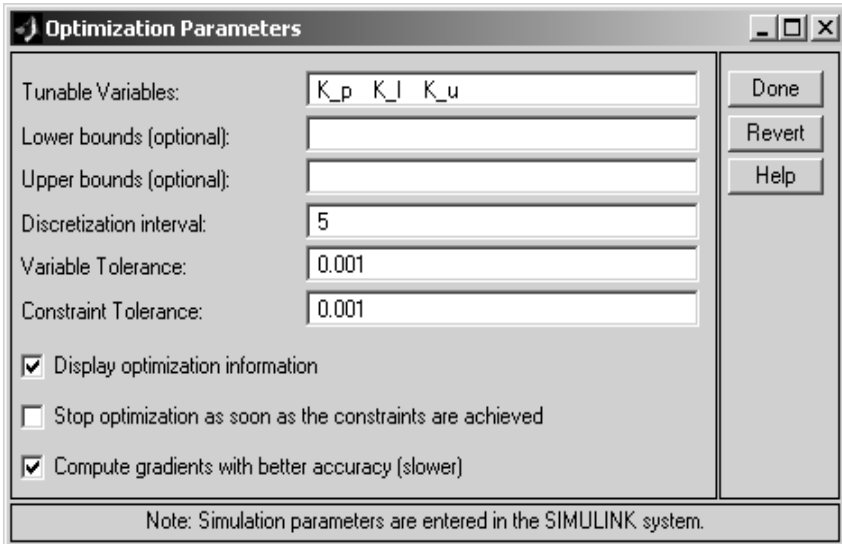


Рис. 4. Окно задания оптимизируемых параметров блока NCD Output

В текстовое поле **Tunable Variables** необходимо ввести имя оптимизируемой переменной. Если таких переменных несколько, как в данном случае, то их имена разделяются пробелами.

В текстовое поле **Discretization Interval** вводится значение интервала дискретизации при моделировании переходного процесса, выраженное в секундах.

В качестве примера на рис. 4 показаны три оптимизируемых параметра (K_p , K_i , K_d) и установлено значение интервала дискретизации, равное 5 с.

Для подтверждения ввода нажать на кнопку **Done**.

Для запуска процесса оптимизации в меню рабочего окна блока **NCD Output** выбрать команду **Optimization** → **Start**.

После успешного окончания процесса оптимизации в окне ввода формул **Command Window** появляется соответствующее сообщение:

Optimization Converged Successfully (оптимизация выполнена успешно). В рабочем окне блока NCD Output отображается график переходного процесса, соответствующего оптимальным настройкам ПИД-регулятора. Оптимизированные значения коэффициентов K_p , K_i , K_d можно просмотреть в окне ввода формул Command Window, введя в строке ввода формул следующее выражение:

>> K_p , K_i , K_d

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления, созданная в Simulink.
3. Результаты настройки ПИД-регулятора по методу Зиглера-Никольса: значение коэффициента пропорциональной составляющей регулятора K_u , при котором в системе наблюдаются незатухающие колебания переходного процесса, значение периода незатухающих колебаний T_u ; рассчитанные значения коэффициентов K_p , K_i , K_d .
4. График переходной функции САР с оптимальными значениями параметров ПИД-регулятора, полученными по методу Зиглера-Никольса, по задающему воздействию.
5. Результаты настройки ПИД-регулятора с помощью блока NCD Output: значения коэффициентов K_p , K_i , K_d .
6. График переходной функции САР по задающему воздействию в рабочем окне блока NCD Output вместе с начальными ограничениями на вид переходной функции.
7. График переходной функции САР с оптимальными значениями параметров ПИД-регулятора, полученными с помощью блока NCD Output, по задающему воздействию.
8. Сравнение оптимальных значений параметров ПИД-регулятора, полученных различными методами.

Контрольные вопросы и задания

1. Что представляет собой передаточная функция пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования САР? Приведите ее.

2. В чем заключается задача синтеза САР?
3. Приведите формулы метода Зиглера-Никольса настройки ПИД-регулятора.
4. Опишите порядок настройки ПИД-регулятора с помощью компонента NCD Outport.

№ 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА

Цель работы: ознакомиться с принципом действия двухпозиционного регулятора; исследовать двухпозиционный регулятор на примере регулятора температуры и режимы работы двухпозиционных систем на примере САР температуры сушильной камеры.

Задание:

1. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 как двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры. Заданную температуру Θ_3 и ширину зоны неоднозначности $2a$ назначает преподаватель.
2. Снять данные статической характеристики регулятора в функции сопротивления датчика и рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Лабораторная установка выполнена на базе цифрового измерителя-регулятора МТ2141, предназначенного для измерения и регулирования температуры (рис.) и магазина сопротивлений, имитирующего датчик температуры – термометр сопротивления.



Рис. Внешняя панель измерителя-регулятора температуры МТ2141


Регулятор позволяет реализовать двух- и трехпозиционные законы регулирования и ПИД-закон регулирования в нелинейной приближенной реализации. Для этого регулятор снабжен двумя программируемыми каналами регулирования с релейными выходами K1, K2.


К регулятору в качестве датчика могут быть подключены платиновые и медные термометры сопротивления 100П и 100М номинальным сопротивлением 100 Ом при 0 °С, термопары, токовые и потенциальные датчики.


Порядок выполнения работы


1. Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 на двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.



У прибора три уровня программирования: конфигурационный, параметрический и рабочий. Переход от одного уровня ко второму осуществляется при нажатом состоянии операторной кнопки .


1. Для задания параметров на конфигурационном уровне программирования Conf необходимо на панели регулятора нажать на кнопку  и удерживать ее до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Conf.

Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии на операторную кнопку .





На данном уровне необходимо задать положение Pnt – x1. Выбор разряда производится нажатием на кнопку .





Выбранные значения подтверждают: удерживая операторную кнопку , нажимают на кнопку .



Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием на кнопки  + .






2. Для задания параметров на параметрическом уровне программирования Par необходимо на панели регулятора нажать на кнопку  и удерживать ее до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Par.



Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии на операторную кнопку .

На данном уровне программирования задают значения ширины зоны неоднозначности $2a$ для выхода К1 (HYS1). Для этого нажимают на операторную кнопку , пока на индикаторе прибора не появится сообщение HYS1, затем выбирают численное значение ширины зоны неоднозначности нажатием на операторную кнопку . Выбранные значения подтверждаются: удерживая операторную кнопку , нажимают на кнопку .

Далее выбирают направление регулирования. Для этого нажимают на операторную кнопку , пока на индикаторе не появится сообщение dir. С помощью операторной кнопки  выбирают направление регулирования (нагрев) $\dot{\dots}$. Выбранные значения подтверждаются: удерживая операторную кнопку , нажимают на кнопку .

Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием на кнопки  + .

3. На рабочем уровне задают значение температуры Θ_3 (центр ширины зоны неоднозначности $2a$). Для этого нажимают операторную кнопку  и, не отпуская ее, нажимают на операторную кнопку , с помощью операторной кнопки  выбирают заданное значение и затем фиксируют: удерживая операторную кнопку , нажимают на кнопку .

Аналогичным образом задают центр неоднозначности для выхода К2. Разница заключается в том, что вместо кнопки  нажимают на кнопку .

Центр срабатывания реле К2 должен отстоять достаточно далеко от центра срабатывания реле К1, чтобы реле К2 не срабатывало при работе заданной двухпозиционной системы.

II. Снятие данных статической характеристики регулятора

В данной работе регулятор запрограммирован на термометр сопротивления 100М ($W_{100} = 1,426$). Это значит, что датчик при тем-

температуре Θ °С имеет номинальное сопротивление 100 Ом, а при температуре 100 °С – сопротивление 142,6 Ом, поэтому номинальная статическая характеристика датчика описывается формулой

$$R_d = 100 + 0,426\Theta,$$

где R_d – сопротивление датчика, Ом;

Θ – температура, °С.

1. С помощью магазина сопротивлений увеличивать значение сопротивления датчика через 0,1 Ом и зафиксировать значение сопротивления R_d и Θ , при которых происходит включение реле К1. Затем уменьшать значение сопротивления магазина через 0,1 Ом и зафиксировать значение сопротивления R_d и Θ , при которых происходит выключение реле К1. Результаты занести в таблицу.

Таблица

Статическая характеристика двухпозиционного регулятора

R_d , Ом	100,0	100,1	100,2	...	115,0	...
Θ , °С	0		
$\Theta_{расч}$, °С			
Состояние реле К1			
			

2. Построить по данным таблицы статическую характеристику в функции сопротивления датчика для регулирующего выхода К1, показать на ней ширину зоны неоднозначности.

3. Рассчитать по экспериментальной характеристике, при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую характеристику датчика. Сравнить полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания ($\Theta_3 \pm a$).

4. Сделать вывод о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента (табл.).
3. Статическая характеристика регулятора в виде функции сопротивления датчика
4. Расчетные значения температуры срабатывания регулятора.
5. Вывод о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой позиционный закон регулирования, двухпозиционный закон регулирования?
2. Каковы параметры настройки двухпозиционных регуляторов?
3. Что означает понятие «зона неоднозначности»?
4. В каком установившемся режиме работают двухпозиционные системы?
5. Каковы показатели качества регулирования двухпозиционных САР?
6. Как изменяются режимы работы двухпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?

№ 12. ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА

Цель работы: ознакомиться с принципом действия трехпозиционного регулятора; исследовать трехпозиционный регулятор на примере регулятора температуры и режимы работы трехпозиционных систем на примере САР температуры сушильной камеры.

Задание:

1. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор температуры сушильной камеры. Заданную температуру Θ_3 и ширину зоны нечувствительности $2a$ назначает преподаватель.

2. Снять данные статической характеристики регулятора в функции сопротивления датчика и рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Цифровой измеритель-регулятор температуры МТ2141, предназначенный для измерения и регулирования температуры, и магазин сопротивлений, имитирующий датчик температуры – термометр сопротивления.

Порядок выполнения работы

I. Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор температуры сушильной камеры

Трехпозиционный закон регулирования задается настройкой зон неоднозначности и их центров для реле К1 и К2. Ширина зоны нечувствительности равна разности Θ_3 для реле К1 и К2 плюс ширина зоны неоднозначности (дифференциал) этих реле.

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.

Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 осуществляется в соответствии с лабораторной работой № 11).

II. Снятие данных статической характеристики регулятора

В данной лабораторной работе выбран и заранее запрограммирован датчик 100М ($W_{100} = 1,426$). При температуре 0 °С датчик имеет номинальное сопротивление 100 Ом, а при температуре 100 °С – 142,6 Ом, поэтому номинальная статическая характеристика датчика описывается формулой: $R_d = 100 + 0,426\Theta$.

1. С помощью магазина сопротивлений увеличивать значение сопротивления датчика через 0,1 Ом и зафиксировать значения $R_1, R_2, \Theta_1, \Theta_2$, при которых происходит включение реле К1 и К2. Затем уменьшать сопротивление магазина через 0,1 Ом и зафиксиро-

ровать значения R_1 , R_2 , Θ_1 , Θ_2 , при которых происходит отключение реле К1 и К2. Результаты занести в таблицу.

Таблица

Статическая характеристика трехпозиционного регулятора

R_d , Ом	100	100,1	100,2	...	115	...
Θ , °С	0		
$\Theta_{расч}$, °С			
Состояние реле К1			
			
Состояние реле К2			
			

2. Построить статическую характеристику в функции сопротивления датчика для регулирующих выходов К1 и К2, показать на ней ширину зон нечувствительности и неоднозначности (дифференциалы d).

3. Рассчитать по экспериментальной характеристике, при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую характеристику датчика. Сравнить полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания.

4. Сделать вывод о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента (табл.).
3. Статическая характеристика регулятора в виде функции сопротивления датчика.
4. Расчетные температуры срабатывания регулятора.
5. Вывод о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой трехпозиционный закон регулирования?
2. Каковы параметры настройки трехпозиционных регуляторов?
3. В чем разница между понятиями «зона нечувствительности» и «зона неоднозначности»?
4. В каком установившемся режиме работают трехпозиционные системы?
5. Каковы показатели качества регулирования трехпозиционных САР?
6. Как изменяются режимы работы двухпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?

№ 13 (УСРС). ИЗУЧЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: изучить и определить функциональный состав системы автоматического регулирования по заданной схеме.

Задание:

1. Дать характеристику объекта управления.
2. Описать устройства, входящие в САР.
3. Составить функциональную схему САР.
4. Описать работу САР.
5. Сделать вывод о принципе управления и виде САР.

Порядок выполнения работы

1. Зарисовать схему исследуемой системы.
2. В характеристике объекта управления (ОУ) указать, что является ОУ, регулируемой величиной, целью управления, управляющим воздействием на объект, возмущающими воздействиями, а также возмущающим воздействием, принятым в качестве основного.
3. При описании устройства САР перечислить все элементы системы, описать связи между элементами, определить функцию, выполняемую каждым элементом.

4. Составить функциональную схему.
5. Описать работу системы.

Пример выполнения работы

На рис. 1 приведена схема САР температуры в климатической камере, выполненная на непрерывных устройствах.

