

Министерство сельского хозяйства РФ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Мичуринский государственный аграрный университет»



А.С. Гордеев

ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ

**«Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по агроинженерному образованию в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению «Агроинженерия»**



Мичуринск – наукоград РФ
2006

УДК 629.7.05.06:531.781

ББК 32.965я73

Г11

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **А.И. Учеваткин**, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода Московского агроинженерного университета им. В.П. Горячкина;

доктор технических наук, профессор **А.И. Викторов**, заведующий кафедрой электрификации и автоматизации Российского государственного аграрного университета.

Г11 **Основы автоматики: Учебное пособие для вузов / А.С. Гордеев.**
– Мичуринск.: МичГАУ, 2006. – 220 с.
ISBN 5-94664-088-7

В учебном пособии изложены общие сведения о системах управления и элементной базе автоматики, рассмотрены основы теории систем управления и технические средства автоматики на основе электроники и микропроцессорной техники, а также приведены примеры использования современных микропроцессорных приборов для построения систем автоматизации отдельных технологических процессов.

Учебное пособие создано в соответствии со стандартом второго поколения по дисциплине “Автоматика” для направления 660300 «Агроинженерия».

УДК 629.7.05.06:531.781

ББК 32.965я73

ISBN 5-94664-088-7

©Издательство Мичуринского государственного аграрного университета, 2006

Введение

Чтобы различные технические устройства выполняли требуемые функции, необходимо организовать тот или иной процесс управления. Процесс управления может быть реализован "ручным" способом или с помощью совокупности технических средств, которые, в общем случае, называют системами автоматического управления,

Системы автоматического управления в сельскохозяйственном производстве и переработке продукции призваны управлять режимами работы оборудования, теплиц, холодильных установок и т.п. Особенностью этих систем является работа с биологическими объектами, животными, растениями и продуктами их переработки.

Необходимость внедрения и развитие систем автоматического управления способствовали созданию отдельного научно-технического направления, которое включает элементную базу, теоретические вопросы анализа и синтеза, вопросы проектирования и обеспечения требуемой надёжности. Вместе с тем это отдельное направление имеет тесную связь с электроникой, электротехникой, математикой и другими разделами науки и техники. В развитие систем автоматики внесли вклад ученые Н.Н.Боголюбов, И.Ф.Бородин, Н.Винер, Н.Е.Жуковский, А.Н.Колмогоров, Н.М.Крылов, А.В.Михайлов, Г.Найквист, В.Д.Шеповалов, С.А.Чаплыгин, и многие другие ученые.

Предметом дисциплины "Автоматика" является – теоретические основы и технические средства автоматики. Она базируется на общенаучных и общетехнических дисциплинах: математике, физике, химии, электротехнике. Изучение дисциплины является составной частью изучения общепрофессиональных дисциплин.

Цель дисциплины – активно закрепить, обобщить, углубить и расширить знания, полученные при изучении базовых дисциплин, приобрести новые знания и сформировать умения и навыки, необходимые для изучения специальных инженерных и технологических дисциплин и для последующей инженерной деятельности.

Задачи дисциплины заключаются в изучении основ теории автоматического управления и регулирования сельскохозяйст-

венными и промышленными объектами, принципов построения технических средств для автоматизации процессов.

Студент, изучивший курс "Автоматика", должен знать общие сведения о системах и элементах автоматики, принципы построения систем автоматического управления, датчиков, усилительных и исполнительных элементов, регуляторов, архитектуру микропроцессорных систем, основы теории автоматического управления.

Студент по окончании изучения курса должен уметь владеть методами расчетов параметров датчиков; собрать и отладить автоматическое устройство, включающее источник энергопитания, устройство управления и исполнительный механизм.

Целью данного учебного пособия является изучение круга вопросов, которые представляют собой теории автоматического управления и регулирования, а также технические средства реализации систем управления, включая микропроцессорные приборы и наиболее употребляемые схемы автоматики.

Учебное пособие создано в соответствии со стандартом второго поколения по дисциплине "Автоматика" для направления 660300 «Агроинженерия». Оно состоит из трех частей – Основы теории автоматического управления и Технические средства автоматики, включающих в себя 14 глав.

Часть 1. Основы теории автоматического управления

Глава 1. Принципы построения автоматизированных производств

1.1. Автоматизация производства

Автоматика – отрасль науки и техники, охватывающая теорию и устройства средств и систем автоматического управления машинами и технологическими процессами. Она возникла в 19 веке с появлением механизированного производства на базе прядильных и ткацких станков, паровых машин и др., которые заменили ручной труд и дали возможность повысить его производительность.

Автоматизации всегда предшествует процесс полной механизации – такого производственного процесса, в котором человек не затрачивает на выполнение операций физической силы.

По мере развития техники функции управления процессами и машинами расширились и усложнялись. Человек уже во многих случаях не был в состоянии управлять механизированным производством без специальных дополнительных устройств. Это обусловило возникновение автоматизированного производства, при котором работники высвобождаются не только от физического труда, но и от функций контроля за машинами, оборудованием, производственными процессами и операциями, а также управления ими.

Под автоматизацией производственных процессов понимают комплекс технических мероприятий по разработке новых технологических процессов и создание производства на основе высокопроизводительного оборудования, выполняющего все основные операции без непосредственного участия человека.

Автоматизация способствует значительному повышению производительности труда, улучшению качества продукции и условий труда людей.

В сельском хозяйстве, пищевой и перерабатывающей промышленности автоматизируется контроль и управление температурой, влажностью, давлением, регулирование скорости и переме-

щение, сортирование по качеству, упаковка и многие другие процессы и операции, обеспечивая более высокую их эффективность, экономию труда и средств.

Автоматизированные производства по сравнению с не автоматизированными обладают определенной спецификой:

- для повышения эффективности они должны охватывать большее количество разнородных операций;

- необходима тщательная проработка технологии, анализ объектов производства, маршрутов движения и операций, обеспечения надежности процесса с заданным качеством;

- при широком ассортименте выпускаемой продукции и сезонности работы технологические решения могут быть многовариантными;

- повышаются требования к четкой и слаженной работе различных служб производства.

При проектировании автоматизированного производства должны быть соблюдены следующие принципы:

1. Принцип завершенности. Следует стремиться к выполнению всех операций в пределах одной автоматизированной производственной системы без промежуточной передачи полуфабрикатов в другие подразделения. Для реализации этого принципа необходимо обеспечить:

- технологичность продукта, т.е. на его изготовление должно расходоваться минимальное количество материалов, времени и средств;

- унификацию методов обработки и контроля продукта;

- расширение типажа оборудования с повышенными технологическими возможностями для обработки нескольких видов сырья или полуфабрикатов.

2. Принцип малооперационной технологии. Количество операций промежуточной обработки сырья и полуфабрикатов должны быть сведены к минимуму, а маршруты их подачи - оптимизированы.

3. Принцип малолюдной технологии. Обеспечение автоматической работы на протяжении всего цикла изготовления продукта. Для этого необходимо стабилизировать качество входного сырья, повысить надежность оборудования и информационного обеспечения процесса.

4. Принцип безотладочной технологии. Объект управления не должен требовать дополнительных наладочных работ после того, как он пущен в эксплуатацию.

5. Принцип оптимальности. Все объекты управления и службы производства подчинены единому критерию оптимальности, например, выпускать продукцию только высшего качества.

6. Принцип групповой технологии. Обеспечивает гибкость производства, т.е. возможность перехода с выпуска одного продукта на выпуск другого. В основе принципа лежит общность операций, их сочетаний и рецептур.

Для серийного и мелкосерийного производства характерно создание автоматизированных систем из универсального и агрегатного оборудования с межоперационными емкостями. Это оборудование в зависимости от перерабатываемого продукта может переналаживаться.

Для крупносерийного и массового выпуска продукции автоматизированное производство создается из специального оборудования, объединенного жесткой связью. В подобных производствах применяется высокопроизводительное оборудование, например, роторное для разлива жидкостей в бутылки или пакеты.

Для функционирования оборудования необходим промежуточный транспорт для сырья, полуфабрикатов, компонентов, различных сред.

В зависимости от промежуточного транспорта автоматизированные производства могут быть:

- со сквозной транспортировкой без перестановки сырья, полуфабриката или сред;
- с перестановкой сырья, полуфабрикатов или сред;
- с промежуточной емкостью.

По видам компоновки оборудования (агрегатирования) различают автоматизированные производства:

- однопоточные;
- параллельного агрегатирования;
- многопоточные.

В однопоточном оборудовании расположено последовательно по ходу выполнения операций. Для увеличения производительности однопоточного производства операция может выполняться на однотипном оборудовании параллельно.

В многопоточном производстве каждый поток выполняет аналогичные функции, но работает независимо один от другого.

Особенностью сельскохозяйственного производства и переработки продукции является быстрое снижение ее качества, например, после забоя скота или съема плодов с деревьев. Это требует такого оборудования, которое имело бы высокую мобильность (возможность выпуска широкого ассортимента продуктов из однотипного сырья и переработки различных видов сырья на однотипном оборудовании).

Для этого создаются переналаживаемые производственные системы, обладающие свойством автоматизированной переналадки. Организационным модулем таких систем является производственный модуль, автоматизированная линия, автоматизированный участок или цех.

Производственным модулем называют систему, состоящую из единицы технологического оборудования, оснащенного автоматизированным устройством программного управления и средствами автоматизации технологического процесса, автономно функционирующую и имеющую возможность встраиваться в систему более высокого уровня (рис.1.1).

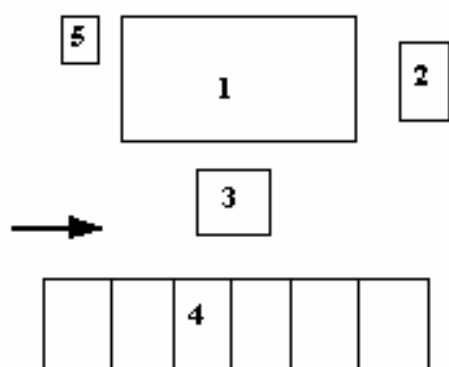


Рисунок 1.1 – Структура производственного модуля: 1- оборудование для выполнения одной или нескольких операций; 2- управляющее устройство; 3- погрузочно-разгрузочное устройство; 4- транспортно-накопительное устройство (промежуточная емкость); 5- контрольно-измерительная система.

Производственный модуль может включать в себя, например, сушильную камеру, контрольно-измерительную систему, погрузочно-разгрузочную и транспортную системы с локальным управлением или смесительную установку с аналогичным добавочным оборудованием.

Частным случаем производственного модуля является *производственная ячейка* – комбинация модулей с единой системой измерения режимов работы оборудования, транспортно-

накопительной и погрузо-разгрузочной системами (рис.1.2). Производственная ячейка может встраиваться в системы более высокого уровня.

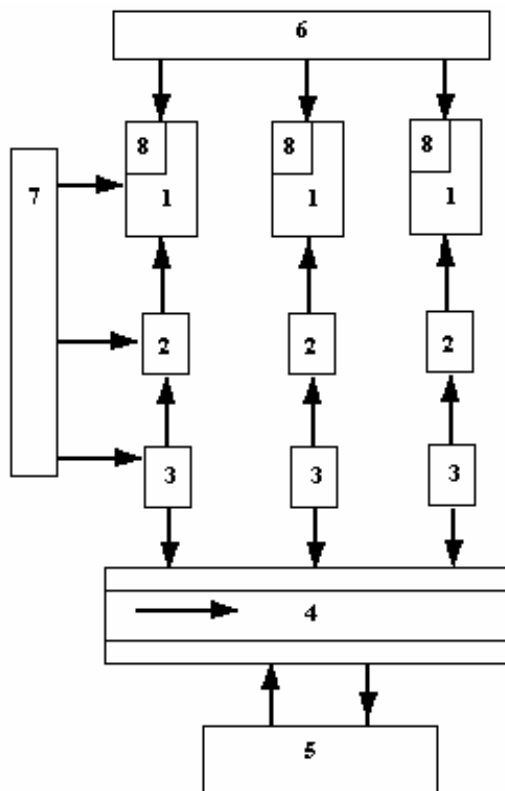


Рисунок 1.2 – Структура производственной ячейки: 1- оборудования для выполнения одной или нескольких операций; 2- приемный бункер; 3- погрузочно-разгрузочное устройство; 4- конвейер; 5- промежуточная емкость; 6- управляющий компьютер; 7- контрольно-измерительная система.

Автоматизированная линия - переналаживаемая система, состоящая из нескольких производственных модулей или ячеек, объединенных единой транспортно-складской системой и системой автоматического управления технологического процесса (АСУ ТП).

Оборудование автоматизированной линии расположено в принятой последовательности выполнения технологических операций. Структура автоматизированной линии изображена на рис.1.3.

В отличие от автоматизированной линии на переналаживаемом автоматизированном участке предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования. Линия и участок могут иметь отдельно функционирующие единицы технологического оборудования. Структура автоматизированного участка приведена на рис.1.4.

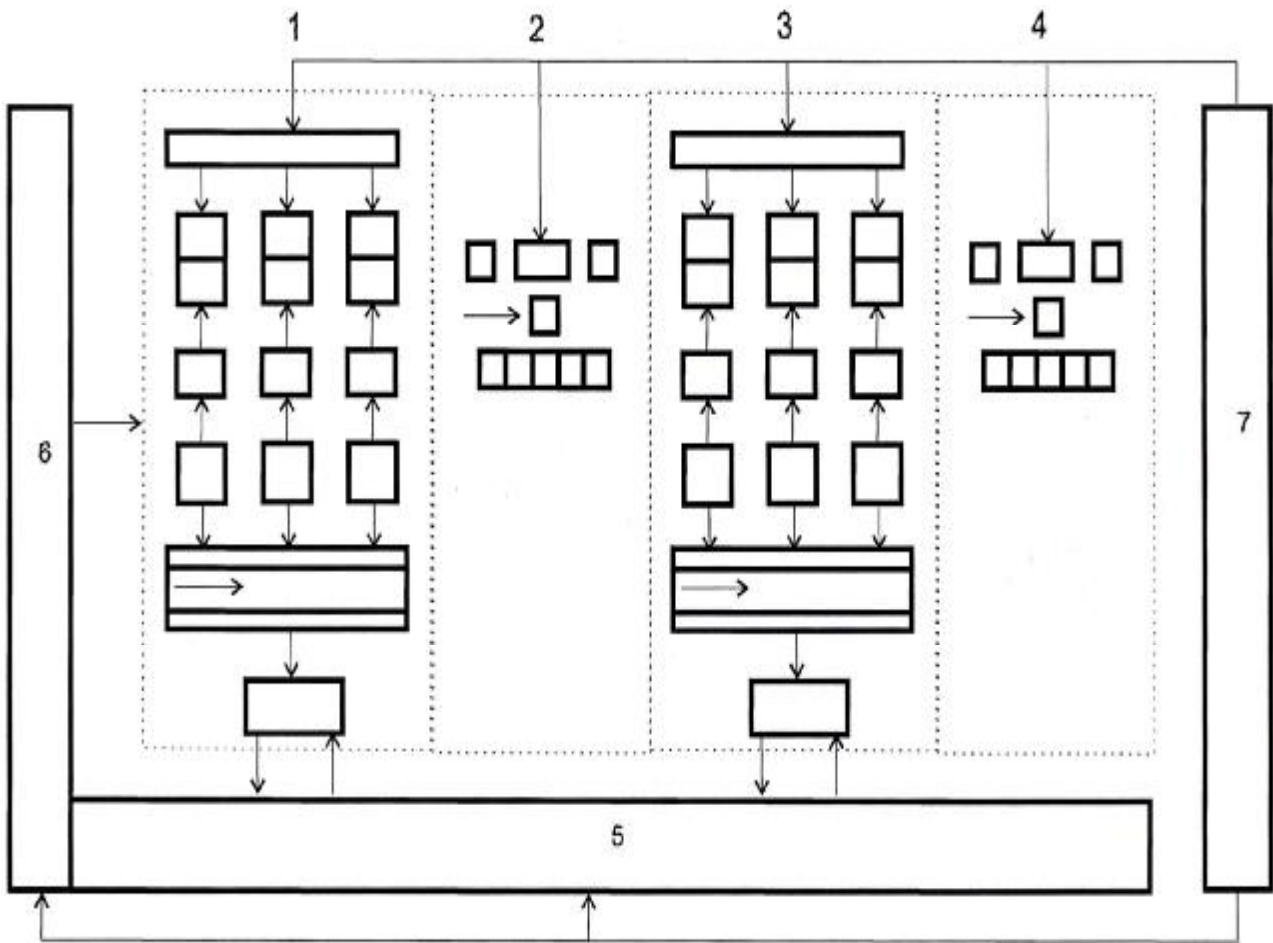


Рисунок 1.3 – Структура автоматизированной линии: 1, 2, 3, 4- производственные ячейки и модули; 5- транспортная система; 6-склад; 7- управляющий компьютер.

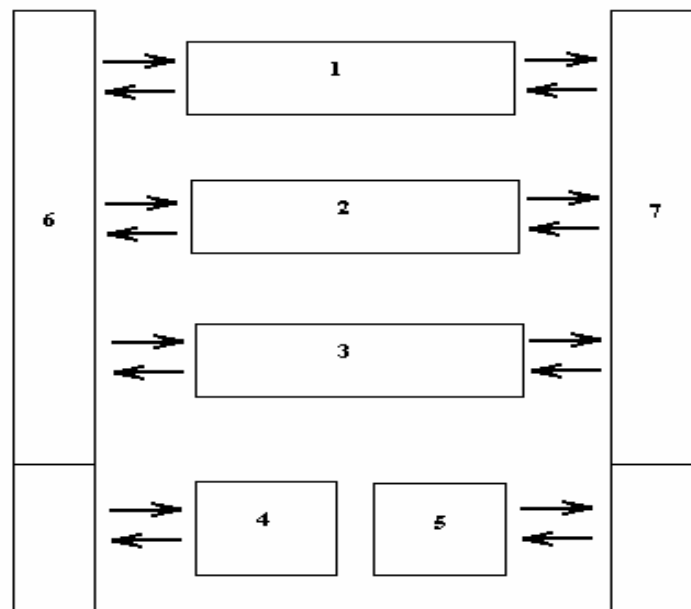


Рисунок 1.4 – Структура автоматизированного участка: 1,2,3- автоматизированные линии; 4- производственные ячейки; 5- производственные модули; 6- склад; 7- управляющий компьютер.

1.2. Основные термины и определения автоматизированных производств

Разработка автоматизированных производств, отдельного автоматизированного оборудования осуществляется на базе теории автоматического управления - ТАУ.

ТАУ – это совокупность методов и специального математического аппарата, позволяющих спроектировать работоспособную промышленную систему автоматического управления (САУ), отвечающую требованиям по качеству её работы.

При описании отдельных элементов ТАУ и системы в целом применяется определенная терминология.

САУ – система автоматического управления – совокупность технических средств по управлению величиной регулируемого параметра, в которой вычислительные и логические операции осуществляются с помощью специального технического устройства - автоматического регулятора, программируемого контроллера или компьютера. Основной частью (узлом, элементом) САУ является объект управления.

Объект управления – это техническая установка, оборудование (отжимной пресс, выпарная установка, автоклав и др.) или технологическая цепь установок, физико-химических процессов (нагрев, охлаждение, хранение, смешивание и т.д.), в которой управляют (регулируют) с помощью специальных технических средств.

Технологические параметры – это физико-химические величины, характеризующие состояние технологического процесса в объекте управления. Например: температура, давление, скорость вращения и др.

Регулируемый параметр – это технологический параметр, величиной которого управляют с помощью специальных технических средств. Число регулируемых параметров, как правило, значительно меньше общего числа технологических параметров.

Параметры состояния объекта – выходные величины, объективные показатели объекта в заданный момент времени, измеряемые в определенных физических (температура, кило-

граммы и др.) или относительных (доли, проценты, баллы и т.п.) единицах.

Управление объектом – это процесс воздействия на объект с целью достижения показателей состояния заданных значений в определенный момент времени.

Цель управления – достижение необходимого состояния объекта, заданного величинами его параметров, например, температуры при варке сырья или влажности продукта в процессе хранения. Цель управления в данный момент времени считается достигнутой, если достигнуты заданные значения параметров состояния объекта управления.

Система ручного регулирования (СРР) – это совокупность технических средств по управлению величиной регулируемого параметра, в которой вычислительные и логические операции осуществляются человеком-оператором.

Воздействия – факторы, изменяющие течение технологического процесса в объекте управления. Они могут быть возмущающие и управляющие.

Возмущающие воздействия носят случайный, трудно предсказуемый характер. Например, температура наружного воздуха, колебания напряжения в электросети и др.

Управляющие воздействия – это воздействия на объект управления, организуемые техническим устройством или человеком-оператором с целью компенсации влияния возмущающих воздействий.

Сигналы – совокупность потоков энергии или вещества, поступающих или выходящих из объекта управления, возмущающие и управляющие воздействия, а также регулируемый параметр.

По направлению различают входные и выходные сигналы объекта управления. Воздействия, возмущающие и управляющие, будут *входными* сигналами для объекта управления.

Регулируемый параметр в ТАУ всегда принимают за *выходной* сигнал объекта управления, даже если он физически никуда за пределы объекта не выходит. Например, температура в топке котла, уровень материала в бункере, напряжение на обмотках электродвигателя и др.

В ТАУ любой сложности объект изображают в виде простого прямоугольника.

Основой управления является переработка информации о состоянии объекта в соответствии с целью управления.

Управление может осуществляться человеком или специальным техническим устройством.

Управление, осуществляемое без участия человека, называется *автоматическим*, с участием человека – *автоматизированным*.

Уровень автоматизации производственного процесса – отношение количества автоматизированных операций N_a к общему их количеству N

$$\alpha = N_a/N.$$

Величина уровня автоматизации зависит от типа производства. В единичном производстве она не превышает 0,2, в массовом – приближается к 0,8 и выше.

1.3. Конструкторская документация - схемы систем автоматизики

При разработке, изготовлении и эксплуатации САУ и ее составляющих применяют единую систему конструкторской документации – комплекс стандартов, который определяет состав, правила разработки, оформления и обращения конструкторской документации.

Конструкторская документация – это графические и текстовые документы, которые в совокупности или в отдельности определяют состав и устройство САУ и содержат всю информацию, необходимую для ее разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

Конструкторская документация чертежная – это графическая документация, состоящая из чертежей пяти видов.

Чертеж детали содержит ее изображение и информацию, необходимую для ее изготовления и контроля.

Сборочный чертеж содержит изображение и информацию сборочной единицы – нескольких сопряженных деталей, необходимую для ее сборки и контроля.

Чертеж общего вида определяет конструкцию всего изделия, взаимодействие его основных частей и поясняет принцип действия.

Электромонтажный чертеж содержит информацию, необходимую для электрического монтажа САУ или ее части.

Монтажный чертеж содержит контурное (упрощенное) изображение САУ, а также информацию для его установки на месте использования.

Конструкторская документация схемная – это графическая документация, которая состоит из электрических схем шести видов.

Структурная схема определяет основные функциональные части САУ, их назначение и взаимосвязь. Элементы обозначаются в виде прямоугольников с текстовыми или условными графическими обозначениями.

Принципиальная схема определяет полный состав элементов и связи между ними, дает подробное представление о принципе действия изделия. Элементы обозначаются в виде условных графических обозначений.

Функциональная схема объясняет процессы, которые происходят в функциональных узлах и цепях САУ. Функциональные схемы применяются тогда, когда уровень описания структурной схемы недостаточен, а уровень принципиальной схемы избыточен или она не разработана.

Схема соединений (монтажная) показывает соединения составных частей САУ и определяет необходимые провода, жгуты кабели, а также места их соединений (зажимы, соединители и т.д.).

Схема подключения показывает внешние соединения.

Схема общая устанавливает составные части комплекса устройств САУ и способы их соединения на месте эксплуатации.

Конструкторская документация текстовая – документация, которую выполняют рукописным (печатным) способом на листах формата А4 согласно установленным формам.

Спецификация определяет составные части сборочной единицы, комплекса или комплекта.

Перечень элементов принципиальной схемы устанавливает ее состав.

Технические условия (ТУ) содержат требования к САУ.

Пояснительная записка содержит словесное описание САУ, а также обоснование принятых во время разработки технических решений.

Ведомости включают перечни составных элементов: ведомость спецификаций, ведомость покупных изделий, ведомость ссылочных документов, а также ведомости технического предложения, эскизного и технического проектов.

Эксплуатационная конструкторская документация предназначена для изучения САУ и правил ее эксплуатации; содержит техническое описание, инструкции по эксплуатации и техническому обслуживанию, паспорт, ведомость запасных изделий и т.п.

Контрольные вопросы к главе 1.

1. Дайте определение автоматике.
2. Дайте определение автоматизации производственного процесса.
3. В чем различие между механизацией процесса и автоматизацией?
4. В чем сущность принципа завершенности автоматизации?
5. В чем сущность принципа малооперационной технологии?
6. Какие бывают автоматизированные производства по видам компоновки оборудования?
7. Какие бывают автоматизированные производства по видам промежуточного транспорта?
8. Дайте определение производственного модуля.
9. Дайте определение производственной линии.
10. Чем отличается производственный участок от производственной линии?
11. Дайте определение ТАУ.
12. Дайте определение САУ.
13. Дайте определение объекта управления.
14. Дайте определение технологического параметра.
15. Что такое управление объектом?
16. Назовите виды воздействий на объект управления.
17. Чем отличается автоматизированный процесс от автоматического?
18. Что такое уровень автоматизации производства?
19. Дайте определение конструкторской документации.

20. Дайте определение конструкторской документации чертежной
21. Назовите составляющие чертежной конструкторской документации.
22. Что содержит электромонтажный чертеж?
23. Что содержит монтажный чертеж?
24. Дайте определение конструкторской документации схемной.
25. Дайте определение структурной схемы САУ.
26. Дайте определение принципиальной схемы.
27. Дайте определение функциональной схемы.
28. Дайте определение схемы соединений (монтажной).
29. Дайте определение схемы подключения.
30. Дайте определения общей схемы САУ.
31. Дайте определения текстовой конструкторской документации.

Глава 2. Принципы построения САУ и режимы ее работы

2.1. Фундаментальные принципы управления

Принято различать три фундаментальных принципа управления: принцип разомкнутого управления, принцип компенсации, принцип обратной связи.

Одномерными называются системы с одной регулируемой величиной.

Многомерными называются системы с несколькими регулируемыми величинами и они используются для управления многомерными объектами регулирования, нормальное функционирование которых требует изменения по заданному закону не менее двух физических величин.

Принцип разомкнутого управления. Рассмотрим САУ хлебопекарной печи (рис.2.1). Ее принципиальная схема показывает принцип действия данной конкретной САУ, состоящей из конкретных технических устройств. Принципиальные схемы могут быть электрическими, гидравлическими, кинематическими и т.п. Технология выпечки требует изменения температуры в печи по заданной временной программе, в частном случае требуется поддержание постоянной температуры.

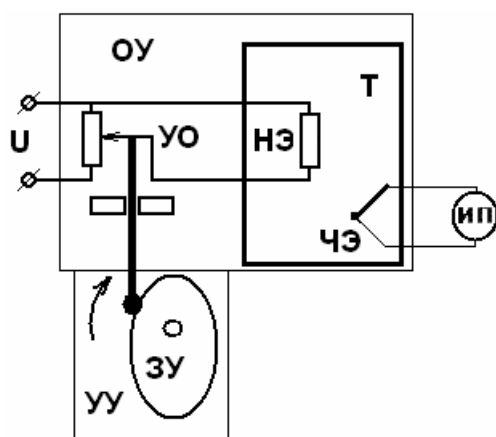


Рисунок 2.1 – САУ хлебопекарной печи:

U- напряжение электрической сети; НЭ- нагревательный элемент; ОУ- объект управления; УО- управляющий орган объекта (реостат); ЗУ- задающее устройство; УУ- устройство управления; ИП- измерительный прибор; ЧЭ- чувствительный элемент; Т- температура в печи.

Для этого надо реостатом регулировать напряжение на нагревательном элементе НЭ. Подобная часть ОУ, с помощью которой можно изменять параметры управляемого процесса, называется управляющим органом объекта (УО). Это может быть реостат, вентиль, заслонка и т.п.

Часть ОУ, которая преобразует управляемую величину в пропорциональную ей величину, удобную для использования в САУ, называют чувствительным элементом (ЧЭ). Физическую величину на выходе ЧЭ называют выходной величиной ОУ. Как правило, это электрический сигнал (ток, напряжение) или механическое перемещение. В качестве ЧЭ могут использоваться термомпары, тахометры, рычаги, электрические мосты, датчики давления, деформации, положения и т.п. В нашем случае это термопара, на выходе которой формируется напряжение, пропорциональное температуре в печи, подаваемое на измерительный прибор ИП для контроля. Физическую величину на входе управляющего органа ОУ называют входной величиной ОУ.

Управляющее воздействие $u(t)$ – это воздействие, прикладываемое к УО объекта с целью поддержания требуемых значений управляемой величины. Оно формируется устройством управления (УУ). Ядром УУ является исполнительный элемент, в качестве которого могут использоваться электрические двигатели, мембраны, электромагниты и т.п.

Задающим устройством (ЗУ) называется устройство, задающее программу изменения управляющего воздействия, то есть формирующее задающий сигнал $u_0(t)$. В простейшем случае $u_0(t) = U$ - постоянная величина. ЗУ может быть выполнено в виде отдельного устройства, быть встроенным в УУ или же вообще отсутствовать. В качестве ЗУ может выступать кулачковый механизм, магнитофонная лента, маятник в часах, задающий профиль и т.п. Роль УУ и ЗУ может исполнять человек. Однако это уже не САУ. В нашем примере УУ является кулачковый механизм, перемещающий движок реостата согласно программе, которая задается профилем кулачка.

Рассмотренную САУ можно представить в виде функциональной схемы, элементы которой называются функциональными звеньями. Эти звенья изображаются прямоугольниками, в которых записывается функция преобразования входной величины в

выходную (рис.2.2). Эти величины могут иметь одинаковую или различную природу, например, входное и выходное электрическое напряжение, или электрическое напряжение на входе и скорость механического перемещения на выходе и т.п.

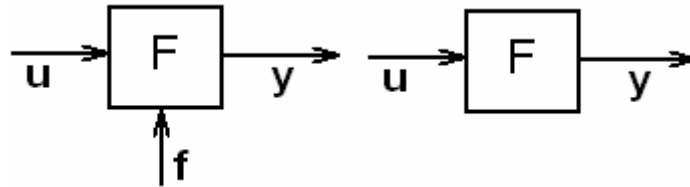


Рисунок 2.2 – Функция преобразования входной величины u в выходную y .

Величина f , подаваемая на второй вход звена, называется возмущением. Она отражает влияние на выходную величину y изменений окружающей среды, нагрузки и т.п.

В общем случае функциональное звено может иметь несколько входов и выходов (рис.2.3). Здесь u_1, u_2, \dots, u_n - входные (управляющие) воздействия; f_1, f_2, \dots, f_k - возмущающие воздействия; y_1, y_2, \dots, y_m - выходные величины.

Принцип работы функциональных звеньев может быть различным, поэтому функциональная схема не дает представление о принципе действия конкретной САУ, а показывает лишь пути прохождения и способы обработки и преобразования сигналов.

Сигнал – это информационное понятие, соответствующее на принципиальной схеме физическим величинам. Пути его прохождения указываются направленными отрезками (рис.2.4). Точки разветвления сигнала называются узлами. Сигнал определяется лишь формой изменения физической величины, он не имеет ни массы, ни энергии, поэтому в узлах он не делится (рис. 2.4а), и по всем путям от узла идут одинаковые сигналы, равные сигналу, входящему в узел. Суммирование сигналов осуществляется в сумматоре (рис. 2.4б), вычитание - в сравнивающем устройстве, рис 2.4в.

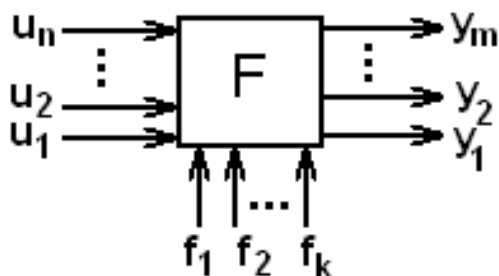


Рисунок 2.3 – Функциональное звено с несколькими входами и выходами.

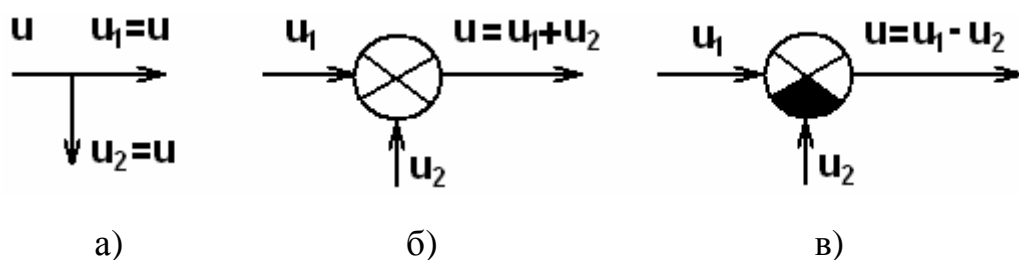


Рисунок 2.4 – Прохождение сигнала по узлам САУ: а – ветвление; б – суммирование; в – вычитание.

САУ хлебопекарной печи можно изобразить функциональной схемой (рис.2.5). В данной схеме заложен принцип разомкнутого управления, сущность которого состоит в том, что программа управления во времени t жестко задана ЗУ; управление не учитывает влияние возмущений на параметры процесса.

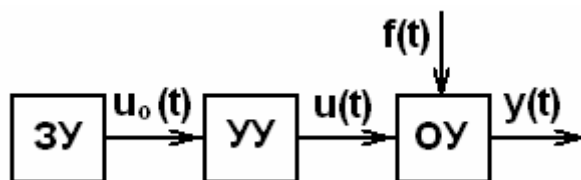


Рисунок 2.5 – Функциональная схема САУ хлебопекарной печи.

Примерами систем, работающих по принципу разомкнутого управления, являются часы, магнитофон, компьютер и т.п.

Принцип компенсации. Если возмущающий фактор искажает выходную величину до недопустимых пределов, то применяют принцип компенсации (рис.2.6, КУ - корректирующее устройство). Пусть y_0 - значение выходной величины, которое требуется обеспечить согласно программе. На самом деле из-за возмущения f на выходе регистрируется значение y .

Величина

$$\varepsilon = y_0 - y$$

называется отклонением от заданной величины. Если каким-то образом удастся измерить величину f , то можно откорректировать управляющее воздействие u на входе ОУ, суммируя сигнал УУ с корректирующим воздействием, пропорциональным возмущению f и компенсирующим его влияние. Примеры систем компенсации: биметаллический маятник в часах, компенсационная обмотка машины постоянного тока и т.п.

На рис.2.6 в цепи нагревательного элемента НЭ стоит термосопротивление R_t , величина которого меняется в зависимости от колебаний температуры окружающей среды, корректируя напряжение на НЭ.

Достоинство принципа компенсации: быстрота реакции на возмущения. Он более точен, чем принцип разомкнутого управления. Недостаток- невозможность учета подобным образом всех возможных возмущений.

Принцип обратной связи. Наибольшее распространение в технике получил принцип обратной связи (рис.2.7). Здесь управляющее воздействие корректируется блоком КУ в зависимости от выходной величины y . И уже не важно, какие возмущения действуют на ОУ.

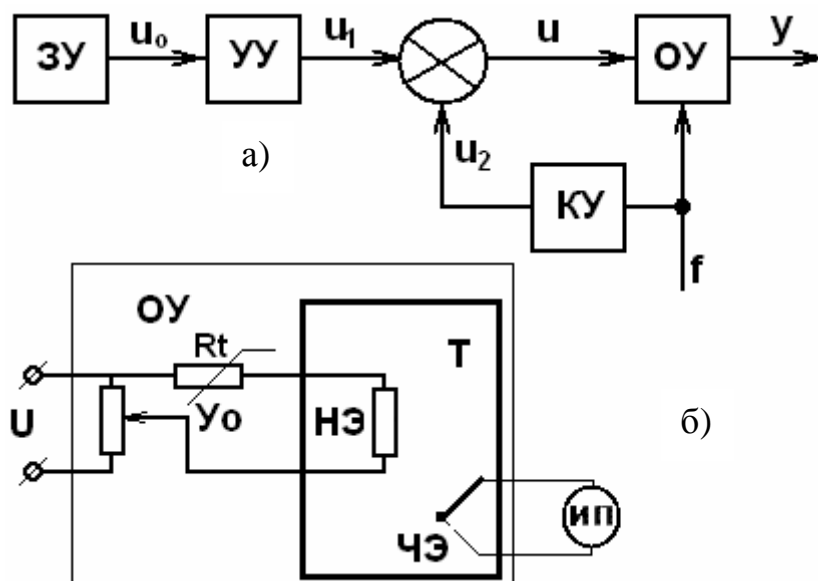


Рисунок 2.6 – САУ с компенсацией возмущающего сигнала:
а – функциональная схема; б – СА хлебопекарной печи.

Если значение y отклоняется от требуемого, то происходит корректировка сигнала u с целью уменьшения данного отклонения. Связь выхода ОУ с его входом называется главной обратной связью (ОС). В частном случае (рис.2.8) ЗУ формирует требуемое значение выходной величины y_0 , которое сравнивается с действительным значением на выходе САУ y .

Отклонение $\varepsilon = y_0 - y$

с выхода сравнивающего устройства подается на вход регулятора P , объединяющего в себе УУ, УО, ЧЭ. Если $\varepsilon \neq 0$, то регулятор формирует управляющее воздействие u , действующее до тех пор, пока не обеспечится равенство $\varepsilon = 0$, или $y = y_0$.

Так как на регулятор подается разность сигналов, то такая обратная связь называется отрицательной в отличие от положительной обратной связи, когда сигналы складываются. Такое управление в функции отклонения называется регулированием, а подобную САУ называют системой автоматического регулирования (САР). Так, на рис. 2.9 изображена упрощенная схема САР хлебопекарной печи.

Роль ЗУ здесь выполняет потенциометр, напряжение на котором U_3 сравнивается с напряжением на термопаре U_T . Их разность ΔU через усилитель U_c подается на исполнительный двигатель ИД, регулирующий через редуктор положение движка реостата в цепи НЭ. Наличие усилителя говорит о том, что данная САР является системой непрямого регулирования, так как энергия для функций управления берется от посторонних источников питания в отличие от систем прямого регулирования, в которых энергия берется непосредственно от ОУ, как, например, в САР уровня воды в баке (рис.2.10).

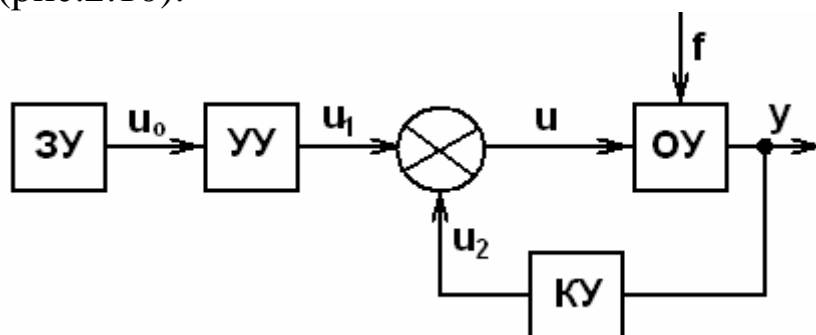


Рисунок 2.7 – САУ с обратной связью.