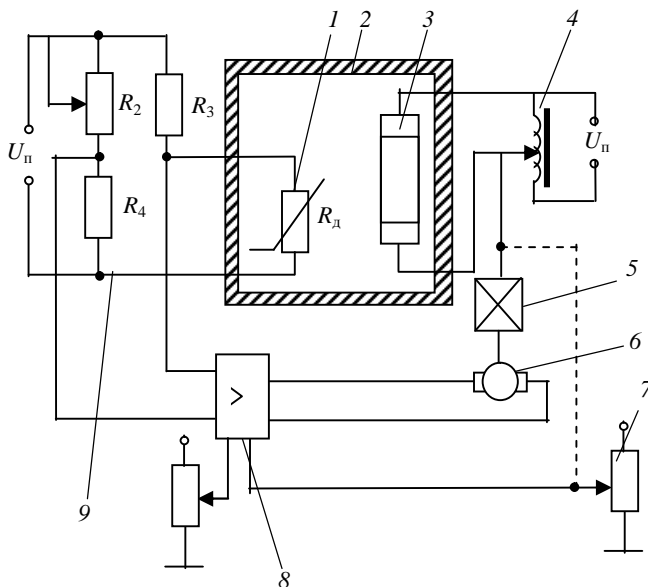


Рис. 1. Схема системы автоматического регулирования температуры в климатической камере:

- 1 – датчик (термометр сопротивления); 2 – камера климатическая;
- 3 – нагреватель электрический; 4 – автотрансформатор; 5 – редуктор;
- 6 – электродвигатель; 7 – потенциометр местной обратной связи;
- 8 – усилитель дифференциальный; 9 – схема мостовая измерительная

1. САР температуры в климатической камере состоит из объекта управления и регулятора.

Объектом управления (ОУ) рассматриваемой САР является климатическая камера 2 с нагревательным элементом 3. Регулируемой величиной является температура Θ внутри камеры. Целью

управления является поддержание температуры в климатической камере на постоянном заданном уровне. Управляющим воздействием на ОУ является напряжение U_n , подаваемое на нагревательный элемент 3. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры Θ_n наружного воздуха от расчетного номинального значения. Дополнительными возмущающими воздействиями могут быть, например, изменения напряжения питания моста U_n и трансформатора U .

2. Описанию устройства САР.

Датчиком (Д) является термометр сопротивления R_d 1. Входной сигнал для термометра сопротивления – температура Θ в камере, выходной сигнал – величина сопротивления R_d термометра.

Задатчиком является переменное сопротивление R_2 . Задающий сигнал – величина сопротивления R_2 , которая в определенном масштабе соответствует заданному значению температуры Θ_3 в камере.

Сравнивающее устройство (СУ) – мостовая измерительная схема (М) 9, образованная сопротивлениями R_d , R_2 , R_3 и R_4 . Для нее входными сигналами являются величины сопротивлений R_d и R_2 , выходным сигналом – напряжение U_m разбаланса моста, которое в определенном масштабе соответствует ошибке регулирования.

Дифференциальный усилитель (ДУ) 8 выполняет функции устройства сравнения (вычитания) входных сигналов и усиления их разности. На вход усилителя поступают напряжение U_m разбаланса моста и напряжение U_{oc} устройства местной обратной связи. Выходной сигнал усилителя – напряжение U_y , подаваемое на электродвигатель 6.

Исполнительное устройство представляет собой исполнительный механизм, который состоит из электродвигателя (Дв) 6 и редуктора (Р) 5. Входной сигнал для электродвигателя – напряжение U_y , выходной сигнал – угол $\varphi_{дв}$ поворота вала электродвигателя. Входной сигнал для редуктора – $\varphi_{дв}$, выходной сигнал – угол φ_p поворота вала редуктора.

Устройство местной обратной связи (УОС) выполнено в виде потенциометрического датчика перемещения 7, подвижный контакт которого механически связан с валом редуктора. Входной сигнал УОС – угол φ_p , выходной сигнал – напряжение U_{oc} .

Регулирующим органом (РО) является автотрансформатор (АТ) 4. Входной сигнал – угол поворота φ_p , выходной сигнал – напряжение U_n , подаваемое на нагревательный элемент 3 объекта управления.

3. Функциональная схема.

На основании изложенного составлена функциональная схема системы, которая приведена на рис. 2 для систем, работающих на непрерывных устройствах.

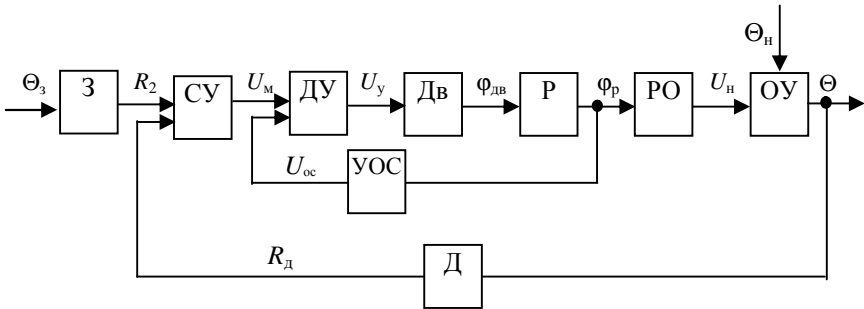


Рис. 2. Функциональная схема САР температуры в климатической камере

4. Описание работы САР.

Система работает следующим образом. В установившемся режиме, при равенстве температуры Θ в камере заданной Θ_3 , выходное напряжение U_m равно 0. При отклонении температуры в камере от заданной, например при изменении температуры наружного воздуха Θ_n , сопротивление R_d изменяется, мост разбалансируется. Напряжение U_m разбаланса моста является сигналом возникшей ошибки системы, оно усиливается усилителем и подается на двигатель. Двигатель через редуктор перемещает подвижный контакт автотрансформатора, тем самым изменяя напряжение U_n на нагревательном элементе в нужную сторону. Если температура в камере ниже заданной, то напряжение U_n увеличивается, если выше – уменьшается. Одновременно выходной вал редуктора перемещает подвижный контакт потенциометрического датчика местной обратной связи, выходное напряжение U_{oc} которого подается на дифференциальный усилитель, где вычитается из напряжения U_m разбаланса моста. Усилитель усиливает разность напряжений U_m и U_{oc} . За счет местной обратной связи обеспечивается пропорциональная зависимость между напряжением U_m и углом φ_p поворота вала редуктора. Поэтому изменение напряжения U_n на нагревательном элементе (управляющее воздействие на объект) пропорционально

величине отклонения температуры Θ в камере от заданного Θ_3 значения. В результате температура в камере возвращается к заданному значению.

При непрерывном изменении наружной температуры процесс регулирования идет непрерывно. Если наружная температура устанавливается, то при правильно подобранных параметрах регулятора процесс регулирования через некоторое время заканчивается и вся система приходит в новое установившееся состояние.

Вывод: в системе реализован принцип управления по отклонению (по ошибке). Система является стабилизирующей.

Примечание. Система могла бы работать и без УОС. Напряжение U_n изменялось бы до тех пор, пока температура Θ в камере не стала бы равна заданной Θ_3 . Качество системы при этом отличалось бы от выявленного.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Схема системы автоматического регулирования индивидуального задания.
3. Характеристика объекта управления.
4. Состав САР.
5. Функциональная схема САР.
6. Описание работы системы.
7. Вывод.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое система автоматического регулирования?
2. Что такое функциональная схема?
3. Что такое технические средства автоматизации?
4. Перечислите функции технических средств автоматизации.
5. Перечислите основные характеристики ТСА и дайте их определения.

№ 14. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Цель работы: изучить принцип действия, назначение, особенности работы и примеры исполнения потенциометрических датчиков; экспериментально исследовать потенциометрический датчик для измерения угловых перемещений.

Задание:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и приборами, необходимыми для исследования.

2. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения однотактного потенциометрического измерительного преобразователя.

3. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения потенциометрического преобразователя, включенного по мостовой схеме.

4. Построить статические характеристики потенциометрических измерительных преобразователей по экспериментальным данным.

5. Определить чувствительность и максимальную относительную погрешность потенциометрических измерительных преобразователей при различных нагрузках. Рассчитать максимальную относительную погрешность потенциометрических измерительных преобразователей при различных нагрузках.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется учебный лабораторный стенд НТЦ-09.12 «Основы автоматики и вычислительной техники» (рис. 1).

Конструктивно стенд состоит из корпуса, в котором установлено электрооборудование, электронные платы, лицевая панель и столешница интегрированного рабочего стола.

На лицевой панели изображены электрические схемы объектов исследования. Все схемы, изображенные на панели, разбиты на группы в соответствии с тематикой проводимых работ.

На панели установлены коммутационные гнезда, коммутационная аппаратура, а также органы управления, позволяющие изменять параметры элементов при проведении лабораторной работы.

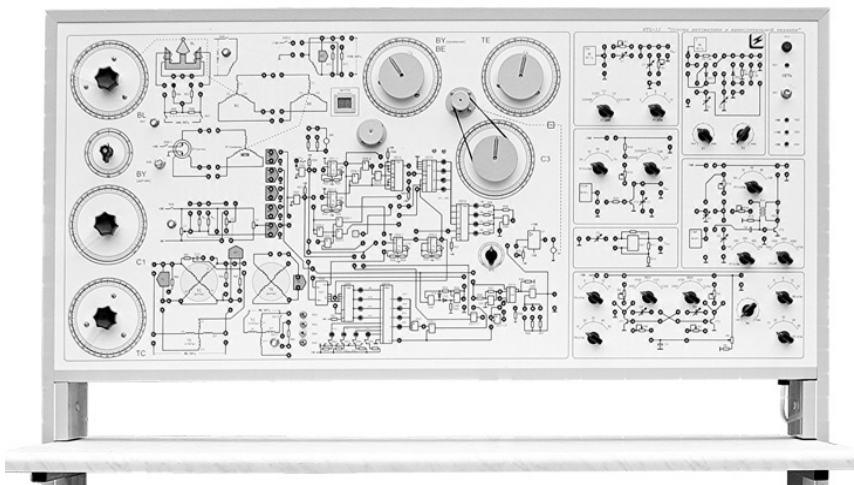


Рис. 1. Лабораторный стенд НТЦ-09.12
«Основы автоматики и вычислительной техники»

Для проведения работы необходимо собрать схему объекта исследования с помощью унифицированных перемычек, позволяющих осуществлять это без потери наглядности.

Необходимые измерения производятся с помощью сигнальных светодиодов, мультиметра, осциллографа.

Порядок выполнения работы

1. До включения стенда измерить с помощью тестера полное (движок потенциометра в крайнем положении) сопротивление потенциометрического преобразователя $S1$ и сопротивления нагрузок $R_{н1}$ и $R_{н2}$. Снять данные для построения зависимости $r = f(\varphi)$ через каждые 30° .

2. Подготовить к работе лабораторный стенд:

- собрать схему лабораторной установки согласно рис. 2;
- подключить вольтметр к выходу потенциометрического преобразователя;
- включить питание стенда $SA1$ и электрической схемы $SA9$.

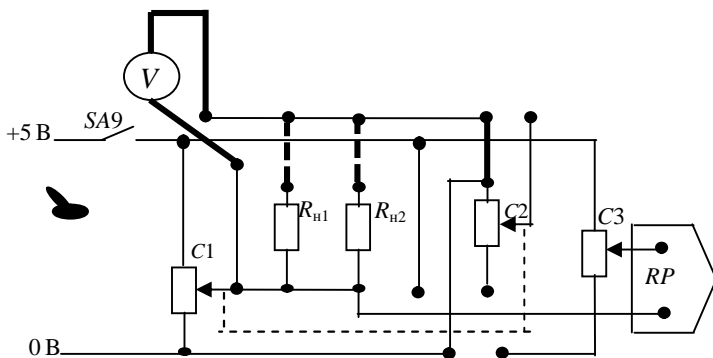


Рис. 2. Схема однотактного
потенциметрического преобразователя

3. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения потенциметрического преобразователя:

- снять данные статической характеристики в режиме холостого хода. Для этого снять показания вольтметра через каждые 30° положений щетки потенциометра $C1$ и занести полученные данные в табл. 1;
- снять данные статической характеристики потенциметрического преобразователя для различных нагрузок. Для этого поочередно подключить $R_{н1}$ и $R_{н2}$ и снять показания вольтметра через каждые 30° положения щетки потенциометра. Данные занести в табл. 1.

Таблица 1

Статическая характеристика
потенциметрического преобразователя

$X_{вх}$	$U_{ввых}, В$		
	$R_{н} = \infty$	$R_{н1} = 510 \text{ Ом}$	$R_{н2} = 800 \text{ Ом}$
0°			
30°			
60°			
...			

4. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения потенциметрической мостовой схемы. Подготовить к работе лабораторный стенд:

- собрать схему согласно рис. 3;
- подключить вольтметр к выходу схемы;
- включить питание SA9;
- установить ручку потенциометра в среднее положение, добившись по вольтметру значения $U = 0$ В, и считать данное положение ручек исходным.

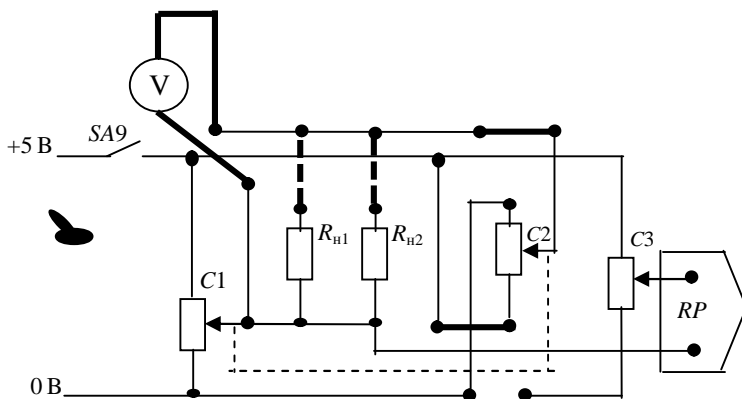


Рис. 3. Схема лабораторного стенда для исследования мостовой потенциметрической схемы

Снять данные статической характеристики потенциметрической мостовой схемы в режиме холостого хода:

- поворачивать ручку потенциометра $C1$ вправо от исходного (сбалансированного) положения через каждые 30° и записывать в табл. 2 показания вольтметра;
- поворачивать ручку потенциометра $C1$ влево от исходного положения через каждые 30° и записывать в табл. 2 показания вольтметра.

Снять данные статической характеристики потенциметрической мостовой схемы при различных нагрузках:

- поочередно подключить к схеме $R_{н1} = 510$ Ом и $R_{н2} = 800$ Ом;
- поворачивать ручки потенциометров вправо и влево от исходного положения через каждые 30° и записывать показания вольтметра в табл. 2.

Таблица 2

Статическая характеристика потенциметрической мостовой схемы

$X_{\text{вх}}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$					
	$R_{\text{н}} = \infty$		$R_{\text{н1}} = 510 \text{ Ом}$		$R_{\text{н2}} = 800 \text{ Ом}$	
	Правое вращение	Левое вращение	Правое вращение	Левое вращение	Правое вращение	Левое вращение
0°						
30°						
60°						
...						

5. Построить статические характеристики потенциметрического измерительного преобразователя.

- по данным табл. 1 построить на одних координатных осях три характеристики;

- по данным табл. 2 построить на одних координатных осях три характеристики;

- проанализировать полученные статические характеристики.

6. Определить экспериментальные максимальные относительные погрешности потенциметрических измерительных схем для различных нагрузок по формуле

$$\delta = \frac{U_{\text{вых}}^{x, x} - U_{\text{вых}}^{R_{\text{н}}}}{U_{\text{вых}}^{x, x}} 100 \%,$$

где $U_{\text{вых}}^{x, x}$ – напряжение в режиме холостого хода, В;

$U_{\text{вых}}^{R_{\text{н}}}$ – напряжение при наличии нагрузки, В.

Сравнить расчетную и экспериментальную максимальные относительные погрешности.

7. Оформить отчет.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Таблицы экспериментальных данных.
3. Графики статических характеристик.
4. Расчеты чувствительности и максимальной погрешности.
5. Вывод о влиянии сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения потенциометрического преобразователя.

Контрольные вопросы

1. Каковы назначение и конструкции потенциометрических измерительных преобразователей?
2. Каков принцип работы потенциометрических преобразователей?
3. Какие существуют погрешности у потенциометрических преобразователей?
4. Как влияет нагрузка на линейность статической характеристики потенциометрических преобразователей?
5. Каковы преимущества и недостатки потенциометрических преобразователей по сравнению с преобразователями других типов?

№ 15. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНЫХ И ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

Цель работы: исследовать основные характеристики индуктивных и индукционных датчиков.

Задание:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и приборами, необходимыми для исследования.
2. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения индуктивного датчика.
3. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения тахогенератора.
4. Построить статические характеристики индуктивного датчика по экспериментальным данным.
5. Построить статические характеристики тахогенератора по экспериментальным данным.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется учебный лабораторный стенд НТЦ-09.12 «Основы автоматики и вычислительной техники».

Дополнительное оборудование: осциллограф, тестер.

Порядок выполнения работы

1. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения индуктивного датчика.

Подготовить лабораторный стенд к работе:

- собрать схему согласно рис. 1, установить предел измерения мультиметра 110 В;
- тестером измерить значения сопротивления R_{56} , R_{57} ;
- включить $SA1$, $SA7$.

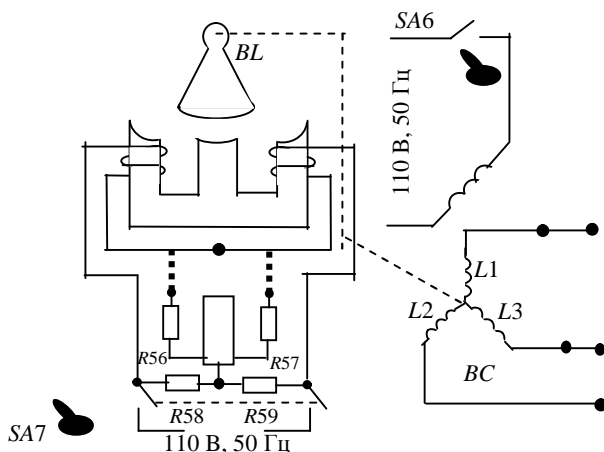


Рис. 1. Схема подключения индукционного датчика

Снять данные статической характеристики индуктивного датчика при различных нагрузках:

- плавно вращая диск BL вправо и влево от 0, определить диапазон угла поворота, при котором $U_{\text{вых}}$ нарастает от 0 до $U_{\text{макс}}$;

- выбрать в полученном диапазоне 5-6 точек угла α и, плавно вращая диск BL , снять данные для построения зависимости $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$ в режиме холостого хода;
- результаты занести в табл. 1;
- выключить $SA1, SA7$;
- выполнить п. 1.2 для сопротивлений нагрузки $R56, R57$, результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Статическая характеристика индуктивного датчика

Напряжение $U_{\text{вых}}, \text{В}$	α , град.	Сопротивления нагрузки, Ом		
		$R_H = \infty$	$R_{56} = ___$	$R_{57} = ___$
U_0		0	0	0
U_1				
U_2				
U_3				
U_4				
$U_{\text{макс}}$				

Построить статические характеристики индуктивного преобразователя на основании данных табл. 1.

2. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения тахогенератора.

Подготовить к работе лабораторный стенд:

- собрать схему согласно рис. 2, соединить пассиком вал двигателя $M1$ с валом тахогенератора BR ;
- тестером измерить сопротивления нагрузки тахогенератора BR ;
- включить $SA1$.

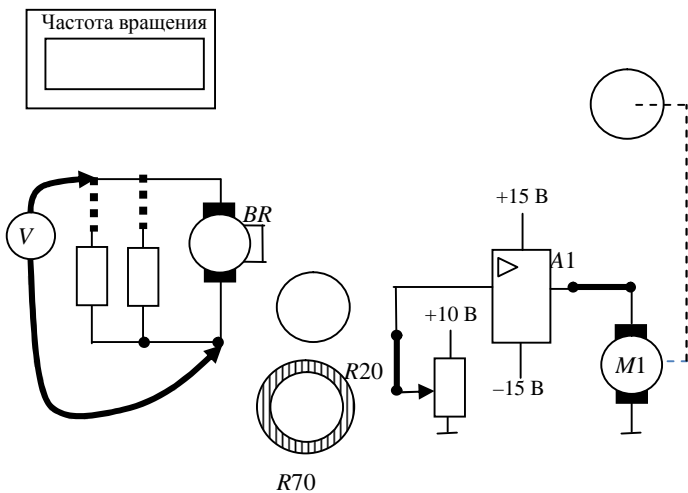


Рис. 2. Схема подключения тахогенератора

Снять данные статической характеристики тахогенератора в режиме холостого хода и для двух сопротивлений нагрузки:

- изменяя резистором $R70$ частоту вращения ω двигателя $M1$, снять данные для построения зависимости $U_{\text{вых. тг}} = f(\omega)$ и занести результаты измерения в табл. 2. Угловая частота ω измеряется импульсным датчиком. Результат измерения отражается на индикаторе «Частота вращения»;
- повторить для двух сопротивлений нагрузки тахогенератора;
- результаты занести в табл. 2;
- выключить SA1.

Таблица 2

Статическая характеристика тахогенератора

Напряжение $U_{\text{вых. В}}$	$\omega, \text{с}^{-1}$	Сопротивления нагрузки, Ом		
		$R_{\text{н}} = 0$	$R_{\text{н1}} = \text{---}$	$R_{\text{н2}} = \text{---}$
U_0	10			
U_1	20			
U_2	30			

Напряжение $U_{\text{вых}}$, В	ω , с ⁻¹	Сопротивления нагрузки, Ом		
		$R_n = 0$	$R_{n1} = \underline{\hspace{1cm}}$	$R_{n2} = \underline{\hspace{1cm}}$
U_3	40			
U_4	50			
$U_{\text{макс}}$	60			

Построить статические характеристики тахогенератора в режиме холостого хода и для двух сопротивлений нагрузки.

3. Оформить отчет о проделанной работе.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Таблицы экспериментальных данных.
3. Графики статических характеристик.
4. Вывод о влиянии сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения индуктивных и индукционных датчиков.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия индуктивного датчика?
2. Каков принцип действия индукционного датчика?
3. Чем обусловлена нелинейность статической характеристики индуктивного датчика?
4. К каким классам относят индуктивные и индукционные датчики?
5. Какой тип питающего напряжения – постоянное или переменное – используют в индуктивных датчиках? Почему?
6. Для каких цепей в системах автоматики используют тахогенераторы?
7. На чем основан принцип действия асинхронного тахогенератора?
8. В чем отличие работы асинхронного тахогенератора от синхронного?
9. Как работает тахогенератор постоянного тока?

№ 16. ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить принцип действия датчиков температуры, используемых в системах автоматики.

Задание:

1. Изучить классификацию датчиков температуры по принципу действия первичного преобразователя.
2. Теоретически и экспериментально исследовать металлический термометр сопротивления и термопару.
3. Сравнить результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Стенд лабораторной работы состоит из стенда образцов датчиков температуры и лабораторной установки для выполнения экспериментальной части.

Лабораторная установка состоит из сушильных шкафов 1 и 2, в каждом из которых установлены два термометра сопротивления ТСМ-50М и термопара ТХК-008. Один из термометров сопротивления шкафа используется как датчик температуры в шкафу, другой термометр сопротивления и термопара установлены для проведения их исследований.

Для измерения температуры в шкафах применен милливольтметр типа Ш4541/1, к которому и подключены датчики температуры в шкафах.

Для измерения термоЭДС термопары и сопротивления термометра в процессе исследований установлены цифровые мультиметры ЦР-04.

Включение питания лабораторной установки производится автоматическим выключателем QF , включение питания милливольтметра – тумблером SA1, включение питания мультиметра для измерения ЭДС термопары – тумблером SA2, включение питания мультиметра для измерения сопротивления термометра сопротивления – тумблером SA3. Трехпозиционными тумблерами SA4, SA5 и SA6 производится подключение установленных в шкафу 1 или 2 датчиков к указанным измерительным приборам.

Порядок выполнения работы

I. Снятие данных для построения экспериментальных зависимостей

Выбрать полностью остывший сушильный шкаф, в котором температура равна температуре в помещении. Закрыть его дверцу.

Трехпозиционными тумблерами SA4, SA5 и SA6 подключить датчики выбранного шкафа к измерительным приборам.

Включить питание установки выключателем QF, затем питание измерительных приборов тумблерами SA1, SA2 и SA3.

Занести в табл. 1 и 2 начальные экспериментальные значения температуры Θ в шкафу, сопротивления R_{Θ}° термометра сопротивления, разность $\Delta\Theta$ значений температуры в шкафу и в помещении (это разность температур горячего и холодного спаев $\Delta\Theta = \Theta_{\Gamma} - \Theta_{\text{Х}}$, поэтому ее начальное значение равно 0), ЭДС R_{Γ}° термопары (начальное значение равно 0).

Таблица 1

Зависимость сопротивления термометра сопротивления от температуры

$\Theta, ^{\circ}\text{C}$						60
$R^{\circ}, \text{Ом}$						
$R_{\Theta}, \text{Ом}$						

Таблица 2

Зависимость термоЭДС термопары от температуры

$\Theta, ^{\circ}\text{C}$						60
$\Delta\Theta, ^{\circ}\text{C}$						
$E_{\Gamma}^{\circ}, \text{мВ}$						
$E_{\Gamma}, \text{мВ}$						

Тумблером включить питание выбранного шкафа.

По мере нагревания шкафа дополнить табл. 1 и 2 данными температуры Θ в шкафу через каждые 10 $^{\circ}\text{C}$ (начиная с ближайшего

значения, кратного 10), сопротивления R_{Θ}^3 , разности $\Delta\Theta$ и термо-ЭДС R_T^3 .

С целью экономии лабораторного времени закончить опыт при значении $\Theta = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выключить питание шкафа, открыть его дверцу, выключить питание измерительных приборов и установки.

II. Получение теоретических зависимостей сопротивления R_{Θ} и термоЭДС E_T от температуры Θ в шкафу

В данных опытах температура изменяется в одном диапазоне температуры табл. 1 и 2, поэтому получить зависимости можно следующим образом:

1) рассчитать чувствительность термометра сопротивления по данным градуировочных таблиц:

$$K_{\Theta} = \frac{R_1 - R_0}{\Theta_1 - \Theta_0},$$

где Θ_0 , Θ_1 – границы диапазона температур, в пределах которого изменялась температура в опыте, град.;

R_0 , R_1 – значения сопротивления, соответствующие границам температур, Ом.