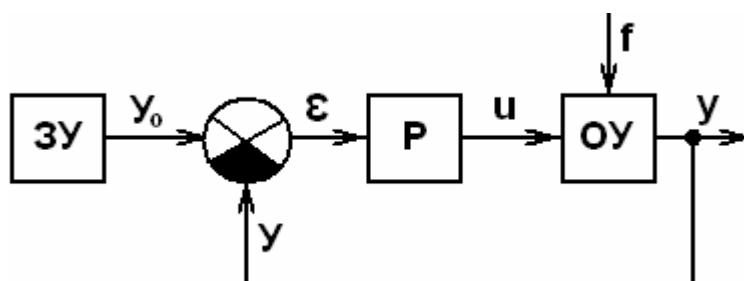


Рисунок 2.8 – САУ с обратной связью по отклонению выходной величины от заданной.

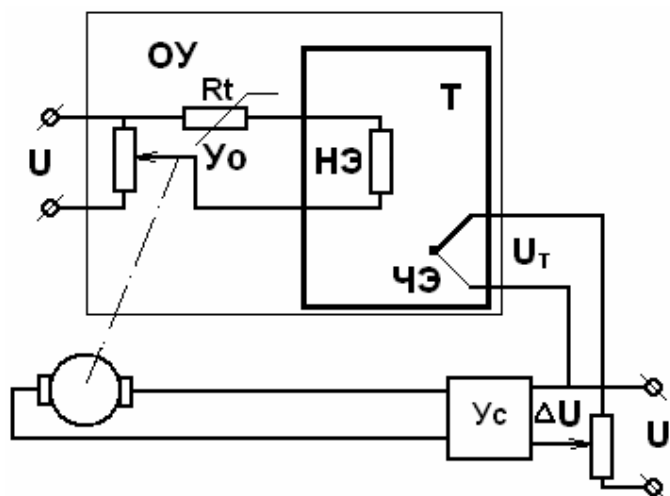


Рисунок 2.9 – Упрощенная схема САР хлебопекарной печи с регулятором.

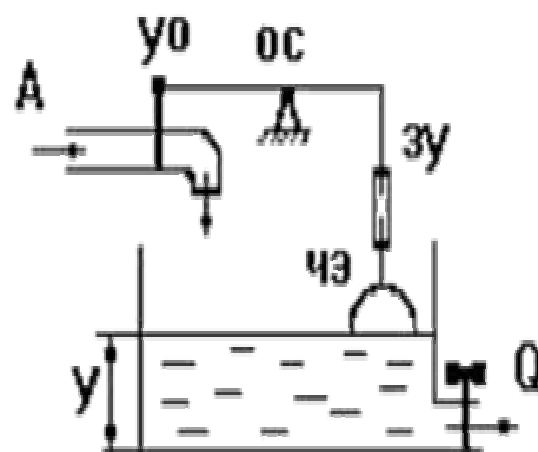


Рисунок 2.10 – САР уровня воды в баке.

Для поддержания постоянного уровня воды в баке U используется чувствительный элемент ЧЭ в виде поплавка, постоянно находящегося на ее поверхности. При увеличении расхода воды Q ее уровень U начинает понижаться. Поплавок ЧЭ перемещается вниз и через тягу ЗУ (задающее устройство) и рычаг ОС (отрицательная обратная связь) воздействует на управляющий орган УО (заслонка), который увеличивает подачу воды A в бак. Увеличение подачи A приводит к поднятию уровня U воды в баке. В результате чего поплавок поднимается и закрывает заслонку УО. Подача воды уменьшается, и уровень воды стабилизируется вокруг заданного уровня, изменяемого длиной тяги ЗУ. Недостатком принципа обратной связи является инерционность системы.

Поэтому часто применяют комбинацию данного принципа с принципом компенсации, что позволяет объединить достоинства обоих принципов: быстроту реакции на возмущение принципа компенсации и точность регулирования независимо от природы возмущений принципа обратной связи.

Системы, содержащие одну или несколько местных обратных связей, называются *многоконтурными*. В этих системах воздействие, приложенное к тому или иному элементу, может обойти всю систему и вернуться в исходную точку по нескольким путям обхода.

2.2. Основные виды САУ

В зависимости от принципа и закона функционирования ЗУ, задающего программу изменения выходной величины, различают основные виды САУ:

- стабилизации;
- программные;
- следящие;
- самонастраивающиеся:
- экстремальные;
- оптимальные;
- адаптивные.

В *системах стабилизации* (рис.2.9,2.10) обеспечивается неизменное значение управляемой величины при всех видах возмущений, т.е. $y = const$. ЗУ формирует эталонный сигнал, с которым сравнивается выходная величина. ЗУ, как правило, допускает настройку эталонного сигнала, что позволяет менять по желанию значение выходной величины.

В *программных системах* обеспечивается изменение управляемой величины в соответствии с программой, формируемой ЗУ. В качестве ЗУ может использоваться кулачковый механизм, устройство считывания с перфоленты или магнитной ленты и т.п. К этому виду САУ можно отнести заводные игрушки, магнитофоны, проигрыватели и т.п. Различают системы с временной программой (например, рис.2.1), обеспечивающие $y = f(t)$, и системы с пространственной программой, в которых $y = f(x)$, применяемые там, где на выходе САУ важно получить требуемую траекторию в пространстве, например, в копировальном станке (рис.2.11), закон движения во времени здесь роли не играет, где t – время, x – координата точки.



Рисунок 2.11 – САУ с пространственной программой.

Следящие системы отличаются от программных лишь тем, что программа $y = f(t)$ или $y = f(x)$ заранее неизвестна. В качестве

ЗУ выступает устройство, следящее за изменением какого-либо внешнего параметра. Эти изменения и будут определять изменения выходной величины САУ. Например, рука робота, повторяющая движения руки человека.

Все три рассмотренных вида САУ могут быть построены по любому из трех фундаментальных принципов управления. Для них характерно требование совпадения выходной величины с некоторым предписанным значением на входе САУ, которое само может меняться. То есть в любой момент времени требуемое значение выходной величины определено однозначно.

В *самонастраивающихся* системах ЗУ ищет такое значение управляемой величины, которое по какому-то критерию (или нескольким) является оптимальным.

Так, в экстремальных системах (рис.2.12) требуется, чтобы выходная величина всегда принимала минимальное или максимальное значение из всех возможных, которое заранее не определено и может непредсказуемо изменяться. Для его поиска система выполняет небольшие пробные движения и анализирует реакцию выходной величины на эти пробы.

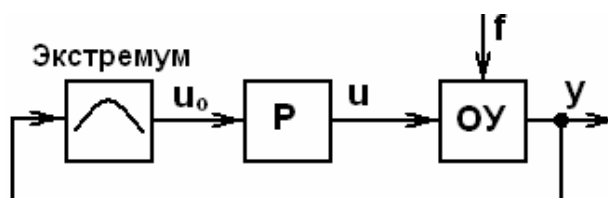


Рисунок 2.12 – Самонастраиваемая САУ.

После этого вырабатывается управляющее воздействие, приближающее выходную величину к экстремальному значению. Процесс повторяется непрерывно. Так как в данных САУ происходит непрерывная оценка выходного параметра, то они выполняются только в соответствии с третьим принципом управления – принципом обратной связи.

Оптимальные системы являются более сложным вариантом экстремальных систем. Здесь происходит, как правило, сложная обработка информации о характере изменения выходных величин и возмущений, о характере влияния управляющих воздействий на выходные величины, может быть задействована теоретическая информация, информация эвристического характера и т.п. По-

этому основным отличием экстремальных систем является наличие в них ЭВМ. Эти системы могут работать в соответствии с любым из трех фундаментальных принципов управления.

В *адаптивных* системах предусмотрена возможность автоматической перенастройки параметров или изменения принципиальной схемы САУ с целью приспособления ее к изменяющимся внешним условиям.

Контрольные вопросы к главе 2.

1. Что называется системой автоматического управления?
2. Что является основной задачей автоматического управления?
3. Что называется управляемой величиной?
4. Что называется управляющим органом?
5. Что называется чувствительным элементом?
6. Что такое входная и выходная величины?
7. Что называется управляющим воздействием?
8. Что называется возмущением?
9. Что называется отклонением от заданной величины?
10. Что называется управляющим устройством?
11. Что называется задающим устройством?
12. Что называется функциональной схемой и из чего она состоит?
13. В чем отличие сигнала от физической величины?
14. В чем суть принципа разомкнутого управления?
15. В чем суть принципа компенсации?
16. В чем суть принципа обратной связи?
17. Что такое отрицательная обратная связь?
18. Перечислите достоинства и недостатки принципов управления?
19. Какой частный случай управления называется регулированием?
20. В чем отличие систем прямого и непрямого регулирования?
21. Дайте определение многоконтурной системы.
22. Дайте определение САУ стабилизации.
23. Дайте определение программной САУ.
24. Дайте определение следящей САУ.
25. Дайте определение самонастраивающейся САУ.

Глава 3. Режимы работы САУ

3.1. Статические режимы работы САУ

3.1.1. Статические характеристики

Режим работы САУ, в котором управляемая величина и все промежуточные величины не изменяются во времени, называется установившимся, или статическим, режимом. Любое звено и САУ в целом в данном режиме описывается уравнениями статики вида $y = F(u, f)$, в которых отсутствует время t . Соответствующие им графики называются статическими характеристиками. Статическая характеристика звена с одним входом u может быть представлена кривой $y = F(u)$ (рис.3.1а). Если звено имеет второй вход по возмущению f , то статическая характеристика задается семейством кривых $y = F(u, f)$ (рис.3.1б), при различных значениях f_j , или $y = F(f)$ при различных u_j (рис.3.1в).

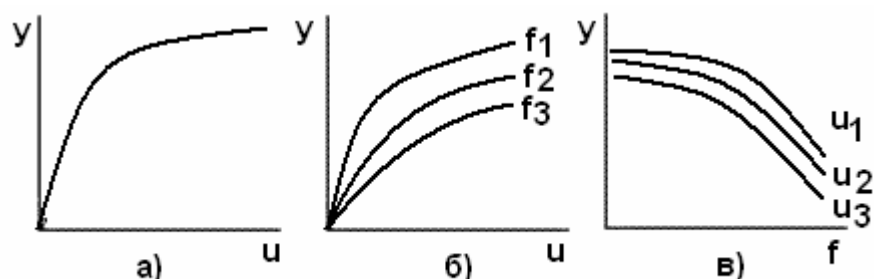


Рисунок 3.1 – Статическая характеристика звена с одним входом $y = F(u)$.

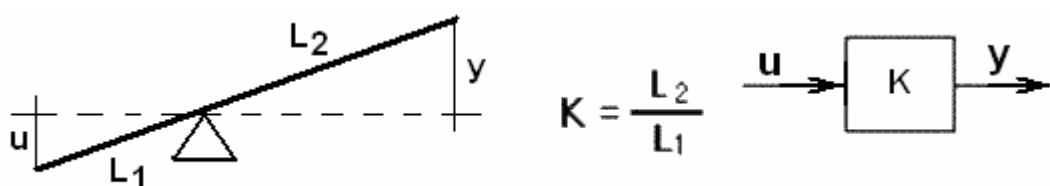


Рисунок 3.2 – Рычаг - функциональное звено системы регулирования воды в баке.

Так, примером одного из функциональных звеньев системы регулирования воды в баке (рис. 2.10) является обычный рычаг (рис.3.2.). Уравнение статики для него имеет вид $y = Ku$. Его

можно изобразить звеном, функцией которого является усиление (или ослабление) входного сигнала в K раз. Коэффициент $K = y/u$, равный отношению выходной величины к входной, называется коэффициентом усиления звена. В случае, когда входная и выходная величины имеют разную природу, его называют коэффициентом передачи.

Статическая характеристика данного звена имеет вид отрезка прямой линии с наклоном $\alpha = \arctg (L_2/L_1) = \arctg (K)$ (рис.3.3.). Звенья с линейными статическими характеристиками называются линейными.

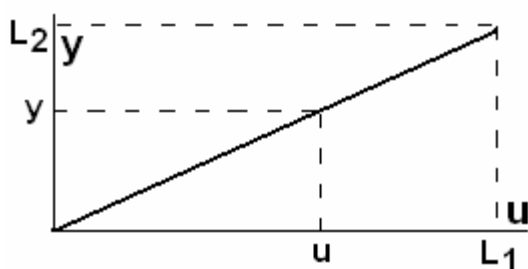


Рисунок 3.3 – Статическая характеристика рычага.

Статические характеристики реальных звеньев, как правило, нелинейны. Такие звенья называются нелинейными. Для них характерна зависимость коэффициента передачи от величины входного сигнала: $K = \Delta y/\Delta u \neq const$.

Например, статическая характеристика насыщенного генератора постоянного тока представлена на рис.3.4. Обычно нелинейная характеристика не может быть выражена какой-либо математической зависимостью и ее приходится задавать таблично или графически.

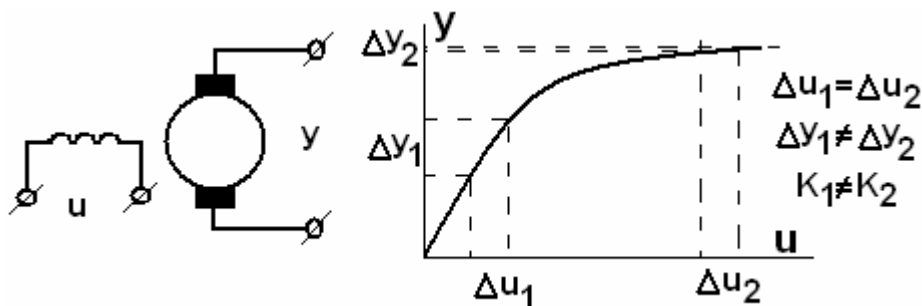


Рисунок 3.4 – Статическая характеристика насыщенного генератора постоянного тока.

Зная статические характеристики отдельных звеньев (рис.3.5), можно построить статическую характеристику САУ (рис.3.6). Если все звенья САУ линейные, то САУ имеет линейную статическую характеристику и называется линейной. Если хотя бы одно звено нелинейное, то САУ - нелинейная.

Звенья, для которых можно задать статическую характеристику в виде жесткой функциональной зависимости выходной величины от входной, называются статическими. Если такая связь отсутствует и каждому значению входной величины соответствует множество значений выходной величины, то такое звено называется астатическим. Изображать его статическую характеристику бессмысленно.

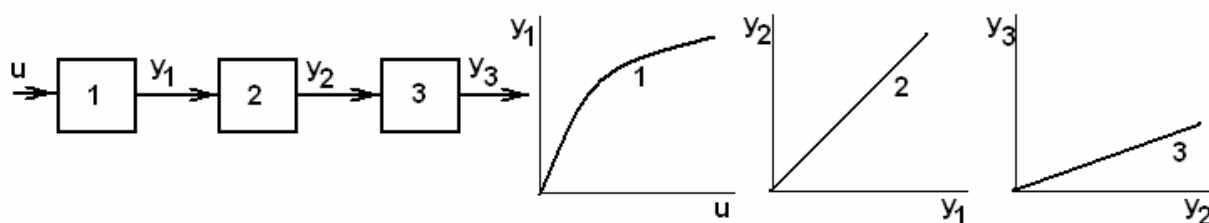


Рисунок 3.5 – Статические характеристики отдельных звеньев САУ.

Для построения статической характеристики системы по известным статическим характеристикам ее звеньев по оси абсцисс, (рис. 3.6), откладываются текущие значения входного параметра u . Перпендикулярно к этой оси вверх откладываются прямые до пересечения с первой характеристикой $y_1=f(u)$. Затем от точки пересечения параллельно оси u проводят прямую до пересечения со второй характеристикой $y_2=f(u)$. Далее прямую снова поворачивают под прямым углом вниз до пересечения с характеристикой $y_3=f(u)$. В точке пересечения проводят прямую, параллельную оси u до пересечения с ординатами, проведенными для данного значения u . Характеристика $y=f(u)$ является искомой статической характеристикой всей САУ.

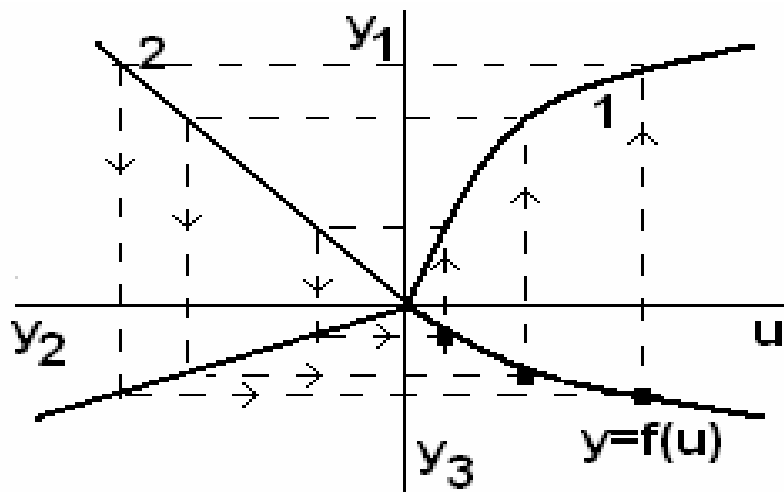


Рисунок 3.6 – К построению статической характеристики САУ.

Имея табличные характеристики звеньев для каждого значения входной величины u можно получить произведение $y = f(u) = y_1(u)y_2(u)y_3(u)$.

Примером астатического звена может служить двигатель, входной величиной которого является напряжение U , а выходной - угол поворота вала, величина которого при $U = const$ может принимать любые значения. Выходная величина астатического звена даже в установившемся режиме является функцией времени.

3.1.2. Статическое и астатическое регулирование

Если на управляемый процесс действует возмущение f , то важное значение имеет статическая характеристика САУ в форме $y = F(f)$ при $y_0 = const$. Возможны два основных вида этих характеристик (рис.3.7.). В соответствии с тем, какая из двух характеристик свойственна для данной САУ (рис.3.7а), различают статическое (рис.3.7.б), и астатическое (рис.3.7.в), регулирование.

Рассмотрим систему регулирования уровня воды в баке (рис.3.8). Возмущающим фактором является поток Q воды из бака. Пусть при $Q = 0$ имеем $y = y_0$, $\varepsilon = 0$. ЗУ системы настраивается так, чтобы вода при этом не поступала. При $Q \neq 0$ уровень воды понижается ($\varepsilon \neq 0$), поплавков опускается и открывает заслонку, в бак начинает поступать вода.

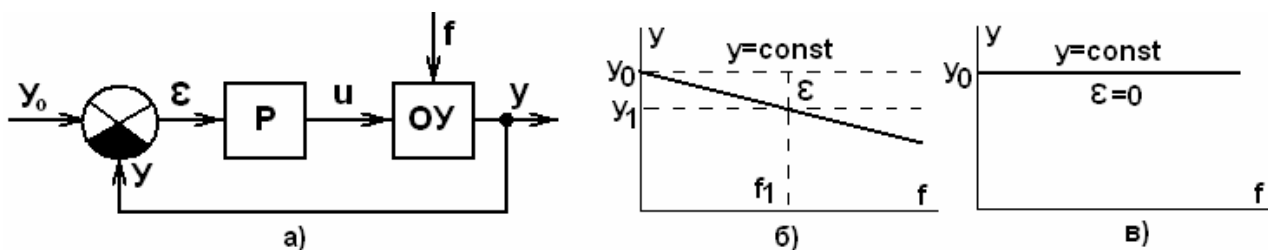


Рисунок 3.7 – Статическое и астатическое регулирование в САУ.

Новое состояние равновесия достигается при равенстве входящего и выходящего потоков воды. Но в любом случае при $Q \neq 0$ заслонка должна быть обязательно открыта, что возможно только при $\varepsilon \neq 0$. Причем, чем больше Q , тем при больших значениях ε устанавливается новое равновесное состояние.

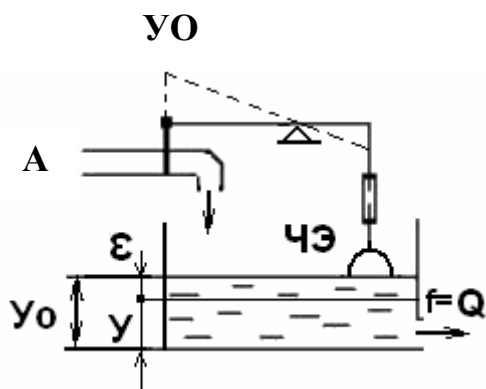


Рисунок 3.8 – САУ регулирования воды в баке.

Статическая характеристика САУ имеет характерный наклон (рис.3.7б.). Это есть пример статического регулирования. Для получения статического регулирования

все звенья САУ должны быть статическими. Статические регуляторы работают при обязательном отклонении ε регулируемой величины от требуемого значения. Это отклонение тем больше, чем больше возмущение f . Это заложено в принципе действия регулятора и не является его погрешностью, поэтому данное отклонение называется статической ошибкой регулятора. Чем больше коэффициент передачи регулятора K_p , тем на большую величину откроется заслонка при одних и тех же значениях ε , обеспечив в установившемся режиме большую величину потока Q .

Это значит, что на статической характеристике одинаковым значениям ε при больших K_p будут соответствовать большие значения возмущения Q , статическая характеристика САУ пойдет более полого. Поэтому, чтобы уменьшить статическую ошибку, надо увеличить коэффициент передачи регулятора.

Статизм d САУ показывает, насколько сильно значение регулируемой величины отклоняется от требуемого значения при

действию возмущений, и равен тангенсу угла наклона статической характеристики, построенной в относительных единицах (рис.3.9.):

$$d = \operatorname{tg}(\alpha) = (y/y_n)/(f/f_n),$$

где $y = y_n, f = f_n$ - точка номинального режима САУ. При достаточно больших значениях K_p имеем $d \approx 1/K_p$.

В некоторых случаях статическая ошибка недопустима, тогда переходят к астатическому регулированию, при котором регулируемая величина в установившемся режиме принимает точно требуемое значение независимо от величины возмущающего фактора. Статическая характеристика астатической САУ не имеет наклона (рис.3.7в.).

Возможные неточности относятся к погрешностям конкретной системы и не являются закономерными.

Для того, чтобы получить астатическое регулирование, необходимо в регулятор включить астатическое звено, например ИД, между ЧЭ и УО (рис.3.10.).

Если уровень воды понизится, то поплавков переместит движок потенциометра на величину ΔL , за счет этого появится разность потенциалов $\Delta\varphi \neq 0$ и ИД начнет поднимать заслонку до тех пор, пока $\Delta\varphi$ не уменьшится до нуля, а это возможно только при $y = y_o$. При поднятии уровня воды разность потенциалов сменит знак и двигатель будет вращаться в противоположную сторону, опуская заслонку.

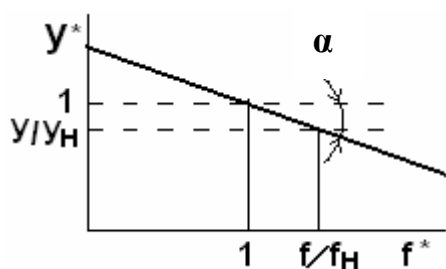


Рисунок 3.9 – К понятию статизма d .

Достоинства и недостатки статического и астатического регулирования:

- статические регуляторы обладают статической ошибкой;

- астатические регуляторы статической ошибки не имеют, но они более инерционны, сложны конструктивно и более дороги.

Обеспечение требуемой статической точности регулирования является первой основной задачей при расчете элементов САУ.

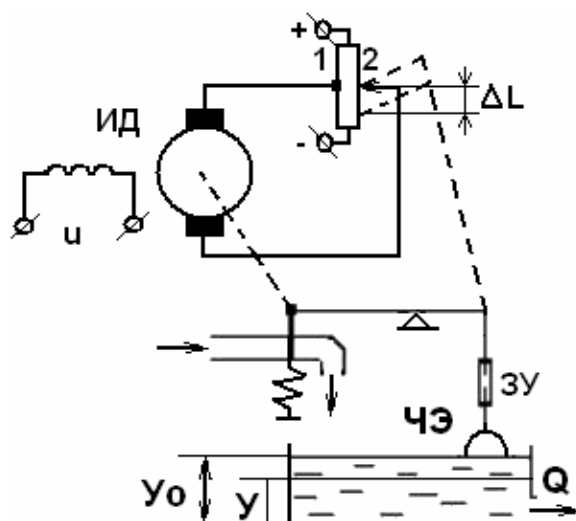


Рисунок 3.10 – Регулирование воды в баке астатическим регулятором.

3.2. Динамический режим САУ

3.2.1. Уравнение динамики САУ

Установившийся режим не является характерным для САУ. Обычно на управляемый процесс действуют различные возмущения, отклоняющие управляемый параметр от заданной величины. Процесс установления требуемого значения управляемой величины называется регулированием. Ввиду инерционности звеньев регулирование не может осуществляться мгновенно.

Рассмотрим САР, находящуюся в установившемся режиме, который характеризуется значением выходной величины $y = y_0$. Пусть в момент $t = 0$ на объект воздействовал какой-либо возмущающий фактор, отклонив значение регулируемой величины y . Через некоторое время регулятор вернет САР к начальному состоянию (рис.3.11.). Если регулируемая величина изменяется во времени по апериодическому закону, то процесс регулирования называется апериодическим.

При резких возмущениях возможен колебательный затухающий процесс (рис.3.12а.). Существует и такая вероятность, что по истечении некоторого времени T_p в системе установятся незатухающие колебания регулируемой величины – незатухающий колебательный процесс (рис.3.12б.). Последний вид - расходящийся колебательный процесс (рис.3.12в.).



Рисунок 3.11 – Динамика статических и астатических САР после возмущения.

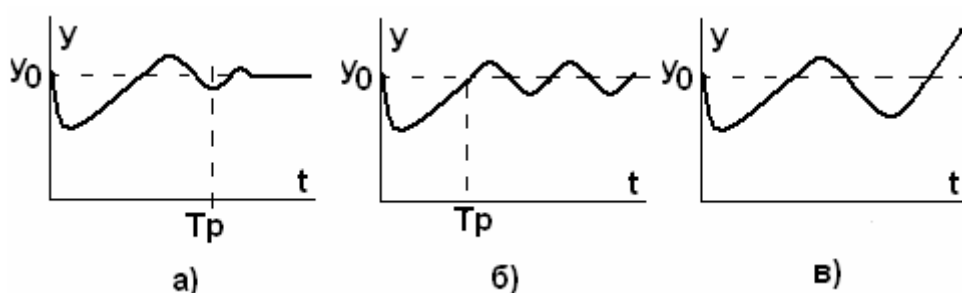


Рисунок 3.12 – Колебательные процессы в САР.

Таким образом, основным режимом работы САУ считается динамический режим, характеризующийся протеканием в ней переходных процессов. Поэтому второй основной задачей при разработке САУ является анализ динамических режимов работы САУ.

Поведение САУ или любого ее звена в динамических режимах описывается уравнением динамики $y(t) = F(u, f, t)$, характеризующим изменение величин во времени. Как правило, это дифференциальное уравнение или система дифференциальных уравнений. Поэтому основным методом исследования САУ в динамических режимах является метод решения дифференциальных уравнений. Порядок дифференциальных уравнений может быть довольно высоким, то есть зависимостью связаны как сами входные и выходные величины $u(t)$, $f(t)$, $y(t)$, так и скорости их изменения, ускорения и т.д. Поэтому уравнение динамики в общем виде можно записать так:

$$F(y, y', y'', \dots, y^{(n)}, u, u', u'', \dots, u^{(m)}, f, f', f'', \dots, f^{(k)}) = 0,$$

где: $y', y'', \dots, y^{(n)}, u, u', u'', \dots, u^{(m)}, f, f', f'', \dots, f^{(k)}$ – соответственно: ' – первые; '' – вторые; n, m, k – производные величин.

3.2.2. Передаточная функция

В ТАУ часто используют операторную форму записи дифференциальных уравнений. При этом вводится понятие дифференциального оператора $p = d/dt$ так, что $dy/dt = py$, а $p_n = d^n/dt^n$. Это лишь другое обозначение операции дифференцирования. Обратная дифференцированию операция интегрирования записывается как $1/p$. В операторной форме исходное дифференциальное уравнение записывается как алгебраическое:

$$a_0 p^{(n)} y + a_1 p^{(n-1)} y + \dots + a_n y = (a_0 p^{(n)} + a_1 p^{(n-1)} + \dots + a_n) y = (b_0 p^{(m)} + b_1 p^{(m-1)} + \dots + b_m) u$$

Некоторые правила операционного исчисления математики применимы к операторной форме записи уравнения динамики. Так, оператор p можно рассматривать в качестве сомножителя без права перестановки, то есть

$$py \neq yp.$$

Его можно выносить за скобки и т.п. Поэтому уравнение динамики можно записать также в виде:

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

Дифференциальный оператор $W(p)$ называют *передаточной функцией*. Она определяет отношение выходной величины звена к входной в каждый момент времени: $W(p) = y(t)/u(t)$, поэтому ее еще называют *динамическим коэффициентом усиления*. В установившемся режиме $d/dt = 0$, то есть $p = 0$, поэтому передаточная функция превращается в коэффициент передачи звена

$$K = b_m/a_n.$$

Знаменатель передаточной функции

$$D(p) = (a_0 p^{(n)} + a_1 p^{(n-1)} + \dots + a_n)$$

называют *характеристическим уравнением*. Его корни, то есть значения p , при которых знаменатель $D(p)$ обращается в ноль, а $W(p)$ стремится к бесконечности, называются полюсами передаточной функции.

Числитель

$$K(p) = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m$$

называют *операторным коэффициентом передачи*. Его корни, при которых $K(p) = 0$ и $W(p) = 0$, называются *нулями передаточной функции*.

Звено САУ с известной передаточной функцией называется *динамическим звеном*. Оно изображается прямоугольником, внутри которого записывается выражение передаточной функции. То есть это обычное функциональное звено, функция которого задана математической зависимостью выходной величины от входной в динамическом режиме.

Для звена с двумя входами и одним выходом должны быть записаны две передаточные функции по каждому из входов. Передаточная функция является основной характеристикой звена в динамическом режиме, из которой можно получить все остальные характеристики. Она определяется только параметрами системы и не зависит от входных и выходных величин.

Например, одним из динамических звеньев является интегратор. Его передаточная функция $W_u(p) = 1/p$. Схема САУ, составленная из динамических звеньев, называется *структурной*.

3.2.3. Элементарные динамические звенья

Динамика большинства функциональных элементов САУ независимо от исполнения может быть описана одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями не более второго порядка. Такие элементы называют элементарными *динамическими звеньями*. Передаточная функция элементарного звена в общем виде задается отношением двух полиномов не более чем второй степени:

$$W_3(p) = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_2}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}.$$

Любую сложную передаточную функцию САУ можно представить как произведение передаточных функций элементарных звеньев. Каждому такому звену в реальной САУ, как правило, соответствует какой-то отдельный узел. Зная свойства отдельных звеньев, можно судить о динамике САУ в целом.

В теории удобно ограничиться рассмотрением типовых звеньев, передаточные функции которых имеют числитель или знаменатель, равный единице, то есть

$$W(p) = \frac{1}{Tp + 1} ;$$

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2pTp + 1} ;$$

$$W(p) = 1/p ;$$

$$W(p) = p ;$$

$$W(p) = Tp + 1 ;$$

$$W(p) = k.$$

Из них могут быть образованы все остальные звенья. Звенья, у которых порядок полинома числителя больше порядка полинома знаменателя, технически нереализуемы.

3.3. Структурные схемы в САУ

Обычно структурная схема САУ состоит из отдельных элементов, соединенных последовательно, параллельно или с помощью обратных связей. Каждый элемент имеет один вход, один выход и заданную передаточную функцию. Структурная схема САУ в простейшем случае строится из элементарных динамических звеньев. Но несколько элементарных звеньев могут быть заменены одним звеном со сложной передаточной функцией. Для этого существуют правила эквивалентного преобразования структурных схем.

Рассмотрим возможные способы преобразований.

1. *Последовательное соединение* - выходная величина предшествующего звена подается на вход последующего (рис. 3.13). При этом можно записать:

$$y_1 = W_1 \cdot y_0,$$

$$y_2 = W_2 y_1,$$

$$\dots ;$$

$$y_n = W_n y_{1-n} \Rightarrow$$

$$y_n = W_1 W_2 \dots W_n,$$

$$y_0 = W_{экр} \cdot y_0 ;$$

$$W_{\text{экв}} = \prod_{i=1}^n W_{i n},$$

где n – число элементарных звеньев.

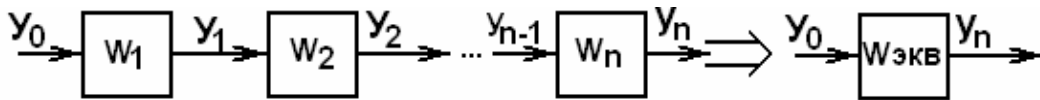


Рисунок 3.13 – Последовательное соединение звеньев САУ.

То есть цепочка последовательно соединенных звеньев преобразуется в эквивалентное звено с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций отдельных звеньев.

2. *Параллельно - согласное соединение* (рис.3.14.) - на вход каждого звена подается один и тот же сигнал, а выходные сигналы – складываются. Тогда:

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_n = (W_1 + W_2 + \dots + W_n)y_0 = W_{\text{экв}} y_0,$$

где $W_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n W_i$.

То есть цепочка звеньев, соединенных параллельно - согласно, преобразуется в звено с передаточной функцией, равной сумме передаточных функций отдельных звеньев.

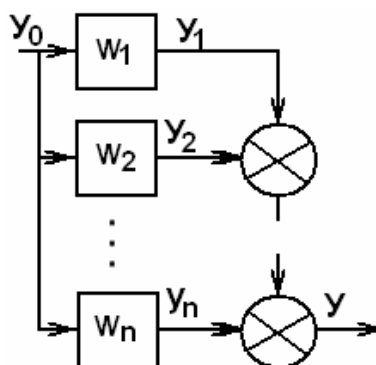


Рисунок 3.14 – Параллельно-согласное соединение звеньев САУ.

3. *Параллельно - встречное соединение* (рис. 3.15а) - звено охвачено положительной или отрицательной обратной связью. Участок цепи, по которому сигнал идет в противоположном направлении по отношению к системе в целом (то есть с выхода на

вход), называется *цепью обратной связи* с передаточной функцией W_{oc} . При этом для отрицательной ОС:

$$\begin{aligned} y &= W_n u; \\ y_1 &= W_{oc} y; \\ u &= y_o - y_1, \end{aligned}$$

следовательно,

$$\begin{aligned} y &= W_n y_o - W_n y_1 = W_n y_o - W_n W_{oc} y \Rightarrow \\ y(1 + W_n W_{oc}) &= W_n y_o \Rightarrow y = W_{экр} y_o, \end{aligned}$$

где $W_{экр} = \frac{W_n}{1 + W_n W_{oc}}$

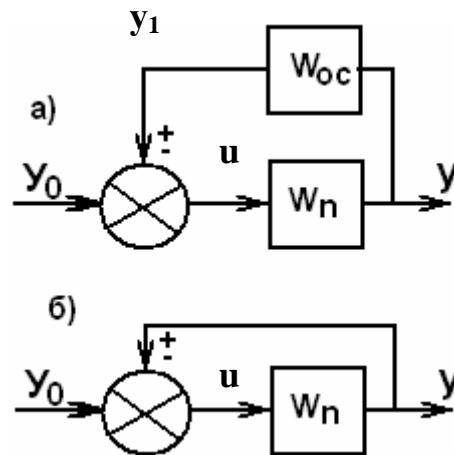


Рисунок 3.15 – Параллельно- встречное соединение звеньев.

Аналогично для положительной ОС:

$$W_{экр} = \frac{W_n}{1 - W_n W_{oc}}$$

Если $W_{oc} = 1$, то обратная связь называется *единичной* (рис.3.15б), тогда $W_{экр} = W_n / (1 \pm W_n)$.

Замкнутую систему называют *одноконтурной*, если при ее размыкании в какой либо точке получают цепочку из последовательно соединенных элементов (рис.3.16а). Участок цепи, состоящий из последовательно соединенных звеньев, соединяющий точку приложения входного сигнала с точкой съема выходного сигнала, называется *прямой цепью* (рис.3.16б). Передаточная функция прямой цепи – $W_n = W_o \cdot W_1 \cdot W_2$.

Цепь из последовательно соединенных звеньев, входящих в замкнутый контур, называют *разомкнутой цепью* (рис.3.16в), передаточная функция которой $W_p = W_1 W_2 W_3 W_4$.

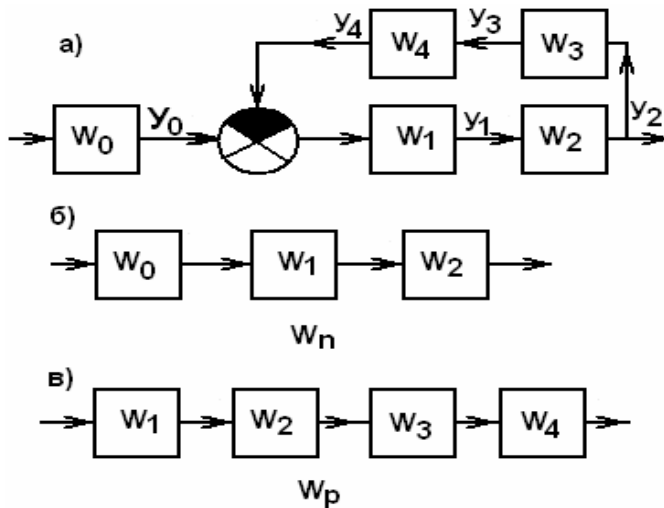


Рисунок 3.16 – Замкнутая одноконтурная система.

Исходя из приведенных выше способов эквивалентного преобразования структурных схем, одноконтурная система может быть представлена одним звеном с передаточной функцией:

$$W_{\text{эKB}} = W_n / (1 \pm W_p)$$

– передаточная функция одноконтурной замкнутой системы с отрицательной ОС равна передаточной функции прямой цепи, поделенной на единицу плюс передаточная функция разомкнутой цепи.

Для положительной ОС в знаменателе – знак минус. Если сменить точку снятия выходного сигнала, то меняется вид прямой цепи. Так, если считать выходным сигнал y_1 на выходе звена W_1 , то

$$W_p = W_0 W_1.$$

Выражение для передаточной функции разомкнутой цепи не зависит от точки снятия выходного сигнала.

Замкнутые системы бывают *одноконтурными* и *многоконтурными* (рис.3.17). Чтобы найти эквивалентную передаточную функцию для данной схемы, нужно сначала осуществить преобразование отдельных участков.