Записать теоретическую зависимость сопротивления термометра сопротивления от температуры в рассматриваемом диапазоне температур:

$$R_{\Theta} = R_0 + K_{\Theta}(\Theta - \Theta_0).$$

Рассчитать и занести в табл. 1 значения R_{Θ} для двух крайних значений температур в опыте;

2) рассчитать чувствительность термопары по данным градуировочных таблиц:

$$K_T = \frac{E_0 - E_1}{\Theta_0 - \Theta_1},$$

где E_0, E_1 – значения термоЭДС, соответствующие границам температур, мВ.

Записать теоретическую зависимость термоЭДС от разности температур горячего и холодного спаев в рассматриваемом диапазоне температур:

$$E_T = K(\Theta_r - \Theta_x).$$

Рассчитать и занести в табл. 2 значения E_T для двух крайних значений температур в опыте.

III. Построение графиков полученных зависимостей

Построить теоретическую $R_\Theta(\Theta)$ (по двум крайним точкам) и экспериментальную $R_\Theta^3(\Theta)$ зависимости сопротивления термометра сопротивления от температуры в одних координатах (для увеличения масштаба графиков начало отсчета R_Θ можно принять равным 50 Ом).

Построить теоретическую (по двум крайним точкам) и экспериментальные зависимости $E_T(\Delta\Theta)$, $E_T^3(\Theta)$, $E_T^3(\Delta\Theta)$, термоЭДС от температуры и разности $\Delta\Theta = \Theta_r - \Theta_x$ в одних координатах (ось $\Delta\Theta$ поместить под осью Θ).

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Таблицы экспериментальных данных.
3. Графики статических характеристик.
4. Расчеты чувствительности.
5. Вывод с указанием степени соответствия теоретических зависимостей характеру изменения экспериментальных зависимостей, а также возможных причин несовпадения.

Контрольные вопросы

1. Какова классификация датчиков температуры? Каковы их принципы действия?
2. Из каких материалов в основном изготавливают чувствительный элемент металлических термометров сопротивления? Как их маркируют в зависимости от материала?
3. Как рассчитывается сопротивление термометров сопротивления в зависимости от температуры с использованием градуированных характеристик?
4. Из каких материалов изготавливают термопары? Как их маркируют в зависимости от материала?
5. Как рассчитывается термоЭДС с использованием градуировочных характеристик?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматика [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Автоматика» для специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)», направления специальности: 1-74 06 05-01 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика)»; 1-74 06 05-02 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика)» / Минсельхозпрод РБ, БГАТУ, АЭФ, кафедра АСУП ; сост. Е. Е. Мякинник. – Электронные данные (18 636 813 байт). – Минск : БГАТУ, 2018. – Загл. с экрана.

2. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления : учебное пособие / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.

3. Власов, К. П. Теория автоматического управления : учебное пособие / К. П. Власов. – Харьков : Гуманитарный центр, 2007. – 528 с.

4. Власов, К. П. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета : учебное пособие / К. П. Власов. – 2-е изд., испр. и доп. – Харьков : Гуманитарный центр, 2013. – 540 с.

5. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2011. – 464 с.

6. Дьяконов, В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 448 с.

7. Евсюков, В. Н. Нелинейные системы автоматического управления : учебное пособие / В. Н. Евсюков. – Оренбург : ОГУ, 2007. – 172 с.

8. Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления : учебник / А. А. Ерофеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2003. – 302 с.

9. Компьютерные технологии и микропроцессорные средства в автоматическом управлении : учебное пособие / Б. А. Карташов [и др.] ; под ред. Б. А. Карташова. – Ростов н/Д : Феникс, 2013. – 541 с.

10. Коновалов, Б. М. Теория автоматического управления : учебное пособие / Б. М. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – 4-е изд., доп. и перераб. – СПб. : Лань, 2016. – 219 с.

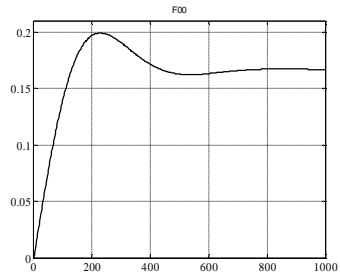
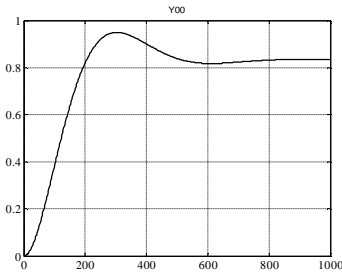
11. Кочетков, В. П. Основы теории управления : учебное пособие / В. П. Кочетков. – Ростов н/Д : Феникс, 2012. – 412 с.
12. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учебник / В. Я. Ротач. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МЭИ, 2004. – 400 с.
13. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления : учебное пособие / Ю. А. Сидоренко. – Минск : БГАТУ, 2007. – 124 с.
14. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления : практикум / Ю. А. Сидоренко, Е. Е. Мякинник. – Минск : БГАТУ, 2012. – 130 с.
15. Теория автоматического управления : учебник / В. Н. Брюханов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 4-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2003. – 272 с.
16. Теория автоматического управления [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Теория автоматического управления» для специальности 1-53 01 01-09 «Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)» / Минсельхозпрод РБ, БГАТУ, АЭФ, кафедра АСУП ; сост. Н. М. Матвейчук. – Электронные данные (94 175 005 байт). – Минск : БГАТУ, 2020. – Загл. с экрана.
17. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Дж. Пиани. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Невский Диалект, 2001. – 533 с.
18. Ощепков, А. Ю. Системы автоматического управления: теория, управление, моделирование в MATLAB : учебное пособие / А. Ю. Ощепков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2013. – 208 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

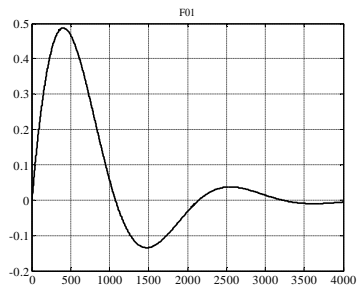
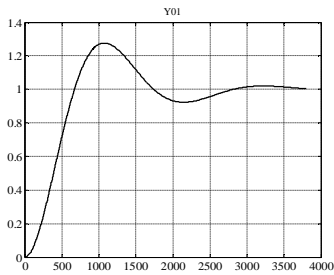
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Варианты индивидуальных заданий по теме «Изучение и оценка качества регулирования линейных систем прямым методом»

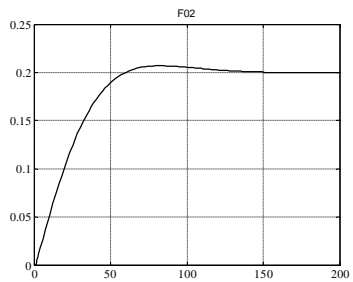
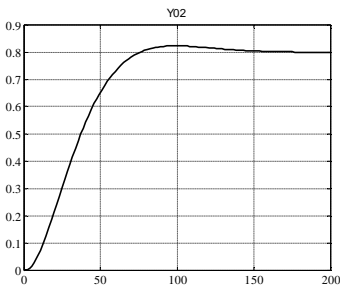
Вариант 1



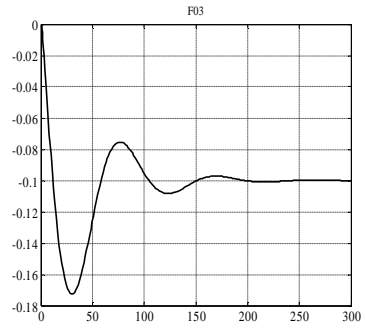
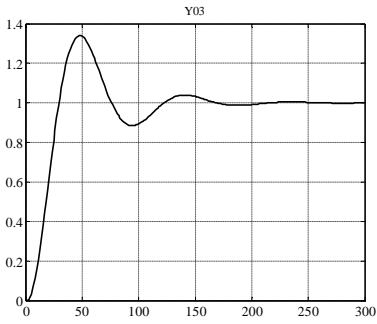
Вариант 2



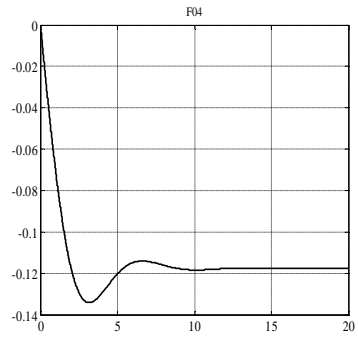
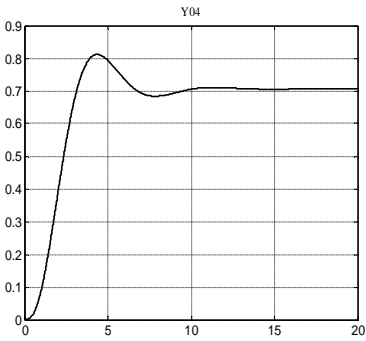
Вариант 3



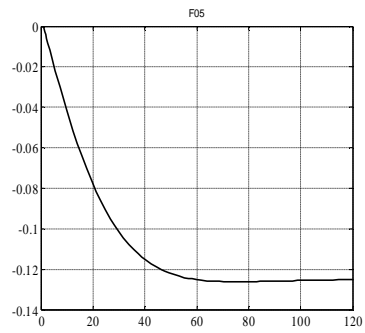
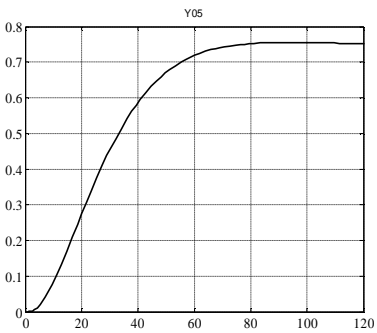
Вариант 4



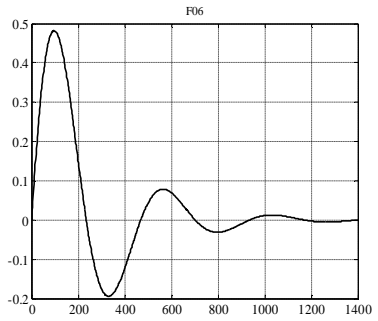
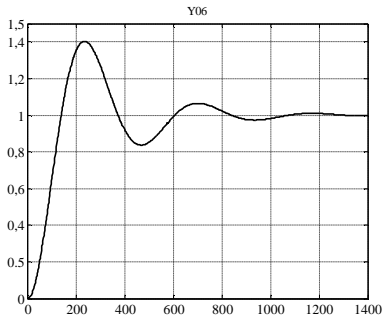
Вариант 5



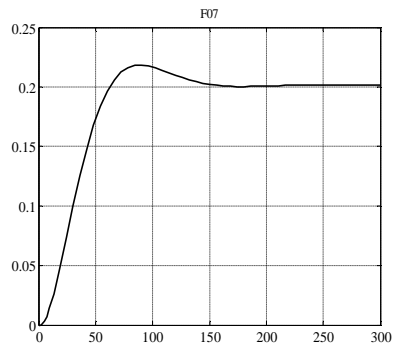
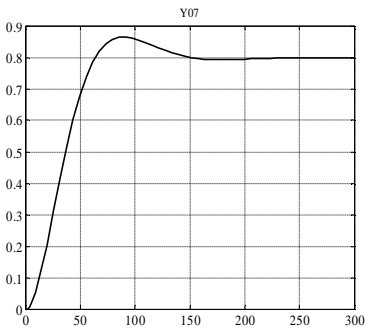
Вариант 6



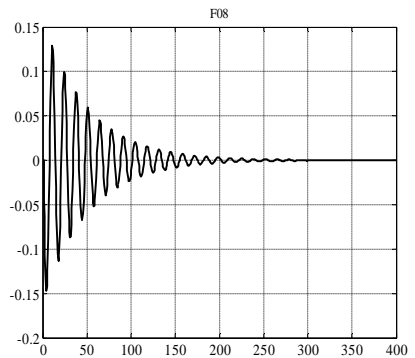
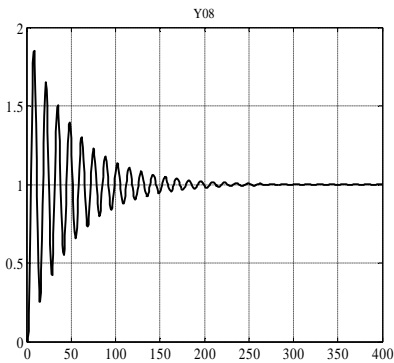
Вариант 7



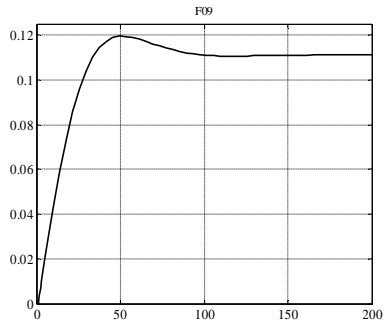
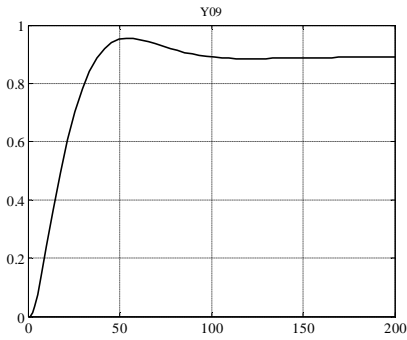
Вариант 8



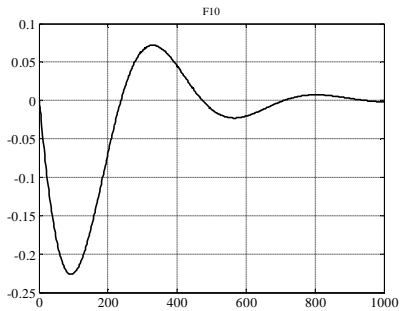
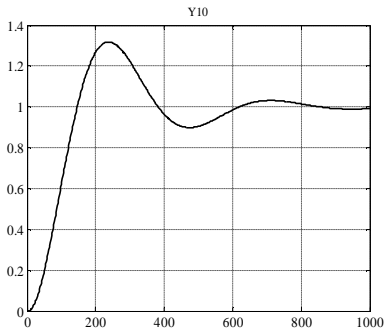
Вариант 9



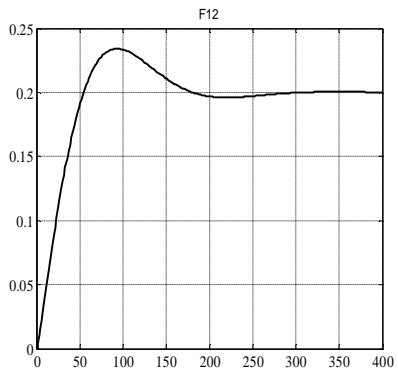
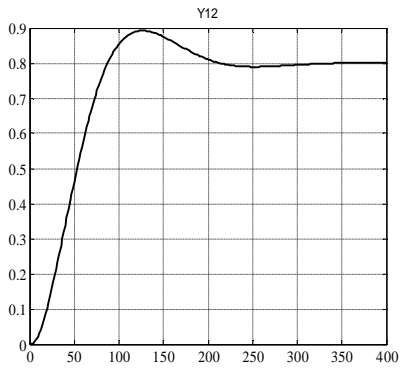
Вариант 10



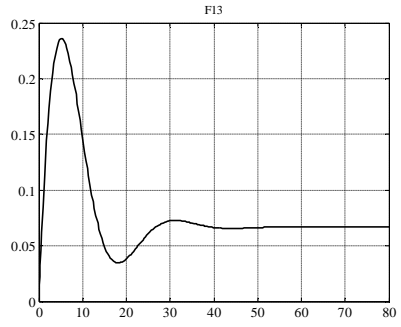
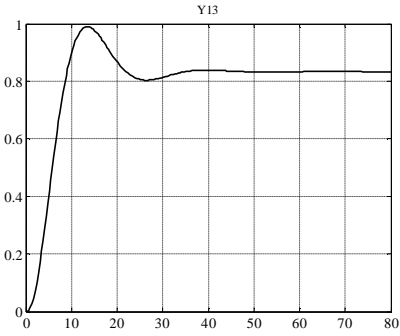
Вариант 11



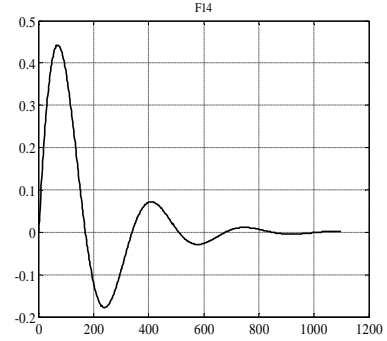
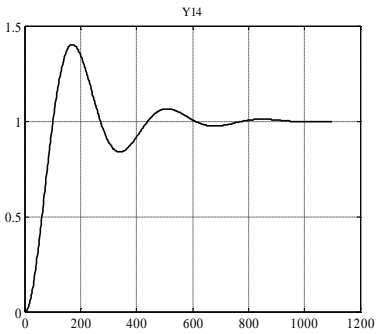
Вариант 12



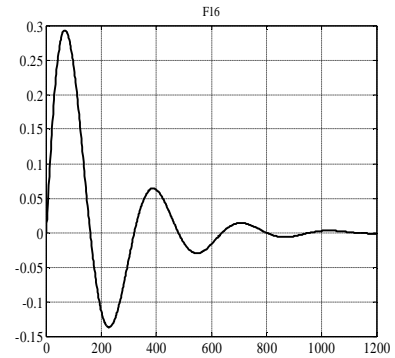
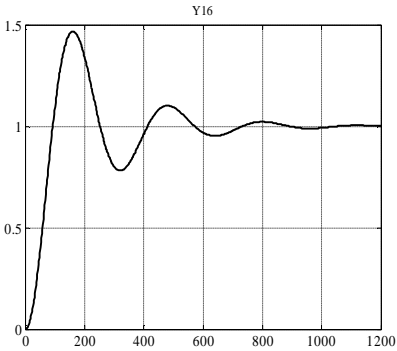
Вариант 13



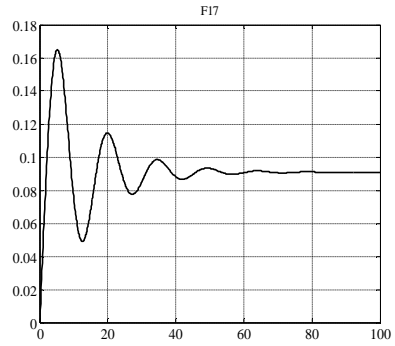
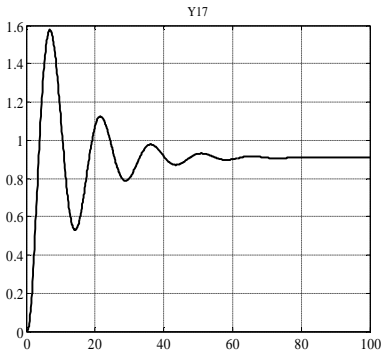
Вариант 14



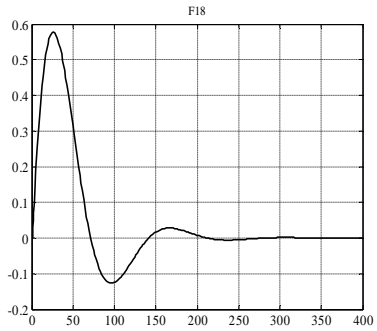
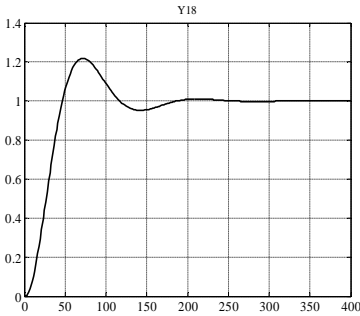
Вариант 15



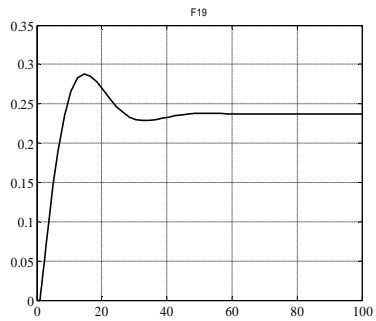
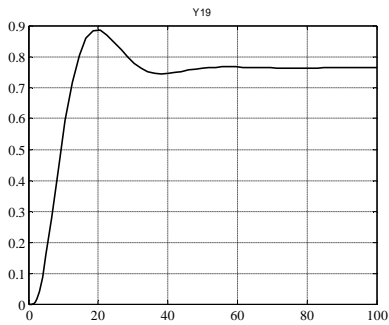
Вариант 16



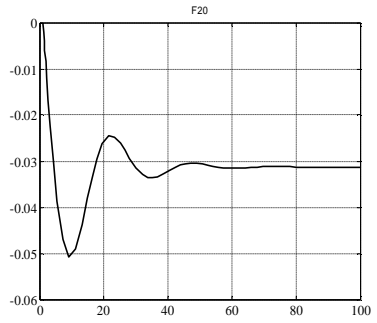
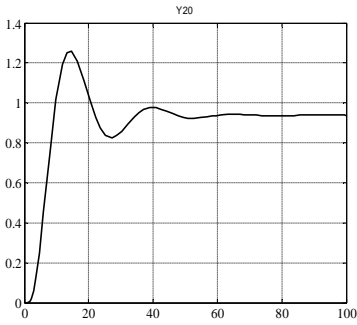
Вариант 17



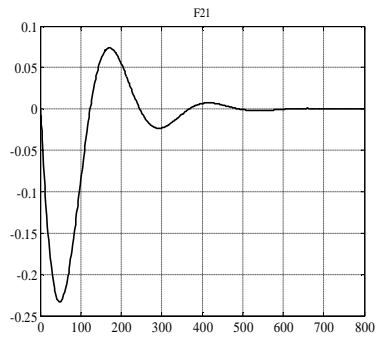
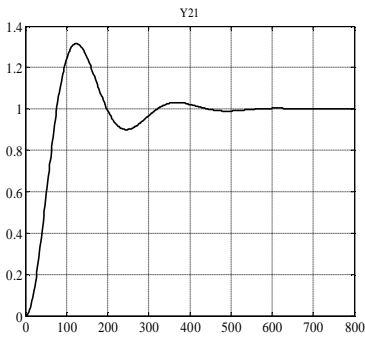
Вариант 18



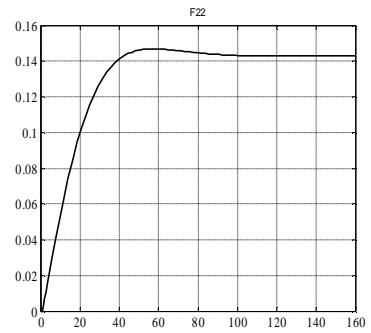
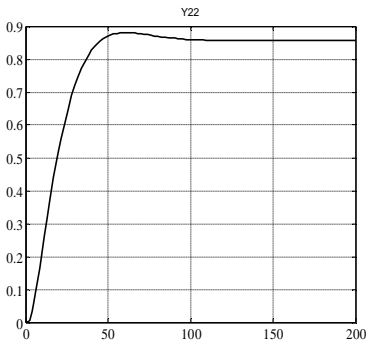
Вариант 19



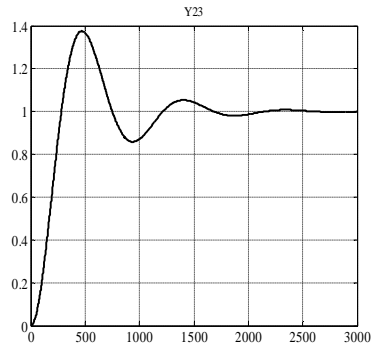
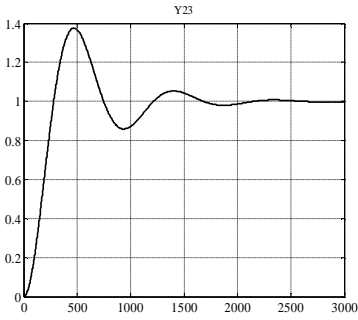
Вариант 20



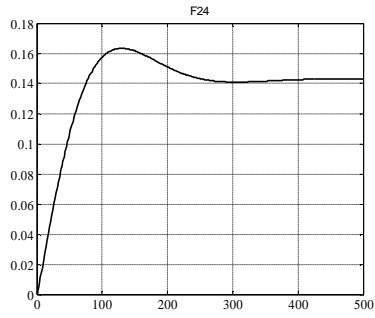
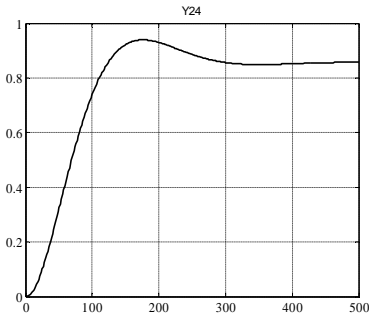
Вариант 21



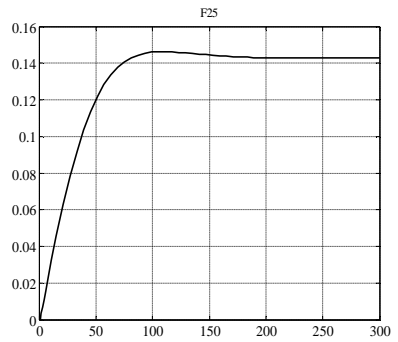
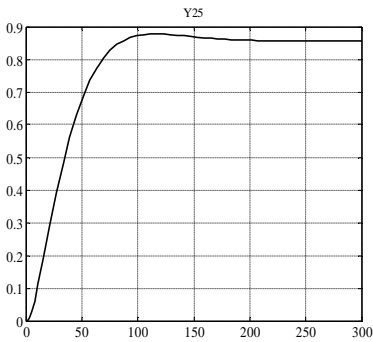
Вариант 22



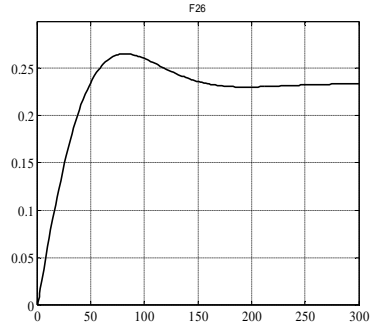
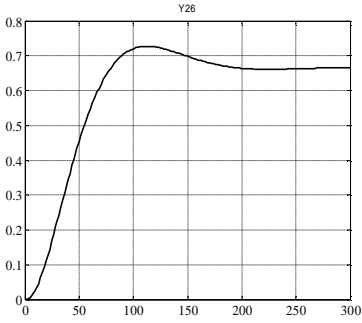
Вариант 23