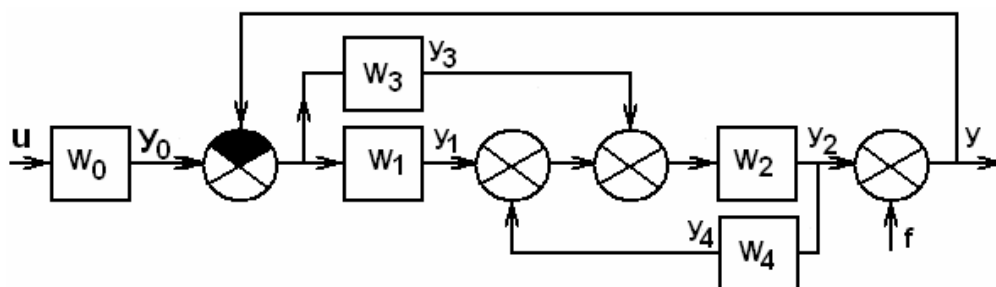


Рисунок 3.17 – Многоконтурные замкнутые системы.

Если многоконтурная система имеет перекрещивающиеся связи, то для вычисления эквивалентной передаточной функции нужны дополнительные правила. Эти правила сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Правила структурных преобразований

Преобразование	Структурная схема	
	Исходная	Эквивалентная
Перенос точки разветвления через элемент		
Перенос сумматора через элемент		
Вынос точки разветвления из параллельного соединения		
Вынос точки разветвления из контура обратной связи		

Найденные с помощью правил структурных преобразований передаточные функции позволяют достаточно просто определить временные и частотные характеристики и получить качественные и количественные оценки динамики и статики САУ.

Контрольные вопросы к главе 3.

1. Что называется статическим режимом САУ?
2. Что называется статическими характеристиками САУ?
3. В каком случае статическая характеристика задается семейством кривых?
4. Что называется уравнением статики САУ?
5. Что называется коэффициентом передачи, в чем его отличие от коэффициента усиления?
6. В чем отличие нелинейных звеньев от линейных?
7. Как построить статическую характеристику нескольких звеньев?
8. В чем отличие астатических звеньев от статических?
9. В чем отличие астатического регулирования от статического?
10. Как сделать статическую САУ астатической?
11. Что называется статической ошибкой регулятора, как ее уменьшить?
12. Что называется статизмом САУ?
13. Назовите достоинства и недостатки статического и астатического регулирования?
14. Какой режим САУ называется динамическим?
15. Что называется регулированием?
16. Назовите возможные виды переходных процессов в САУ.
17. Что называется уравнением динамики?
18. Как провести теоретическое исследование динамики САУ?
19. Почему уравнение динамики САУ называется уравнением в отклонениях?
20. Справедлив ли для уравнения динамики САУ принцип суперпозиции?
21. Представьте звено с двумя и более входами схемой, состоящей из звеньев с одним входом?
22. Запишите линеаризованное уравнение динамики в обычной форме.
23. Какими свойствами обладает дифференциальный оператор p ?
24. Что называется передаточной функцией звена?

25. Запишите линеаризованное уравнение динамики с использованием передаточной функции.
27. Что называется динамическим коэффициентом усиления звена?
28. Что называется характеристическим полиномом звена?
29. Что называется нулями и полюсами передаточной функции?
30. Что называется динамическим звеном?
31. Что называется структурной схемой САУ?
32. Что называется элементарными и типовыми динамическими звеньями?
33. Как сложную передаточную функцию разложить на передаточные функции типовых звеньев?
34. Запишите линеаризованное уравнение динамики в операторной форме.
35. Перечислите типичные схемы соединения звеньев САУ?
36. Как преобразовать цепь последовательно соединенных звеньев к одному звену?
37. Как преобразовать цепь параллельно соединенных звеньев к одному звену? Как преобразовать обратную связь к одному звену?
38. Что называется прямой цепью САУ?
39. Что называется разомкнутой цепью САУ?
40. Как перенести сумматор через звено по ходу и против движения сигнала?
41. Как перенести узел через звено по ходу и против движения сигнала?
42. Как перенести узел по ходу и против движения сигнала?
43. Как перенести сумматор через сумматор по ходу и против движения сигнала?
44. Как перенести узел через сумматор и сумматор через узел по ходу и против движения сигнала?
45. Что называется неэквивалентными участками линий связи в структурных схемах?
46. Как преобразовать обратную связь к одному звену?

Глава 4. Временные характеристики САУ

4.1. Понятие временных характеристик

Для оценки динамических свойств системы и отдельных звеньев принято исследовать их реакцию на типовые входные воздействия, которые наиболее полно отражают особенности реальных возмущений.

Это позволяет сравнивать отдельные элементы между собой с точки зрения их динамических свойств и, зная реакцию системы на типовые воздействия, можно судить о том, как она будет вести себя при сложных изменениях входной величины.

Наиболее распространенными типовыми воздействиями являются: ступенчатое, импульсное и гармоническое воздействия.

Любой сигнал $u(t)$, имеющий сложную форму, можно разложить на сумму типовых воздействий $u_i(t)$ и исследовать реакцию системы на каждую из составляющих, а затем, пользуясь принципом суперпозиции, получить результирующее изменение выходной величины $y(t)$, суммируя полученные таким образом составляющие выходного сигнала $y_i(t)$.

Особенно важное значение в ТАУ придают ступенчатому воздействию

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

Все остальные воздействия могут быть сведены к нему. Так, например, реальный импульсный сигнал может быть представлен двумя ступенчатыми сигналами одинаковой величины, но противоположными по знаку, поданными один за другим через интервал времени Δt (рис.4.1.).

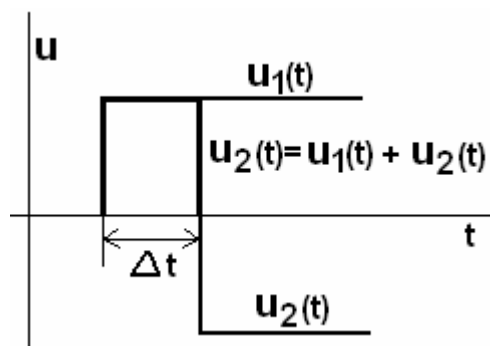


Рисунок 4.1 – Представление импульсного сигнала двумя ступенчатыми.

Зависимость изменения выходной величины системы от времени при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия при нулевых начальных условиях называется *переходной характеристикой* и обозначается $h(t)$.

Не менее важное значение в ТАУ уделяется *импульсной переходной характеристике* $\omega(t)$, которая описывает реакцию системы на единичное импульсное воздействие при нулевых начальных условиях. Единичный импульс физически представляет из себя, ограничивающий единичную площадь, очень узкий импульс, ширина которого стремится к нулю, а высота - к бесконечности. Математически он описывается дельта - функцией $d(t) = u'(t)$.

Переходная и импульсная переходная характеристики называются *временными характеристиками*. Каждая из них является исчерпывающей характеристикой системы и любого ее звена при нулевых начальных условиях. По ним можно однозначно определить выходную величину при произвольном входном воздействии.

Зная передаточную функцию $W(p) = K(p)/D(p)$, выражение для переходной функции можно найти из формулы Хевисайда:

$$h(t) = \frac{K(0)}{D(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{K(p_k) e^{p_k t}}{p_k D'(p_k)},$$

где p_k - корни характеристического уравнения $D(p) = 0$.

Взяв производную от переходной функции, можно получить выражение для импульсной переходной функции $\omega(t) = h'(t)$.

4.2. Переходные характеристики элементарных звеньев

Типовым динамическим звеном (ТДЗ) САР является составная часть системы, которая описывается дифференциальным уравнением не выше второго порядка. Звено, как правило, имеет один вход и один выход. Рассмотрим основные типовые звенья.

4.2.1. Безынерционное (пропорциональное, усилительное) звено

Типовое уравнение взаимосвязи выходного и входного сигналов этого звена является алгебраическим:

$$y(t) = ku(t).$$

где k - постоянный коэффициент.

Передаточная функция:

$$W(p) = k.$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = kI(t).$$

Пропорциональное звено мгновенно (без инерции) реагирует на возмущающее воздействие. Выходной сигнал пропорционален входному сигналу. Ордината выходного сигнала равна коэффициенту пропорциональности k .

В ответ на единичное ступенчатое воздействие сигнал на выходе мгновенно достигает величины в k раз большей, чем на входе, и сохраняет это значение (рис.4.2а.). При $k = 1$ звено никак себя не проявляет, а при $k = -1$ - инвертирует входной сигнал.

Любое реальное звено обладает инерционностью, но с определенной точностью некоторые реальные звенья могут рассматриваться как безынерционные, например, жесткий механический рычаг (рис.4.2.б), редуктор (рис.4.2.в), потенциометр (рис.4.2.г) и т.п.

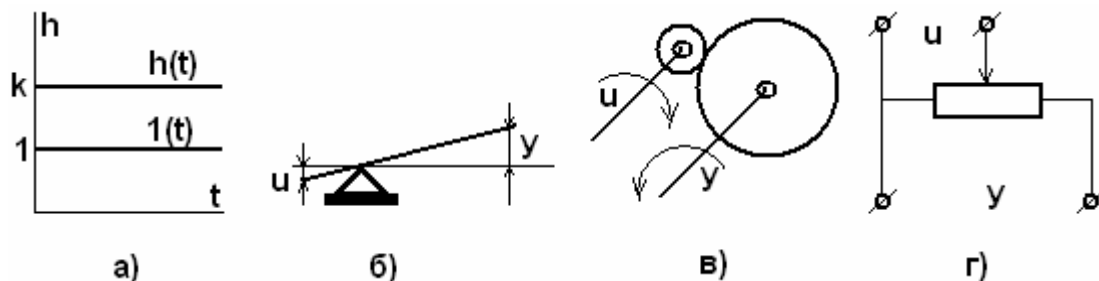


Рисунок 4.2 – Примеры безынерционного (пропорционального, усилительного) звена.

4.2.2. Интегрирующее (астатическое) звено

Уравнение интегрирующего звена имеет следующий вид:

$$y(t) = k \int_0^t u(t) dt ,$$

или
$$\frac{dy}{dt} = ku' ,$$

или $p_y = k_u$.

Передаточная функция: $W(p) = k/p$.

Переходная характеристика (рис.4.3.):

$$h(t) = k \int_0^t 1(t) dt = kt .$$

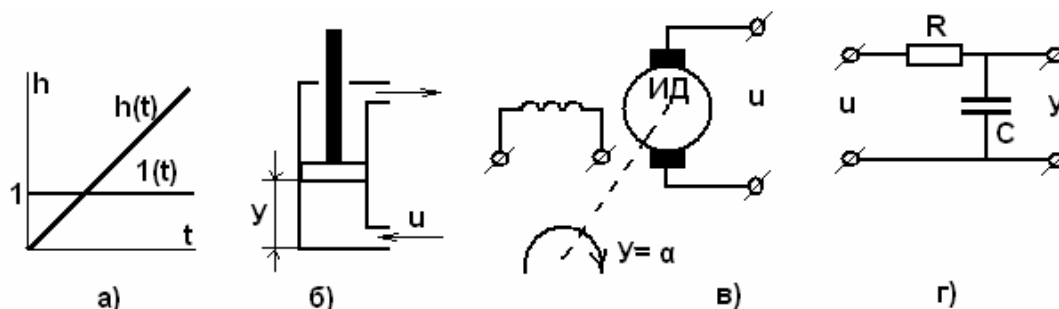


Рисунок 4.3 – Примеры интегрирующих (астатических) звеньев.

При $k = 1$ звено представляет собой “чистый” интегратор $W(p) = 1/p$. Интегрирующее звено неограниченно “накапливает” входное воздействие. Введение его в САУ превращает систему в астатическую (рис. 4.3а), то есть ликвидирует статическую ошибку. Примерами интегрирующих звеньев могут быть поршневой гидравлический двигатель (рис. 4.3б), электродвигатель (рис.4.3в), электрическая емкость (рис. 4.3г) и т.п.

Примером реализации астатического ТДЗ может быть любой накопитель - бак равного по высоте сечения с жидкостью, на выходе которого работает насос с постоянной производительностью (рис. 4.4).

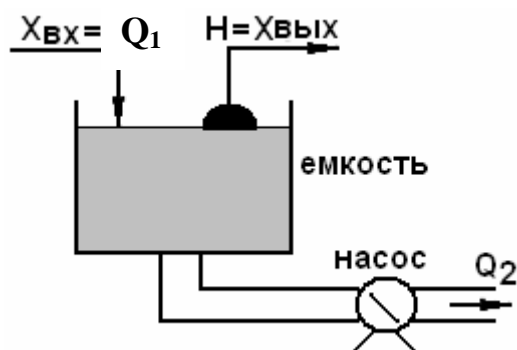


Рисунок 4.4 – Пример реализации астатического звена – бак с жидкостью и выходным насосом.

Объекты, которые аппроксимируют астатическим или интегрирующим звеном, называют *астатическими объектами*.

4.2.3. Инерционное звено первого порядка (апериодическое)

Уравнение динамики инерционного звена первого порядка:

$$T \frac{dy}{dt} + y = ku,$$

или

$$Tpy + y = ku.$$

Это уравнение динамики, называемое иногда кривой разгона, имеет вид экспоненты.

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Переходная характеристика может быть получена с помощью формулы Хевисайда:

$$h(t) = \frac{K(0)}{D(0)} + \frac{K(p_1)e^{p_1 t}}{p_1 D'(p_1)} = \frac{k}{T0+1} + \frac{ke^{-t/T}}{-(1/T)T} = k(1 - e^{-t/T}),$$

где $p_1 = -1/T$ - корень уравнения $D(p) = Tp + 1 = 0$; $D'(p_1) = T$.

Переходная характеристика имеет вид экспоненты (рис.4.5а), по которой можно определить передаточный коэффициент k , равный установившемуся значению h (асимптота), и постоянную времени T_0 по времени t , соответствующему точке пересечения касательной к кривой в начале координат с ее асимптотой. При достаточно больших T_0 звено на начальном участке может рассматриваться как интегрирующее, при малых T звено приближенно можно рассматривать как безынерционное.

Пример апериодического звена - четырехполюсник из сопротивления R и емкости C (рис.4.5б).

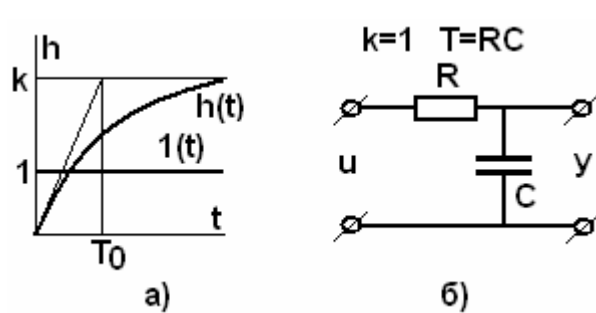


Рисунок 4.5 – Инерционное звено первого порядка (апериодическое).

У экспоненты есть свойство: если к любой ее точке провести касательную, а затем точку касания и точку пересечения касательной с асимптотой, к которой с течением времени приближается экспонента, спроецировать на ось времени t , то получают одну и ту же величину времени - «постоянную времени» T_0 , которая характеризует инерционные свойства объекта.

Ордината асимптоты, к которой стремится экспонента, по величине равна коэффициенту k в передаточной функции апериодического звена. Таким образом, по графику кривой разгона можно найти оба коэффициента- k и T_0 в передаточной функции апериодического звена.

Еще одним примером реализации апериодического звена может быть установка - емкость равного по высоте сечения, которая изображена на рис. 4.6. Бак на входе заполняет поток воды с расходом Q_1 , из бака вытекает свободно поток с расходом Q_2 .

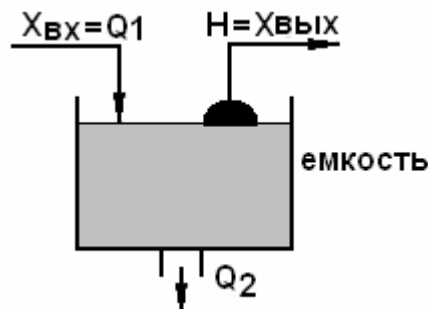


Рисунок 4.6 – Пример реализации апериодического звена при наполнении и истечении емкости с равным расходом.

Регулируемый параметр $X_{вых}$ - уровень H в баке. При «единичном скачке» Q_1 уровень H повышается, увеличивается гидростатическое давление, возрастает Q_2 и затем уровень H стабилизируется (экспонента приближается к асимптоте). Эта способность самостоятельно восстанавливать равновесие, присущая объектам, аппроксимируемым апериодическим ТДЗ за счет на-

полнения или опорожнения энергии или вещества, называется *самовыравниванием*.

Самовыравнивание количественно определяется *коэффициентом самовыравнивания*, который равен обратной величине коэффициента k передаточной функции звена:

$$C = 1/k.$$

4.2.4. Инерционные звенья второго порядка

Уравнение инерционного звена второго порядка:

$$T_1^2 p^2 y + T_2 p y + y = k u.$$

Передаточная функция:
$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}.$$

Решение уравнения зависит от соотношения постоянных времени T_1 и T_2 , которое определяет коэффициент затухания

$$r = \frac{T_2}{2T_1}.$$

Можно записать
$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2rTp + 1},$$

где $T = T_1$.

Если $r \geq 1$, то знаменатель $W(p)$ имеет два вещественных корня p_1 и p_2 и раскладывается на два сомножителя:

$$T_2 p^2 + 2rTp + 1 = T_2 (p - p_1)(p - p_2).$$

Такое звено можно разложить на два апериодических звена первого порядка, поэтому оно не является элементарным.

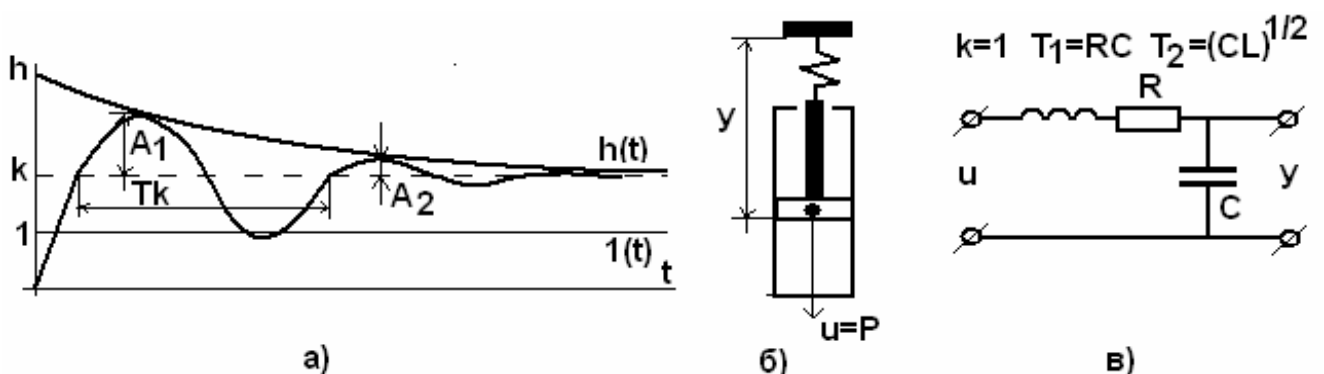


Рисунок 4.7 – Переходная характеристика инерционного звена второго порядка: A_1 ; A_2 – амплитуда колебаний в разное время t ; T_k – период колебаний; $1(t)$ – единичная функция; $h(t)$ – переходная характеристика.

При $r < 1$ корни полинома знаменателя $W(p)$ комплексно сопряженные:

$$p_{1,2} = \alpha \pm j\omega.$$

Переходная характеристика представляет собой выражение, характеризующее затухающий колебательный процесс (рис.4.7а), с затуханием α и частотой ω (рис.4.7). Такое звено называется *колебательным*.

При $r = 0$ колебания носят незатухающий характер. Такое звено является частным случаем колебательного звена и называется *консервативным*.

Примерами колебательного звена могут служить пружина, имеющая успокоительное устройство (рис.4.7б), электрический колебательный контур с активным сопротивлением (рис.4.7в) и т.п. Зная характеристики реального устройства можно, определить его параметры как колебательного звена. Передаточный коэффициент k равен установившемуся значению переходной функции.

4.2.5. Дифференцирующее звено

Различают идеальное и реальное дифференцирующие звенья. Уравнение динамики идеального звена:

$$y(t) = k \frac{du}{dt}, \text{ или } y = kpu.$$

Здесь выходная величина пропорциональна скорости изменения входной величины. Передаточная функция:

$$W(p) = kp.$$

При $k=1$ звено осуществляет чистое дифференцирование $W(p) = p$. Переходная характеристика:

$$h(t) = k \cdot I'(t) = d(t).$$

Идеальное дифференцирующее звено реализовать невозможно, так как величина всплеска выходной величины при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия всегда ограничена. На практике используют реальные дифференцирующие звенья, осуществляющие приближенное дифференцирование входного сигнала.

Его уравнение:

$$T p y + y = k T p u.$$

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{pTk}{1 + pT}.$$

При малых T звено можно рассматривать как идеальное дифференцирующее. Переходную характеристику можно вывести с помощью формулы Хевисайда:

$$h(t) = \frac{K(0)}{D(0)} + \frac{K(p_1)e^{p_1 t}}{p_1 D'(p_1)} = ke^{-t/T},$$

здесь $p_1 = -1/T$ - корень характеристического уравнения $D(p) = Tp + 1 = 0$; кроме того, $D'(p_1) = T$.

По переходной характеристике, имеющей вид экспоненты (рис.4.8а), можно определить передаточный коэффициент k и постоянную времени T . Примерами таких звеньев могут являться четырехполюсник из сопротивления и емкости (рис.4.8б) и демпфер, (рис.4.8.в). Дифференцирующие звенья являются главным средством, применяемым для улучшения динамических свойств САУ.

При подаче на вход единичного ступенчатого воздействия выход оказывается ограничен по величине и растянут во времени (рис.4.8а).

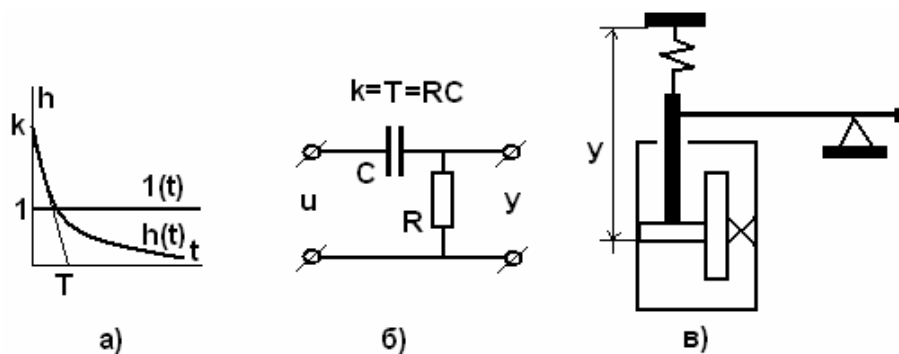


Рисунок 4.8 – Разновидность типовых дифференцирующих звеньев САУ.

4.2.6. Запаздывающее (чистого или транспортного запаздывания) звено

Запаздывающее звено имеет переходную характеристику

$$W(p) = e^{-pT},$$

и воспроизводит входное воздействие с запаздыванием по времени T .

Примером реализации запаздывающего звена может быть ленточный транспортёр длиной L , перемещающийся со скоростью V (рис. 4.9). Поток сыпучего материала в начале ленточного транспортёра $Q_1 = X_{вх}$, поток материала, ссыпающегося в конце - $Q_2 = X_{вых}$. Время движения материала по ленточному транспортёру будет равно:

$$\Delta\tau = L/V = \tau_o.$$

Если на вход ленточного транспортёра подать возмущение типа «единичного скачка» (открыть подачу материала), то этот же «единичный скачок» появится на выходе транспортёра через отрезок времени равный времени запаздывания. Кривая разгона такого процесса изображена на рис. 4.10.

Теперь представим, что на вход транспортёра подан «единичный импульс»- единица материала. Через время запаздывания мы его получим на выходе - в конце ленточного транспортёра. То же будет и с изменением входного потока по синусоиде или другому закону изменения во времени.

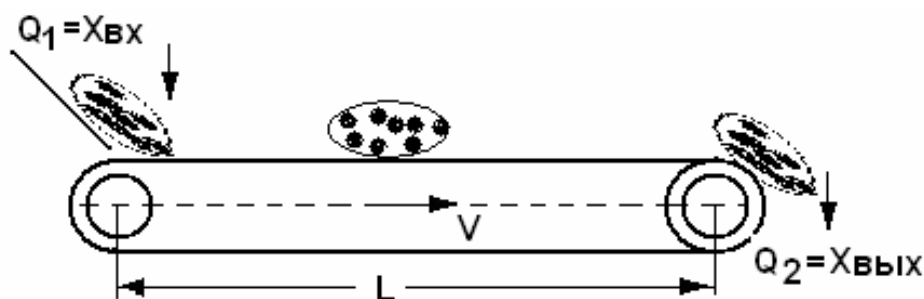


Рисунок 4.9 – Пример реализации запаздывающего звена – перемещение продукта по транспортеру.

Следовательно, выходной сигнал запаздывающего звена повторяет входной сигнал, но позже на время запаздывания. Исходя из этого, можно записать общее уравнение взаимосвязи входного и выходного сигналов запаздывающего звена в динамическом режиме работы:

$$X_{вх}(T) = X_{вых}(T + T_o).$$

Реальные объекты управления могут состоять из нескольких типовых звеньев ТДЗ, которые соединяются последовательно, параллельно и смешанно.

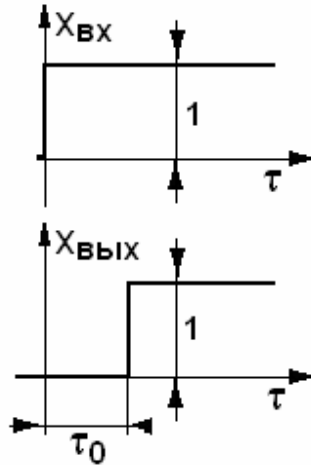


Рисунок 4.10 – Переходная характеристика запаздывающего звена.

Контрольные вопросы к главе 4.

1. Что называется и какие Вы знаете типовые входные воздействия? Для чего они нужны?
2. Что называется переходной характеристикой?
3. Что называется импульсной переходной характеристикой?
4. Дайте определение временной характеристики?
5. Как получить кривую переходного процесса при сложной форме входного воздействия, если известна переходная характеристика звена?
6. Что называется безынерционным звеном?
7. Назовите уравнение динамики безынерционного звена.
8. Назовите передаточную функцию безынерционного звена.
9. Назовите вид переходной характеристики безынерционного звена.
10. Что называется интегрирующим звеном?
11. Назовите уравнение динамики интегрирующего звена.
12. Назовите передаточную функцию интегрирующего звена.
13. Назовите вид переходной характеристики интегрирующего звена.
14. Что называется аperiodическим звеном?
15. Назовите уравнение динамики аperiodического звена.
16. Назовите передаточную функцию аperiodического звена.
17. Назовите вид переходной характеристики аperiodического звена.
18. Что называется колебательным звеном?
19. Назовите уравнение динамики колебательного звена.
20. Назовите передаточную функцию колебательного звена.
21. Назовите вид переходной характеристики колебательного звена.

22. Почему не являются элементарными инерционными звеньями второго порядка с коэффициентом затухания большим или равным единице?
23. Что называется реальным дифференцирующим звеном, его уравнение динамики, передаточная функция, вид переходной характеристики?
24. Что называется дифференцирующим звеном?
25. Назовите уравнение динамики дифференцирующего звена.
26. Назовите передаточную функцию дифференцирующего звена.
27. Назовите вид переходной характеристики дифференцирующего звена.

Глава 5. Частотные характеристики САУ

5.1. Понятие частотных характеристик

В условиях реальной эксплуатации САУ часто возникает необходимость определить реакцию на периодические сигналы, т.е. определить сигнал на выходе САУ, если на один из входов подается периодически сигнал гармонической формы. Решение этой задачи возможно получить путем использования частотных характеристик системы.

Зависимости, связывающие амплитуду и фазу выходного сигнала с частотой входного сигнала, называются частотными характеристиками (ЧХ). Анализ ЧХ системы с целью исследования ее динамических свойств называется *частотным анализом*.

Частотные характеристики могут быть получены экспериментальным или аналитическим путем. При аналитическом определении исходным моментом является одна из передаточных функций САУ (по управлению или по возмущению).

Возможно также определение частотных характеристик исходя из передаточных функций разомкнутой системы и передаточной функции по ошибке.

Если подать на вход системы с передаточной функцией $W(p)$ гармонический сигнал

$$u(t) = U_m(\cos t + j \sin \omega t),$$

где U_m – амплитуда колебаний, ω – частота колебаний, t – время, то после завершения переходного процесса на выходе установятся гармонические колебания

$$y(t) = Y_m e^{j(\omega t + \varphi)} = Y_m e^{j\omega t} e^{j\varphi}$$

с той же частотой ω , но иными амплитудой Y_m и фазой φ , зависящими от частоты ω возмущающего воздействия. По ним можно судить о динамических свойствах системы.

Подставим выражения для $u(t)$ и $y(t)$ в уравнение динамики

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n) y = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) u.$$

Учтем, что

$$pu = pU_m e^{j\omega t} = U_m j\omega e^{j\omega t} = j\omega u,$$

а значит
$$p^n u = p^n U_m e^{j\omega t} = U_m (j\omega)^n e^{j\omega t} = (j\omega)^n u.$$

Аналогичные соотношения можно записать и для левой части уравнения. Получим:

$$p^n u = p^n U_m e^{j\omega t} = U_m (j\omega)^n e^{j\omega t} = (j\omega)^n u$$

По аналогии с передаточной функцией можно записать:

$$y = \frac{b_0 (j\omega)^m + b_1 (j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_n} u = W(j\omega) u.$$

$W(j\omega)$, равная отношению выходного сигнала к входному при изменении входного сигнала по гармоническому закону, называется *частотной передаточной функцией*. Легко заметить, что она может быть получена путем простой замены p на $j\omega$ в выражении $W(p)$.

$W(j\omega)$ есть комплексная функция, поэтому:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega);$$

где $P(\omega)$ - вещественная ЧХ (ВЧХ);

$Q(\omega)$ - мнимая часть ЧХ (МЧХ);

$A(\omega)$ - амплитудная ЧХ (АЧХ);

$\varphi(\omega)$ - фазовая ЧХ (ФЧХ).

АЧХ дает отношение амплитуд выходного и входного сигналов, ФЧХ - сдвиг по фазе выходной величины относительно входной:

$$A(\omega) = \frac{U_m}{Y_m} = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}$$

Если $W(j\omega)$ изобразить вектором на комплексной плоскости, то при изменении

$$j(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{P(\omega)}{Q(\omega)}$$

и ω от 0 до $+\infty$ его конец будет вычерчивать кривую, называемую *годографом вектора* $W(j\omega)$, или *амплитудно - фазовую частотную характеристику (АФЧХ)* (рис.5.1.). Ветвь АФЧХ при изменении ω от $-\infty$ до 0 можно получить зеркальным отображением данной кривой относительно вещественной оси.

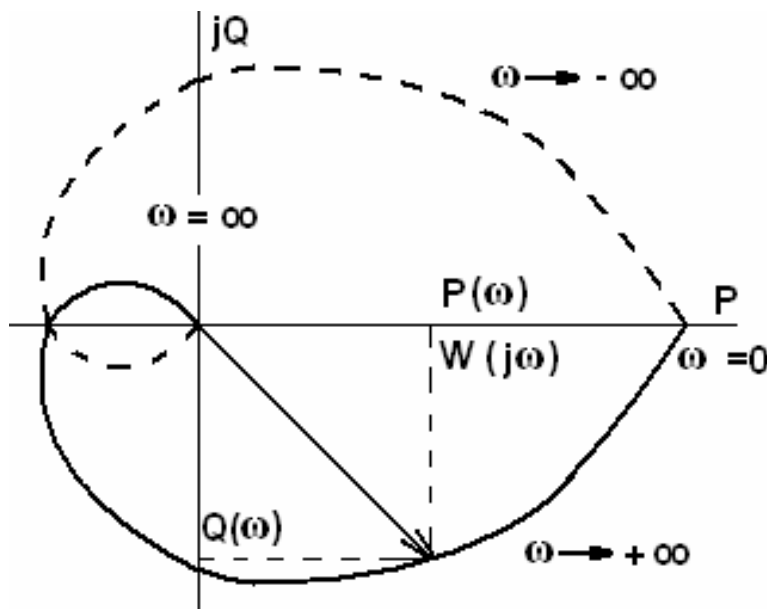


Рисунок 5.1 – Годограф вектора $W(j\omega)$ (АФЧХ).

В ТАУ широко используются логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) (рис.5.2.): логарифмическая амплитудная ЧХ (ЛАЧХ) $L(\omega)$ и логарифмическая фазовая ЧХ (ЛФЧХ) $\varphi(\omega)$. Они получаются путем логарифмирования передаточной функции.

По оси абсцисс откладывается частота ω в логарифмическом масштабе. То есть единичным промежуткам по оси абсцисс соответствует изменение ω в 10 раз. Такой интервал называется *декадой*. Так как $\lg(0) = -\infty$, то ось ординат проводят произвольно.

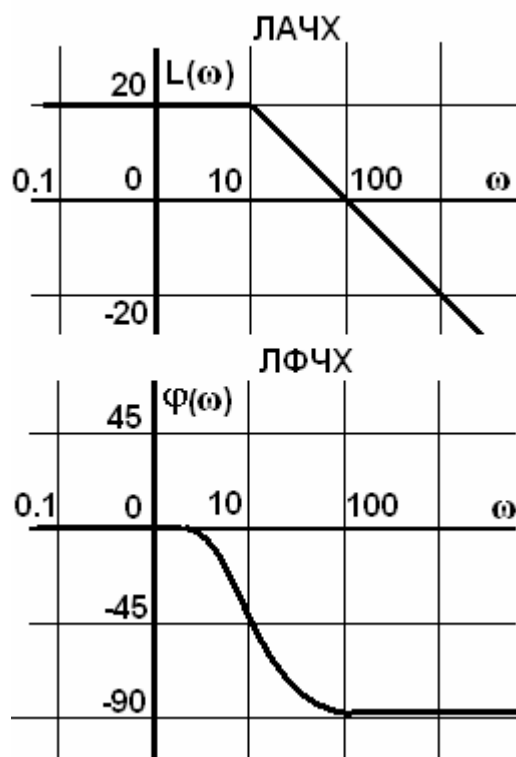


Рисунок 5.2 – Логарифмические частотные характеристики.

5.2. Частотные характеристики типовых звеньев

Зная передаточную функцию звена $W(p)$ легко получить все его частотные характеристики. Для этого необходимо подставить в нее $j\omega$ вместо p , получим АФЧХ $W(j\omega)$. Затем надо выразить из нее ВЧХ $P(\omega)$ и МЧХ $Q(\omega)$. После этого преобразуют АФЧХ в показательную форму и получают АЧХ $A(\omega)$ и ФЧХ $\varphi(\omega)$, а затем определяют выражение ЛАЧХ $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$ (ЛФЧХ отличается от ФЧХ только масштабом оси абсцисс).

5.2.1. Безынерционное звено

Передаточная функция:

$$W(p) = k.$$

$$\text{АФЧХ: } W(j\omega) = k.$$

$$\text{ВЧХ: } P(\omega) = k.$$

$$\text{МЧХ: } Q(\omega) = 0.$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = k.$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = 0.$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20 \lg k.$$

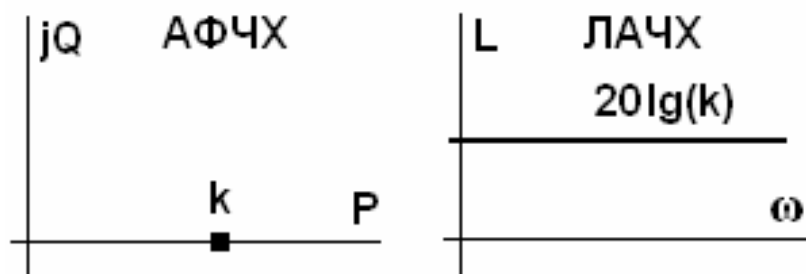


Рисунок 5.3 – АФЧХ и ЛФЧХ безынерционного звена.

Некоторые ЧХ показаны на рис.5.3. Звено пропускает все частоты одинаково с увеличением амплитуды в k раз и без сдвига по фазе.

5.2.2. Интегрирующее звено

Передаточная функция: $W(p) = k/p$.

Рассмотрим частный случай, когда $k = 1$, то есть $W(p) = 1/p$.

$$\text{АФЧХ: } W(j\omega) = \frac{1}{j\omega} = \frac{1}{\omega} e^{-j\pi/2}.$$

$$\text{ВЧХ: } P(\omega) = 0.$$

$$\text{МЧХ: } Q(\omega) = -1/\omega.$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = 1/\omega.$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = -\pi/2.$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20\lg(1/\omega) = -20\lg(\omega).$$

ЧХ показаны на рис.5.4. Все частоты звено пропускает с запаздыванием по фазе на $\varphi=90^\circ$. Амплитуда выходного сигнала увеличивается при уменьшении частоты и уменьшается до нуля при росте частоты (звено "заваливает" высокие частоты).

ЛАЧХ представляет собой прямую, проходящую через точку $L(\omega) = 0$ при $\omega = 1$. При увеличении частоты на декаду ордината уменьшается на $20\lg 10 = 20\text{дб}$, то есть наклон ЛАЧХ равен -20 дб/дек (децибел на декаду).

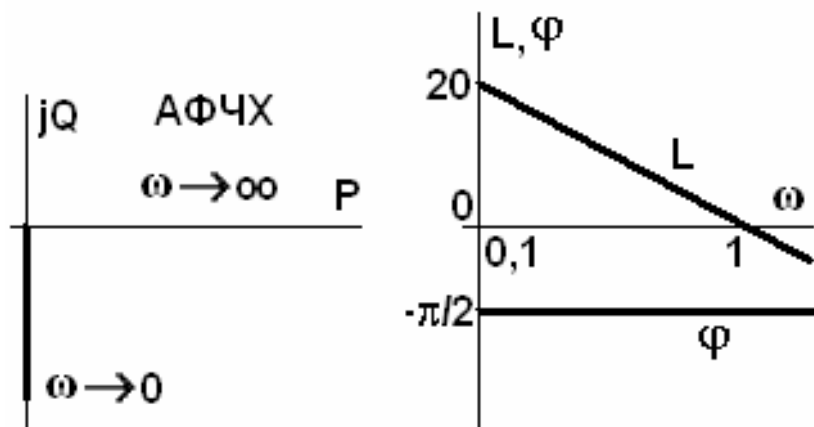


Рисунок 5.4 – Частотные характеристики интегрирующего звена.

5.2.3. Аperiodическое звено

Для аperiodического звена при $k = 1$ получаем следующие выражения ЧХ.