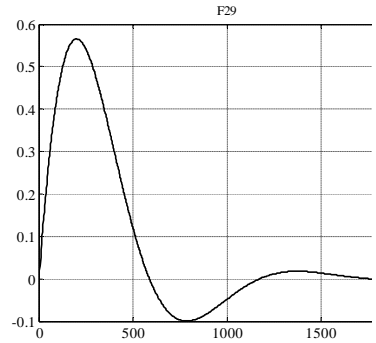
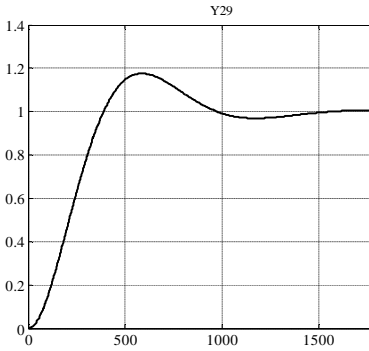
Вариант 24



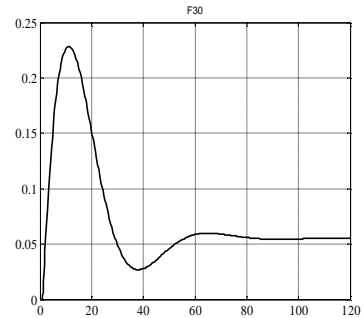
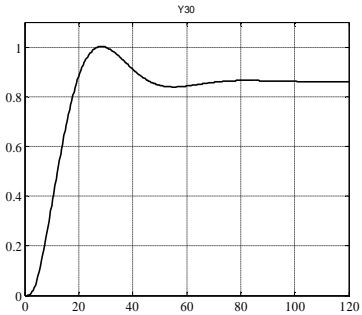
Вариант 25



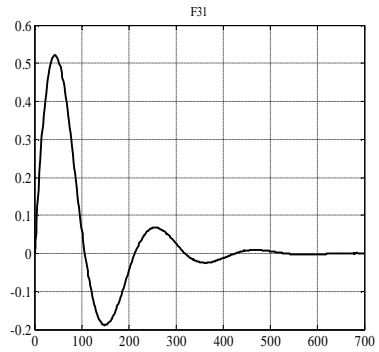
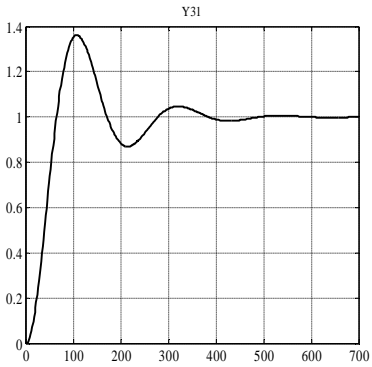
Вариант 26



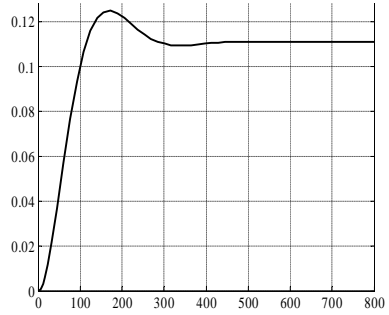
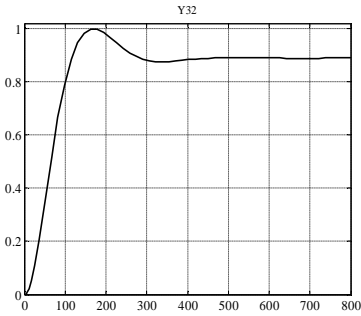
Вариант 27



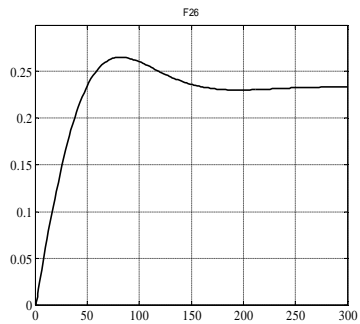
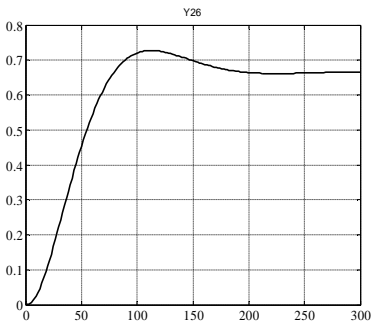
Вариант 28



Вариант 29



Вариант 30



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Варианты для выполнения индивидуальных заданий по темам «Изучение и исследование системы, определение закона регулирования» и «Изучение и определение функционального состава системы автоматического регулирования»

Вариант	Рис.	Параметры											
		K_1	K_2	T_1, c	K_d	T_d, c	K_y	$K_{дв}$	K_p	K_v	$K_{п}$	K_m	$T_{дв}, c$
0	П.16	0,5	1,0	600	0,4	30,0	10	0,017	0,1	25,0	1,0	–	0,5
1	П.7	0,2	1,0	400	0,2	10,0	25	0,004	0,1	25,0	–	0,4	0,5
2	П.11	1,0	1,0	170	0,4	7,0	50	0,018	0,1	50,0	1,0	0,2	0,5
3	П.1	0,1	0,1	–	0,5	0,4	50	0,001	0,2	10,0	1,0	–	0,5
4	П.4	1,2	0,4	5	0,2	0,2	40	0,250	0,1	10,0	0,1	–	0,5
5	П.2	0,1	0,5	100	0,3	1,0	50	0,020	0,2	50,0	0,1	–	0,5
6	П.10	10,0	1,0	100	0,4	10,0	10	0,001	0,1	25,0	–	0,2	0,5
7*	П.9	2,0	1,0	150	0,2	8,0	33	–	–	–	–	0,3	–
8	П.5	0,5	0,4	5	0,2	0,2	40	0,030	0,2	50,0	–	–	0,5
9	П.6	0,2	1,0	200	0,4	10,0	10	2,000	–	10,0	–	0,5	3,0
10	П.3	0,1	0,5	150	0,5	1,0	10	0,005	0,2	40,0	–	–	0,5
11	П.18	30,0	0,6	70	0,2	10,0	100	0,035	0,1	1,0	2,0	–	0,5
12	П.8	0,1	1,0	200	0,4	10,0	25	0,040	0,1	40,0	0,4	1,0	0,5
13	П.20	50,0	0,4	4	0,1	0,1	50	0,002	0,1	50,0	5,0	–	0,5
14	П.12	30,0	1,0	80	1,0	4,0	4	0,025	0,1	1,0	–	–	0,5
15	П.13	30,0	1,0	80	0,4	4,0	20	0,310	0,1	1,0	0,2	–	0,5
16	П.17	30,0	0,6	70	0,4	10,0	25	0,010	0,1	1,0	–	–	0,5
17	П.15	2,0	1,0	20	0,2	2,0	50	0,062	0,2	50,0	2,0	0,5	0,5
18	П.14	1,0	1,0	20	0,2	2,0	20	0,010	0,1	50,0	–	0,5	0,5
19	П.19	10,0	1,0	25	0,2	2,0	5	0,040	0,2	1,0	–6,2	–	0,5
20	П.2	0,5	0,5	50	0,2	0,5	80	0,025	0,2	75,0	0,1	–	0,5
21	П.3	0,5	0,5	50	0,4	0,5	25	0,020	0,1	30,0	–	–	0,5
22	П.13	8,0	1,0	160	0,5	8,0	30	0,110	0,3	5,0	–0,1	–	0,5
23	П.7	0,2	1,0	200	0,4	15,0	10	0,025	0,2	5,0	–	0,5	0,5
24	П.8	1,0	1,0	400	0,2	10,0	10	0,030	0,1	30,0	1,0	1,0	0,5
25	П.6	0,4	1,0	300	0,2	15,0	50	1,000	–	15,0	–	–0,1	5,0
26	П.18	20,0	0,7	100	0,4	10,0	70	0,300	0,1	0,1	–0,2	–	0,5
27	П.10	5,0	1,0	200	0,2	14,0	25	0,200	0,2	10,0	–	0,1	0,5
28	П.4	2,0	0,4	3	0,1	0,3	60	0,800	0,1	20,0	0,2	–	0,5
29	П.12	10,0	1,0	160	5,0	8,0	6	0,100	0,2	0,1	–	–	0,5
30	П.20	25,0	0,4	8	0,1	0,1	10	0,100	0,1	5,0	2,0	–	0,5

* $T_2 = 4$.

САР уровня воды в барабане котла (рис. П.1)

Система обеспечивает поддержание уровня воды в верхнем барабане котла в требуемых пределах. К системе предъявляются высокие требования, поскольку снижение уровня воды или перепитка котла могут привести к серьезным авариям: перегосу экранных труб или забросу воды в магистральный паропровод. Уровень регулируется за счет изменения расхода питающей воды в барабане котла. Основное возмущающее воздействие на котел – изменение расхода пара (изменение нагрузки котла). Датчик уровня – дифманометр с дифтрансформаторным преобразователем сигнала. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

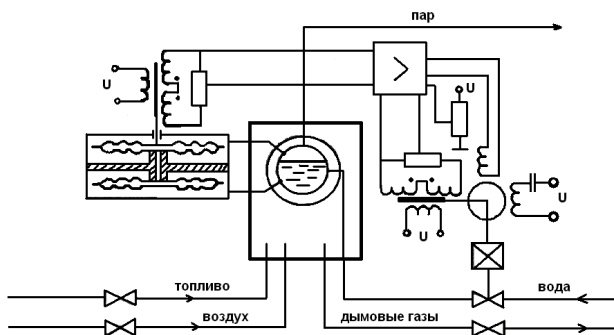


Рис. П.1

САР давления пара в барабане котла (рис. П.2, П.3)

Система поддерживает на заданном уровне давление пара в барабане котла, что необходимо по условиям экономичности и безопасности работы котлоагрегата. Давление регулируется путем изменения подачи топлива в топку. Основное возмущающее воздействие – изменение расхода пара (изменение нагрузки котла). Датчик давления – манометр с дифтрансформаторным преобразователем сигнала. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

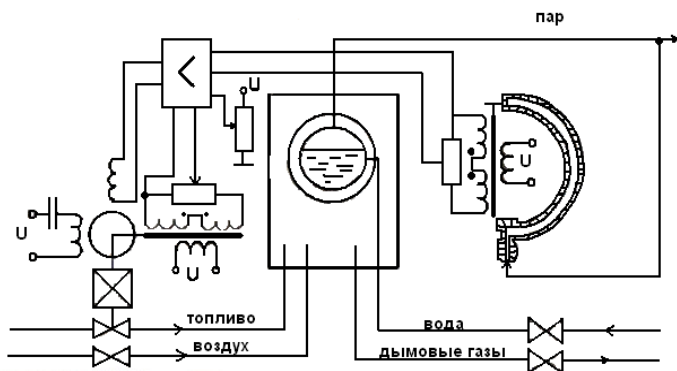


Рис. П.2

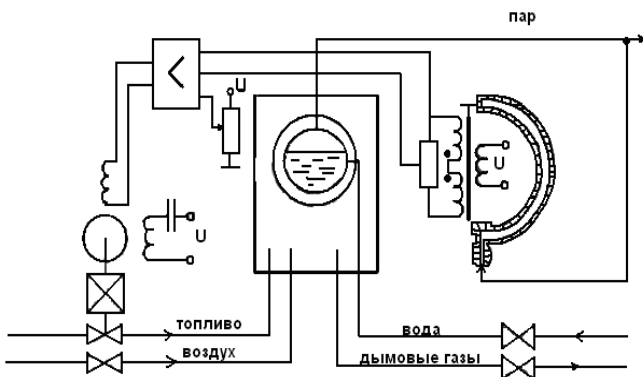


Рис. П.3

САР разрежения в топке (рис. П.4, П.5)

Система стабилизирует разрежение в верхней части топки, что необходимо для нормального топочного режима. Разрежение регулируется за счет изменения производительности дымососа с помощью поворотных заслонок. Основное возмущающее воздействие – изменение расхода воздуха в топку. Датчик разрежения – дифтигометр, соединенный с верхней частью топки. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

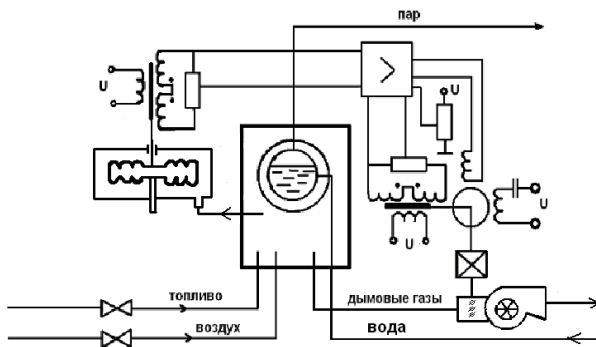


Рис. П.4

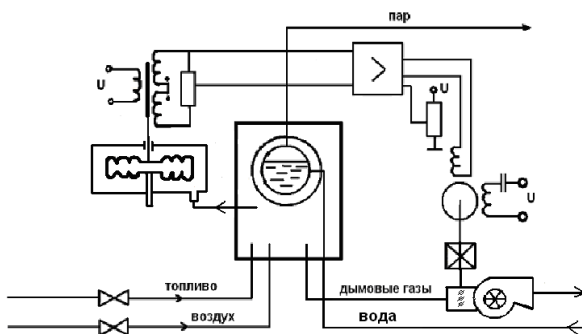


Рис. П.5

САР температуры воздуха в птичнике в летний период (рис. П.6)

Система стабилизирует температуру воздуха за счет изменения воздухообмена. Воздухообмен регулируется изменением частоты вращения вытяжных вентиляторов. Основное возмущающее воздействие – колебание температуры наружного воздуха. Датчик температуры – термометр сопротивления. Устройством сравнения является мост. Система импульсно-фазового управления (СИФУ) совместно с тиристорным блоком и предварительным усилителем образуют управляемый усилитель.