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{1}{Tp + 1};$$

$$\text{АФЧХ: } W(j\omega) = \frac{1}{j\omega T + 1} = \frac{1 - j\omega T}{1 + (\omega T)^2};$$

$$\text{ВЧХ: } P(\omega) = \frac{1}{1 + (\omega T)^2};$$

$$\text{МЧХ: } Q(\omega) = -\frac{\omega T}{1 + (\omega T)^2}.$$

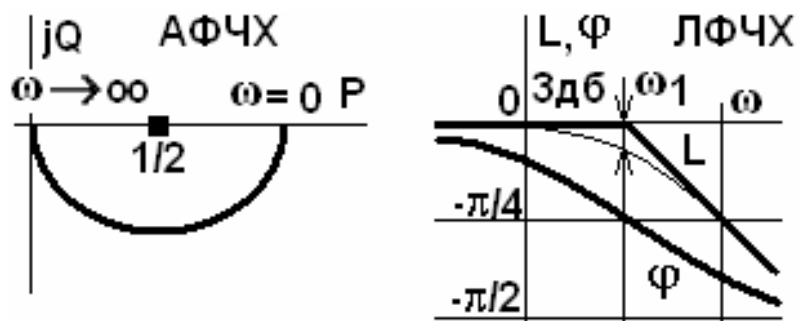


Рисунок 5.5 – Частотные характеристики для аperiodического звена.

$$\varphi(\omega) = \varphi_1 - \varphi_2 = -\operatorname{arctg}(\omega T);$$

$$A(\omega) = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\omega T}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}};$$

$$L(\omega) = 20\lg(A(\omega)) = -10\lg(1 + (\omega T)^2),$$

где: A_1 и A_2 - амплитуды числителя и знаменателя ЛФЧХ;
 φ_1 и φ_2 - аргументы числителя и знаменателя.

Частотные характеристики показаны на рис.5.5. АФЧХ есть полуокружность радиусом $1/2$ с центром в точке $P = 1/2$.

При построении асимптотической ЛАЧХ считают, что при $\omega < \omega_1 = 1/T$ можно пренебречь компонентой $(\omega T)^2$ в выражении для $L(\omega)$, то есть $L(\omega) \approx -10\lg 1 = 0$. При $\omega > \omega_1$ пренебрегают единицей в выражении в скобках, то есть $L(\omega) \approx -20\lg(\omega)$.

Поэтому ЛАЧХ проходит вдоль оси абсцисс до сопрягающей частоты, затем - под наклоном - 20 дБ/дек. Частота ω_1 называется сопрягающей частотой. Максимальное отличие реальных ЛАЧХ от асимптотических не превышает 3 дБ при $\omega = \omega_1$.

ЛФЧХ асимптотически стремится к нулю при уменьшении ω до нуля (чем меньше частота, тем меньше искажения сигнала по фазе) и к $-\pi/2$ при возрастании ω до бесконечности. Перегиб в точке $\omega = \omega_1$ при $\varphi(\omega) = -\pi/4$. ЛФЧХ всех апериодических звеньев имеют одинаковую форму и могут быть построены по типовой кривой с параллельным сдвигом вдоль оси частот.

5.2.4. Правила построения ЧХ элементарных звеньев

При построении ЧХ некоторых звеньев можно использовать “правило зеркала”: при $k=1$ ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев с обратными передаточными функциями зеркальны относительно горизонтальной оси. Так, на рис.5.6 изображены ЧХ идеального дифференцирующего (а) и идеального форсирующего звеньев (б).

Если $k \neq 1$, то передаточную функцию звена можно рассматривать как произведение $W = kW_1$,

где W_1 - передаточная функция с $k = 1$.

При этом амплитуда вектора АФЧХ $W(j\omega)$ при всех значениях ω должна быть увеличена в k раз, то есть $A(\omega) = kA_1(\omega)$.

Центр полуокружности АФЧХ апериодического звена будет находиться не в точке $P = 1/2$, а в точке $k/2$. ЛАЧХ также изменится: $L(\omega) = 20\lg A(\omega) = 20\lg kA_1(\omega) = 20\lg k + 20\lg A_1(\omega)$.

При $k \neq 1$ ЛАЧХ звена нужно поднять по оси ординат, не меняя ее формы, на $20 \lg k$. На ЛФЧХ изменение k никак не отразится. Для примера на рис.5.7 приведены частотные характеристики апериодического звена при $k = 10$ и $T = 1$ с. При этом ЛАЧХ апериодического звена с $k = 1$ поднята вверх на $20 \lg 10 = 20$.

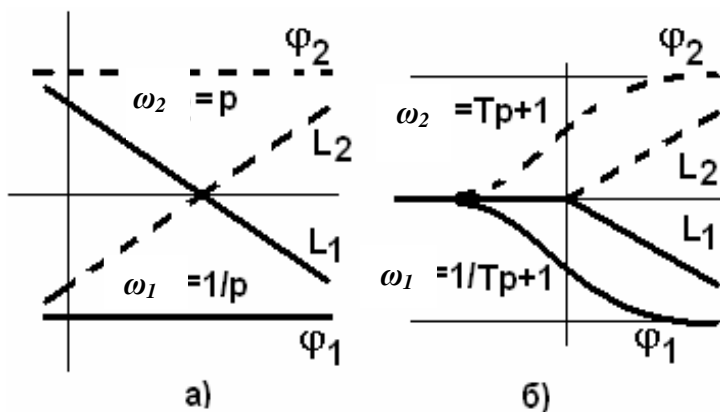


Рисунок 5.6 – ЧХ идеального дифференцирующего (а) и идеального форсирующего звеньев (б).

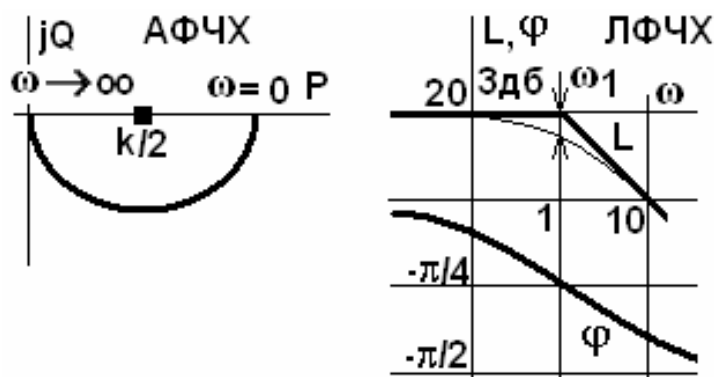


Рисунок 5.7 – Частотные характеристики апериодического звена при $k = 10$ и $T = 1$ с.

5.3. Частотные характеристики разомкнутых одноконтурных САУ

При исследовании и проектировании САУ часто используют АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых систем. Это объясняется тем, что разомкнутые САУ более просто исследовать экспериментально, чем замкнутые. В то же время по ним можно получить исчерпывающую информацию о поведении данной САУ в замкнутом состоянии.

Любую многоконтурную САУ можно привести к одноконтурной. Разомкнутая одноконтурная САУ состоит из цепочки последовательно соединенных динамических звеньев. Зная передаточную функцию разомкнутой САУ, можно построить ее ЧХ. И наоборот, зная ЧХ разомкнутой САУ, снятую, например, опытным путем, можно найти ее передаточную функцию. Передаточная функция разомкнутой одноконтурной системы равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p).$$

Заменив в этом выражении p на $j\omega$, получим ее:

$$\text{АФЧХ} \quad W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)},$$

$$\text{АЧХ} \quad A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega),$$

значит ЛАЧХ равна сумме ЛАЧХ звеньев:

$$L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega).$$

ЛФЧХ:

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega).$$

Таким образом, ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой САУ строят путем сложения ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев.

Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ рекомендуется следующий порядок:

1) раскладывают сложную передаточную функцию на множители, являющиеся передаточными функциями типовых динамических звеньев (порядок полиномов числителя и знаменателя не выше второго);

2) вычисляют сопрягающие частоты отдельных звеньев и строят асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ каждого элементарного звена;

3) путем суммирования ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев строят результирующие ЧХ.

Контрольные вопросы к главе 5.

1. Что называется частотными характеристиками?
2. Как получить частотные характеристики теоретическим путем по известной передаточной функции звена?
3. Что такое и как получить АФЧХ?
4. Что такое и как получить ВЧХ?
5. Что такое и как получить МЧХ?
6. Что такое и как получить АЧХ?
7. Что такое и как получить ФЧХ?
8. Что такое и как получить ЛАЧХ?
9. Что такое и как получить ЛФЧХ?
10. Как построить годограф АФЧХ?
11. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ безынерционного звена.
12. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ интегрирующего звена.
13. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ апериодического звена.
14. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ колебательного звена.
15. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ консервативного звена.
16. Постройте ЛАЧХ и ЛФЧХ идеального дифференцирующего звена.
17. Постройте ЛАЧХ и ЛФЧХ идеального форсирующего звена.
18. Как изменятся ЛАЧХ и ЛФЧХ звена, если коэффициент усиления возрастет в 100 раз?
19. Что представляет собой разомкнутая одноконтурная САУ?
20. Почему для построения ЧХ разомкнутых одноконтурных САУ удобно пользоваться логарифмическими характеристиками?
21. Чем отличается ЛФЧХ от ФЧХ?
22. Как изменится ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой одноконтурной САУ, если коэффициент усиления увеличить в 10 раз?

Глава 6. Законы регулирования и качество САР

6.1. Характеристики объекта управления

Каждый объект регулирования можно охарактеризовать одним или несколькими количественными и качественными параметрами. Такие величины, как производительность, мощность, расход, влажность продукта, скорость и т.д. изменяются в широких пределах. Законы этих изменений во времени произвольны и носят случайный характер. Однако можно выделить ряд величин, которые присущи любому объекту автоматического управления.

Емкость объекта. Уравнение динамики объекта регулирования в общем виде можно записать (для бесконечно малого отрезка времени, когда зависимость между входными и выходными параметрами можно считать линейной):

$$dy/dt = c dE/dt$$

где dy/dt - скорость изменения регулируемого параметра;

c - постоянная объекта, называемая емкостью объекта, характеризующая его способность запасать энергию;

$E = E_1 - E_2$ — подводимая и отводимая к объекту энергия.

Если $dE > 0$, то в объекте накапливается энергия, что сопровождается увеличением регулируемого параметра y .

Если $dE < 0$, то запас энергии в объекте снижается, т. е. регулируемый параметр уменьшается.

Для многих объектов величины подводимой и затрачиваемой энергии в той или иной степени зависят от значения регулируемого параметра.

Условие $E_1 = E_2$ соответствует состоянию равновесия объекта. При отклонении регулируемого параметра y от заданного y_0 в ту или иную сторону равновесие объекта нарушается.

Если объект накапливает один вид энергии, то он называется одноемкостным, если несколько – многоемкостным (например, LRC контуры - магнитная, тепловая и электрическая энергия).

Механические объекты, например резервуар, обладают способностью накапливать в себе жидкость, газ, сыпучие тела. Понятие емкости здесь связано с объемом резервуара. Печь, термо-

стат, сушильный шкаф способны накапливать тепло. Понятие их емкости связано с теплоемкостью и т. д.

Время разгона — это время, в течение которого регулируемый параметр y изменяется от нуля до номинального значения y при максимальном возмущении или управлении при условии, что скорость изменения dy/dt остается в течение этого времени постоянной, рис. 6.1. Время разгона T_p может быть определено экспериментально по переходной характеристике $y(t)$. Для одноемкостного объекта оно может быть определено как $T_p = T_a/k$, где T_a — постоянная времени объекта; k — тангенс угла наклона касательной в начальной точке $t=0$.

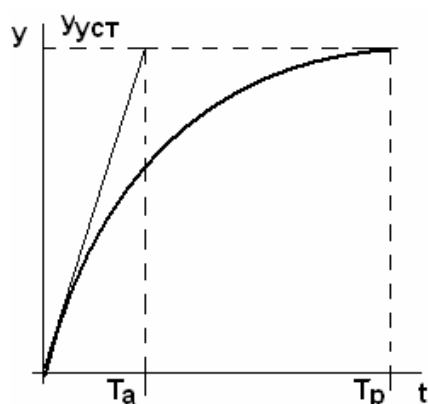


Рисунок 6.1 – К определению времени разгона.

Чувствительность объекта. Чувствительность, или скорость разгона, объекта представляет величину, обратную времени разгона

$$e = 1/T_p.$$

Постоянная времени объекта представляет собой время, в течение которого регулируемый параметр достигает нового установившегося значения при неизменных притоке и расходе вещества или энергии для данного объекта, лишенного самовыравнивания. Значение T_a можно принимать равным

$$T_a = (0,25...0,33)T_p.$$

Самовыравнивание объекта — это свойство объекта после возникновения возмущения приходит в состояние равновесия без внешнего вмешательства (без регулятора), причем каждому возмущению соответствует свое значение установившегося регулируемого параметра. Оценивается самовыравнивание степенью

или коэффициентом самовыравнивания (иногда его называют коэффициентом статизма или саморегулирования).

Запаздывание в объекте. Одной из важнейших характеристик объекта регулирования является его запаздывание. Сущность его состоит в том, что с увеличением или уменьшением нагрузки (расходе энергии, вещества) в объекте параметры изменяют свое значение не сразу, а спустя некоторое время с момента возмущения. При этом различают (аналогично, как и для систем автоматического управления) два вида запаздывания: транспортное и переходное, определяемые свойствами объекта.

6.2. Законы регулирования

Закон регулирования – это закон изменения управляющего параметра, подаваемого на исполнительный механизм. Закон регулирования определяется характеристиками автоматического регулятора, заложенными в его принцип работы.

Зависимость выходного сигнала Y регулятора от входного X называется статической характеристикой регулятора $Y(X)$.

Промышленностью выпускаются регуляторы с пятью законами регулирования. Рассмотрим основные типы регуляторов.

Регуляторы с *позиционным (релейным)* законом регулирования. Структурная схема позиционной САР показана на рис. 6.2.

Данные типы регуляторов еще называют Т-регуляторами или компараторами. Они бывают с *двухпозиционным и трехпозиционным* законом регулирования.

Двухпозиционные имеют дискретную выходную величину Y типа включен/ выключен (например, включение/выключение нагревателя). Т-регулятор включает или выключает выходное реле в зависимости от того, достигла или не достигла регулируемая величина X заданного значения.

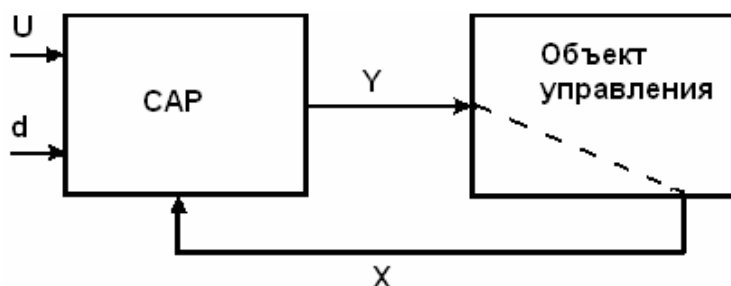


Рисунок 6.2 – Структурная схема позиционной САР: U, d - вектора заданий и зон нечувствительности; X, Y - вектор регулируемой величины и выходной сигнал регулирования.

Зона нечувствительности d определяет разницу в величине срабатывания при возрастании сигнала X и его снижении.

Трехпозиционные регуляторы имеют дискретную выходную величину Y с двумя точками переключения типа включено/выключено.

Для определения возможности применения Т-регулятора необходимо знать инерционность - постоянную времени, и время транспортного запаздывания регулируемого объекта. Двухпозиционное Т-регулирование на примере САР с водяным отоплением при управлении подачи теплоносителя задвижкой иллюстрируется на рис.6.3.

В здание подается то или иное количество теплоты от котельной. Оно регулируется управляемой задвижкой Z . В зависимости от объема помещения V , солнечного тепла и окружающей среды изменяется теплоприток в здание G и температура в здании X . САР должна поддерживать температуру в здании постоянной, заданной в автоматическом регуляторе TR. Пример разгонной характеристики здания приведена на рис.6.4.

Датчик температуры DT подает электрический сигнал в регулятор TR, который сравнивает заданную температуру с действительной в здании. В зависимости от результата сравнения температур подается сигнал на открытие или закрытие заслонки Z .

Если температура в здании меньше заданной, то заслонка открывается и в здание начинает поступать горячая вода. Температура в здании повышается, достигает необходимой величины и автоматический регулятор отключает задвижку. Горячая вода в здание больше не поступает, температура в нем понижается до минимальной величины, включается регулятор, открывается заслонка и т.д.

На вход исполнительного механизма Z подается ступенчатое воздействие Y , в результате чего состояние объекта представляет собой некоторый процесс $X(t)$ – переходную характеристику. Установившееся значение X_y – это максимальное значение температуры в помещении, достигаемая при данной мощности котельной.

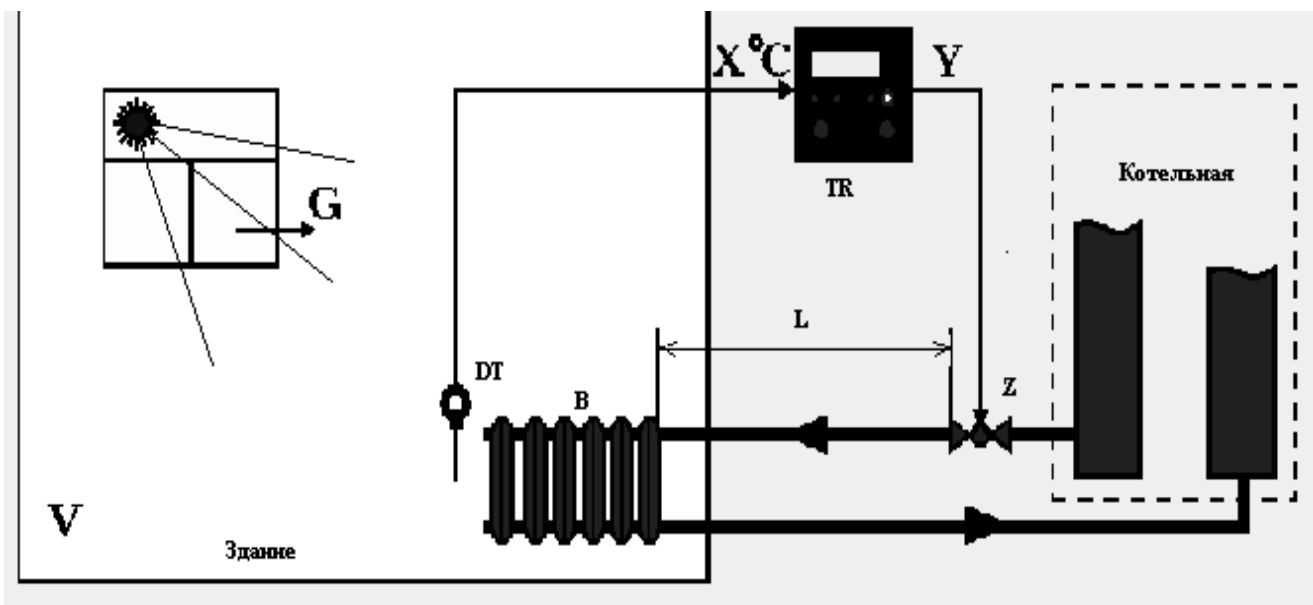


Рисунок 6.3 – Блок-схема САР с водяным отоплением здания:
 G- теплоприток от солнца и окружающей среды; V- объем нагреваемого помещения; B- батареи отопления; DT- датчик температуры; L-расстояние от котельной до здания; TR- автоматический регулятор; Z- исполнительный механизм - управляемая задвижка теплоносителя; X- входной регулируемый параметр- температура в здании; Y- сигнал на исполнительный механизм.

С момента открытия заслонки до момента прихода горячей воды в здание проходит определенное время T_u . Транспортное запаздывание T_u - время после включения заслонки, за которое температура в помещении достигнет принятого значения $0,1X_y$. Оно определяется временем притока воды в батарею из отопительной сети и временем распространения теплового потока в воздухе помещения.

Для экспоненты (без запаздывания) постоянная времени T_a определяется как время, прошедшее с начала процесса до повышения температуры до величины

$$X = 0,63X_y.$$

Постоянная времени объекта регулирования T_a зависит от объема помещения V. Следовательно, уменьшая длину трубопровода L и приближая датчик DT к батарее B, мы можем снизить соотношение T_u/T_a и упростить задачу регулирования.

Для регуляторов с релейным выходом на объект подается 100% мощности - заслонка открывается полностью.

Исходя из соотношения T_u/T_a и выбирается тип регулятора. Т- регулятор можно применять, если $T_u/T_a < 0,1$. Выходная величина Y равна максимальному воздействию (нагреватель включен, заслонка открыта полностью) при рассогласовании

$$\varepsilon = X - U < -d, Y = 0 \text{ при } \varepsilon > d,$$

где: U - задаваемое регулятору значение температуры, которую необходимо поддерживать в помещении, d – порог срабатывания регулятора - минимальное значение колебания температуры, которое он может отслеживать с определенной ошибкой регулирования.

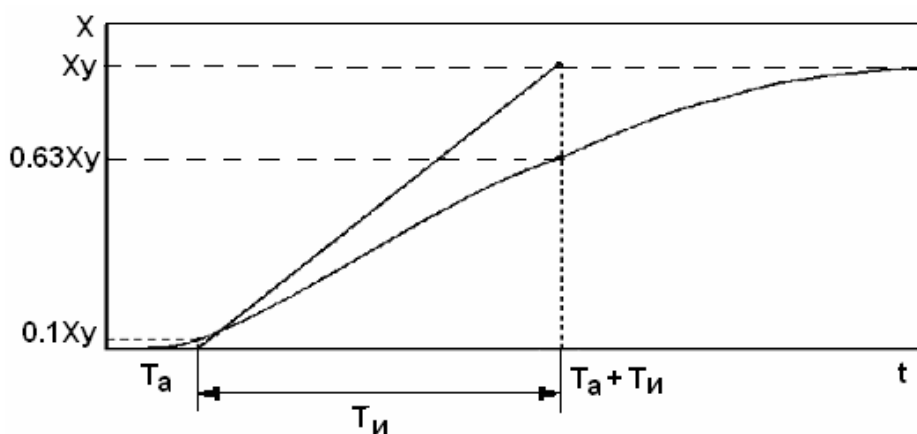


Рисунок 6.4 – Переходные процессы для объектов с различными свойствами: X - входной регулируемый параметр- температура в здании; τ - время процесса; $T_{и}$ - время транспортного запаздывания; T_a - постоянная времени (время согласования); X_y - установившееся значение температуры в помещении.

Алгоритм регулирования для позиционных регуляторов определяется статической характеристикой регулятора – зависимостью выходного сигнала Y от входного X (рис.6.5).

Процесс регулирования представляет собой колебание вокруг задания U (рис.6.6). Частота и амплитуда определяются величинами T_a, R, T_u, d .

Пусть заданное значение температуры, которое необходимо поддерживать в помещении $U_3=18^{\circ} C$, а порог срабатывания ± 2 С. Тогда процесс регулирования температуры Т - регулятором будет происходить следующим образом.

Пусть первоначально температура в помещении $U \leq 16^{\circ} C$, т.е. меньше, чем заданная $U_3=18^{\circ}C$. Регулятор TR включен, открыта задвижка Z, в результате чего горячая вода подается в помещение. Через время t_0 температура начинает повышаться и достигает заданного значения $U = 18^{\circ} C$. Однако, в силу ее нерав-

номерности по объему помещения, инерционности датчика температуры ΔT и наличия порога срабатывания, регулятор сработает несколько позднее того времени, когда температура достигнет заданного значения. За это время за счет пришедшего “лишнего тепла” температура в помещении поднимется выше заданной, например до 20°C . Этот эффект называется перерегулированием. Регулятор отключается и перекрывает задвижку с теплоносителем. Подача тепла в помещение прекращается.

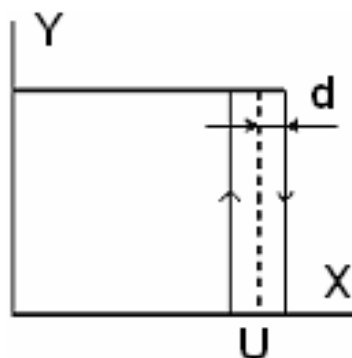


Рисунок 6.5 – Статическая характеристика двухпозиционного регулятора.

Помещение начинает остывать. Температура после отключения регулятора (закрытия задвижки) начинает падать. Ее падение продолжается до заданного значения 18°C , и ниже в силу все той же инерционности системы и наличия порога срабатывания. Срабатывает регулятор только при температуре, например, 16°C , после чего откроется задвижка и горячая вода вновь начнет поступать в помещение и поднимать температуру.

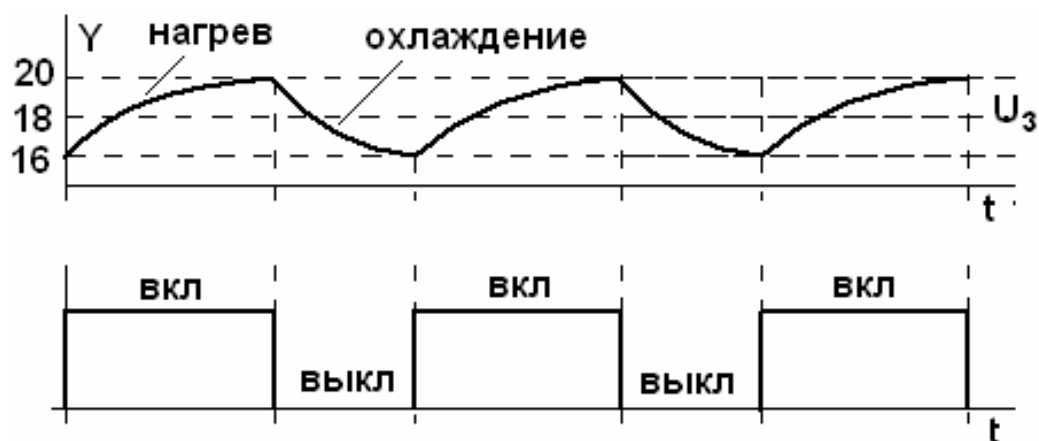


Рисунок 6.6 – Процесс регулирования температуры Т-регулятором.

Таким образом, температура в помещении будет колебаться вокруг заданной, но не будет равна ей, т.е. T - регулятор имеет статическую ошибку.

Для объектов с большой инерционностью T_a и с малым запаздыванием T_u регулирование происходит с постоянными колебаниями, достигающими до 5-15% от U . Чем больше d , T_a/T_u , R , тем больше амплитуда колебаний. Чем больше T_a и T_u , тем больше период колебаний.

Подобные регуляторы используются для регулирования температуры воды в баках, в пастеризаторах, для управления нагревом печей хлебозавода, в сушильных камерах, в саунах и других объектах. Позиционные регуляторы практически неприменимы для систем с существенным транспортным запаздыванием $T_a > 0,2 t_n$ и для объектов без самовыравнивания, так как регулируемая величина выходит далеко за необходимые пределы регулирования.

Пропорциональные регуляторы. В пропорциональном регуляторе входная (рассогласование)

$$\varepsilon = U - X$$

и выходная величины связаны соотношением

$$Y = K \varepsilon,$$

где K - постоянный коэффициент.

Рассмотрим принцип действия пропорционального регулятора для разгонной кривой объекта регулирования 1 (рис.6.7), аналогичной разгонной кривой отопления здания (рис.6.4). Выходная величина регулятора Y , пропорциональная сигналу рассогласования, определяет уровень открытия задвижки - чем больше рассогласование, тем больше открыта заслонка.

При данном законе регулирования значение регулируемой величины X никогда не достигнет задания U . Всегда имеется *статическая ошибка*

$$d = U - X.$$

При постоянном коэффициенте K приближение температуры X к заданию U постепенно уменьшает подаваемую тепловую мощность $Y = K(U - X)$ - заслонка закрывается. Но теплота, рассеиваемая в окружающую среду, при этом увеличивается, и при $Y = Kd$ наступит равновесие теплопритоков и ошибка d не достигнет 0, т.к. если d будет равно 0, то и выходной сигнал (подаваемая котельной тепловая мощность) будет равен нулю, $Y = 0$. В результате, чем больше приближается регулируемая величина X к заданию U , тем меньше сигнал Y с САР, и тем меньше под дей-

ствием окружающей среды стремится регулируемая величина X к заданию U .

Таким образом, на выходе регулятора устанавливается некоторое значение

$$Y = Kd ,$$

которое приводит регулируемую величину X в состояние, отличное от задания U . Чем больше коэффициент K , тем меньше ошибка d .

При больших значениях K резко увеличивается величина X и при значительной величине транспортного запаздывания система переходит в режим автоколебаний (рис.6.6., зависимость 2). При меньшем значении K регулирование происходит без колебаний (рис.6.6., зависимость 3).

При пропорциональном регулировании регулятор реагирует на мгновенное изменение рассогласования. При очень большом коэффициенте усиления K пропорциональный регулятор вырождается в двухпозиционный регулятор. В ряде случаев, при малом транспортном запаздывании, статическая ошибка не превышает необходимую величину, поэтому П- регуляторы находят некоторое применение.



Рисунок 6.7 – Процесс регулирования П – регулятором при скачкообразном изменении задания с 0 до U (разгонная кривая).

Для устранения статической ошибки d при формировании выходной величины Y вводят *интегральную (И)* составляющую отклонения от задания:

$$Y = K\varepsilon_i + \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \Delta t_u / t_n ,$$

где t_n - постоянная интегрирования сигнала; Δt_u - время между двумя соседними измерениями;

$\Sigma \varepsilon_i$ - накопленная между двумя соседними измерениями сумма рассогласований.

Таким образом, чем больше время, в течение которого величина X меньше задания U , тем больше интегральная составляющая и тем больше выходной сигнал Y . Регулятор с таким законом формирования выходного сигнала называется *пропорционально-интегральным ПИ-регулятором*.

В установившемся режиме ($d = 0$) в интеграторе имеется величина $\Sigma \varepsilon_i / t_n$, содержащая в себе накопленную ошибку регулирования, которая является дополнительным источником, ускоряющим регулятор к достижению заданного значения регулируемой величины.

Для достижения установившегося режима в интеграторе требуется достаточно большее время. Поэтому ПИ-регулятор можно применять в случае, когда и внешние воздействия достаточно медленные. В случае резких изменений внешних и внутренних факторов (например, налили холодной воды в бак или резко изменили задание) ПИ-регулятору требуется время для компенсации этих изменений.

Для ускорения реакции САР на внешние воздействия и изменения в задании в регулятор вводят *дифференциальную составляющую*(Д):

$$Y = K\varepsilon_i + \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \Delta t_u / t_n + t_d \varepsilon_i / \Delta t_i,$$

где t_d - постоянная дифференцирования сигнала.

Чем быстрее растет Σ , тем больше $t_d \Sigma_i$. Регулятор с таким законом управления называется *ПИД- регулятором*. Дифференциальная составляющая зависит от скорости изменения рассогласования $\varepsilon_i / \Delta t_u$. Она вызывает реакцию регулятора на резкое изменение регулируемого параметра, возникшее, например, для случая нагрева помещения, в результате открытия дверей и окон при сильном холодном ветре.

Подобрав для конкретного объекта K , t_u и t_d , можно оптимизировать качество работы регулятора: уменьшить время выхода на задание, снизить влияние внешних возмущений, уменьшить отклонение от задания.

При очень большом t_n регулятор медленно выводит объект на задание. При малом t_n происходит перерегулирование, т.е. регулируемый параметр X проскакивает задание, а затем сходится к нему.

В реальных системах применяют различные сочетания ПИД - законов регулирования. Отдельно П, И и Д законы применяются достаточно редко. В зависимости от объекта и необходимого качества регулирования возможны сочетания: ПИ, ПД, ДИ, ПИД.

Выбор регулятора для конкретного объекта зависит от его свойств, которые в определяются его динамической характеристикой.

П- регуляторы используются в объектах с небольшим запаздыванием и изменением нагрузки, а также в системах, где допускается статическая ошибка и не используются при циклическом изменении параметров объекта.

И- регуляторы используются для объектов с самовыравниванием и небольшими запаздыванием и изменением нагрузки.

ПИ- регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, с большим запаздыванием, а также при больших и медленных изменениях нагрузки.

ПИД- регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, при требуемой малой статической ошибке регулирования и при больших запаздываниях в объекте.

Двухпозиционные релейные регуляторы рекомендуется применять в объектах с большой емкостью.

Контрольные вопросы к главе 6.

1. Что называется законом регулирования?
2. Что такое двухпозиционное регулирование?
3. Как реализовать пропорциональный закон регулирования?
4. Зачем в регулятор добавляют дифференцирующие звенья?
5. Зачем в регулятор добавляют интегрирующие звенья?
6. Что такое постоянная регулирования?
7. Дайте определение разгонной характеристики объекта.
8. Дайте определение Т-регулятора.
9. Как влияет постоянная регулирования на время выхода объекта на заданное значение регулируемой величины?
10. Какие условия оптимального применения П-регулятора?
11. Какие условия оптимального применения ПИ-регулятора?
12. Какие условия оптимального применения ПИД-регулятора?
13. Дайте определение *емкости объекта*.
14. Чем отличаются одностепенный объект от многостепенного?
15. Дайте определение времени разгона объекта.
16. Дайте определение постоянной времени объекта.
17. Дайте определение чувствительности объекта.
18. Поясните понятие самовыравнивания.
19. Дайте определение запаздывания объекта.

6.3. Понятие устойчивости системы

Под устойчивостью системы понимается способность ее возвращаться к состоянию установившегося равновесия после снятия возмущения, нарушившего это равновесие. Неустойчивая система непрерывно удаляется от равновесного состояния или совершает вокруг него колебания с возрастающей амплитудой.

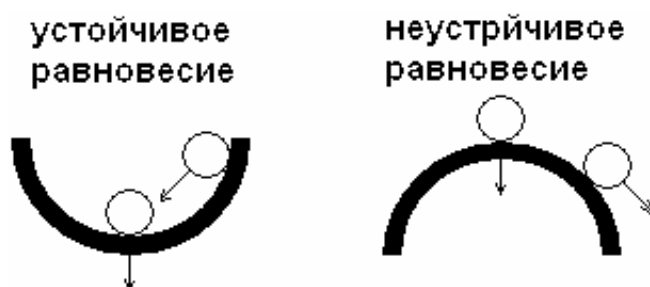


Рисунок 6.7 – К понятию устойчивости системы.

Устойчивость линейной системы определяется не характером возмущения, а структурой самой системы (рис.6.7.). Говорят, что система устойчива "в малом", если определен факт наличия устойчивости, но не определены ее границы. Система устойчива "в большом", когда определены границы устойчивости и то, что реальные отклонения не выходят за эти границы.

В САУ, работающей по отклонению, регулятор изменяет управляющий сигнал после того, как появилось отклонение регулируемого параметра от заданного значения. Следовательно, он должен не только компенсировать возмущающее воздействие, но и свести к нулю отклонение регулируемого параметра от заданного значения, т.е. регулятору предстоит форсированная работа.

При этом могут быть следующие случаи:

1. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал недостаточной мощности. При этом скорость нарастания отклонения регулируемого параметра от заданного значения уменьшается, но само отклонение продолжает расти. График процесса регулирования - изменение во времени выходного сигнала $Y_{\text{вых}}(t)$ системы после нанесения на нее возмущающего воздействия – будет расходящийся, а работа САУ -неустойчивой (рис. 6.8а). Отклонение выходной величины $Y_{\text{вых}}(t)$ от установившегося значения $Y_o(t) = Y_{\text{вых}}(t) = 0$

$$\Delta_i = Y_i(t) - Y_o(t)$$

увеличивается с течением времени, $i = 1, 2, 3, \dots$.

2. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал избыточной мощности, который не только компенсирует возмущающее воздействие и сводит к нулю отклонение регулируемого параметра от заданного значения, но и вызывает новое отклонение Δ_i , противоположное по знаку и большей амплитуды (рис. 6.8б). График процесса регулирования в такой САУ также будет расходящийся (расходится с заданием), а работа САУ - неустойчивой.

3. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал необходимой мощности. При этом регулируемый параметр или плавно возвращается к заданному значению (апериодический процесс регулирования), или возвращается к нему через колебания уменьшающейся амплитуды (колебательный процесс регулирования). Такие графики процессов регулирования называются сходящимися, а работа САУ будет устойчивой (рис. 6.8в).

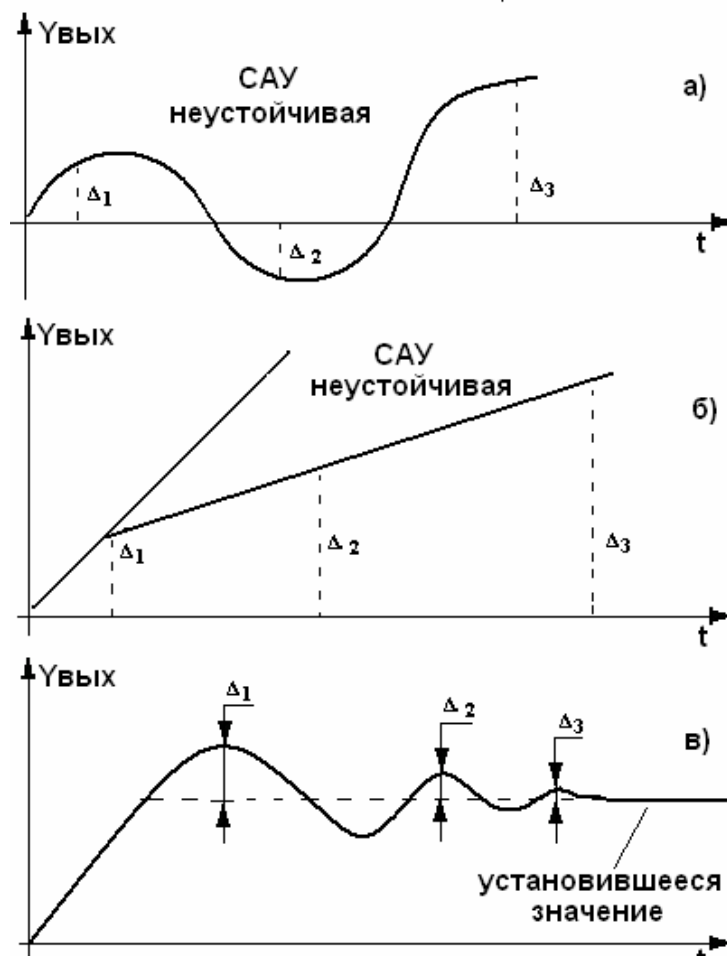


Рисунок 6.8 – Графики процессов регулирования в САУ:

- а) с выходным сигналом регулятора недостаточной мощности;
- б) с выходным сигналом регулятора избыточной мощности;
- в) с выходным сигналом регулятора необходимой мощности.

Неустойчивые системы неработоспособны. Но кроме устойчивости, САУ должна отвечать требованиям по качеству своей работы.

6.4. Основные условия устойчивости

Можно провести аналогию между САУ и пружиной, колебания которой описываются аналогичным дифференциальным уравнением (рис.6.9).

В соответствии с классическим методом решение дифференциального уравнения ищется в виде:

$$y(t) = y_{\text{вын}}(t) + y_{\text{св}}(t),$$

где - $y_{\text{св}}(t)$ - общее решение однородного дифференциального уравнения, то есть уравнения с нулевой правой частью:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)} y' + a_{(n)} y = 0;$$

где - $y_{\text{вын}}(t)$ - частное решение неоднородного дифференциального уравнения, под которым понимается уравнение с ненулевой правой частью.

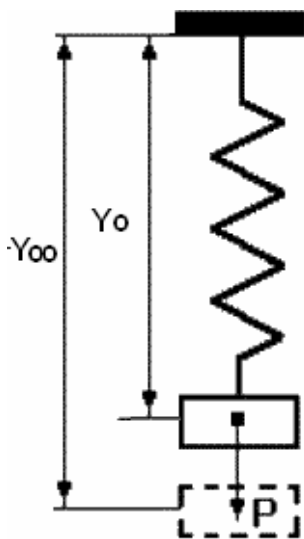


Рисунок 6.9 – Колебание пружины.

Для общего решения неоднородного дифференциального уравнения $y_{\text{св}}(t)$, когда все внешние воздействия сняты и система абсолютно свободна, ее движения определяются лишь собственной структурой. Поэтому решение данного уравнения называется свободной составляющей общего решения.

Для частного решения неоднородного дифференциального уравнения $y_{\text{вын}}(t)$ к системе приложено внешнее воздействие $u(t)$. Поэтому вторая составляющая общего решения называется вынужденной. Она определяет вынужденный установившийся режим работы системы после окончания переходного процесса.

Оттянем пружину, а затем отпустим, предоставив ее самой себе. Пружина будет колебаться в соответствии со свободной составляющей решения уравнения, то есть характер колебаний будет определяться только структурой самой пружины. Если в момент времени $t = 0$ подвесить к пружине груз, то на свободные колебания наложится внешняя сила P . После затухания колеба-

ний, описываемых только свободной составляющей общего решения, система перейдет в новый установившийся режим, характеризуемый вынужденной составляющей с начальным положением Y_0 и конечным Y_∞ , рис. 6.9.

$$y_{вын} = y(t \rightarrow \infty),$$

Если внешнее воздействие само будет изменяться по синусоидальному закону $P = P_0 \sin(\omega t + \varphi)$, то после затухания переходного процесса система будет совершать вынужденные колебания с той же частотой, что и вынуждающая сила, то есть $y_{вын} = y_{max} \sin(\omega t + \varphi)$.

Каждая составляющая общего решения уравнения динамики ищется отдельно.

Вынужденная составляющая ищется на основе решения уравнения статики для данной системы для времени t .

Свободная составляющая представляет собой сумму из n отдельных составляющих:

$$y_{св}(t) = \sum_{i=1}^n A_i P^{-p_i t},$$

где p_i корни характеристического уравнения

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

Корни могут быть либо вещественными $p_i = \alpha_i$, либо попарно комплексно сопряженными $p_i = \alpha_i \pm j\omega_i$. Постоянные интегрирования A_i определяются исходя из начальных и конечных условий, подставляя в общее решение значения u , y и их производные в моменты времени $t = 0$ и $t \rightarrow \infty$.

Каждому отрицательному вещественному корню соответствует экспоненциально затухающая во времени составляющая $y_{св}(t)_i$, каждому положительному – экспоненциально расходящаяся, каждому нулевому корню соответствует $y_{св}(t)_i = const$ (рис.6.10.).

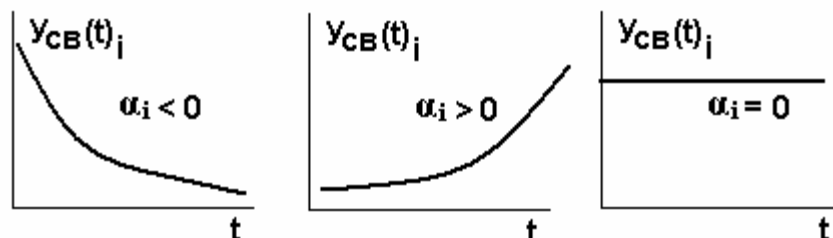


Рисунок 6.10 – Соответствие корней характеристического уравнения и изменение $y_{св}(t)$ свободной составляющей.

Пара комплексно сопряженных корней с отрицательной вещественной частью определяет затухающие колебания с частотой ω_i (рис. 6.11а), при положительной вещественной части (6.11б) - расходящиеся колебания, при нулевой - незатухающие (рис.6.11в).

Так как после снятия возмущения $y_{вын}(t) = 0$, то устойчивость системы определяется только характером свободной составляющей $y_{св}(t)$. Поэтому условие устойчивости систем по Ляпунову формулируется так: *в устойчивой системе свободная составляющая решения уравнения динамики, записанному в отклонениях, должна стремиться к нулю, то есть затухать.*

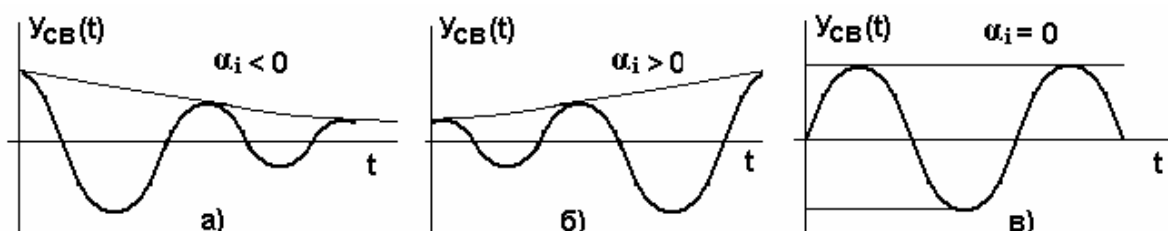


Рисунок 6.11 – Характер колебаний при комплексно сопряженных корнях.

Исходя из расположения на комплексной плоскости корни с отрицательными вещественными частями называются левыми, с положительными - правыми (рис.6.12.).

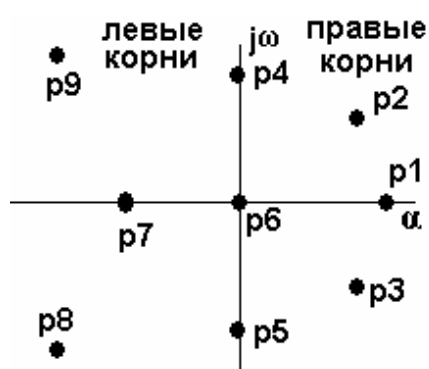


Рисунок 6.12 – Расположение корней характеристического уравнения.

Поэтому условие устойчивости линейной САУ можно сформулировать следующим образом: *для того, чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все корни ее характеристического уравнения были левыми.*

Если хотя бы один корень правый, то система неустойчива. Если один из корней равен нулю (в системах, где $\alpha_n = 0$), а остальные левые, то система находится на границе аperiodической устойчивости.

Если равны нулю вещественные части одной или нескольких пар комплексно сопряженных корней, то система находится на границе колебательной устойчивости.

Правила, позволяющие судить о знаках корней характеристического уравнения без его решения, называются *критериями устойчивости*. Их можно разделить на алгебраические (основаны на составлении по данному характеристическому уравнению по определенным правилам алгебраических выражений) и частотные (основаны на исследовании частотных характеристик).

Если система представлена в виде передаточной функции, то для анализа устойчивости используется ее собственный оператор (знаменатель передаточной функции).

Полученные корни характеристического уравнения могут быть представлены в виде точек на комплексной плоскости.

Для устойчивых систем необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения лежали слева от мнимой оси комплексной плоскости.

Если хотя бы один вещественный корень или пара комплексных сопряженных корней находится справа от мнимой оси, то система является неустойчивой.

Если имеется нулевой корень или пара чисто мнимых корней, то система считается нейтральной (находящейся на границе устойчивости и неустойчивости). Таким образом, мнимая ось комплексной плоскости является границей устойчивости.

С целью упрощения анализа устойчивости систем разработан ряд специальных методов, которые получили название критерии устойчивости.

Критерии устойчивости делятся на две разновидности: алгебраические и частотные.

Алгебраические критерии являются аналитическими, а частотные - графоаналитическими. Критерии устойчивости позволяют оценить влияние параметров системы на ее устойчивость.

Необходимое условие устойчивости.

Характеристическое уравнение системы с помощью теоремы Виета может быть записано в виде

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = a_0 (p - p_1) (p - p_2) \dots (p - p_n) = 0,$$

где p_1, p_2, \dots, p_n - корни этого уравнения.

Если система устойчива, значит все корни левые, то есть вещественные части всех корней отрицательны, что можно записать как $\alpha_i = -|\alpha_i| < 0$. Подставим их в уравнение:

$$a_0(p + |\alpha_1| - j\omega_1)(p + |\alpha_2| - j\omega_2) \dots (p + |\alpha_n| + j\omega_n) \dots = 0.$$

Так как в скобках нет ни одного отрицательного числа, то ни один из коэффициентов α_i не будет отрицательным.

Поэтому необходимым условием устойчивости САУ является *положительность всех коэффициентов характеристического уравнения*: $\alpha_i > 0$. В дальнейшем будем рассматривать только уравнения, где $\alpha_0 > 0$. В противном случае уравнение домножается на -1.

Рассмотренное условие является необходимым, но недостаточным условием. Необходимые и достаточные условия дают алгебраические критерии *Рауса и Гурвица*.

Раус предложил критерий устойчивости САУ в виде алгоритма, по которому заполняется специальная таблица с использованием коэффициентов характеристического уравнения:

1) в первой строке записываются коэффициенты уравнения с четными индексами в порядке их возрастания;

2) во второй строке - с нечетными;

3) остальные элементы таблицы определяется по формуле:

$$C_{k,i} = C_{k+1,i-2} - r_i \cdot C_{k+1,i-1},$$

$$\text{где } r_i = C_{1,i-2} / C_{1,i-1},$$

$i \geq 3$ - номер строки,

k - номер столбца.

4) число строк таблицы Рауса на единицу больше порядка характеристического уравнения.

R_i	$i \backslash k$	1	2	3	4
-	1	$c_{11} = a_0$	$c_{21} = a_2$	$c_{31} = a_4$...
-	2	$c_{12} = a_1$	$c_{22} = a_3$	$c_{32} = a_5$...
$r_3 = c_{11}/c_{12}$	3	$c_{13} = c_{21} - r_3 c_{22}$	$c_{23} = c_{31} - r_3 c_{32}$	$c_{33} = c_{41} - r_3 c_{42}$...
$r_3 = c_{11}/c_{12}$	4	$c_{14} = c_{22} - r_3 c_{23}$	$c_{24} = c_{32} - r_3 c_{33}$	$c_{34} = c_{42} - r_3 c_{43}$...
...

Критерий Рауса: для того, чтобы САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты первого столбца таблицы Рауса $c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots$ были положительными.

Если это не выполняется, то система неустойчива, а количество правых корней равно числу перемен знака в первом столбце.

Достоинство данного критерия в том, что он прост в использовании независимо от порядка характеристического уравнения. Он удобен для использования на ЭВМ. Его недостаток - малая наглядность, трудно судить о степени устойчивости системы, насколько далеко отстоит она от границы устойчивости.

Критерий Гурвица. Гурвиц предложил другой критерий устойчивости. Из коэффициентов характеристического уравнения строится определитель Гурвица

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & a_9 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & a_8 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

по алгоритму:

- 1) по главной диагонали слева направо выставляются все коэффициенты характеристического уравнения от a_1 до a_n ;
- 2) от каждого элемента диагонали вверх и вниз достраиваются столбцы определителя так, чтобы индексы убывали сверху вниз;
- 3) на место коэффициентов с индексами меньше нуля или больше n ставятся нули.

Критерий Гурвица:

для того, чтобы САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все n диагональных миноров определителя Гурвица были положительны.

Эти миноры называются определителями Гурвица. Рассмотрим примеры применения критерия Гурвица:

- 1) $n = 1 \Rightarrow$ уравнение динамики:

$$a_0 p + a_1 = 0.$$

Определитель Гурвица: $\Delta_1 = a_1 > 0$ при $a_0 > 0$,

то есть условие устойчивости: $a_0 > 0, a_1 > 0$;

2) $n = 2 \Rightarrow$ уравнение динамики:

$$a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0.$$

Определители Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1 > 0, \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 = a_1 a_2 > 0,$$

так как $a_3 = 0$, то есть условие устойчивости:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0;$$

3) $n = 3 \Rightarrow$ уравнение динамики:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0.$$

Определители Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1 > 0, \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0,$$

условие устойчивости: $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$.

Таким образом, при $n \leq 2$ положительность коэффициентов характеристического уравнения является необходимым и достаточным условием устойчивости САУ. При $n > 2$ появляются дополнительные условия.

Критерий Гурвица применяют при $n \leq 4$. При больших порядках возрастает число определителей и процесс становится трудоемким.

Недостаток критерия Гурвица - малая наглядность. Достоинство - удобен для реализации на ЭВМ. Его часто используют для определения влияния одного из параметров САУ на ее устойчивость.

Так равенство нулю главного определителя $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1} = 0$ говорит о том, что система находится на границе устойчивости. При этом либо $a_n = 0$ - при выполнении остальных условий система находится на границе апериодической устойчивости, либо предпоследний минор $\Delta_{n-1} = 0$ - при положительности всех ос-

тальных миноров система находится на границе колебательной устойчивости.

Контрольные вопросы к главе 6.

1. Что понимают под устойчивостью САУ в малом и в большом?
2. Какой вид имеет решение уравнения динамики САУ?
3. Как найти вынужденную составляющую решения уравнения динамики САУ?
4. Какой вид имеет свободная составляющая решения уравнения динамики САУ?
5. Что такое характеристическое уравнение?
6. Какой вид имеют корни характеристического уравнения?
7. Чем отличаются правые и левые корни характеристического уравнения?
8. Сформулируйте условие устойчивости систем по Ляпунову.
9. Что такое граница устойчивости?
10. Что такое критерии устойчивости?
11. Сформулируйте необходимое условие устойчивости САУ.
12. Сформулируйте критерий Рауса.
13. Сформулируйте критерий Гурвица.
14. В чем достоинства и недостатки алгебраических критериев устойчивости?

6.5 Частотные критерии устойчивости САУ

Это графоаналитические методы, позволяющие по виду частотных характеристик САУ судить об их устойчивости. Их общее достоинство в простой геометрической интерпретации, наглядности и в отсутствии ограничений на порядок дифференциального уравнения. Запишем характеристическое уравнение САУ в виде

$$D(p) = a_0(p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n) = 0.$$

Его корни

$$P_i = \alpha_i + j\omega_i = |p_i|e^{j\arg(p_i)},$$

где $\arg(p_i) = \arctg(\omega_i/\alpha_i) + k\pi$;

$$|p_i| = \sqrt{a_i^2 + w_i^2} .$$

Каждый корень можно изобразить вектором на комплексной плоскости (рис.6.13а), тогда разность $p - p_i$ изобразится разностью векторов (рис.6.13б), где p - любое число.

Если менять значение p произвольным образом, то конец вектора $p - p_i$ будет перемещаться по комплексной плоскости, а его начало будет оставаться неподвижным, так как p_i - это конкретное неизменное значение.

В частном случае, если на вход системы подавать гармонические колебания с различной частотой ω , то $p = j\omega$, а характеристическое уравнение принимает вид:

$$D(j\omega) = a_0 (j\omega - p_1) (j\omega - p_2) \dots (j\omega - p_n).$$

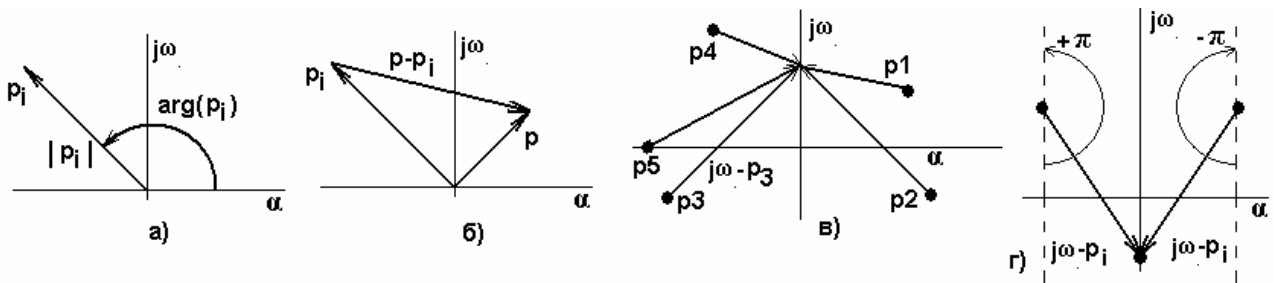


Рисунок 6.13 – К определению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

При этом концы векторов $j\omega - p_i$ будут находиться на мнимой оси (рис.6.13в). Если менять ω от $-\infty$ до $+\infty$, то каждый вектор $j\omega - p_i$ будет поворачиваться относительно своего начала p_i на угол $+\pi$ для левых и $-\pi$ для правых корней (рис.6.13г).

Характеристическое уравнение можно представить в виде

$$D(j\omega) = |D(j\omega)| e^{j \arg(D(j\omega))},$$

$$\text{где } |D(j\omega)| = a_0 |j\omega - p_1| \cdot |j\omega - p_2| \dots |j\omega - p_n|,$$

$$\arg(D(j\omega)) = \arg(j\omega - p_1) + \arg(j\omega - p_2) + \dots + \arg(j\omega - p_n).$$

Пусть из n корней m - правые, а $(n - m)$ - левые, тогда угол поворота вектора $D(j\omega)$ при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ равен

$$\Delta \arg(D(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} = \sum_{i=1}^n \arg(j\omega - p_i) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} = (n - m)\pi - m\pi,$$

или при изменении ω от 0 до $+\infty$ получаем

$$\Delta \arg(D(j\omega)) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = (n - 2m) (\pi / 2).$$

Отсюда вытекает правило:

изменение аргумента вектора $D(j\omega)$ при изменении частоты ω от $-\infty$ до $+\infty$ равно разности между числом левых и правых корней уравнения $D(p) = 0$, умноженному на π , а при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ эта разность умножается на $\pi / 2$.

Это правило называется принцип аргумента. Он положен в основе всех частотных критериев устойчивости.

Мы рассмотрим два наиболее распространенных критерия: критерий Михайлова и критерий Найквиста.

Критерий устойчивости Михайлова. Так как для устойчивой САУ число правых корней $m = 0$, то угол поворота вектора $D(j\omega)$ составит

$$\Delta \arg(D(j\omega)) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = n\pi/2.$$

САУ будет устойчива, если вектор $D(j\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ повернется на угол $n\pi/2$.

При этом конец вектора опишет кривую, называемую годографом Михайлова. Она начинается на положительной полуоси, так как $D(0) = a_n$, и последовательно проходит против часовой стрелки n квадрантов комплексной плоскости, уходя в бесконечность в n -ом квадранте (рис.6.14а).

Если это правило нарушается (например, число проходимых кривой квадрантов не равно n , или нарушается последовательность прохождения квадрантов (рис.6.14б), то такая САУ неустойчива - это и есть необходимое и достаточное условие критерия Михайлова. Этот критерий удобен своей наглядностью. Так, если кривая проходит вблизи начала координат, то САУ находится вблизи границы устойчивости и наоборот. Этим критерием удобно пользоваться, если известно уравнение замкнутой САУ.

Для облегчения построения годографа Михайлова выражение для $D(j\omega)$ представляют суммой вещественной и мнимой составляющих:

$$D(j\omega) = a_0(j\omega - p_1)(j\omega - p_2)\dots(j\omega - p_n) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n = \text{Re}D(j\omega) + j\text{Im}D(j\omega),$$

где:

$$\text{Re}D(j\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots,$$

$$\text{Im}D(j\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \dots$$

Меняя ω от 0 до ∞ , по этим формулам находят координаты точек годографа, которые соединяют плавной линией.

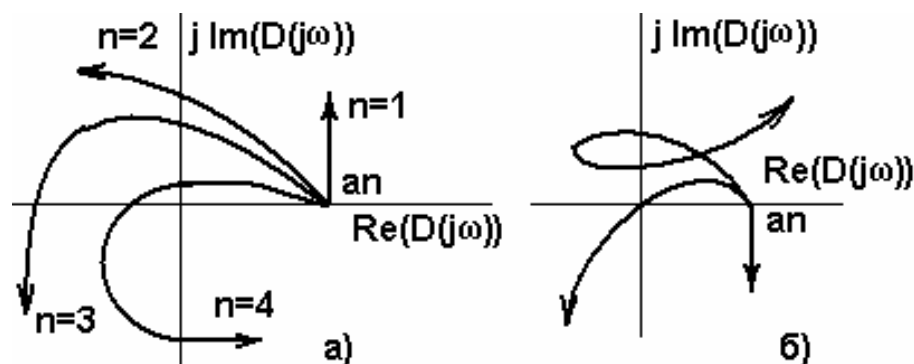


Рисунок 6.14 – Годограф Михайлова.

Критерий устойчивости Найквиста. Этот критерий позволяет судить об устойчивости замкнутой САУ по виду АФЧХ разомкнутой САУ (рис.6.15). Исследование разомкнутой САУ проще, чем замкнутой. Его можно производить экспериментально, поэтому часто оказывается, что АФЧХ разомкнутой САУ мы имеем или можем получить.

Передаточная функция разомкнутой САУ:

$$W_p(p) = W_r(p)/D_p(p)$$

и ее уравнение динамики:

$$y(t) = \frac{K_p(p)}{D_p(p)} \varepsilon(t),$$

или

$$D_p(p) y(t) = K_p(p) \varepsilon(t),$$

где $D_p(p)$ – характеристическое уравнение разомкнутой САУ;
 $K_p(p)$ – операторный коэффициент передачи разомкнутой САУ;

$\varepsilon(t)$ – рассогласование на входе разомкнутой САУ.

По виду корней уравнения $D_p(p) = 0$ можно судить об устойчивости разомкнутой САУ. Но это пока ничего не говорит об устойчивости замкнутой САУ.

Для того, чтобы получить уравнение динамики замкнутой САУ при свободном движении, считаем, что внешнее воздействие $u = 0$, тогда на вход первого звена САУ подается сигнал рассогласования

$$\varepsilon(t) = u(t) - y(t) = -y(t).$$

То есть

$$D_p(p) y(t) = K_p(p) (-y(t)),$$

следовательно, уравнение замкнутой САУ:

$$(D_p(p) + K_p(p)) y(t) = 0.$$

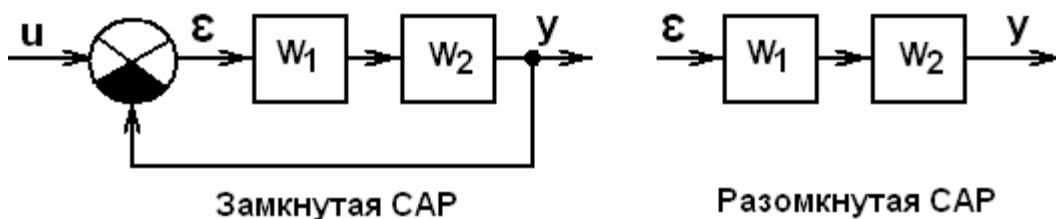


Рисунок 6.15 – К использованию критерия устойчивости Найквиста.

Таким образом, характеристическое уравнение замкнутой САУ:

$$D_3(p) = D_p(p) + K_p(p) = 0.$$

По виду его корней уже можно судить об устойчивости замкнутой САУ.

Вспользуемся вспомогательной функцией:

$$F(j\omega) = 1 + W_p(j\omega) = 1 + \frac{K_p(j\omega)}{D_p(j\omega)} = \frac{D_p(j\omega) + K_p(j\omega)}{D_p(j\omega)} = \frac{D_3(j\omega)}{D_p(j\omega)}$$

По сути дела она представляет собой АФЧХ разомкнутой САУ, сдвинутую на единицу вправо. Степени полиномов $D_z(j\omega)$ и $D_p(j\omega)$ равны n . Эти полиномы имеют свои корни p_{zi} и p_{pi} , то есть можно записать:

$$F(j\omega) = \frac{D_z(j\omega)}{D_p(j\omega)} = \frac{a_n(j\omega - p_{z1}) \dots (j\omega - p_{zn})}{a_n(j\omega - p_{p1}) \dots (j\omega - p_{pn})} = \frac{|D_z|}{|D_p|} e^{j(\arg D_z - \arg D_p)}.$$

Каждую разность в скобках можно представить вектором на комплексной плоскости, конец которого скользит по мнимой оси ω . При изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ каждый из векторов $j\omega - p_i$ будет поворачиваться на угол $+p$, если корень левый и $-p$, если корень правый.

Пусть полином $D_z(j\omega)$ имеет m правых корней и $n - m$ левых, а полином $D_p(j\omega)$ имеет g правых корней и $n - g$ левых. Тогда суммарный угол поворота вектора функции $F(j\omega)$ при изменении частоты ω от $-\infty$ до $+\infty$:

$$\Delta \arg(F(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} = \Delta \arg(D_z(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} - \Delta \arg(D_p(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} \\ = p[(n - m) - m] - p[(n - g) - g] = 2p(g - m).$$

Если замкнутая САУ устойчива, то $m = 0$, тогда суммарный поворот вектора $F(j\omega)$ при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ должен быть равен $2\pi g$, а при изменении ω от 0 до $+\infty$ он составит $2\pi g/2$.

Отсюда можно сформулировать критерий устойчивости Найквиста: *если разомкнутая САУ неустойчива и имеет g правых корней, то для того чтобы замкнутая САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы вектор $F(j\omega)$ при изменении ω от 0 до $+\infty$ охватывал начало координат в положительном направлении $g/2$ раз, то есть АФЧХ разомкнутой САУ должна охватывать $g/2$ раз точку $(-1, j0)$.*

На рис.6.16а приведены АФЧХ разомкнутых САУ, устойчивых в замкнутом состоянии, на рис. 6.16б - замкнутая САУ неустойчива.

На рис. 6.16в и 6.16г показаны АФЧХ разомкнутых астатических САУ, соответственно устойчивых и неустойчивых в замкнутом состоянии. Их особенность в том, что АФЧХ при $\omega \rightarrow 0$ уходит в бесконечность.

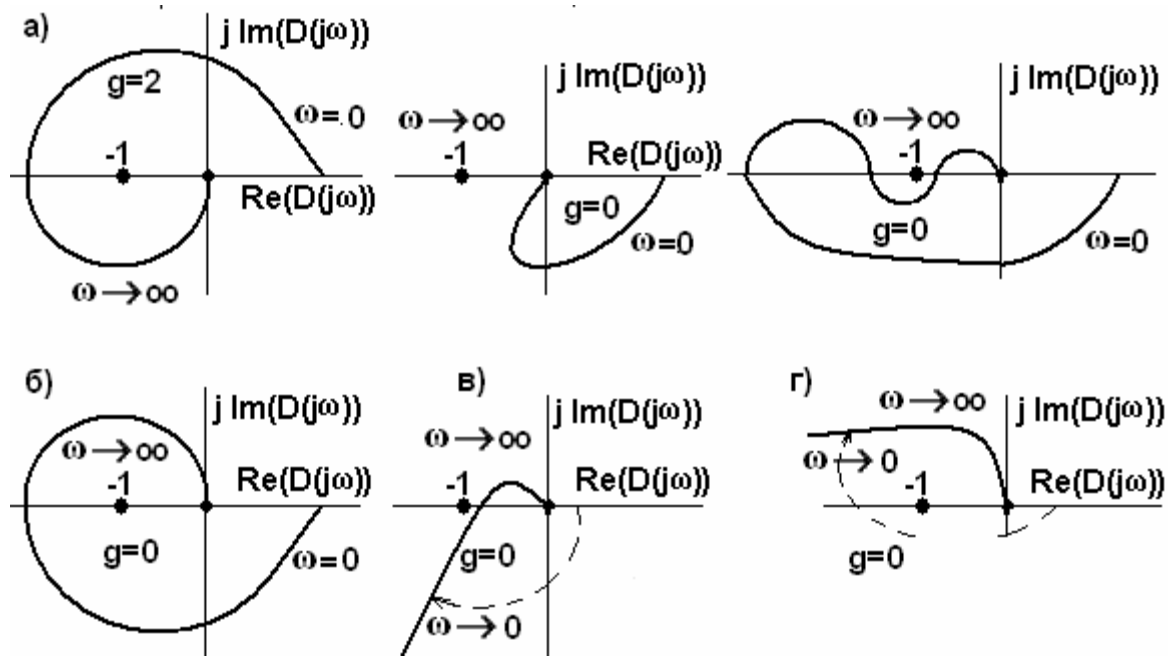


Рисунок 6.16 – Применение критерия Найквиста для анализа устойчивости разомкнутых и замкнутых САУ.

В этом случае при использовании критерия Найквиста ее мысленно замыкают на вещественную ось по дуге окружности бесконечно большого радиуса. Критерий Найквиста очень нагляден. Он позволяет не только выявить, устойчива ли САУ, но и, в случае, если она неустойчива, наметить меры по достижению устойчивости.

6.6 Качество регулирования САУ

Качество работы САУ оценивают по величинам статической и динамической ошибок. По этим характеристикам автоматические системы бывают статические и астатические.

Статическая ошибка - это разность величин регулируемого параметра в исходном и конечном (после окончания регулирования) состояниях равновесия системы.

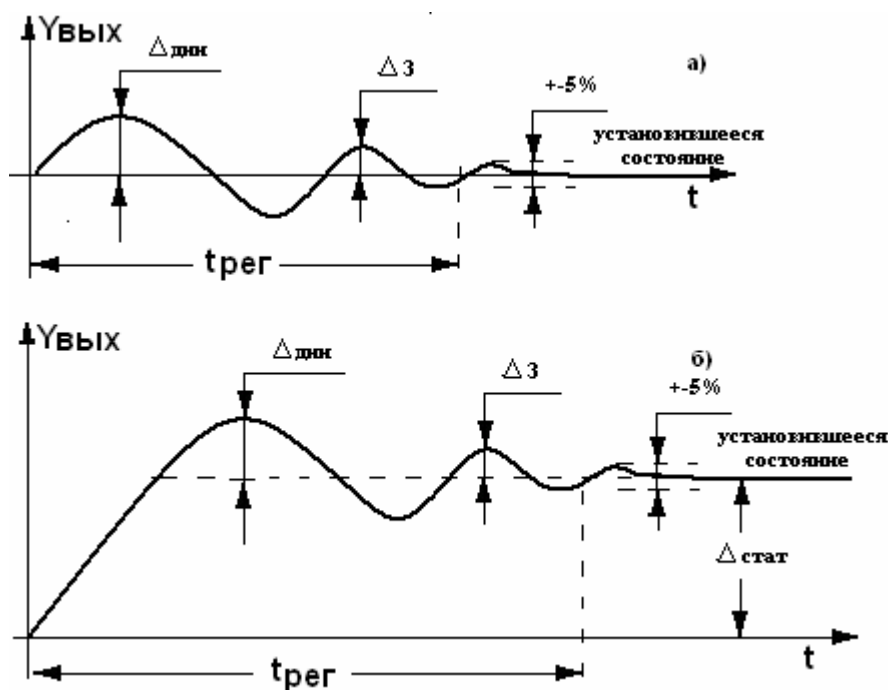


Рисунок 6.17 – График регулирования астатической (а) и статической (б) САУ.

В астатической системе статическая ошибка равна нулю, т.е. система после процесса регулирования возвращается в исходное состояние равновесия. В астатических САУ конечное и исходное равновесие совпадает с заданием. Поэтому в этих САУ динамическая ошибка равна максимальному отклонению параметра в процессе регулирования (рис. 6.17а).

В статической системе в установившемся состоянии - через достаточно долгое время после начала регулирования τ , всегда имеется статическая ошибка регулирования (рис.6.17б).

Динамическая ошибка - это максимальное в процессе регулирования отклонение регулируемого параметра от конечного состояния равновесия

$$\Delta_{\text{дин}} = (Y_{\text{вых}}^{\text{max}} - Y_{\text{вых}}^{\text{ном}}).$$

Время регулирования - это отрезок времени $\Delta\tau$ с момента нанесения на замкнутую САУ возмущающего воздействия, по истечении которого отличие регулируемого параметра от конечного состояния равновесия становится равным и меньше $\pm 5\%$ от заданной величины. Если заданная величина равна нулю, то $\pm 5\%$ берут от величины динамической ошибки.

Перерегулирование - это динамическая ошибка, отнесённая к номинальной величине регулируемого параметра в процентах. Перерегулирование вычисляют по формуле:

$$\sigma = (Y_{вых}^{max} - Y_{вых}^{ном})100\%/Y_{вых}^{ном}.$$

Степень затухания - это показатель качества, который характеризует, насколько процентов уменьшается амплитуда колебаний выходного сигнала системы за один период колебаний. Степень затухания Ψ определяется по формуле:

$$\psi = (\Delta_{дин} - \Delta_3)100\%/ \Delta_{дин},$$

где: Δ_3 - амплитуда колебаний третьего периода. Если $\Delta_3 = 0$, то $\Psi = 100\%$.

Обобщённый показатель качества. Для определения величины этого показателя вычисляют интеграл (площадь подынтегральной фигуры) изменения в процессе регулирования выходного сигнала системы за период времени регулирования:

$$J = \int_0^{t_{рег}} (\Delta)^2 dt.$$

Δ – амплитуду колебаний берут в квадрате, чтобы просуммировать как положительные, так и отрицательные отклонения выходного сигнала. Естественно, чем меньше динамическая, статическая ошибки и время регулирования, тем меньше величина интеграла J и выше качество работы САУ.

Оптимальные процессы регулирования.

На практике часто требования к качеству работы проектируемой САУ задаются не в виде величины отдельных показателей качества, а в виде требования реализации одного из трёх оптимальных процессов регулирования.

Первый из них - *апериодический* процесс регулирования показан на рис. 6.18а.

Регулируемый параметр после отклонения плавно возвращается к заданной величине. В этом процессе по сравнению с двумя последующими будет минимально время регулирования, но максимальна динамическая ошибка.

Второй - процесс регулирования с 20% перерегулированием условно дан на рис. 6.18б. В этом процессе по сравнению с апериодическим меньше динамическая ошибка, но больше время регулирования. Для этого процесса перерегулирование не должно превышать 20%.

Третий- процесс регулирования с минимальным интегральным показателем качества (рис. 6.18в). В этом процессе регулирования интегральный показатель качества сведён к минимуму, а из трёх рассмотренных оптимальных процессов регулирования будет минимальная динамическая ошибка, но время регулирования - максимальное.

Выбор оптимального процесса из трёх определяется видом технологического процесса объекта управления. Иногда кратковременная большая динамическая ошибка может быть очень опасна. Например, при управлении давлением пара в котле. Для такого объекта апериодический процесс не самый лучший. В некоторых случаях большое время перерегулирования может быть опасным для проведения операции - например, при выпечке хлеба, значительное повышение температуры в печи не может быть длительным.

6.7 Синтез и коррекция САУ

В ТАУ можно выделить две характерные задачи:

- 1) в заданной САУ найти и оценить переходные процессы - это задача анализа САУ;
- 2) по заданным переходным процессам и основным показателям разработать САУ - это задача синтеза САУ.

Вторая задача сложнее ввиду своей неоднозначности, многое определяется творческими способностями проектировщика. Поэтому обычно задача синтеза САУ ставится ограниченно. Считается, что основная часть системы уже задана, что обычно имеет место. Требуется синтезировать корректирующие звенья, то есть выбрать их схему и параметры. При этом необходимо, чтобы в результате коррекции САУ обеспечивался требуемый запас устойчивости, точность управления в установившихся режимах и качество управления в динамических режимах.

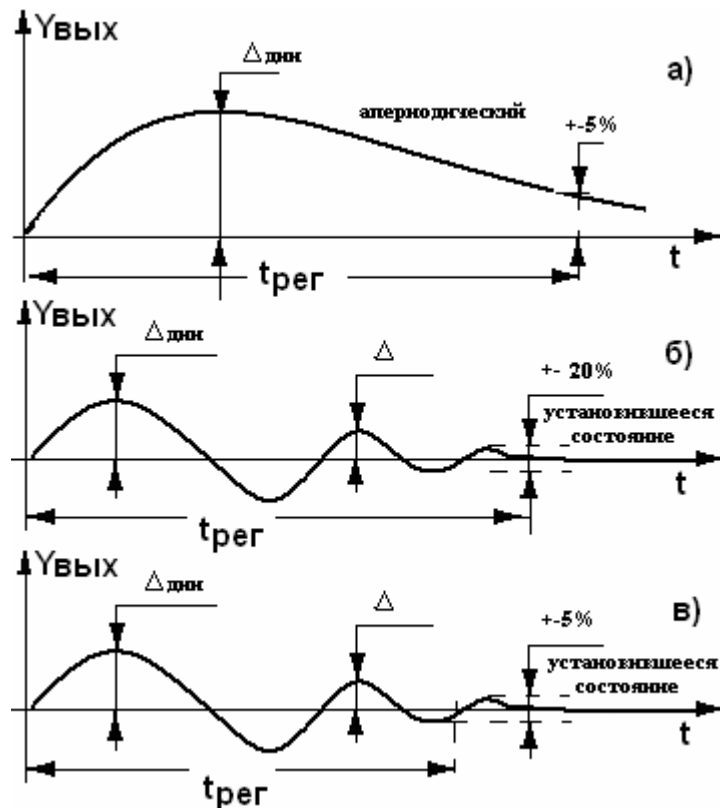


Рисунок 6.18 – Оптимальные процессы регулирования:
а) аperiodический; б) колебательный с 20% перерегулированием;
в) колебательный с минимальным интегральным показателем качества

В тех случаях, когда устойчивость и необходимые качества не могут быть достигнуты путем изменения параметров системы (коэффициентов передачи, постоянных времени), то применяется коррекция. Коррекция представляет собой введение в систему дополнительных элементов, называемых корректирующими.

Корректирующие элементы (устройства) могут быть включены в структуру САР различными способами. Корректирующее устройство может быть включено в прямую цепь последовательно (рис.6.19).

Последовательные корректирующие устройства обычно применяют в тех случаях, когда сигнал управления представляет собой напряжение постоянного тока. Если корректирующее устройство вводит производную от сигнала рассогласования D , то происходит увеличение запаса устойчивости и повышение качества переходного процесса. При введении интеграла и производ-

ной от сигнала рассогласования обеспечивается астатизм в сочетании с сохранением устойчивости и качества переходной характеристики.

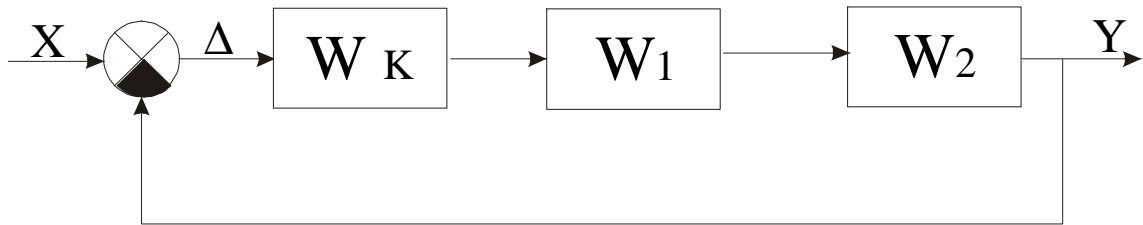


Рисунок 6.19 – Последовательная коррекция.