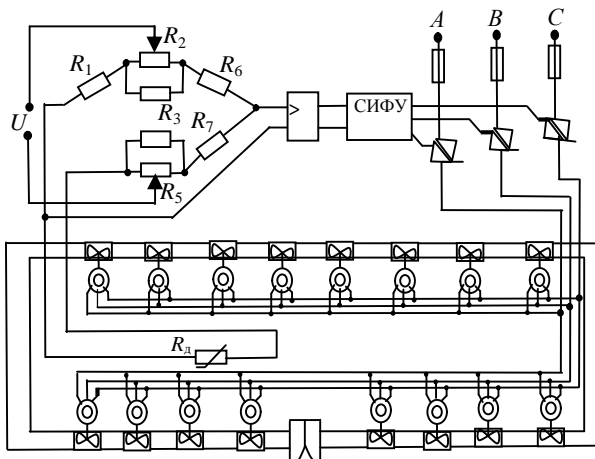


Рис. П.6

САР температуры в животноводческом помещении (рис. П.7, П.8)

Система стабилизирует температуру в помещении в зимний период за счет изменения температуры приточного воздуха, которая регулируется путем изменения расхода горячей воды через водяной калорифер. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры воздуха внутри помещения – термометр сопротивления. Устройством сравнения является мост.

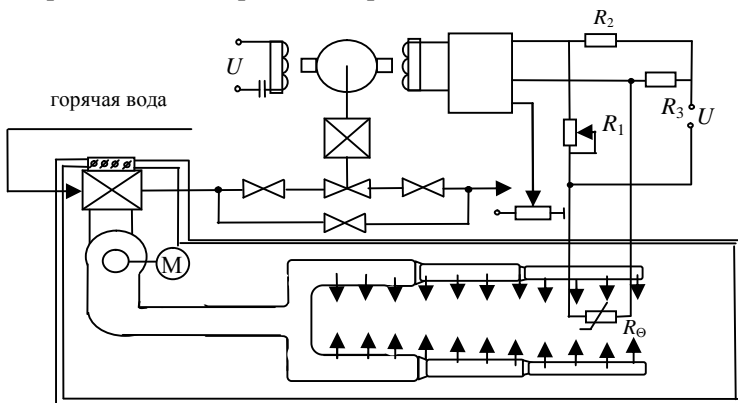


Рис. П.7

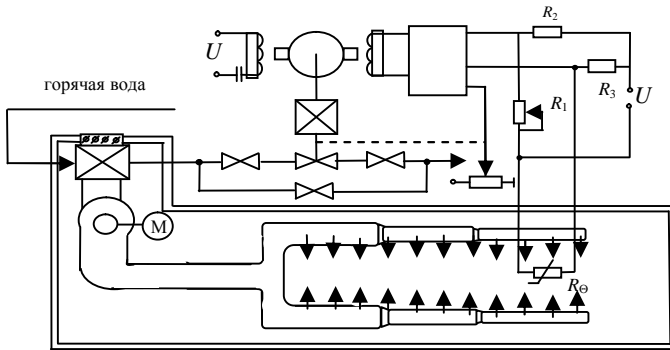


Рис. 11.8

САР температуры в животноводческом помещении (рис. 11.9)

Система стабилизирует температуру в помещении за счет изменения мощности, подаваемой на установленный в приточном воздуховоде электрокалорифер. Датчик температуры – термометр сопротивления. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Устройством сравнения является мост. Система импульсно-фазового управления (СИФУ) совместно с тиристорным блоком и предварительным усилителем образуют управляемый усилитель.

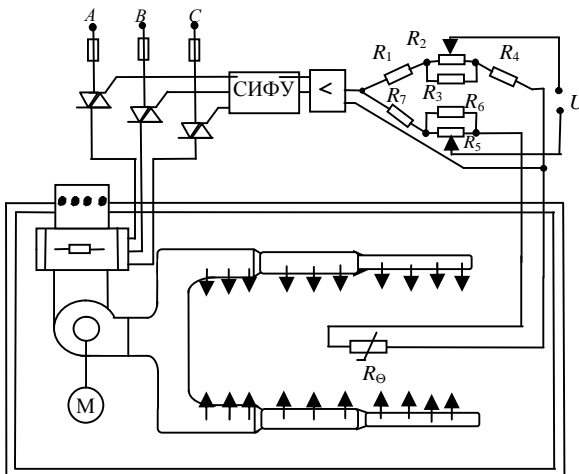


Рис. 11.9

САР температуры приточного воздуха в картофелехранилище (рис. П.10, П.11)

Система стабилизирует температуру приточного воздуха, которым вентилируется в периоды охлаждения и хранения. Температура регулируется путем смешивания холодного воздуха, поступающего через приточную шахту, с более теплым внутренним воздухом хранилища. Смешивание наружного и внутреннего воздуха осуществляется клапаном, установленным в приточном канале. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры – термометр сопротивления. Устройством сравнения является мост.

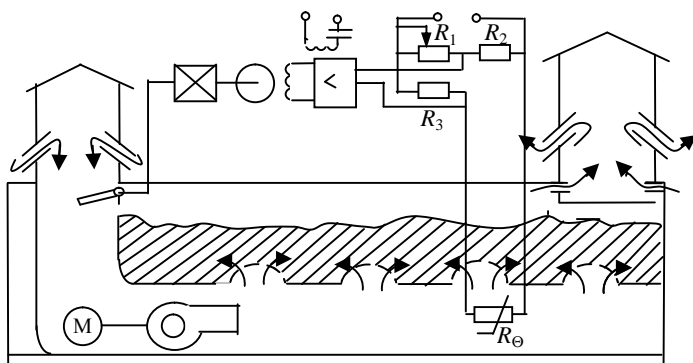


Рис. П.10

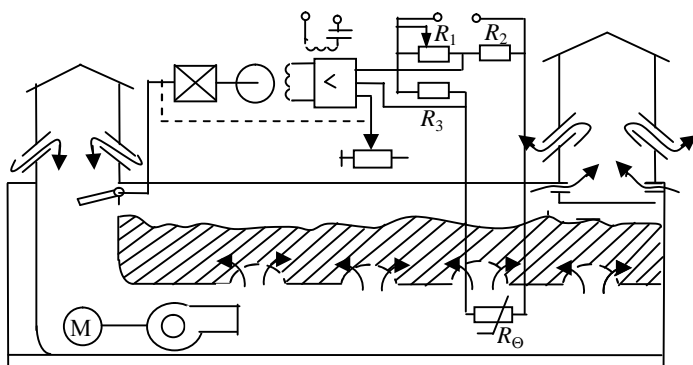


Рис. П.11

САР температуры теплоносителя в агрегате АВМ (рис. П.12, П.13)

Система стабилизирует температуру теплоносителя на выходе из сушильного барабана. Температура регулируется путем изменения количества топлива, подаваемого насосом 1 в теплогенератор 2. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха и влажности высушиваемого продукта. Датчик температуры – термопара. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

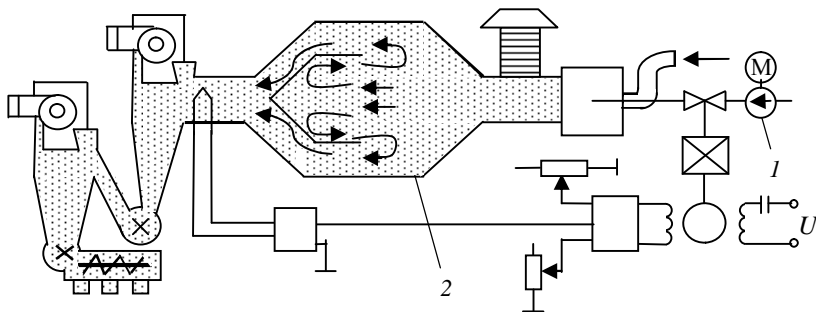


Рис. П.12

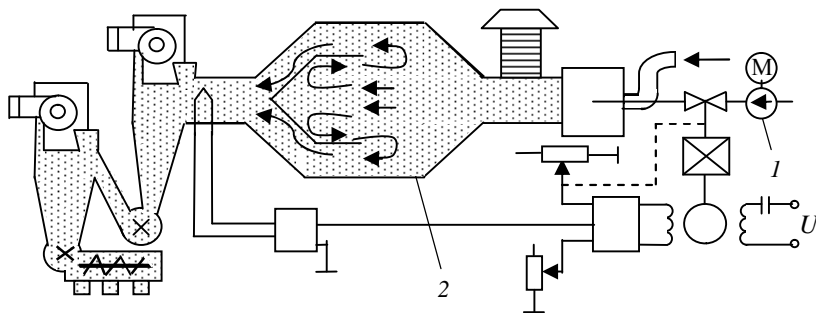


Рис. П.13

САР температуры теплоносителя в шахтной зерносушилке (рис. П.14, П.15)

Система стабилизирует температуру теплоносителя, образованного смесью атмосферного воздуха (Q_a) с топочными газами (Q_r).

Температура регулируется путем изменения соотношения расходов атмосферного воздуха топочных газов с помощью поворотной заслонки. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры – термометр сопротивления, установленный в канале теплоносителя перед входом в сушилку. Устройством сравнения является мост.

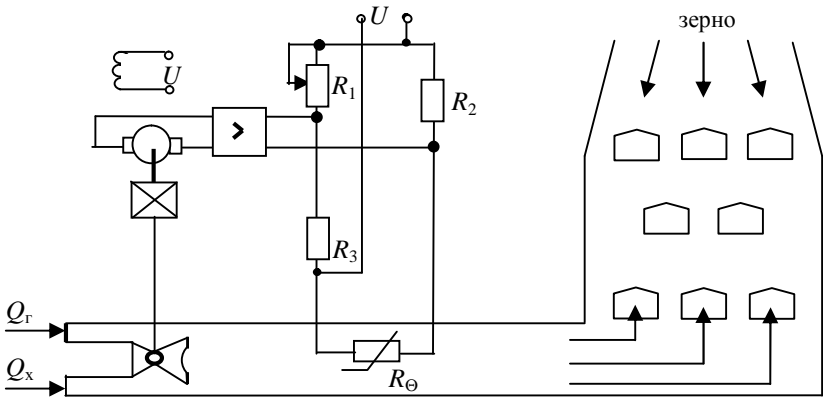


Рис. II.14

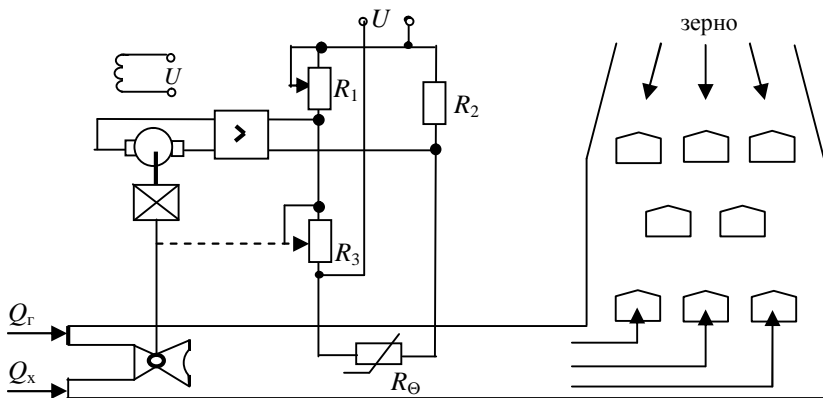


Рис. II.15

САР температуры воздуха в теплице (рис. П.16)

Система стабилизирует температуру воздуха в остекленных блочных теплицах с водяной системой обогрева. Температура воздуха регулируется за счет изменения температуры теплоносителя с помощью смесительного клапана. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры воздуха в теплице – термометр сопротивления. Измерительный блок 1 преобразует величину сопротивления датчика температуры в электрическое напряжение. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

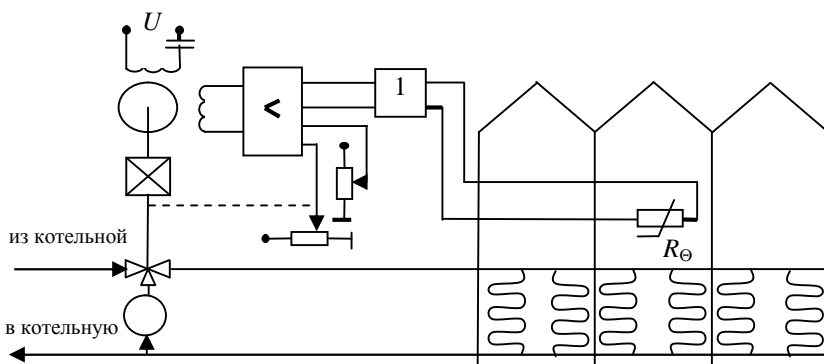


Рис. П.16

САР температуры воздуха в теплице в летний период (рис. П.17, П.18)

Система стабилизирует температуру воздуха в остекленных блочных теплицах в летний период. Температура воздуха регулируется открытием фрамуг. Основное возмущающее воздействие – изменение интенсивности солнечной радиации. Датчик температуры воздуха в теплице – термометр сопротивления. Измерительный блок 2 преобразует величину сопротивления датчика температуры в электрическое напряжение. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