Применяется также включение корректирующего устройства в виде обратной связи (рис.6.20).

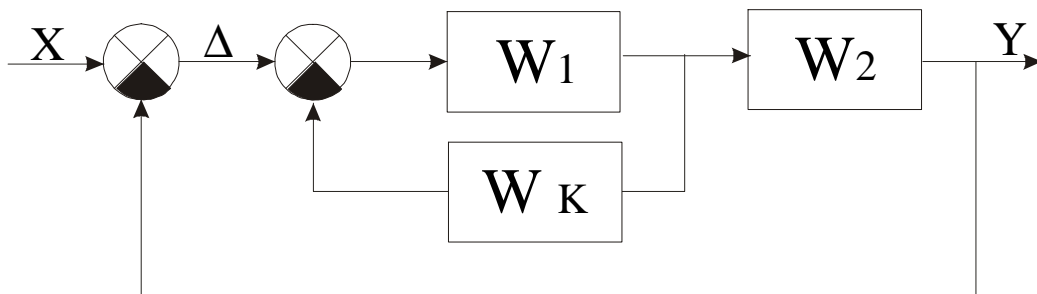


Рисунок 6.20 – Коррекция в виде обратной связи.

Обычно параметры корректирующего устройства выбирают таким образом, чтобы выполнялось соотношение:

$$|W_1(j\omega) \cdot W_k(j\omega) \gg 1|$$

В этом случае свойства участка цепи, где включена коррекция и изменены её параметры, не оказывают влияния на свойства всей системы. Это важное свойство является причиной широкого применения коррекции в виде обратной связи. Обратная связь здесь обычно является отрицательной.

Применяется третий способ коррекции - параллельный (рис.6.21).

Параллельная коррекция имеет меньшие возможности, чем две предыдущие разновидности. Вместе с тем параллельное кор-

ректирующее устройство при меньшей сложности обеспечивает нужное преобразование сигнала рассогласования.

Выбор параметров корректирующих устройств производится исходя из критериев устойчивости и проверяется по оценкам качества переходных процессов.

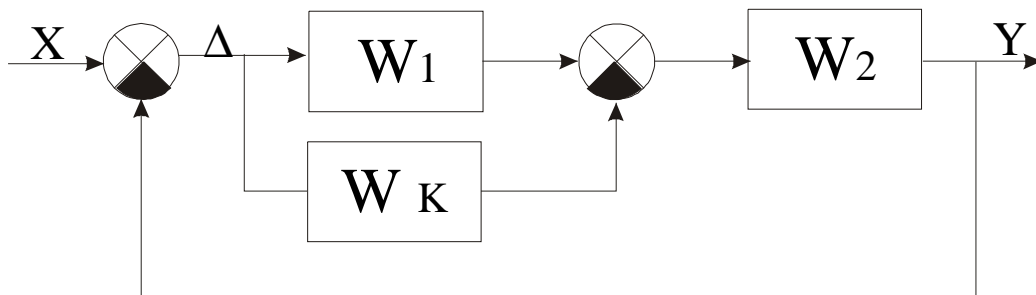


Рисунок 6.21 – Параллельная коррекция.

Контрольные вопросы к главе 6.

1. Что называется частотными критериями устойчивости САУ?
2. В чем преимущество частотных критериев устойчивости перед алгебраическими?
3. Сформулируйте критерий устойчивости Михайлова.
Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста.
4. По каким величинам оценивают качество работы САУ?
5. Что такое статическая ошибка?
6. Что такое динамическая ошибка?
7. Дайте определение астатической системы.
8. Дайте определение статической системы.
9. Что такое время регулирования?
10. Что такое перерегулирование?
11. Что такое степень затухания?
12. Что понимают под обобщенным показателем качества работы САУ?
13. Дайте понятие апериодического процесса регулирования.
14. Дайте понятие колебательного процесса регулирования.
15. Как подобрать передаточную функцию корректирующего устройства при компенсации возмущающего воздействия?
16. Какие характерные задачи решаются при проектировании САУ?
17. Что называется синтезом САУ?
18. Как включаются корректирующие устройства?

Часть 2. Технические средства автоматики

Глава 7. Элементная база устройств автоматики

7.1. Элементная база автоматики

Рассмотренные выше регуляторы и другие элементы САУ реализуются специальными устройствами на электронных, электромеханических и иных элементах. В данном разделе рассматривается электронная элементная база устройств автоматики.

Современные электронные устройства выполняются в основном на базе полупроводниковых приборов: дискретных элементов - диодов, транзисторов-микросхем, стабилитронов, тиристоров и т.д. и в интегральном исполнении.

Основой большинства полупроводниковых приборов является электронно-дырочный $p-n$ переход, возникающий на границе раздела двух полупроводников с разными типами электропроводности. Вольт - амперная характеристика $p-n$ перехода представлена на рис.7.1.

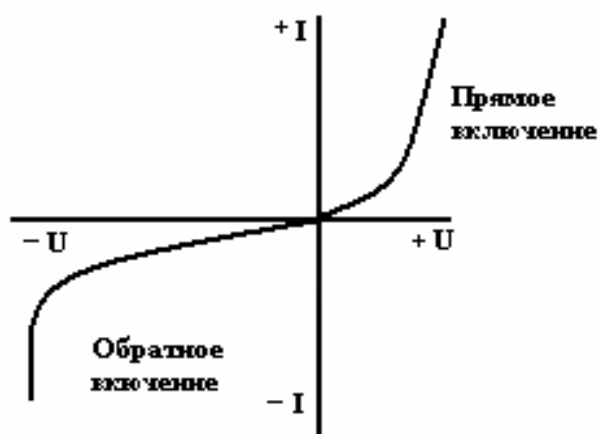


Рисунок 7.1 – Вольт - амперная характеристика $p-n$ перехода.

$p-n$ переходы изготавливаются из кремния, германия с добавками различных материалов (индий, галлий, селен и других), которые придают им необходимые свойства.

Полупроводниковым диодом называется прибор с одним электронно-дырочным $p-n$ переходом и двумя выводами. Один из них, соединенный с p - областью называется анодом, другой, соединенный с n - областью, – катодом. Диод проводит электрический ток только в одном направлении, поэтому он находит применение для выпрямления переменного тока в однополярный. Он представляет из себя нелинейный пассивный элемент, вольт-амперная характеристика которого аналогична вольт-амперной

характеристики р-п перехода (рис.7.1). Изображается диод на схемах в виде стрелы $\rightarrow|$.

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, напряжение на котором при обратном смещении не зависит от его тока, предназначенный для стабилизации напряжения. Изготавливают диоды с заранее заданным уровнем стабилизации напряжения до 15 В.

Биполярный транзистор. Он представляет из себя полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р-п переходами и тремя выводами.

Транзистор имеет три области: эмиттер, базу и коллектор. Переход, который образуется на границе областей эмиттер - база, называется эмиттерным, а на границе база - коллектор – коллекторным. Электропроводность базы может быть как электронной, так и дырочной; соответственно различают транзисторы со структурами р-п-р и п-р-п (рис.7.2.).

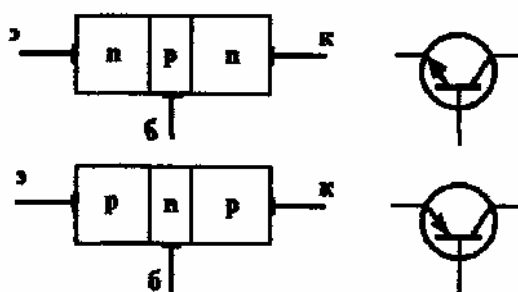


Рисунок 7.2 – Схематическое и условное графическое изображение транзисторов типа п-р-п и р-п-р:
э- эмиттер, б- база, к- коллектор.

Принцип работы транзисторов обоих типов одинаков, различие заключается в том, что в транзисторе со структурой р-п-р основной ток, текущий через базу, создается дырками, пришедшими из эмиттера, а в транзисторе п-р-п – электронами.

В усилительном режиме работы транзистора эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный - в обратном.

Если изменять ток базы из внешней цепи, например, подачей на электрод базы напряжения, то в зависимости от последнего будет изменяться ток коллектора, причем это изменение будет больше, чем изменение тока базы. Таким образом, транзистор будет усиливать входной сигнал, подаваемый на базу.

В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора (рис.7.3): с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

Транзистор характеризуют коэффициентом усиления по току – отношением приращения выходного тока к вызывающему его приращению входного тока. К другим характеристикам транзистора относятся его частотные свойства – зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала и температуры. Биполярный транзистор имеет малое входное сопротивление, а выходное – в зависимости от схемы включения.

Транзисторы служат для усиления тока базы и в качестве переключающего элемента. На них выполняют усилители электрических сигналов, генераторы электрических сигналов разной формы, цифровые логические элементы и многие другие электронные схемы. Они лежат в основе построения интегральных аналоговых и цифровых микросхем.

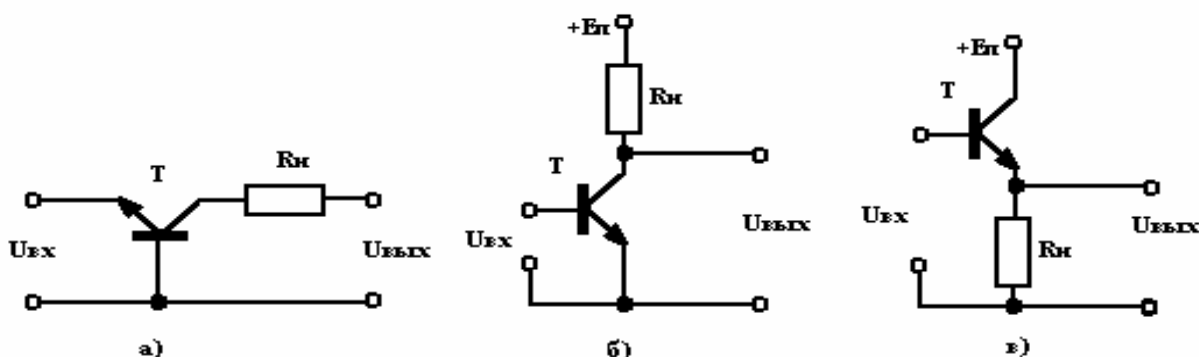


Рисунок 7.3 – Схемы включения транзисторов: а) с общей базой, б) с общим эмиттером, в) с общим коллектором; Т-транзистор; $E_{п}$ - напряжение питания транзистора; $U_{вх}$ - входной сигнал; $U_{вых}$ – выходной сигнал (усиленный); $R_{н}$ - сопротивление нагрузки.

Полевой транзистор. Это прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающих через проводящий канал и управляемых электрическим полем. Полевой транзистор имеет три вывода – исток, сток и затвор. Электрическое поле создается входным управляющим током, подаваемым на затвор. Это поле управляет проводимостью между стоком и истоком транзистора. Входное сопротивление полевого транзи-

стора велико, поэтому управление осуществляется малыми токами на частотах до 1 ГГц.

Тиристор. Тиристор – это четырехслойный кремниевый прибор. Он имеет три электрода: анод А, катод К и управляющий электрод У. Его можно представить двумя транзисторами с тремя р-п переходами (рис.7.4). Тиристоры служат для прерывания токов и напряжений, регулирования мощности постоянного и переменного тока. Запуск тиристора осуществляется путем подачи с блока управления БУ тока на управляющий электрод У. После того как тиристор открывается, управляющий электрод перестает оказывать воздействие на протекание тока I. Поэтому включение тиристора может осуществляться короткими импульсами, подаваемыми с блока БУ.

Чтобы перевести тиристор в выключенное состояние, ток через него необходимо уменьшить до нуля путем прерывания цепи нагрузки или снижения входного $U_{вх}$ напряжения между анодом и катодом.

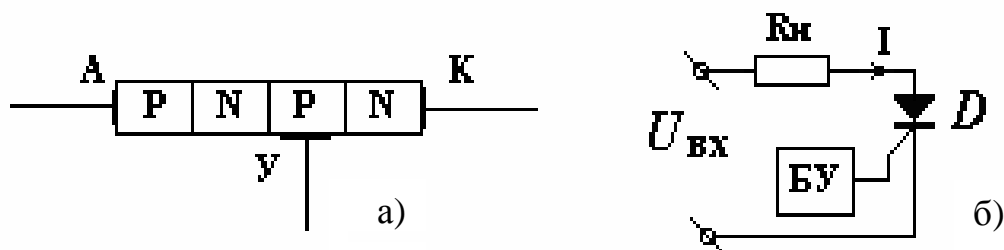


Рисунок 7.4 – Тиристор- структура (а) и схема включения (б): А- анод, К- катод, У- управляющий электрод, БУ- блок управления, $U_{вх}$ - входное напряжение, I- ток тиристора, R_n - сопротивление нагрузки.

Операционный усилитель (ОУ) - многокаскадный усилитель с дифференциальным входом и коэффициентом усиления, стремящимся к бесконечности, с высоким входным сопротивлением и электрическим потенциалом смещения входа, близким нулю. Операционный усилитель имеет два входа- прямой и инверсный, которые позволяют на выходе усилителя иметь сигнал, пропорциональный разности двух входных сигналов. Операционный усилитель – интегральная микросхема, выполненная из множества транзисторов, диодов, резисторов. К основным параметрам ОУ, которые характеризуют его качество, относят:

- коэффициент усиления K – отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению дифференциального входного напряжения. Интегральные ОУ имеют коэффициент усиления до сотен тысяч единиц;

- входное сопротивление - сопротивление со стороны одного из входов ОУ, в то время как другой заземлен. Входное сопротивление ОУ может составлять 10^7 Ом и более;

- выходное сопротивление ОУ - внутреннее сопротивление усилителя со стороны выхода. Составляет обычно величину от десятков до нескольких сотен Ом.

7.2. Аналоговые схемы устройств автоматики

Электронные схемы могут выполнять непосредственно функциональные преобразования сигнала - усиление, сложение, умножение, деление, возведение в квадрат, суммирование, интегрирование, дифференцирование и другие. Каждый элемент предназначен для осуществления одной из частных операций, присущих данному узлу.

К числу наиболее часто применяемых функциональных элементов следует в первую очередь отнести схемы усилителей, содержащих ОУ.

Инвертирующий усилитель. Схема включения инвертирующего ОУ представлена на рис.7.5а. Входной сигнал $U_{вх}$ подается на инвертирующий вход ОУ, при этом с выхода ОУ на инвертирующий вход организована отрицательная обратная связь R_2 . Выходной сигнал $U_{вых}$ связан с входным сигналом $U_{вх}$ соотношением:

$$U_{вых}/R_2 = -U_{вх}/R_1,$$

а коэффициент усиления по напряжению равен:

$$K = -U_{вых}/U_{вх} = -R_2/R_1.$$

Не инвертирующий усилитель показан на рис.10.5б. Входной сигнал $U_{вх}$ подается на не инвертирующий вход, а инвертирующий соединен с общим проводом через сопротивление R_3 . Отрицательная обратная связь через сопротивление R_2 обеспечивает стабильную работу усилителя. Выходное напряжение определяется в соответствии с выражением:

$$U_{вых} = U_{вх} R_4 (1 + R_2/R_1)/(R_3 + R_4).$$

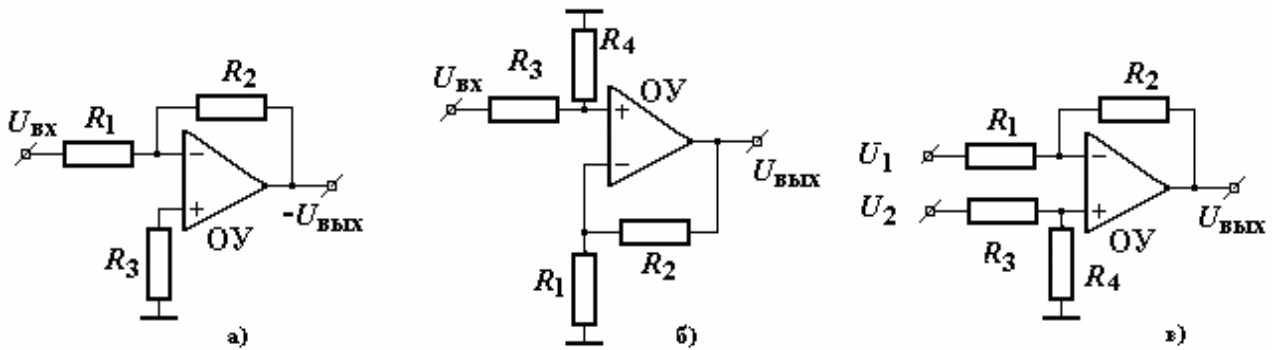


Рисунок 7.5 – Функциональные элементы автоматики на операционном усилителе.

На рис.7.5в. представлена схема дифференциального включения операционного усилителя, выходное напряжение которого пропорционально разности входных сигналов, поданных на инвертирующий и на не инвертирующий входы:

$$U_{вых} = U_2 R_4 (1 + R_2/R_1)/(R_3 + R_4) - U_1 (R_2/R_1).$$

Схема дифференциального включения операционного усилителя имеет большие функциональные возможности по сравнению с другими, рассмотренными выше.

На рис.7.6. показан масштабирующий усилитель, который может применяться в качестве входного звена для ступенчатого регулирования, например, в регуляторе (путем ступенчатого регулирования коэффициента усиления).

Широко применяется суммирующий усилитель. Он может использоваться в качестве элемента-формирователя, реализующего геометрическое суммирование нескольких переменных напряжений.

Наиболее часто при реализации суммирующего усилителя используется инвертирующее включение ОУ, когда несколько входных напряжений U_1, U_2, U_3 , каждое через индивидуальный входной резистор R_1, R_2, R_3 , подаются на инвертирующий вход (рис.7.7).

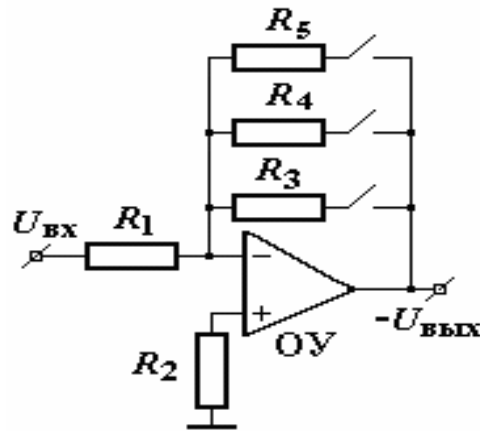


Рисунок 7.6 – Масштабирующий усилитель.

В ОУ через резистор обратной связи протекает суммарный ток входов и с учетом нулевого напряжения на инвертирующем входе выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = R_4 (U_1 + U_2 + U_3) / (R_1 + R_2 + R_3).$$

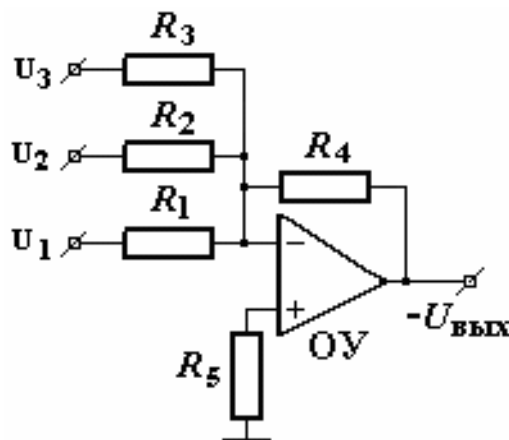


Рисунок 7.7 – Суммирующий усилитель.

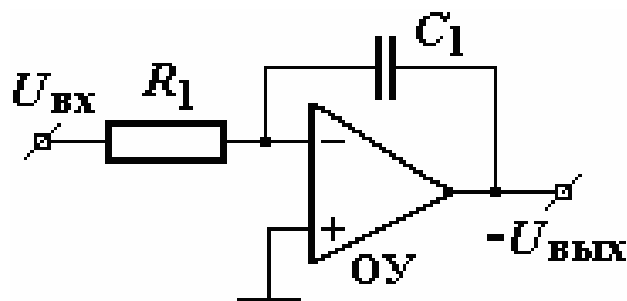


Рисунок 7.8 – Интегрирующий элемент.

Интегрирующий элемент используется для интегрирования сигналов во времени в схемах вычислений, а также в качестве фильтров сигналов (рис.7.8). Его основной характеристикой является постоянная времени интегрирования $\tau=R_1C_1$. Интегрирование входного сигнала во времени осуществляется на емкости C_1 , включенную в обратную связь ОУ.

Часто используется дифференцирующий элемент – для получения производной от входного сигнала (рис.7.9). На выходе этого элемента сигнал соответствует первой производной входного сигнала.

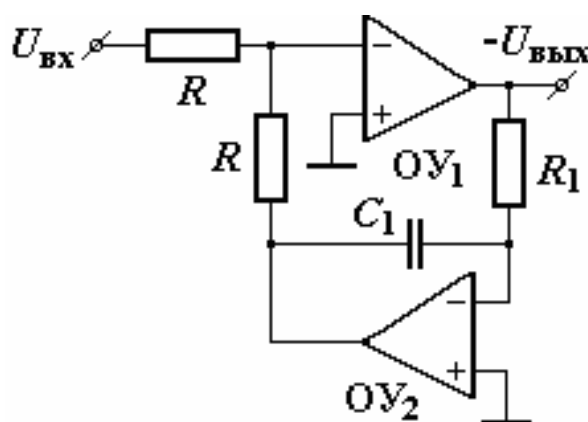


Рисунок 7.9 – Дифференцирующий элемент.

Компараторы. Компараторы – это устройства сравнения, сопоставления сигналов для определенного момента времени (рис.7.10). При каждом равенстве нулю разности двух входных сигналов выходное напряжение изменяется от нижнего (логический 0) до верхнего (логическая 1) предельного значения. Компараторы могут быть аналоговые и цифровые.

В аналоговых компараторах на входе сравниваются два аналоговых сигнала, а на выходе - логический сигнал.

В цифровых компараторах и на входе и на выходе присутствуют сигналы в цифровом виде.

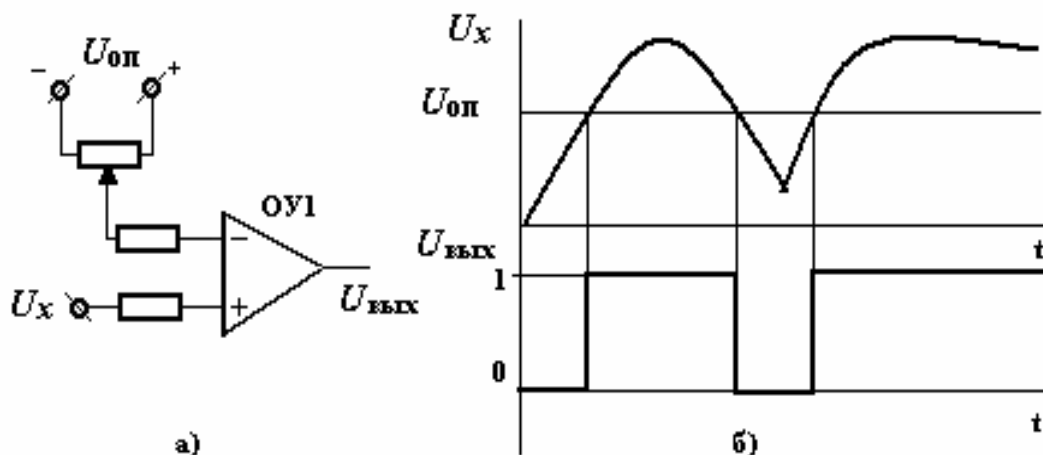


Рисунок 7.10 – Аналоговый компаратор.

В аналоговом компараторе (рис.7.10а) операционный усилитель работает без обратной связи, поэтому имеет очень большой коэффициент усиления. На инвертирующий вход подается опорное напряжение $U_{оп}$, величина которого может изменяться (рис.7.10б). На не инвертирующий вход подается анализируемый сигнал U_x . Любое изменение разности входных напряжений вызывает скачок выходного напряжения $U_{вых}$. Если $U_x \geq U_{оп}$, то на выходе ОУ₁ появляется логическая 1, если $U_x < U_{оп}$, то – логический 0.

Если $U_{оп} = 0$, то такой компаратор называется нуль-органом.

Компараторы находят широкое применение в сравнивающих устройствах систем управления, цифровой технике - аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях.

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Цифро – аналоговые преобразователи имеют многочисленные применения для непосредственного преобразования цифровых сигналов в аналоговые и для образования обратных связей по напряжению в составе аналого-цифровых преобразователей.

ЦАП представляет собой резистивный делитель напряжения, управляемый цифровым кодом $q_1 \dots q_n$ - набором логических нулей и единиц, который характеризует входную информацию. Наиболее часто применяется резистивная матрица $R-2R$ (рис.7.11). Матрица обслуживается двунаправленными ключами Кл, число которых равно числу значащих двоичных разрядов. При наличии на всех входах q логических нулей ключи КЛ подсоединены к нулевой шине и на выходе усилителя ОУ₁ имеется нулевой потенциал.

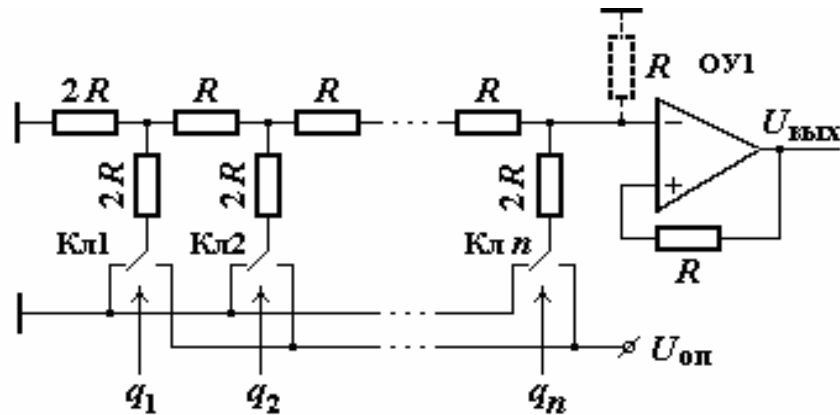


Рисунок 7.11 – Схема ЦАП с матрицей R-2R

При приходе на первый разряд q_1 логической единицы ключ КЛ1 подключает к ОУ₁ через резистор $2R$ и цепочку резисторов R опорное напряжение $U_{оп}$. В результате чего на выходе ОУ₁ возникает ступенька напряжения $\Delta u_{вых}$. При приходе на вход ЦАП логической единицы более старшего разряда (большого числа), например на q_2 , на вход ОУ₁ подключается еще одна резистивная ветвь с опорным напряжением и на выход ОУ₁ добавится еще одна ступенька напряжения. Выходное напряжение нарастает ступеньками с квантом (шагом):

$$\Delta u_{вых} = u_{оп} / (2^n - 1),$$

где n - число разрядов.

Разрешающая способность ЦАП определяется числом разрядов и точностью изготовления резисторов матрицы.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП применяются для преобразования аналоговых сигналов датчиков и источников сигналов в цифровую форму для последующей обработки в компьютере или микропроцессоре. Известно несколько принципов построения аналого-цифровых преобразователей-развёртывания во времени, поразрядного кодирования, следящего уравнивания, считывания.

Схема АЦП считывания приведена на рис.7.12а. Строится АЦП на основе точного резистивного делителя напряжения $R_1 \dots R_N$, выполненного из одинаковых по номиналу резисторов и компараторов $К_1 \dots К_N$, где N -число уровней квантования входного сигнала $U_{вх}$.

На выходах компараторов имеет место позиционный код 0 или 1, когда количество сработавших компараторов (код 1), начиная с первого, соответствует уровню измеряемой величины. Быстродействие компаратора определяется временем задержки компараторов. Для случая, изображенного на рис.7.12б, входной сигнал U_{ex} относится ко второму уровню - сработали два первых компаратора K_1 и K_2 . Цифровой код на выходе АЦП будет 1 1 0 0. АЦП считывания может иметь неограниченное количество разрядов.

Для обработки реального сигнала используют совокупность приведенных и других элементов, схемы которых определяются конкретными задачами обработки сигналов.

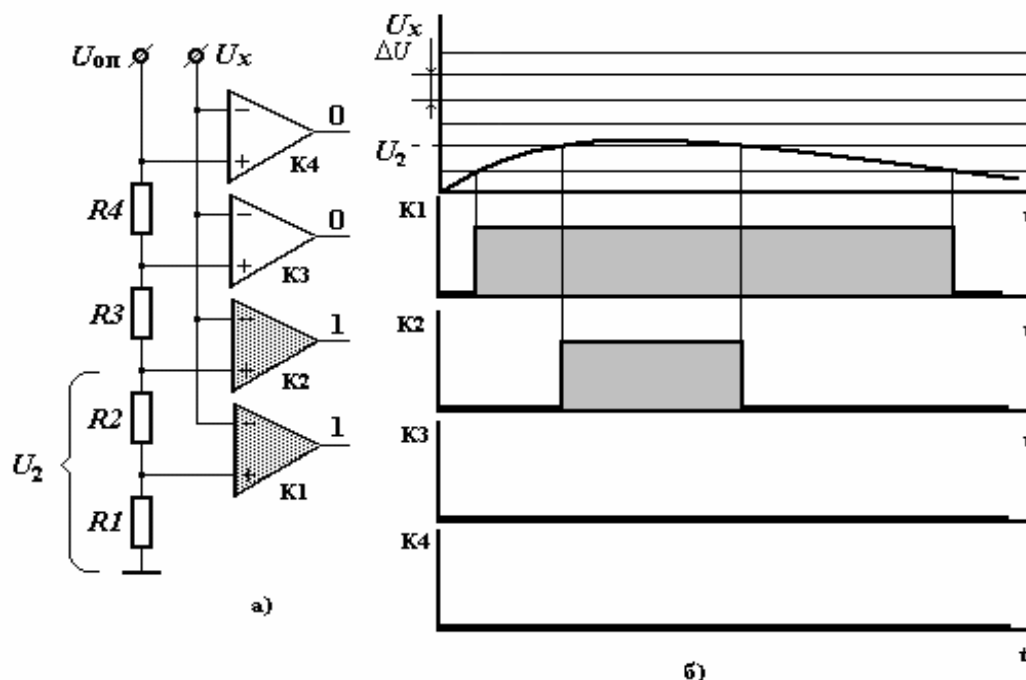


Рисунок 7.12 – АЦП считывания.

Для построения электронных схем, встраиваемых в системы автоматики, требуются различные функциональные преобразователи, а также устройства, реализующие типовые нелинейности.

Функциональные преобразователи могут выполняться для реализации одной или нескольких зависимостей.

В первом случае, например, для воспроизведения только одной зависимости: экспоненты, степенной функции, тригонометрической и т.д., преобразователи называют специализированными.

Во втором случае, если преобразователи могут быть пере-строены посредством изменения их параметров на воспроизведе-ние многих зависимостей, они называются универсальными.

Преобразователи, основанные на естественных нелинейно-стях, используют нелинейные участки вольтамперных характери-стик различных полупроводниковых приборов. Например, вольт-амперные характеристики $p-n$ переходов, зависимость фототока от освещённости, зависимость сопротивления терморезисторов от температуры, зависимость собственной частоты колебаний различных упругих резонаторов от прилагаемых к ним усилий и т.д. Логарифмические и экспоненциальные усилители с исполь-зованием нелинейностей $p-n$ переходов хорошо разработаны и нашли широкое применение в измерительной технике.

На рис. 7.13 приведена схема устройства для возведения аналогового сигнала U_{ex} в квадрат, основанная на использовании нелинейности фоторезисторного оптрона. Фоторезисторный оп-трон представляет собой пару светодиод-фоторезистор $D_1 - R_2$, выполненных интегрально. Величина сопротивления для фоторе-зистора оптрона обратно пропорциональна напряжению, прило-женному к светодиоду $R_2 = K/U_{вх}$. Коэффициент пропорциональ-ности K оптрона зависит от его конструктивных особенностей и в некоторых пределах может подстраиваться резистором R_1 .

Операционный усилитель ОУ преобразует U_{ex} в ток питания светодиода D_1 , который освещает фоторезистор R_2 , изменяя тем самым его сопротивление. Величина переходного напряжения пропорционально квадрата входного $U_{вых} \equiv U_{ex}^2$.

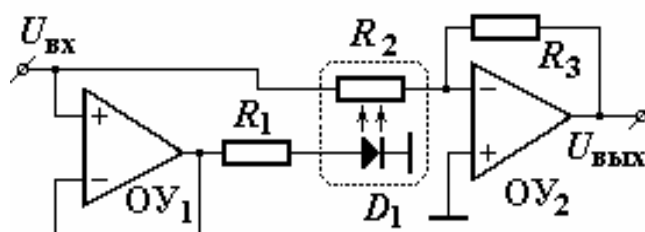


Рисунок 7.13 – Устройство возведения в квадрат

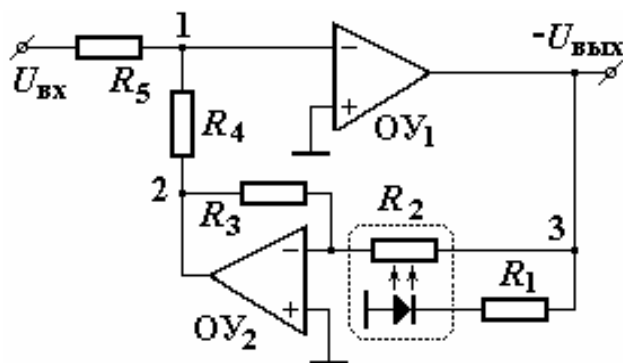


Рисунок 7.14 – Устройство извлечения квадратного корня

В расходомерах и датчиках давления часто используется устройство для извлечения квадратного корня. Схему такого устройства можно получить с помощью квадратора при включении его в цепь обратной связи операционного усилителя (рис.10.14). В точке 1 алгебраическая сумма токов, поступающих по прямой цепи и по цепи обратной связи, при пренебрежении входным током операционного усилителя, равна нулю. Обычно в практических схемах выбирают $R_4 = R_5$. Выходной сигнал равен

$$U_{\text{вых}} = ((K/R_3)U_{\text{вх}})^{0,5}.$$

В реальных физических процессах и системах часто встречаются такие нелинейности статических характеристик, как зона нечувствительности, ограничение, релейность, гистерезис, люфт и т.д. Устройства, обладающие зоной нечувствительности, не имеют реакции на входные сигналы, величина которых находится в пределах данной зоны. Например, в электронных усилителях, если входной сигнал меньше порога чувствительности, в электродвигателях отработки сигналов обратных связей, если питающее напряжение меньше напряжения трогания и т.д. Нелинейность типа зоны нечувствительности реализуется диодно-резистивной схемой (рис.7.15а). Если входное напряжение $U_{\text{вх}} < \alpha U_{\text{оп}}$, то на выходе схемы сигнал равен нулю, где α – коэффициент определяемый потенциометром R_1 и R_2 .

Зона нечувствительности может быть выполнена несимметричной с помощью различных установок коэффициентов передачи потенциометров R_1 и R_2 . Положительное напряжение нечувствительности $U_n = -a U_{\text{оп}}$ устанавливается потенциометром R_2 , а

отрицательное - потенциометром R_1 . При положительном входном сигнале $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{Н}}$ открыт диод D_2 , а диод D_1 закрыт.

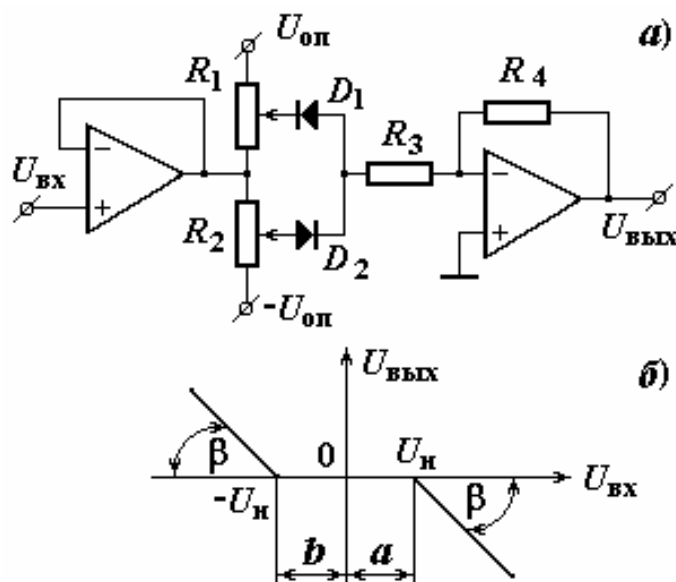


Рисунок 7.15 – Схема зоны нечувствительности

Наклон линейных участков (рис. 7.15 б) во втором и четвёртом квадрантах одинаков и определяется коэффициентом передачи ОУ $\text{tg}\beta = R_4/R_3$. Для воспроизведения характеристики зоны нечувствительности в первом и третьем квадрантах на выходе схемы следует включить дополнительный инвертор.

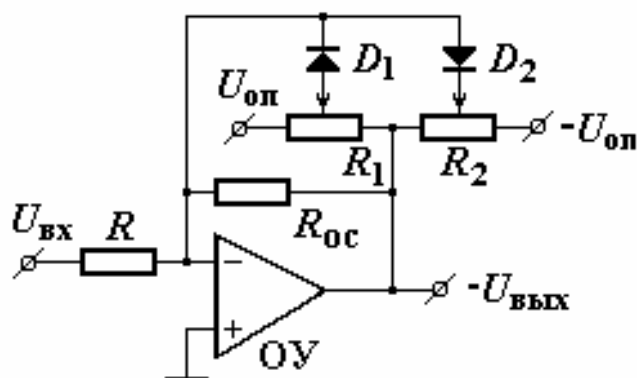


Рисунок 7.16 – Нелинейность типа “насыщения”

На рис. 7.16 приведена схема воспроизведения нелинейности типа “насыщения”. Такой тип нелинейности встречается в

усилителях, генераторах и различных преобразователях физических величин в электрические сигналы. Реализуется схема на ОУ с помощью диодно-резисторных цепочек, включаемых в цепь обратной связи. При малых входных напряжениях диоды D_1 и D_2 заперты опорными напряжениями, снимаемыми с потенциометров. Усилитель в этом случае работает в линейном режиме с передаточным коэффициентом $-R_{oc}/R$. При достижении выходного напряжения значений $+U_{огр}$ или $-U_{огр}$ открывается диод D_1 или D_2 , а резистор R_{oc} шунтируется низкоомным потенциометром R_1 . Дальнейшее изменение выходного напряжения прекращается, так как коэффициент передачи ОУ резко падает. На линейном участке выходное напряжение схемы изменяется по закону в соответствии с рис.7.17а. Ограничение выходного напряжения определяется величиной

$$U_{огр} = -[a/(1-a)]U_{он},$$

где a – коэффициент, определяемый R_1, R_2, R_{oc} .

Если из схемы (рис. 7.16) исключить резистор обратной связи R_{oc} , то будет получена характеристика идеального релейного элемента (рис.7.17б).