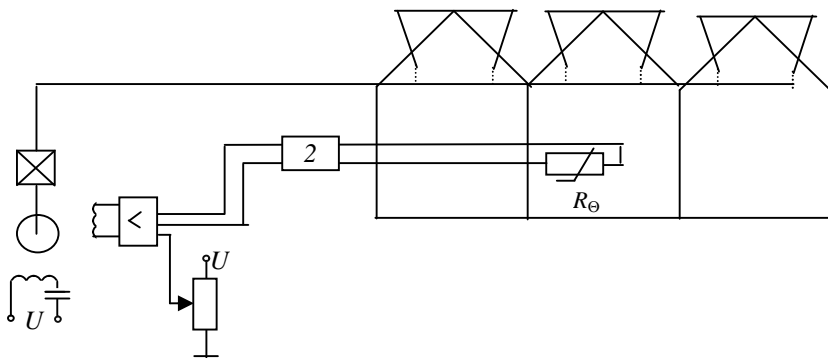


Рис. II.17

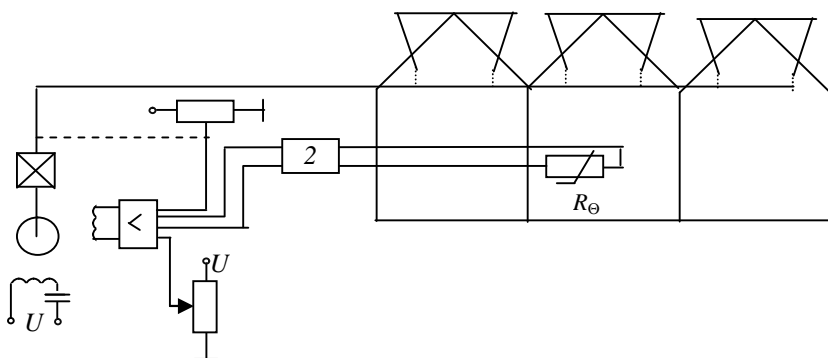


Рис. II.18

САР температуры поливной воды в теплице (рис. II.19)

Температура поливной воды регулируется путем изменения расхода горячей воды через водонагреватель. Возмущающее воздействие – колебание расхода поливной воды, изменение температуры холодной воды, поступающей из котельной. Датчик температуры поливной воды – термометр сопротивления. Измерительный блок 2 преобразует величину сопротивления датчика температуры в электрическое напряжение. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

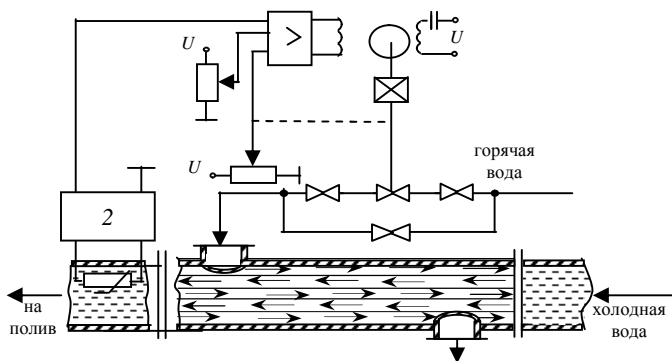


Рис. П.19

САР частоты вращения электродвигателя стенда обкатки ДВС (рис. П.20)

Система стабилизирует частоту вращения приводного асинхронного электродвигателя с фазным ротором, с помощью которого производится обкатка ДВС. Частота вращения регулируется путем изменения сопротивления в цепи ротора с помощью регулируемого жидкостного реостата *1*. Основное возмущающее воздействие – изменение момента сопротивления на вале ДВС в процессе приработки при холодной обкатке. Датчиком регулируемой величины является тахогенератор постоянного тока. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

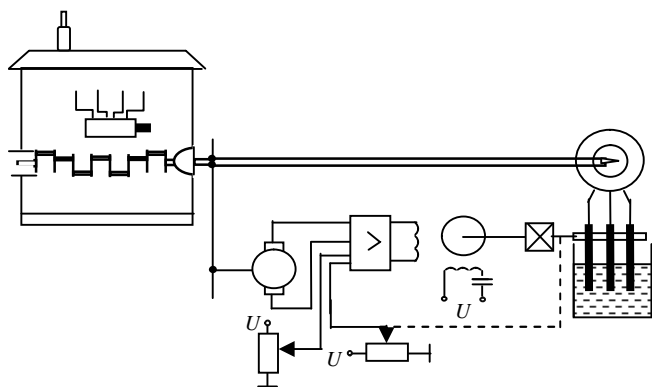


Рис. П.20

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Уравнения объектов управления

1. Паровой котел как объект регулирования уровня воды в барабане:

$$\frac{dH}{dt} = K_1 Q_{\text{в}} - K_2 Q_{\text{п}},$$

где H – уровень воды, м;

$Q_{\text{в}}$ – расход воды в котел, т/ч;

$Q_{\text{п}}$ – расход пара, т/ч.

2. Паровой котел как объект регулирования давления пара в барабане:

$$T_1 \frac{dP}{dt} + P = K_1 Q_{\text{т}} - K_2 Q_{\text{п}},$$

где P – давление пара в барабане, Па;

$Q_{\text{т}}$ – расход топлива, м³/с.

3. Топка котла как объект регулирования разряжения:

$$T_1 \frac{dP_{\text{т}}}{dt} + P_{\text{т}} = K_1 Q_{\text{д}} - K_2 Q_{\text{возд}},$$

где $P_{\text{т}}$ – разряжение в топке, Па;

$Q_{\text{д}}$ – производительность дымососа, м³/с;

$Q_{\text{возд}}$ – расход воздуха в топку, м³/с.

4. Сельскохозяйственное помещение как объект регулирования температуры с помощью приточной вентиляции:

а) с водокалорифером:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta_{\text{т}} = K_1 Q_{\text{в}} + K_2 \Theta_{\text{н}};$$

б) с электрокалорифером:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 P_n + K_2 \Theta_n,$$

где Θ – температура воздуха в помещении, град.;

Θ_n – температура наружного воздуха, град.;

P_n – электрическая мощность, подаваемая на электрокалорифер, кВт.

5. Птичник как объект регулирования температуры с помощью вытяжной вентиляции:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 L + K_2 \Theta_n,$$

где L – воздухообмен, м³/ч.

6. Теплица как объект регулирования температуры воздуха:

а) с системой водяного отопления:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 \Theta_b + K_2 \Theta_n;$$

б) с системой вентиляции:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 \varphi_\phi + K_2 E,$$

где E – интенсивность солнечной радиации, клк;

Θ_b – температура горячей воды в системе отопления, град.;

φ_ϕ – угол открытия фрамуг, рад.

7. Водонагреватель скоростной:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 Q_b + K_2 \Theta_x,$$

где Θ – температура воды на выходе из водонагревателя, град.;

Θ_x – температура холодной воды на входе в водонагреватель, град.;

Q_b – расход горячей воды через нагреватель, м³/ч.

8. Сушильный барабан агрегата АВМ (вместе с теплогенератором):

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 Q_T + K_2 \Theta_n,$$

где Θ – температура теплоносителя на выходе из барабана, град.;

Θ_n – температура наружного воздуха, град.;

Q_T – подача топлива в теплогенератор, т/ч.

9. Канал теплоносителя в шахтной зерносушилке:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 Q_o + K_2 \Theta_n,$$

где Θ – температура теплоносителя на выходе из канала, град.;

Θ_n – температура наружного воздуха, град.;

Q_o – степень смешивания холодного воздуха и горячих газов на входе в канал, %.

10. Канал приточного воздуха в картофелехранилище:

$$T_1 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = K_1 Q_o + K_2 \Theta_n,$$

где Q_o – степень смешивания холодного и рециркуляционного воздуха на входе в канал, %.

11. Трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором:

$$T_1 \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_1 R_\phi - K_2 M_c,$$

где ω – частота вращения ротора, с^{-1} ;

R_ϕ – сопротивление между фазными обмотками ротора, Ом;

M_c – момент сопротивления на вале ротора, Н·м.

12. Электродвигатель постоянного тока с якорным управлением:

$$T_{\text{дв}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = K_{\text{дв}} U,$$

где U – напряжение управления, В;

φ – угол поворота выходного вала, рад.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Уравнения технических средств автоматизации

1. Манометр, дифманометр, дифтягометр (с дифтрансформаторным преобразователем) для измерения давления жидкости или газа, уровня жидкости и разряжения соответственно:

$$T_d \frac{dU_m}{dt} + U_m = K_d X,$$

где X – измеряемая величина;

U_m – амплитуда выходного напряжения преобразователя, В.

2. Термометр сопротивления платиновый или медный:

$$T_d \frac{dR}{dt} + R = K_d \Theta;$$

совместно с измерительным блоком:

$$T_d \frac{dU}{dt} + U = K_d \Theta,$$

где Θ – измеряемая температура, град.;

R – сопротивление датчика, Ом;

U – выходное напряжение измерительного блока, В.

3. Термопара (вместе с измерительным усилителем):

$$T_d \frac{dU_t}{dt} + U_t = K_d \Theta,$$

где U_t – выходное напряжение измерительного усилителя, В.

4. Тахогенератор постоянного тока (вместе с приводным редуктором):

$$T_d \frac{dU_{\text{тр}}}{dt} + U_{\text{тр}} = K_d \omega,$$

где ω – измеряемая частота вращения, с^{-1} ;
 $U_{\text{тр}}$ – выходное напряжение, В.

5. Смесительный вентиль для жидкостей:

$$\Theta_b = K_b \varphi,$$

где Θ – температура жидкости после смесителя, град.;
 φ – угол поворота регулирующего элемента вентиля, рад.

6. Измерительная мостовая схема:

$$U_m = K_m (R_0 - R_d),$$

где R_0 – сопротивление резистора (задатчика), Ом;

R_d – сопротивление резистора (датчика контролируемой величины), Ом;

U_m – выходное напряжение (на переменном токе – амплитуда выходного напряжения), В.

7. Электронный усилитель постоянного и переменного тока:

$$U_2 = K_y U_1,$$

где U_2 – амплитуда выходного напряжения (на переменном токе).

8. Тиристорный регулятор:

а) напряжения:

$$U_T = K_y U_{\text{вх}};$$

б) мощности (вместе с преусилителем):

$$P_T = K_y U_{\text{вх}},$$

где U_T , $U_{\text{вх}}$ – входное и выходное напряжения, В;
 P_T – выходная мощность, Вт.

9. Двухфазный асинхронный электродвигатель с амплитудным управлением:

$$T_{\text{дв}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = K_{\text{дв}} U_M,$$

где U_M – амплитуда напряжения управления, В;
 φ – угол поворота выходного вала, рад.

10. Трехфазный регулируемый асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором:

$$T_{\text{дв}} \frac{d\varphi}{dt} + \omega = K_{\text{дв}} U,$$

где U – фазное напряжение питания электродвигателя, В;
 ω – угловая частота вращения ротора, с^{-1} .

11. Электродвигатель постоянного тока с якорным управлением:

$$T_{\text{дв}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = K_{\text{дв}} U,$$

где U – напряжение управления, В;
 φ – угол поворота выходного вала, рад.

12. Редуктор (рычажный механизм передачи):

$$S_2 = K_p S_1;$$

$$\varphi_2 = K_p \varphi_1,$$

где S_1, S_2 – входное и выходное перемещения, м;

φ_1, φ_2 – входной и выходной углы поворота, рад.

13. Дифтрансформаторный преобразователь перемещения или угла поворота:

$$U_m = K_n S;$$

$$U_m = K_n \varphi,$$

где S – измеряемое перемещение, м;

φ – измеряемый угол поворота, рад;

U_m – амплитуда выходного напряжения, В.

14. Осевой вентилятор:

$$L = K_b \omega,$$

где ω – угловая частота вращения, c^{-1} ;

L – производительность, $m^3/ч$.

15. Фрамуги в теплице:

$$\varphi_\phi = K_b \varphi_p,$$

где φ_ϕ – угол открытия фрамуг, рад;

φ_p – угол поворота приводного редуктора, рад.

16. Регулируемый вентиль для жидкостей и газов:

$$Q = K_b S;$$

$$Q = K_b \varphi,$$

где S – перемещение регулирующего элемента вентиля, м;
 φ – угол поворота регулирующего элемента вентиля, рад;
 Q – расход жидкости или газа через вентиль, м³/с.

17. Дымосос:

$$Q_d = K_v \varphi,$$

где φ – угол поворота дроссельных заслонок, рад;
 Q_d – производительность дымососа, м³/с.

18. Смесительный клапан для воздуха и газов:

$$Q_0 = K_v \varphi_3,$$

где φ_3 – угол поворота заслонки клапана, рад;
 Q_0 – степень смешивания воздуха и газов, %.

19. Жидкостный реостат:

$$R_\varphi = K_v \varphi,$$

где φ – угол поворота пластин реостата, рад;
 R_φ – сопротивление между фазными обмотками ротора управляемого двигателя, Ом.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

АВТОМАТИКА

Учебно-методическое пособие

Составитель **Мякинник** Елена Евгеньевна

Ответственный за выпуск *Н. М. Матвейчук*

Редактор *Д. А. Значёнок*

Корректор *Д. А. Значёнок*

Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*

Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 10.11.2023. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 20,92. Уч.-изд. л. 16,36. Тираж 99 экз. Заказ 17.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.