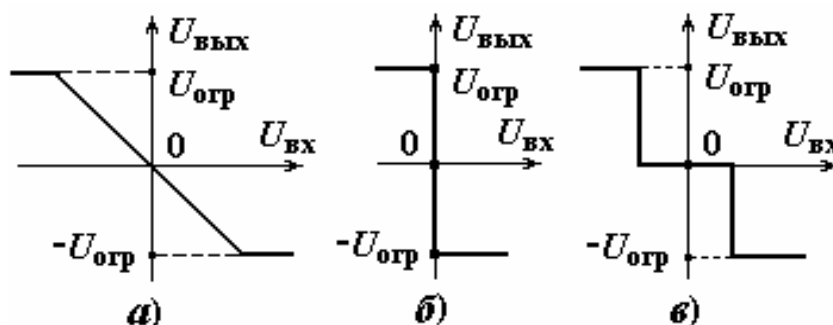


Рисунок 7.17 – Типовые нелинейности: насыщение (а), идеальная релейность (б) и реальная релейность (в)

Последовательное соединение схемы, реализующей идеальный релейный элемент, со схемой нечувствительности даёт характеристику реального релейного элемента (рис. 7.17в).

Гистерезисная характеристика соответствует процессам, имеющим неоднозначность, т.е. одному входному сигналу соответствует несколько разных значений выходной величины. В практике большей частью встречаются характеристики, обладающие двузначностью. При возрастании входного сигнала вы-

ходной сигнал изменяется по одной кривой, а при уменьшении входного сигнала он изменяется по другой кривой, не совпадающей с первой.

Наиболее просто может быть реализована с помощью электронных устройств прямоугольная петля гистерезиса, имеющаяся, например, при намагничивании ферромагнитных сердечников трансформаторов. Модель составляется из последовательной цепи сумматора и схемы ограничения, охваченных положительной обратной связью (рис. 7.18а).

Величина петли гистерезиса прямо пропорциональна величине сигнала положительной обратной связи. Регулирование петли гистерезиса в схеме возможно посредством изменения коэффициента передачи потенциометра R_7 , включенного в цепь положительной обратной связи. Потенциометрами R_5 и R_6 можно регулировать величину ограничения выходного сигнала для положительных и отрицательных значений.

Принцип работы схемы, воспроизводящей гистерезисную характеристику, поясняется на рис. 7.18б. При нулевом входном сигнале выходной сигнал также равен нулю. На характеристике эта точка соответствует началу координат. При малейшем увеличении входного сигнала выходной начинает возрастать скачком по вертикальной ветке (1-й квадрант) до момента ограничения, т.е. до момента открытия диода D_2 . В дальнейшем при снижении входного сигнала изменение выходного протекает по направлению стрелки, отмеченной на характеристике.

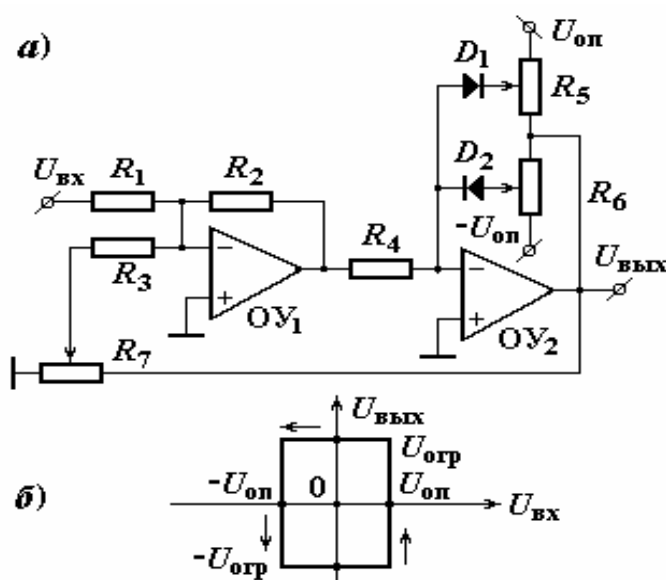


Рисунок 7.18 – Схема моделирования гистерезиса.

Характеристикой люфта обладают различные кинематические механизмы приборных устройств при изменении направления относительного движения его звеньев.

Связано это с наличием зазоров в различ-

ных соединениях. Электрическая схема, моделирующая характеристику люфта, показана на рис. 7.19а. Пусть в начальный момент конденсаторы C_1 и C_2 разряжены. Пока входной сигнал не превысит значений $+U_{оп}$ или $-U_{оп}$, выходной сигнал равен нулю, так как оба диода D_1 и D_2 заперты опорным напряжением. Величина люфта a (рис.10.19б) моделируется схемой зоны нечувствительности. При увеличении входного сигнала $U_{вх} > U_{оп}$ диод D_2 отпирается и выходное напряжение начинает изменяться по следующему закону (участок характеристики 1-2):

$$U_{вых} = (C_1 R_4 / C_2 R_3)(U_{вх} - U_{оп}).$$

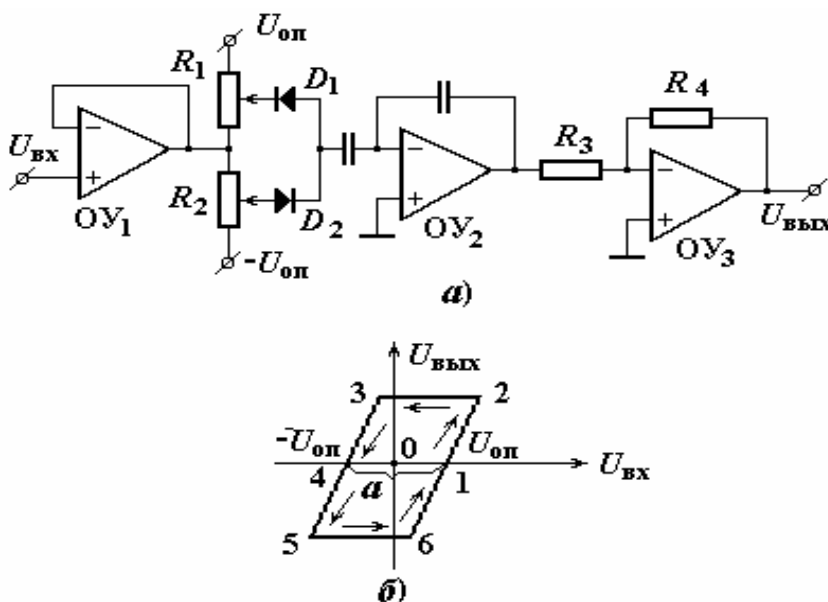


Рисунок 7.19 – Схема модели люфта (а) и ее характеристика (б).

Под действием входного напряжения диод D_2 закрывается напряжением на конденсаторе C_1 . На выходе схемы напряжение будет со-

храняться постоянным и равным напряжению на конденсаторе C_2 (участок 2-3 характеристики). Когда входное напряжение достигнет значения $U_{вх} \leq -U_{оп} + U_{C1}$, откроется диод D_1 и начнется процесс перезарядки конденсаторов. При этом работа схемы будет протекать в обратной последовательности. Масштабный усилитель OU_3 на выходе схемы необходим для изменения наклонов линейных участков 2-6 и 3-5.

На рис. 7.20 приведена схема перемножения-деления аналоговых сигналов, построенная на основе логарифмических преобразователей. Схема выполнена на счетверённых операционных усилителях. Транзисторы $T_1 \div T_4$ должны иметь идентичные параметры и должны быть изготовлены в одном технологическом цикле на одном кристалле. Выходное напряжение усилителя OU_1 определяется разностью базо-эмиттерных напряжений транзи-

сторов T_1 и T_2 . Коллекторные токи этих транзисторов задаются усилителями $ОУ_1$ и $ОУ_2$ на уровнях соответственно U_1/R_1 и U_2/R_2 . Три операционных усилителя $ОУ_1 \div ОУ_3$ схемы используются в логарифмических преобразователях, а на четвёртом усилителе $ОУ_4$ выполнен экспоненциальный преобразователь. Требование идентичности всех применённых транзисторов связано в данной схеме с необходимостью температурной стабилизации выходной характеристики перемножителя. Выходное напряжение $ОУ_4$ можно записать в следующем виде:

$$U_3 = \frac{U_1 U_2}{U_{оп}} \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}.$$

Соотношение резисторов в приведённой формуле должно быть выбрано так, чтобы выходное напряжение U_3 не превысило максимального значения на линейном участке работы операционного усилителя. При необходимости выполнения операции деления U_1 на U_2 напряжения U_2 и $U_{оп}$ должны поменяться ролями.

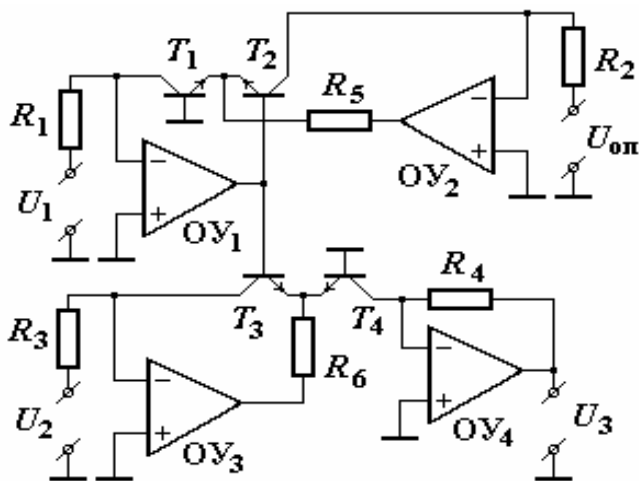


Рисунок 7.20 – Схема перемножителя-делителя.

Контрольные вопросы к главе 7.

1. Определите назначение диода.
2. Определите назначение транзистора.
3. Какие схемы включения транзистора вы знаете?
4. Определите назначение тиристора.
5. Определите назначение стабилитрона.
6. Определите назначение операционного усилителя.

7. Дайте определение коэффициента усиления операционного усилителя.
8. Что понимают под дифференциальным включением операционного усилителя?
9. Что понимают под входным сопротивлением операционного усилителя?
10. Что понимают под выходным сопротивлением операционного усилителя?
11. Какие материалы используют для изготовления полупроводниковых приборов?
12. Чем отличаются между собой неинвертирующий усилитель от инвертирующего?
13. Чему равен коэффициент усиления неинвертирующего усилителя?
14. Чему равен коэффициент усиления инвертирующего усилителя?
15. Поясните назначение обратной связи в усилителе.
16. Какова роль отрицательной обратной связи в усилителе?
17. Чему равно выходное напряжение дифференциального усилителя?
18. Чему равно напряжение выхода масштабирующего усилителя?
19. Нарисуйте схему суммирующего усилителя.
20. Какую роль играет конденсатор в цепи отрицательной обратной связи операционного усилителя?
21. Дайте определение компаратора.
22. Какова форма сигнала на выходе компаратора?
23. Дайте определение ЦАП.
24. Дайте определение АЦП.
25. Чему равно напряжение на выходе АЦП.
26. Что такое разрядность АЦП?
27. Нарисуйте схему возведения числа в квадрат на фоторезистивном оптроне.
28. Какие свойства электронных элементов используются в схемах моделирования люфта?
29. Какие свойства электронных элементов используются в схемах моделирования гистерезиса?
30. Какие свойства электронных элементов используются в схемах моделирования нелинейности?

Глава 8. Цифровые схемы автоматики

8.1. Комбинационная логика

В устройствах автоматики с логическими входными сигналами часто необходимо вырабатывать определенные выходные сигналы для их передачи на последующие узлы. При этом различают два класса задач.

В задачах первого класса состояние выхода зависит от комбинации входных сигналов. Эти задачи называются комбинационными и решаются с помощью логических устройств, которые выполняют операции булевой алгебры в системах с двумя состояниями.

Другой класс задач требует не только формирования комбинации входных сигналов, но также знания их прежнего значения. Для решения таких задач применяют последовательные схемы (цифровые автоматы), имеющие в той или иной форме цифровую память.

Комбинационными устройствами называют логические устройства, не имеющие в своём составе запоминающих ячеек, при этом выходные сигналы зависят от входных, имеющих место только в данный момент времени.

Все цифровые устройства оперируют двоичными кодами, т.е. наборами нулей и единиц. Для описания цифровых устройств используется алгебра логики, в которой так же, как и в двоичном кодировании, переменные могут принимать только два значения: 0 или 1. В алгебре логики имеется три элементарных действия: дизъюнкция (ИЛИ), конъюнкция (И) и инверсия (НЕ).

Дизъюнкция, или логическое сложение, осуществляется по следующим правилам:

$$\begin{aligned}0 \vee 0 &= 0, \\0 \vee 1 &= 1, \\1 \vee 0 &= 1, \\1 \vee 1 &= 1,\end{aligned}$$

где \vee - знак операции дизъюнкции.

Можно также пользоваться знаком “+”, но в логических выражениях этот знак читается как ИЛИ. В дизъюнкции в отличие от двоичного кодирования при суммировании двух логических единиц переносов не осуществляется.

Конъюнкция, или логическое умножение, осуществляется по следующим правилам:

$$0 \wedge 0 = 0,$$

$$0 \wedge 1 = 0,$$

$$1 \wedge 0 = 0,$$

$$1 \wedge 1 = 1,$$

где \wedge - знак операции конъюнкции. В логических выражениях допустимо также условное изображение операции конъюнкции отсутствием какого либо знака между переменными, записанными без пробела, однако читается это как И.

Инверсия представляет собой отрицание истины. Например, инверсия единицы есть нуль, а инверсия нуля есть единица. Операция инверсии обозначается прямой чертой над переменной:

$$\bar{X}, \bar{0}, \bar{1}$$

(читается: не-икс, не-нуль, не-единица).

Законы алгебры логики представляют собой комбинации из дизъюнкций, конъюнкций и инверсий над логическими переменными. Возможные соотношения между ними приведены в таблице 8.1.

Законы отрицания в виде функций Пирса и Шеффера являются полными, т.е. посредством этих функций можно описать работу любого, сколь угодно сложного, логического устройства. Число различных логических функций от n переменных определяется соотношением: $N = 2^{2^n}$.

8.2. Элементы комбинационных логических устройств

На рис.11.1а представлена схема *ИЛИ*, выполненная на диодах. Управляющий сигнал на выходе появляется при поступлении сигнала *ИЛИ* на один, *ИЛИ* на два других входа, одновременно или вместе.

Таблица 8.1 – Основные законы алгебры логики

№	Название	Выражение
1.	Закон универсального множества	$1 \vee X_1 \vee X_2 \vee X_3 \dots \vee X_n = 1$
2.	Закон нулевого множества	$0 \wedge X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \dots \wedge X_n = 0$
3.	Законы повторения	$X \vee X \vee X \vee X \dots \vee X = X$ $X \wedge X \wedge X \wedge X \dots \wedge X = X$
4.	Закон многократной инверсии	$\overline{\overline{X}} = X, \overline{\overline{\overline{X}}} = \overline{X}$ и т.д.
5.	Переместительный закон	$X_1 \vee X_2 = X_2 \vee X_1, X_1 \wedge X_2 = X_2 \wedge X_1$
6.	Сочетательный закон	$X_1 \wedge (X_2 \wedge X_3) = (X_1 \wedge X_2) \wedge X_3 =$ $X_2 \wedge (X_1 \wedge X_3)$
7.	Законы дополнительности	$X \wedge \overline{X} = 0, X \vee \overline{X} = 1.$
8.	Распределительный закон	$X_1 \wedge (X_2 \vee X_3) = (X_1 \wedge X_2) \wedge (X_1 \wedge X_3)$ $X_1 \vee (X_2 \wedge X_3) = (X_1 \vee X_2) \wedge (X_1 \vee X_3)$
9.	Законы поглощения	$X_1 \wedge X_1 \vee X_2 = X_1, X_1 \wedge X_1 \wedge X_2 = X_1$
10.	Законы склеивания	$X_1 \wedge X_2 \vee X_1 \wedge \overline{X}_2 = X_1$ $(X_1 \wedge X_2) \vee (\overline{X}_1 \vee \overline{X}_2) = X_1$
11.	Законы отрицания: Пирса Шеффера	$\overline{X_1 \vee X_2 \vee X_3 \dots \vee X_n} = \overline{X}_1 \wedge \overline{X}_2 \wedge \overline{X}_3 \dots \wedge \overline{X}_n$ $\overline{X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \dots \wedge X_n} = \overline{X}_1 \vee \overline{X}_2 \vee \overline{X}_3 \dots \vee \overline{X}_n$

Сигнал той же полярности появляется на выходе схемы *ИЛИ* в том случае, когда хотя бы на одном из входов: - *ИЛИ* на U_1 *ИЛИ* на U_2 *ИЛИ* на U_3 будут логические сигналы (единицы).

На рис.8.1б приведена схема *И*, собранная на диодах. При поступлении сигнала только на один вход запирается соответствующий диод, а другие диоды остаются открытыми, в силу чего сопротивление между точками А и В остается малым и сигнал на выходе отсутствует. Таким образом, на выходе схемы *И* сигнал появится только тогда, когда на всех входах: *И* на U_1 *И* на U_2 *И* на U_3 будут логические сигналы (единицы).

Логическая схема НЕ выполняется на транзисторе (рис.8.1в), или инвертирующем операционном усилителе. На выходе этой схемы сигнал инверсный тому, который присутствует на входе. Если на входе присутствует логическая единица (высокий сигнал), то на выходе - логический нуль (низкий сигнал) и наоборот.

Рассмотренные схемы на диодах имеют существенный недостаток, связанный с ослаблением сигнала при работе, что затрудняет осуществление каскадных соединений различных логических цепочек. От этого недостатка свободны схемы, дополненные транзисторами, выполняемыми по интегральным технологиям. Современная промышленность выпускает интегральные логические микросхемы с широкой гаммой логики.

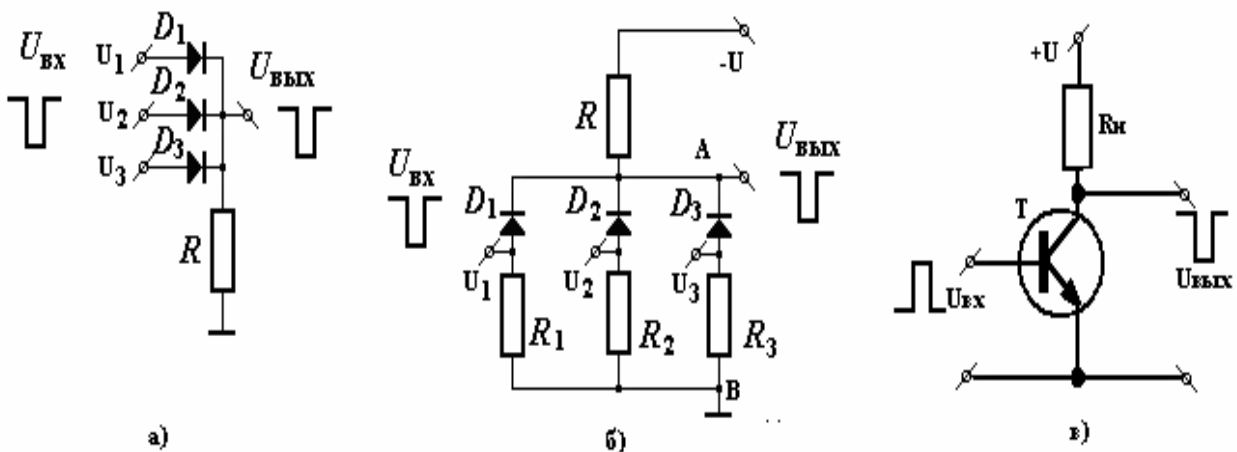


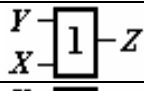
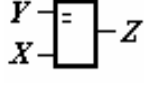
Рисунок 8.1 – Исполнение логических элементов.

Для двух переменных имеют место 16 логических функций, математические соотношения и графические обозначения которых приведены в таблице 8.2.

Графическое изображение логических элементов осуществляется в виде прямоугольников, внутри которых ставятся условные символы: $\&$ - элементы с выполнением операции конъюнкции, 1 - элементы с выполнением операции дизъюнкции, $=1$ - исключающее ИЛИ.

С левой стороны прямоугольников изображают входы, а с правой - выходы (таблица 8.2). Входы или выходы, помеченные кружочками, соответствуют инвертированию сигнала. Входы или выходы, не несущие логической информации, например, входы расширения или питания, помечают крестиком x . На основе логических элементов может быть построена электронная схема любой сложности.

Таблица 8.2 – Некоторые функции двух переменных

Логическое выражение	Условное обозначение
Конъюнкция $Z=XY$	
Исключающее ИЛИ $Z=X\oplus Y$	
Дизъюнкция $Z=XVY$	
Функция Пирса $Z = \overline{XVY} = \overline{X}\wedge\overline{Y}$	
Логическая равнознач- ность $Z = \overline{X \oplus Y}$	
Инверсия $Z = \overline{X}$	
Функция Шеффера $Z = \overline{X\wedge Y} = \overline{X}V\overline{Y}$	

Переключательной функцией в алгебре логики называют функцию, представляющую собой зависимость выходного сигнала от входных, имеющих место в данный момент времени. Для составления переключательных функций вначале составляют таблицы истинности (таблица 8.3). Столбцы в таблице истинности обозначают наименования входных и выходных переменных, а в строках записывают всевозможные сочетания входных и выходных сигналов в соответствии со словесным описанием алгоритма работы синтезируемых устройств.

Покажем это на примере мажоритарного элемента (рис.8.2), имеющего три входа X_1, X_2, X_3 и один выход Y . Единичный сигнал на выходе у такого элемента должен появиться в том случае, если на двух или на трёх входах имеют место единичные сигналы. В противном случае на выходе должен быть нуль. Ниже представлена таблица истинности для мажоритарного элемента. На основании таблицы истинности переключательная функция может быть записана в следующем виде:

$$Y = X_1 \wedge X_2 \wedge \overline{X_3} \vee X_1 \wedge \overline{X_2} \wedge X_3 \vee \overline{X_1} \wedge X_2 \wedge X_3 \vee X_1 \wedge X_2 \wedge X_3. \quad (8.1)$$

Для построения мажоритарного элемента требуется: три инвертора для получения инверсных сигналов $\overline{X_1}, \overline{X_2}, \overline{X_3}$, четыре

трёхвходовых элемента 3И и один четырёхвходовый элемент 4ИЛИ (рис.8.2).

В большинстве случаев, применяя основные законы булевой алгебры, переключательные функции удаётся минимизировать, что в свою очередь снижает аппаратные затраты на построение устройств. Так, например, применяя закон дополненности, формулу (8.1) можно привести к следующему, более простому, виду:

$$Y = X_1 \wedge X_2 \vee X_1 \wedge X_3 \vee X_2 \wedge X_3. \quad (8.2)$$

Для построения того же мажоритарного элемента по формуле (8.2) требуется всего три двухвходовых элемента 2И и один трёхвходовый элемент 3ИЛИ.

Минимизация логических функций осуществляется с целью снижения аппаратных затрат при построении комбинационных устройств. Основными критериями при минимизации являются: сокращение числа членов в переключательной функции, числа входов у используемых логических элементов, числа межсхемных соединений, а также числа логических операций, необходимых для выполнения функции. При минимизации результирующее действие переключательных функций сохраняется постоянным. Для целей минимизации переключательных функций, имеющих до трёх переменных, используют аналитические методы с применением основных законов алгебры логики.

Таблица 8.3 – Таблица истинности для мажоритарного элемента

X_1	X_2	X_3	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

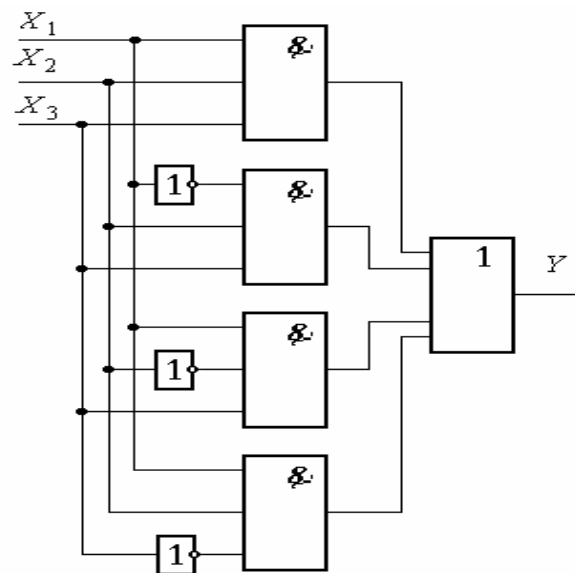


Рисунок 8.2 – Мажоритарный элемент

8.3. Цифровые автоматы

В процессе обработки цифровой информации в электронных блоках возникают задачи обработки последовательностей дискретных сигналов во времени, которые нельзя решить с помощью одних комбинационных схем. Такие задачи возникают в том случае, когда выходные сигналы устройств зависят не только от входных, поступающих в данный момент, но и от всех предыдущих сигналов, поступивших ранее. Такие задачи выполняют цифровые автоматы с памятью.

Роль элементарных цифровых автоматов выполняют триггеры. Триггеры представляют собой логические цепи с памятью и являются основной элементной базой для построения любых, сколь угодно сложных, цифровых устройств.

Существует несколько типов триггеров. В первую очередь их разделяют на тактируемые и нетактируемые.

В нетактируемых триггерах их состояния изменяются сразу же, как только установятся сигналы на входах, а в тактируемых изменение выходных сигналов осуществляется в соответствии с входными только после того, как будут поданы разрешающие сигналы на их тактовые входы. Тактирование триггеров возможно посредством статической и динамической синхронизации.

Статическая синхронизация осуществляется импульсом (логическим уровнем 1 или 0), а динамическая - фронтом (логическим перепадом 1/0 или 0/1).

Наиболее простым и распространённым из всех типов триггеров является триггер с установочными входами или так называемый S-R- триггер. Простейшие не тактируемые S-R - триггеры представляют из себя две цепи И - НЕ или ИЛИ - НЕ, замкнутые в кольцо. Их условные обозначения и потенциальная диаграмма работы показаны на рис. 8.3.

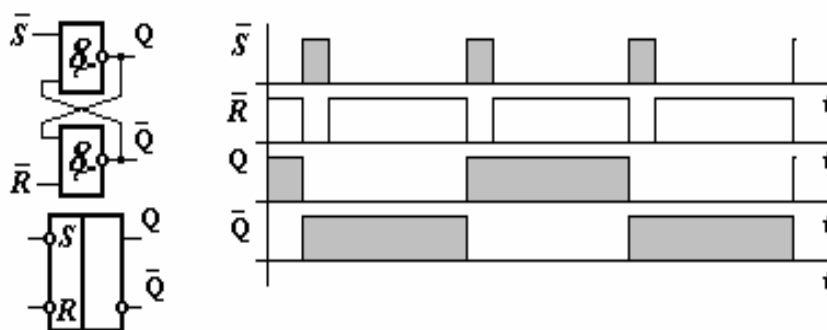


Рисунок 8.3 – Асинхронный S-R триггер

Если отсутствуют внешние воздействия, $S=1$, а $R=0$, то на выходе \overline{Q} устанавливается потенциал, равный единице, а на другой Q - нулю. Если изменить сигнал и подать на вход $S=1$, $R=1$, то сигналы на выходах останутся те же $\overline{Q}=1$, $Q=0$. Они будут находиться там до тех пор, пока на входе сигнал не изменится на $S=0$, $R=1$. Тогда на выходе сигналы изменятся на $\overline{Q}=0$, $Q=1$. Эти сигналы на выходах триггера будут находиться до тех пор, пока не изменятся сигналы на входах. Для осуществления переходов триггера из одного состояния в другое на его входах обязательно должны быть противоположные сигналы, т.е. всегда между сигналами на входах должно выполняться соотношение $S\Lambda R=0$. Частота выходного сигнала триггера вдвое меньше, чем частота входного сигнала, т.е. триггер осуществляет деление количества входных импульсов на 2.

Простейшие триггеры в тех или иных сочетаниях входят во все типы более сложных триггеров. В частности, тактируемые импульсом триггеры состоят из простейшего триггера и входной логической цепи.

Существуют другие виды триггеров с более сложной комбинацией входных и выходных сигналов, например: S - C - R - триггер изменяет свое состояние на выходе в зависимости от потенциала тактирующего импульса C ; D – триггер не имеет неопределённых состояний на выходе (электронная защелка) или J - C - K триггер, отличающийся от S - C - R - триггера наличием перекрёстных цепей обратной связи с выходов основного триггера на входы комбинационной части.

Счетчики применяются для подсчета импульсов за определенное время или между поступлениями синхросигналов. Основой счетчика является триггер.

Счетчики бывают асинхронными, когда работа составляющих его триггеров не синхронизирована, и синхронными, когда на входы триггеров подаются синхроимпульсы.

Счетчики по режиму счета могут быть реверсивными и нереверсивными. В реверсивных счетчиках возможен прямой и обратный счет, а в нереверсивном – только прямой или только обратный.

Принципиальная схема четырехразрядного двоичного счетчика, построенного на триггерах, представлена на рис. 8.4.

Счетные импульсы C поступают на вход R первого триггера. Поступление первого импульса вызывает срабатывание 1-го триггера и на его прямом выходе появляется логическая единица Q_1 . Поступление 2-го импульса возвращает первый триггер в исходное положение ($Q_1=0$) и перекидывает второй триггер в единичное состояние $Q_2=1$ и т.д.

Таким образом, на выходах Q_1, Q_2, Q_3 и Q_4 триггеров формируется двоичный код числа импульсов, поступивших на вход счетчика. После каждого триггера частота поступающих импульсов делится на 2. Разрядность счетчика соответствует количеству триггеров. Она может наращиваться до требуемого значения.

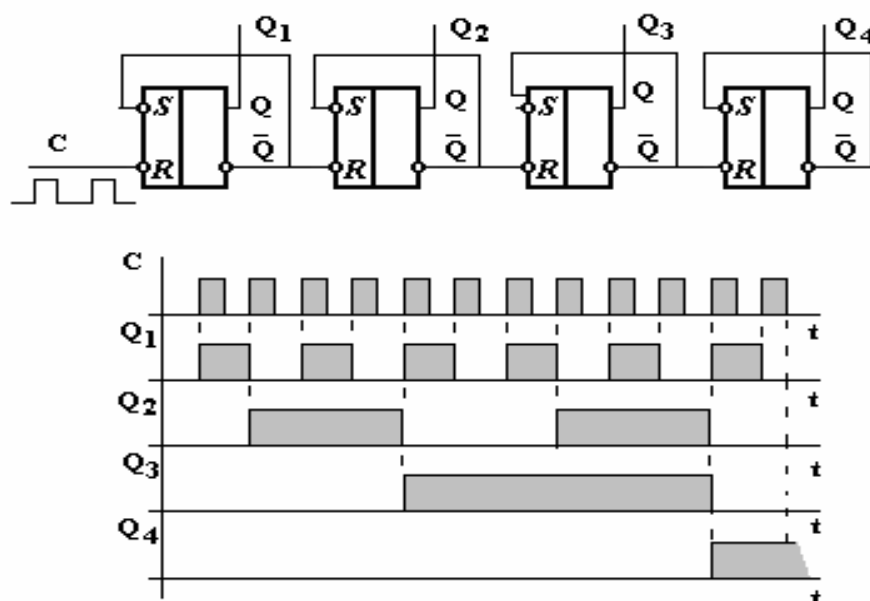


Рисунок 8.4 – Схема двоичного счётчика

Существует большое количество других цифровых устройств, построенных на базе комбинационных устройств, триггеров и счетчиков. К ним можно отнести регистры памяти, предназначенные для хранения цифровой информации, регистры сдвига – для перемещения разрядов чисел на определенное количество тактов вперед или их задержки. Большую группу подобных устройств составляют микропроцессоры, рассматриваемые ниже.

Контрольные вопросы к главе 8.

1. Дайте определение комбинационным логическим устройствам.
2. Дайте определение цифровым автоматам.
3. Что такое двоичный код?
4. Какие элементарные действия имеются в алгебре логики?
5. Напишите правила дизъюнкции.
6. Напишите правила конъюнкции.
7. Что такое инверсия?
8. Определите закон универсального множества.
9. Определите закон повторения.
10. Определите закон нулевого множества.
11. Определите переместительный закон.
12. Определите закон многократной инверсии.
13. Определите сочетательный закон.
14. Определите закон дополнительности.
15. Определите распределительный закон.
16. Определите закон поглощения.
17. Определите закон склеивания.
18. Определите закон Пирса.
19. Определите закон Шеффера.
20. На каких элементах выполняется схема И?
21. На каких элементах выполняется схема ИЛИ?
22. На каких элементах выполняется схема НЕ?
23. Дайте определение переключательной функции.
24. Для чего необходима минимизация переключательной функции?
25. Что такое таблица истинности?
26. Дайте определение триггера.
27. Дайте определение счетчика.
28. Какие виды триггеров вы знаете?
29. Какие виды счетчиков вы знаете?
30. Какими сигналами переключаются триггеры?

Глава 9. Датчики параметров технологического процесса

9.1. Характеристики датчиков

В технологических процессах управление осуществляется по таким параметрам как время, энергия, температура, сила (давление), масса, скорость (ускорение), электропроводность, освещенность, цвет и т.д. Многие остальные параметры технологических процессов могут быть рассчитаны, смоделированы из вышеперечисленных.

Датчик - конструктивно законченное устройство, предназначенное для преобразования физической величины в электрическую или иную величину, удобную для дальнейшей передачи и преобразования.

Большинство известных в автоматике датчиков преобразуют контролируемую величину X в электрическую величину Y (например, движение в индуктивность или напряжение, температуру в электрическое напряжение и т. п.) или в неэлектрическую (движение в давление воздуха или жидкости и др.).

Измерения производят путем внедрения датчика 6 в среду 1 или приема излучений (электромагнитных, акустических и др.) из нее (рис. 9.1).

Основу датчика составляет *чувствительный элемент* 2, непосредственно преобразующий измеряемую величину среды 1 в электрический сигнал. В состав датчика могут входить также устройства 3, изменяющие форму или корректирующие сигнал чувствительного элемента, например, преобразователь аналогового сигнала в цифровой или корректор нелинейности. Сигнал из датчика подают по проводам или по беспроводной системе 4 на приемник 5 его обработки и дальнейшего использования.

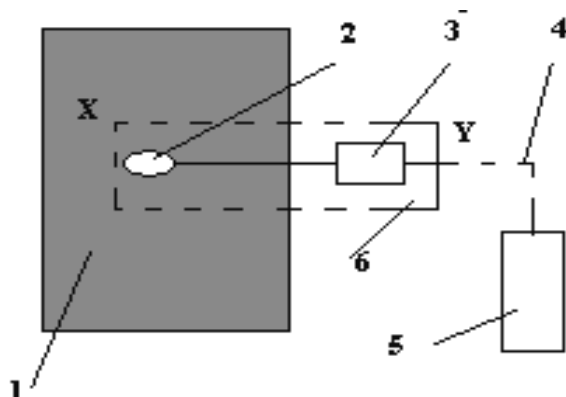


Рисунок 9.1 – Система: датчик и измеряемая среда.

Датчики классифицируют по различным признакам, но, прежде всего по виду измеряемого параметра среды и принципу действия. При заказе датчика у изготовителя оперируют, прежде всего, видом измеряемого параметра: температура, давление, скорость, плотность и т.д.

По роду энергии выходной величины различают электрические и неэлектрические датчики, в частности механические, пневматические или гидравлические.

В практике находят разные виды датчиков, но все большее и большее применение находят электрические и построенные на их основе электронные датчики, в силу своей универсальности применения независимо от оборудования, на которое они устанавливаются, и технологичности изготовления.

Принцип действия датчика оказывает существенное влияние на его выбор, если имеются требования по габаритным размерам, погрешности или безопасности работы автоматической системы.

В современных системах автоматики датчики подразделяют также по виду выходной величины - аналоговая или цифровая. Традиционно использовалось аналоговое представление информации. Однако, в связи с повышением требований к точности передачи информации датчиков на большое расстояние (от оборудования до места обработки информации), применением компьютерного ее анализа и последующего использования, цифровые датчики находят все большее и большее применение.

Понятие датчика связано с такими характеристиками как *диапазон измерений, статическая характеристика, точность измерений, чувствительность, разрешающая способность, время успокоения и быстроедействие, выходная мощность и выходное сопротивление.*

Диапазон измерения – разница между минимальной измеряемой величиной и максимальной.

Статическая характеристика – зависимость выходной величины Y от входной величины X – $Y=f(X)$ (рис.9.2).

Чувствительность – отношение изменения показаний датчика dY к изменению измеряемой величины dX :

$$\eta = dY/dX.$$

Одной из характеристик датчиков является *нелинейность* его статической характеристики. Для датчиков с линейной статической ха-

рактической характеристикой (рис.9.2, зависимость 1) чувствительность постоянна. Для датчиков с нелинейной характеристикой (рис.9.2, зависимость 2) чувствительность непостоянна, что вызывает определенные трудности использования датчика в зависимости от диапазона измеряемой величины. Поэтому применяют различные способы линеаризации выходного сигнала датчиков. Линейная зависимость $Y=f(X)$ упрощает использование и обработку сигналов, снижает погрешности.

Точность измерений. Точность измерений определяется погрешностью. Различают *абсолютную погрешность* - разность между показанием датчика X_d и истинным значением измеряемой величины X_o :

$$\Delta X = X_d - X_o$$

и *относительную погрешность* – отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины

$$\delta = \Delta X / X_o.$$

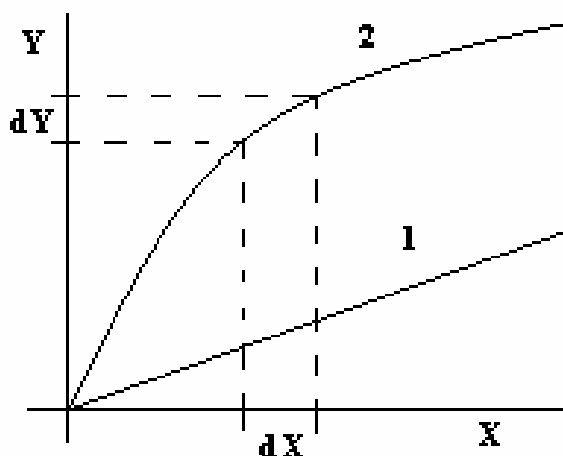


Рисунок 9.2 – Нелинейность датчиков.

Приведенная погрешность - отношение абсолютной погрешности к нормированному значению, например, к максимальному значению измеряемой величины X_m

$$\gamma = \Delta X / X_m.$$

Основная погрешность – погрешность в нормальных условиях эксплуатации (температура, влажность, атмосферное давление и т.п.).

Дополнительная погрешность – погрешность, вызванная отклонением условий измерений (эксплуатации) от нормальных, на которые рассчитан датчик по техническому паспорту.

Разрешающая способность – минимальная разность измеряемой величины, различаемая с помощью датчика.

Время установления показаний (время успокоения) – время, в течение которого при одной и той же входной измеряемой величине показания датчика примут постоянное значение.

Быстродействие – максимальное количество измерений с нормированной погрешностью в единицу времени измерения.

Выходная мощность сигнала и выходное сопротивление датчика должны соответствовать приемнику информации.

9.2. Чувствительные элементы датчиков

Чувствительные элементы датчиков по принципу действия подразделяются на *параметрические*, в которых измеряемая величина воздействует на параметры чувствительного элемента (сопротивление R , емкость C , индуктивность L и т.д.), и *генераторные*, преобразующие неэлектрические величины в электрическую величину (напряжение, ток). Для работы параметрического датчика необходим внешний источник энергии.

К параметрическим чувствительным элементам относятся – контактные, реостатные, потенциометрические, тензометрические, терморезисторы, емкостные, индуктивные, фоторезисторные и др, к генераторным – термоэлектрические, индукционные, пьезоэлектрические, фотоэлементы и др.

Для построения чувствительных элементов датчиков используют ряд физических явлений, которые могут в зависимости от условий давать информацию о том или ином параметре технологического процесса. Принципы построения чувствительных элементов датчиков рассмотрим по физической природе преобразования информации.

9.2.1. Механические чувствительные элементы датчиков

Наиболее простыми средствами получения информации о различных параметрах технологических процессов (положения деталей, тары, продукта на транспорте, уровня воды в емкости и др.) служат механические датчики — щупы, стержни, ползки, катки и т. п.

Механический чувствительный элемент (щуп) связан, как правило, с преобразовательно - усилительным звеном и находится в состоянии силового замыкания с источником информации. Определенная силовая настройка щупа позволяет выделить полезный сигнал, например, появление тары на транспортере.

На рис.9.3. показан пример механического датчика положения движущейся тары на транспортере. Датчик состоит из щупа 4 с противовесом 5, насаженного на ось вращения 10. В корпусе датчика имеется пара контактов 7 и 8 для включения внешней электрической цепи. Щуп имеет возможность при приближении банки 2 отклоняться на угол α .

До подхода банки 2 к позиции срабатывания датчика (рис.9.3а), определяемой осью 5, нижний конец щупа 4 под действием противовеса 5 опущен вертикально, параллельно этой оси. Контакты 7 разомкнуты, и во внешнюю цепь никакого сигнала не поступает.

В момент прихода банки 2 к положению, определяемому осью 9 (рис.9.3б), щуп 4 начинает отклоняться и своим противоположным концом замыкает контакты 7 и 8, которые дают сигнал в цепь управления “одна банка ” прошла. Сигнал управления может представлять собой единичный электрический импульс, который считывается системой управления и используется для подсчета количества банок, остановки транспортера, подачи ящиков и т.д. После прохода банки 2 щуп освобождается и под действием противовеса 5 опускается в положение 9, ожидая прихода следующей банки 3 и т.д.

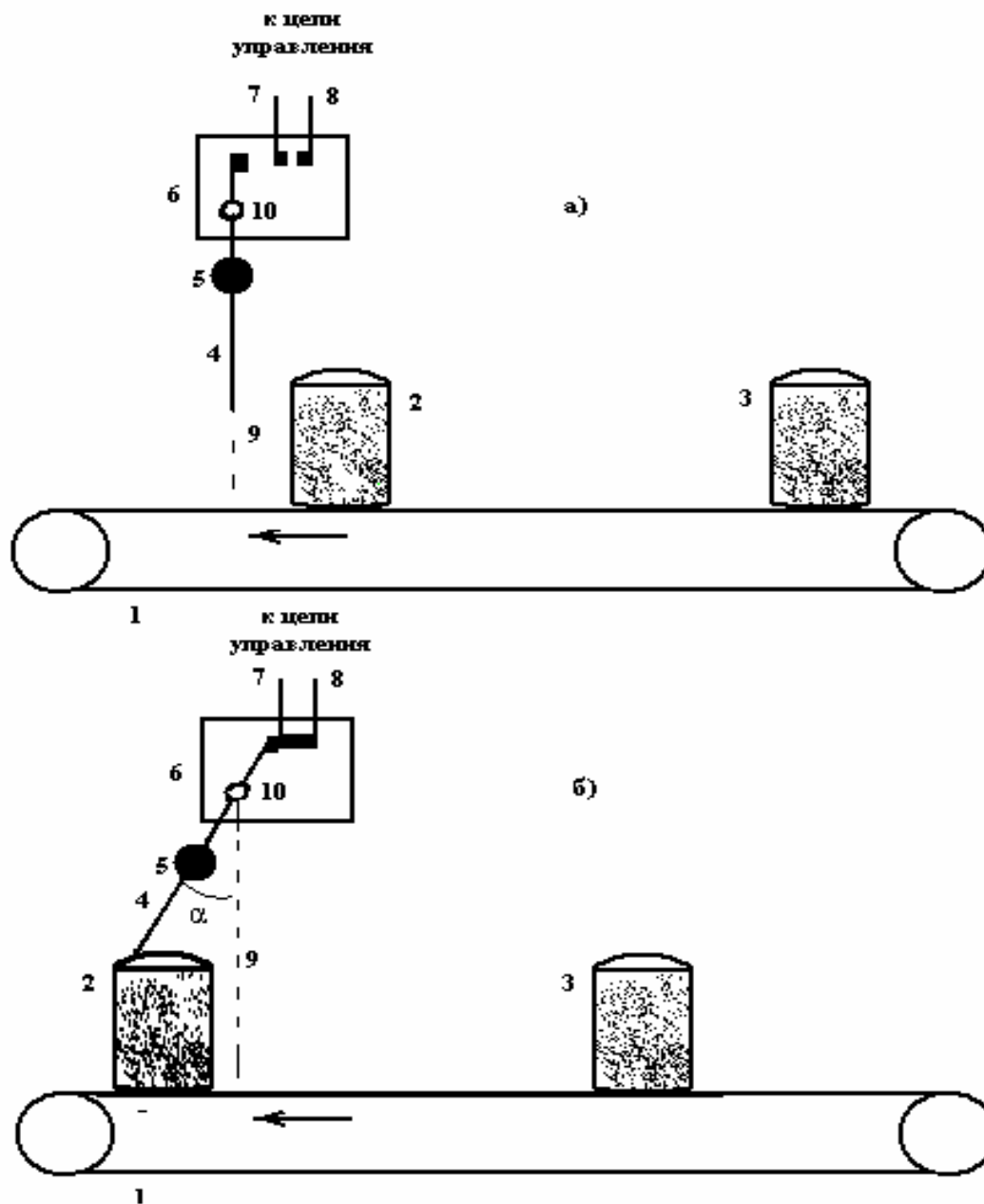


Рисунок 9.3 – Датчик положения с механическим чувствительным элементом:
 1- транспортер; 2, 3- движущиеся банки; 4- чувствительный элемент-щуп; 5- противовес; 6- корпус датчика; 7,8- электрические контакты; 9- ось нейтрального положения щупа; 10- ось вращения щупа; а) положение щупа до подхода банки; б) положение щупа после подхода банки.

Другим примером механического датчика является известный “поплавок” (рис.9.4) для определения уровня жидкости. В бак 1 поступает жидкость 2. Поплавок 4, соединенный рычагом 3 с контактной группой 6 и 7, заключенной в корпус 5.

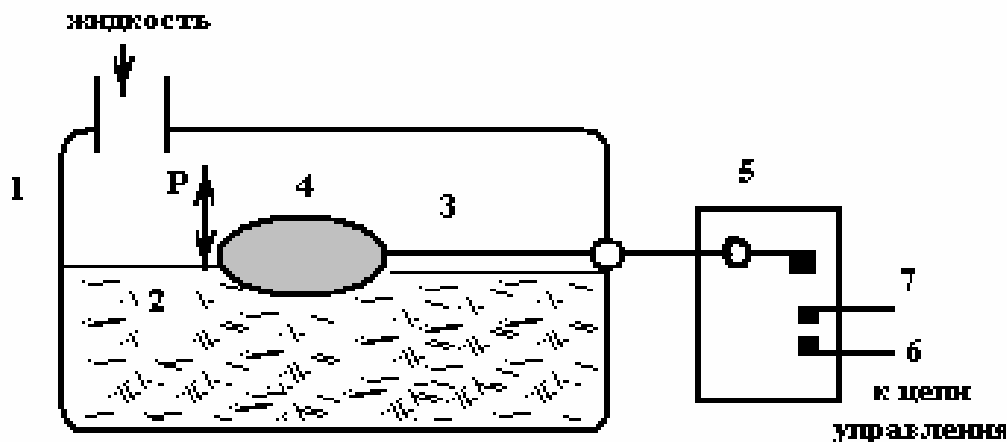


Рисунок 9.4 – Механический датчик “поплавок” для отслеживания уровня жидкости в баке: 1- бак для жидкости; 2 – жидкость; 3- рычаг; 4- поплавок; 5- корпус контактной группы; 6- 7 – контактная группа.

При поступлении жидкости в бак 1 поплавок 4 поднимается вместе с ее уровнем. При достижении заданного уровня жидкости поплавок под действием выталкивающей его силы P перемещает рычаг 3 вверх, который своим противоположным концом замыкает контактную группу 6-7, дающую сигнал управления, например, на прекращение подачи жидкости или ее откачки.

9.2.2. Потенциометрические чувствительные элементы

В датчиках, чувствительным элементом в которых является потенциометр – переменный резистор, подвижной контакт механически связан с устройством, параметр которого необходимо измерить.

Потенциометрические устройства широко используются для преобразования линейного или углового перемещений (входная величина) в электрический сигнал (выходная величина).

Конструктивно потенциометрическое измерительное устройство (рис. 9.5.) состоит из переменного резистора 1 с движком 2, к которому прикреплена жесткая механическая связь 3 с перемещаемым объектом 4. Потенциометр может быть выполнен линейным или круговым. В первом случае измеряются линейные перемещения, во втором - угловые. Обмотка резистора выполняется из металлической проволоки (константа, манганина, изабелина, никелина), навитой на каркас, или металлических пленок. На вход потенциометра подается напряжение U_1 .

Объект, перемещение X которого необходимо измерить, через механическую связь перемещает движок потенциометра на то же расстояние X или кратное ему или на определенный угол, в зависимости от конструкции связи.

Напряжение на выходе U_2 определяется из выражения:

$$U_2 = U_1 R_x / R_n = U_1 X / L = kX,$$

где $k = U_1 / L$ – постоянная датчика.

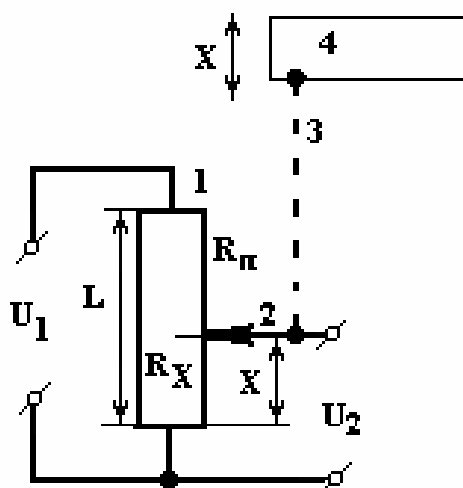


Рисунок 9.5 – Потенциометрический чувствительный элемент: 1- потенциометр; 2- движок потенциометра; 3- жесткая связь; 4- перемещаемый объект; L- длина перемещения движка; X- перемещение объекта; R_n - полное сопротивление потенциометра; R_x - измеряемое сопротивление ползуна; U_1 - входное напряжение; U_2 - выходное напряжение датчика.

Потенциометрические датчики просты по конструкции, дешевы. Однако, в силу применения движущихся механических частей, имеют значительную погрешности и низкую надежность.

9.2.3. Тензочувствительные элементы

Принцип действия тензорезисторов основан на явлении тензоэффекта – изменении величины активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов под воздействием приложенных к ним механических напряжений (усилий).

В простейшем случае тензорезистор представляет собой тонкую проволоку, внедренную в бумагу, наклеиваемую на металлическую балку, которая подвергается механической деформации (растяжение, изгиб, скручивание, сжатие).

Полупроводниковый тензорезистор (рис.9.6) представляет собой кристалл кремния (n-проводимость) 1 с нанесенной на его поверхность дорожкой другого полупроводника с p-проводимостью – тензорезиста 2. Сопротивление дорожки 2 тензорезистора равно

$$R = \rho l / s,$$

где ρ - удельное сопротивление материала тензорезиста; l - длина дорожки тензорезиста; s - площадь поперечного сечения тензорезиста.

При деформации дорожки под действием силы F , например, при ее сжатии, изменяется эффективная длина l (увеличивается) и площадь поперечного сечения s (уменьшается). В результате изменяется сопротивление подложки R (увеличивается), а значит и всего p-n перехода тензорезистора. Это изменение сопротивления фиксируется электронной схемой – таким образом, измеряется сила F .

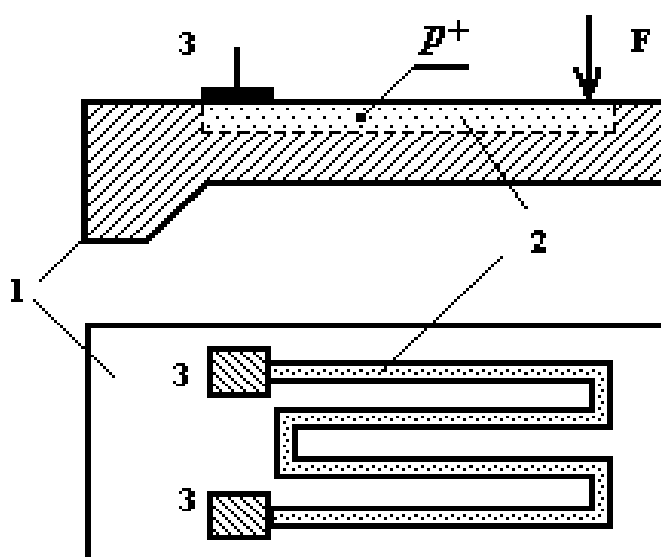


Рисунок 9.6 – Тензорезистор: 1-полупроводниковый кристалл; 2- дорожка тензорезиста с p-проводимостью; 3- электроды.

Тензорезистор крепится к детали, которая воспринимает какие-либо усилия F . Чувствительность тензорезисторных преобразователей определяется тензорезисторным коэффициентом – отношением изменения сопротивления активной части тензорезистора к изменению приложенной силы. У большинства проволочных тензорезисторов $K \sim 2$, а у полупроводниковых – $K \sim 100$.

Применяются тензорезисторы для измерения сил, деформаций и малых перемещений.

9.2.4. Индуктивные чувствительные элементы

Принцип действия индуктивных чувствительных элементов датчиков основан на изменении тока в обмотке индуктивной катушки или трансформатора в зависимости от магнитного сопротивления сердечника.

На рис.9.7. приведен индуктивный чувствительный элемент, состоящий из обмотки катушки 1, намотанной на неподвижный сердечник 2, продолжением которого является подвижный сердечник 3.

Между неподвижным и подвижным сердечниками имеется зазор δ , который зависит от положения подвижного сердечника 3, связанного с объектом, для которого необходимо измерить перемещение X . На обмотку катушки подается переменное синусоидальное напряжение U_1 с частотой f . В сердечнике с магнитным сопротивлением R_M циркулирует магнитный поток Φ .

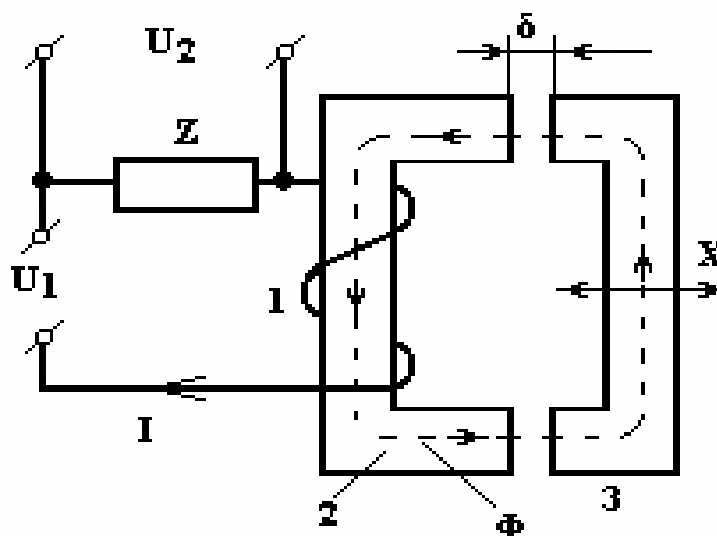


Рисунок 9.7 – Индуктивный чувствительный элемент: 1- обмотка катушки; 2- неподвижный сердечник; 3- подвижный сердечник; U_1 - входное переменное напряжение; U_2 -выходной сигнал; Z - сопротивление нагрузки.

В цепи обмотки протекает ток, величина которого зависит от зазора δ :

$$I = \delta \Phi (2\pi f / \mu_0 S) = k \delta \Phi,$$

где: $k = 2\pi f / \mu_0 S$ - постоянная датчика; μ_0 - магнитная постоянная; S - площадь сечения сердечника.

Выходной сигнал равен

$$U_2 = ZI = k \delta \Phi.$$

Т.к. магнитный поток также зависит от зазора δ , то зависимость тока от зазора является нелинейной, особенно в начале и в конце зависимости $I=f(\delta)$.

Для повышения чувствительности применяют дифференциальное включение двух обмоток в мост. Широко используется трансформаторная схема включения, когда одна из обмоток питается внешним напряжением, а во второй наводится напряжение в зависимости от магнитного сопротивления, т.е. зазора между сердечниками. Индуктивные датчики широко применяются для измерения малых перемещений и вибраций 0,1—0,5 мкм.

9.2.5. Индукционные чувствительные элементы

Индукционные преобразователи подразделяются на два типа: с катушкой, имеющей ферромагнитную деталь, перемещающуюся относительно неподвижной катушки (рис.9.8а) и перемещающуюся (вращающуюся) относительно постоянного магнита (рис. 9.8б).

Индукционный датчик с катушкой 1, намотанной на сердечник 2, и перемещающейся ферромагнитной деталью 3 изображен на рис.9.8а. Ферромагнитная деталь 3 механически связана с перемещающейся деталью 4 (вращающимся со скоростью ω валом). В этом случае катушка 1 периодически пронизывается переменным магнитным потоком Φ , в результате чего в ней возникнет электродвижущая сила:

$$e(t) = -\Psi d\Phi/dt,$$

где Ψ - коэффициент потокосцепления индукционного датчика; t - время.

При вращении вала 4 на выходе катушки возникают импульсы напряжения. Период возникновения импульсов точно соответствует частоте вращения вала $f = \omega / 2\pi$:

$$T = 1/f = 2\pi / \omega.$$

Частота появления импульсов f равна частоте вращения вала. Для подсчета этой частоты применяют счетчики импульсов.

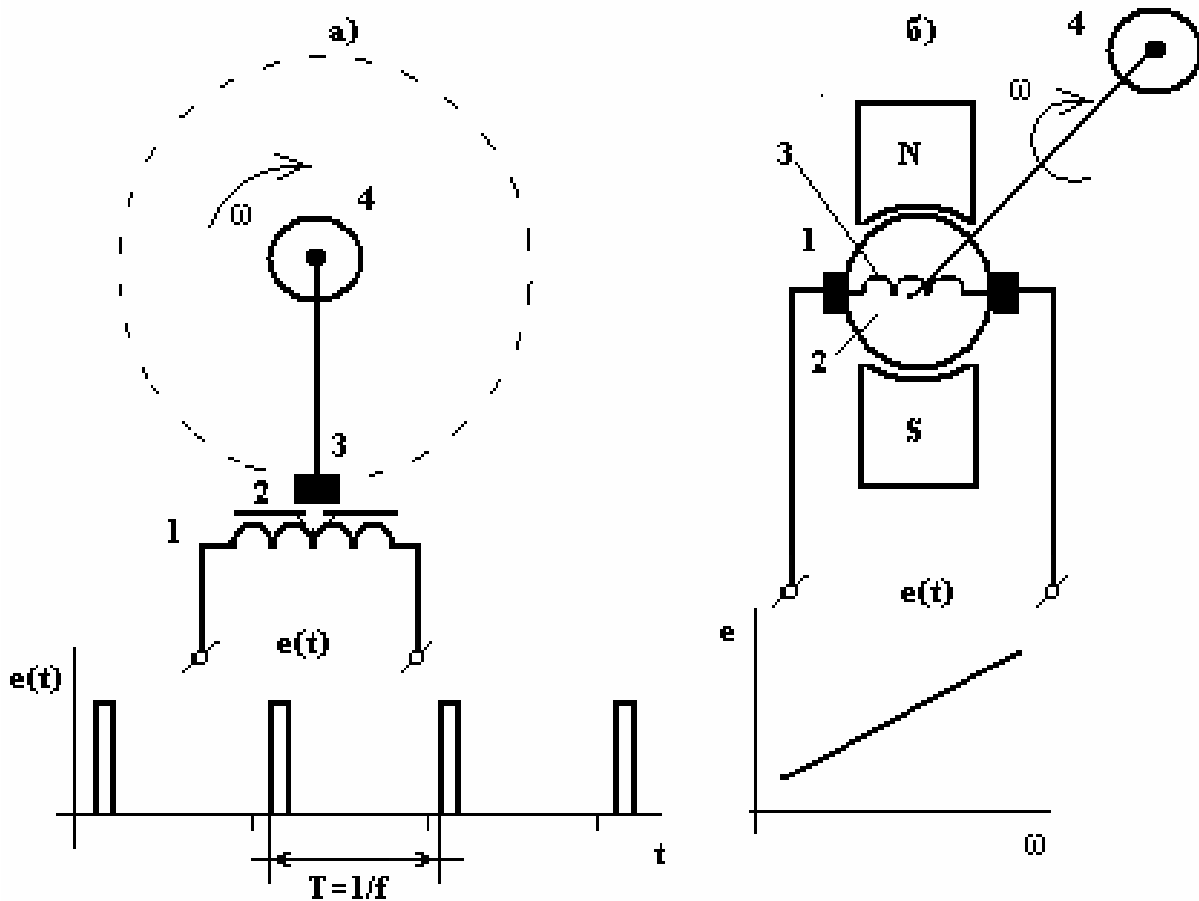


Рисунок 9.8 – Индукционные чувствительные элементы: а - с перемещающейся ферромагнитной деталью; б - тахогенератор.

К индукционным устройствам относятся тахогенераторы (рис.12.8б), которые представляют собой миниатюрные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов или дополнительных обмоток возбуждения.

Магнитное поле создается постоянными магнитами N-S. Якорь 2 тахогенератора содержит катушку 3, вращающуюся от вала 3 со скоростью ω . Выходное напряжение снимается со щеток 1.

Для большинства индукционных преобразователей статическая характеристика является линейной (погрешности составляют 0,5 ... 1,5%) - выходное напряжение пропорционально скорости вращения вала.

9.2.6. Ёмкостные чувствительные элементы

Ёмкостные датчики (рис.9.9.) представляют собой конденсаторы с изменяющимся зазором d между обкладками, площадью пластин S или диэлектрической проницаемостью ϵ . Изменение входной величины вызывает изменение ёмкости конденсатора:

$$C = \epsilon_0 \epsilon S / (d - \Delta d),$$

где S - площадь обкладок измерительных ёмкостей; x - перемещение обкладок; d - начальный зазор; Δd - изменение зазора; ϵ - диэлектрическая проницаемость среды между обкладок; ϵ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Ёмкостные преобразователи с переменным зазором между пластинами (рис. 9.9а) служат для измерения линейных перемещений x с точностью до 0,1...0,01 мкм; с переменной площадью (рис.9.9б)- для измерения линейных и угловых перемещений; с изменением диэлектрической проницаемости среды (рис.9.9в)- для измерения уровней, влажности, температуры, химического состава и др.

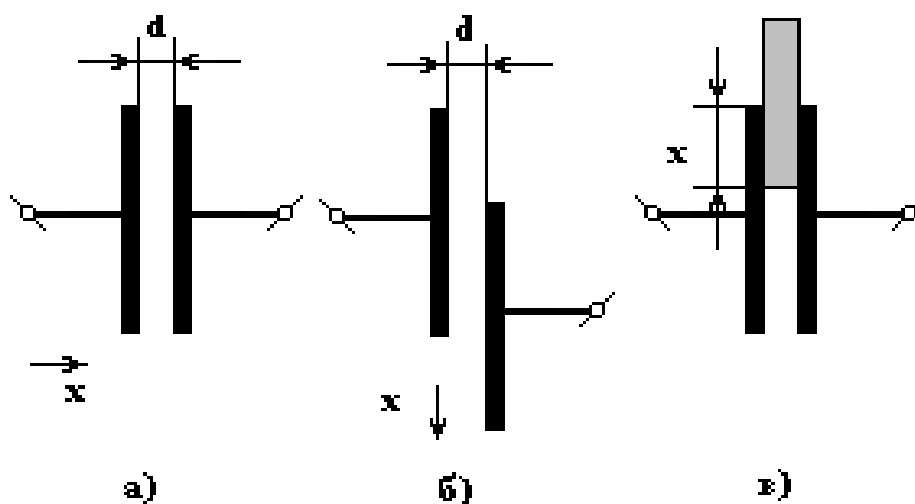


Рисунок 9.9 – Ёмкостные чувствительные элементы.

9.2.7. Пьезоэлектрические чувствительные элементы

В них используется пьезоэлектрический эффект, сущность которого состоит в том, что под действием приложенного усилия на гранях некоторых кристаллов (кварца, титана, бария, турмалина, сегнетовой соли и др.) появляются электрические заряды (прямой пьезо-

эффект), а при внесении пьезоэлемента в электрическое поле он деформируется (обратный пьезоэффект).

При действии силы F на сжатие или растяжение на гранях пластины возникают разнополярные электрические заряды q (рис. 9.10).

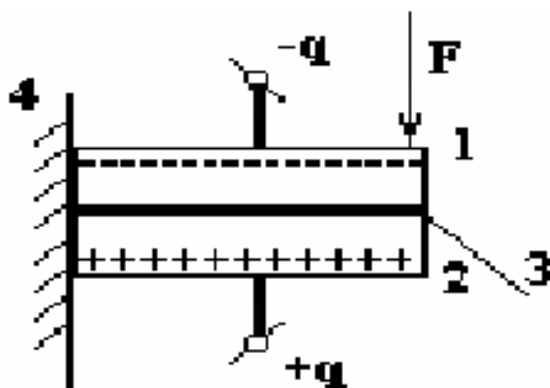


Рисунок 9.10 – Возникновение пьезоэффекта в кристалле кварца: 1,2- пластины кварца; 3- электропроводящая фольга; 4- консоль крепления пластин.

В общем виде плотность зарядов δ зависит от механического напряжения кристалла σ :

$$d = dS ,$$

где d - величина, постоянная для данного типа материала и конструкции чувствительного элемента.

Если к кристаллу приложить внешнее электрическое поле E (подвести электрическое напряжение), то он начнет деформироваться – изменять свои геометрические размеры, а значит, и электрическую емкость. Переменное внешнее электрическое поле приводит к возникновению в кристалле механических колебаний, частота которых зависит от его величины и конструкции. Такие пьезодатчики называются кварцевыми резонаторами – в них основная частота механических колебаний зависит от собственной частоты кристалла:

$$f \equiv \Delta d \sqrt{E_i / \rho}$$

где E_i - модуль упругости пластины, ρ - плотность, Δd - расстояние между краями пластины.

Если включить кварцевый резонатор Π_3 по схеме автогенератора (рис.9.11), то на выходе ОУ возникнет сигнал с частотой f , зависящей от приложенного внешнего воздействия – усилия, температуры, вибрации и т.п.

Конденсатор Π_3 с кварцевой пластиной включен на инвертирующий вход операционного усилителя ОУ. Ток насыщения конденсато-

ра создает падение напряжения на инвертирующем входе ОУ, которое инвертируется и изменяет знак питания цепи Π_3 -R, в результате чего возникают колебания, частота которых определяется ее постоянной времени. Частота колебаний генератора совпадает с собственной частотой кварца и возникают резонансные автоколебания.

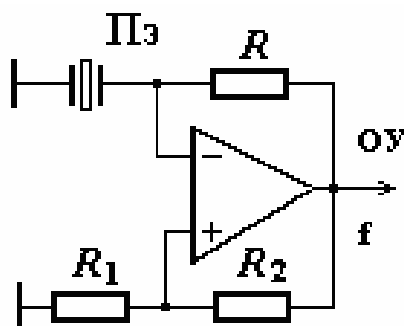


Рисунок 9.11 – Кварцевый автогенератор

Чувствительные элементы пьезорезонансных датчиков выполняются в виде резонатора той или иной формы – прямо-угольной, квадратной, круглой и т.п. Пьезоэлектрические датчики используются при измерении усилий, давлений, вибраций и других физических величин.

9.2.7. Фотоэлектрические чувствительные элементы

Фотоэлектрические чувствительные элементы преобразуют оптическое излучение в электрический сигнал. По принципу действия существуют несколько видов преобразователей: с внешним фотоэффектом (вакуумные или газонаполненные; с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы) и на основе р-п-перехода (фотодиоды, фототранзисторы и т.п.).

Основными характеристиками фотоэлементов являются: зависимость параметра (сопротивления, тока, напряжения) от облученности входного торца чувствительного элемента; спектральная – зависимость чувствительности от длины волны падающего излучения, частотная – зависимость чувствительности от частоты изменения излучения.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом представляют собой вакуумную или газонаполненную лампу с анодом и катодом в виде внутренней стенки с нанесенным на нее фоточувствительным слоем. Под действием светового потока в катоде возникают свободные электроны, которые под действием электрического поля перемещаются к

аноду, создавая внутри фотоэлемента электрический ток. В настоящее время подобные элементы применяются редко.

Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (рис.9.12) представляет собой фоторезистор, принцип действия которого состоит в том, что свободные электроны, образующиеся под действием излучения в слое чувствительного проводника (фоторезиста) 2, остаются (перераспределяются) в веществе, резко изменяя его сопротивление R . Чувствительный материал наносится на изоляционную подложку 1 и сверху покрыт защитной тонкой прозрачной лаковой пленкой 3. Наиболее часто применяются сернисто-кадмиевые, сернисто-свинцовые, сернисто-висмутовые и селенисто-кадмиевые фоторезисторы.

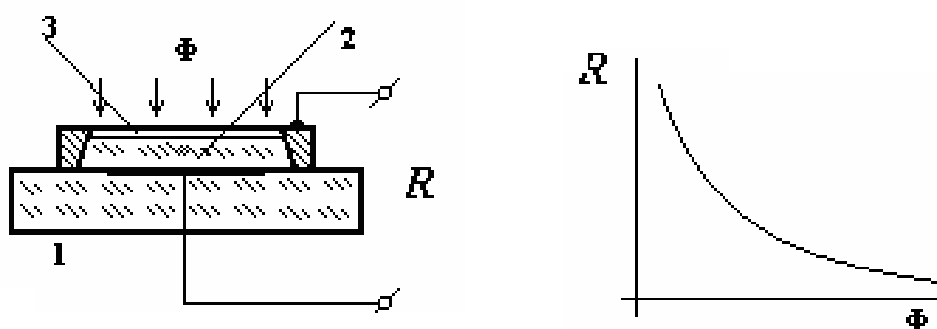


Рисунок 9.12 – Устройство фоторезистора: 1- подложка; 2- фоторезист; 3- защитная пленка; R - сопротивление фоторезистора; Φ - оптическое излучение.

Фотоэлементы с вентильным фотоэффектом работают на использовании явлений, происходящих в переходе р-п под воздействием излучения. Они состоят (рис.9.13): 1- из металлического основания, выполняющего роль нижнего электрода, 2, 3 – полупроводниковых слоев р и n, оптической линзы 4.

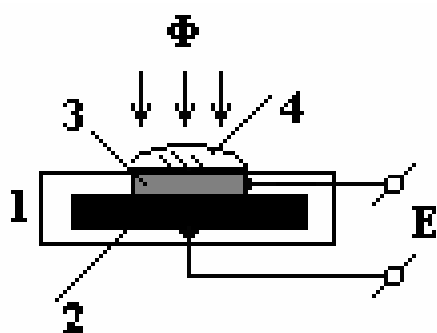


Рисунок 9.13 – Конструкция фотодиода.

Р-п переход при облучении сам генерирует электрическое напряжение. Как правило, напряжение E , возникающее на переходе, имеет положительную полярность со стороны области п. Это напряжение способно обеспечить протекание тока во внешние цепи. Чем выше интенсивность светового потока, тем больше ток I от него. Схема включения фотодиода в режиме генератора приведена на рис.9.14а.

Фотоэлектрические диоды могут использоваться в качестве управляемых излучением диодов, если внешнее напряжение E приложено к ним в обратном направлении таким образом, что n -область подключена к отрицательному потенциалу, как это показано на рис.9.14б. В этом случае обратное сопротивление диода, а значит, и ток в цепи зависят от падающего излучения. Для изготовления фотодиодов используется германий и кремний. Кремниевые фотодиоды имеют меньшее значение темнового тока.

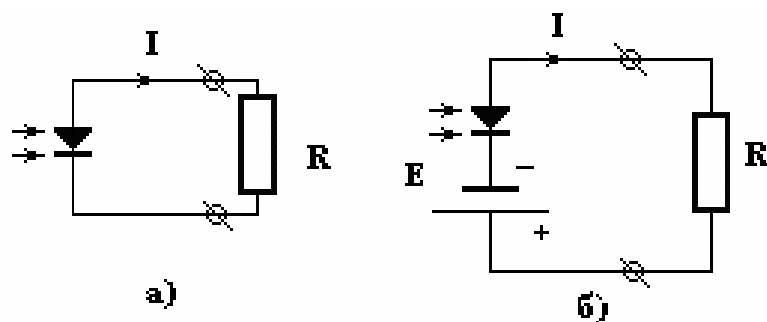


Рисунок 9.14 – Схемы включения диода в генераторном режиме (а) и в обратном направлении (б).

При построении датчиков часто используются излучающие полупроводниковые диоды - *светодиоды*. Если приложить внешнее напряжение в прямом направлении диода, то это приведет к протеканию в нем электрического тока, который вызывает свечение p - n перехода. Длина волны излучаемых колебаний определяется используемым полупроводниковым материалом перехода. Интенсивность излучения возрастает при увеличении тока.

Чтобы обеспечить требуемое пространственное распределение света, светодиод применяется совместно с оптическими линзами. Для изготовления светодиодов применяют арсенид галлия, дающий излучение в инфракрасной области оптического излучения, фосфид арсенида галлия, излучающий красный или оранжевый свет, и фосфид галлия (желтый или зеленый). Глаз человека имеет максимальную чувствительность на зеленом участке спектра, поэтому фосфид галлия имеет наибольшую эффективность.

В датчиках применяются *диодные оптроны*. Они состоят из фотоизлучающего (светодиод) D_1 и фоточувствительных приборов D_2 (фотодиод, фоторезистор), сконструированных в едином устройстве (рис.9.15). Такие устройства применяются для передачи сигнала с одной электронной схемы на другую в тех случаях, когда требуется, чтобы они были электрически изолированы одна от другой.

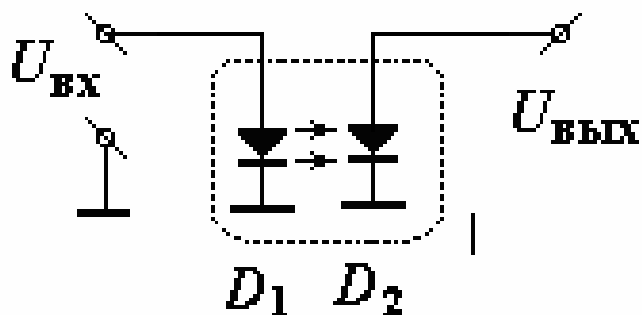


Рисунок 9.15 – Схема устройства оптрона.

В настоящее время получили распространение твердотельные фотоэлектронные приборы с зарядовой связью (ПЗС). Основой ПЗС является конденсатор МОП-структуры (металл-окисел-полупроводник). Одной обкладкой конденсатора является металлический электрод, а второй- полупроводник. Между обкладками находится слой окисла полупроводника, рис.9.16.

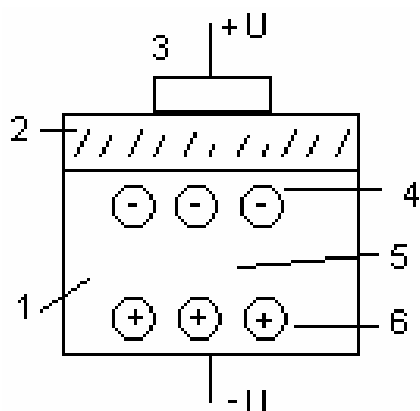


Рисунок 9.16 – Ячейка конденсатора прибора с зарядовой связью (МОП-структура): 1- р-полупроводниковая подложка; 2- окисел полупроводника; 3- металлический электрод; 4- неосновные носители; 5- обедненная область; 6- основные носители.

Если между электродом и полупроводниковой подложкой, например р-типа, приложить напряжение $+U$, то в результате действия электрического поля дырки (основные носители), находящиеся под электродом, отойдут в толщу слоя полупроводника. При этом под электродом образуется область, обедненная основными носителями, - потенциальная яма. Изменяя величину напряжения $+U$ можно управлять глубиной потенциальной ямы.

В образовавшейся потенциальной яме происходит накопление неосновных носителей – электронов, которые могут образовываться за счет фотоэмиссии в результате засветки МОП- структуры, применяемые в виде линеек и матриц.

ПЗС- линейка (рис.9.17) – это устройство для хранения и передвижения зарядовых пакетов вдоль нее, по одной пространственной

координате. Она состоит из последовательно расположенных электродов на общей подложке. Расстояние между электродами настолько мало, что обедненная область под одним электродом практически простирается до соседних электродов. Поэтому, если под одним из n -электродов, к которым приложен потенциал $+U$, будет накоплен заряд, образованный под действием света, то продвинуть его в соседнюю $n+1$ ячейку можно, если потенциальную яму этой ячейки сделать глубже, чем у n -ой ячейки. Если на три соседних электрода последовательно подавать соответствующие потенциалы $+U$, то можно заряды сдвигать от одного электрода к другому, т.е. перемещать сигнал вдоль строки. Проецируя на линейку, например, изображение, получают различную засветку отдельных МОП- конденсаторов, т.е. разные заряды под каждым электродом, величины которых зависят от изображения.

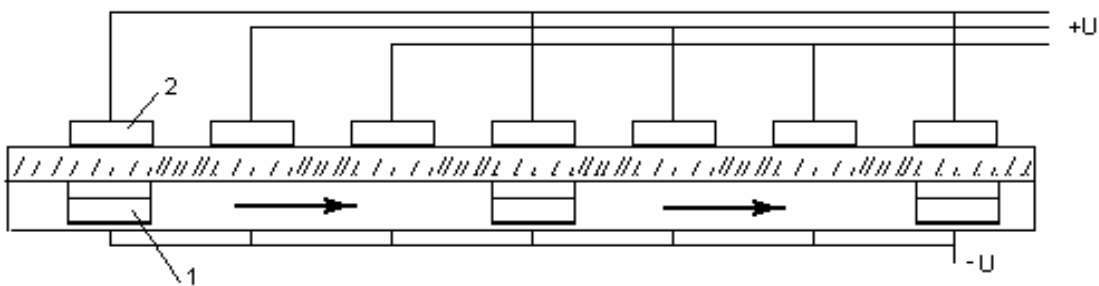


Рисунок 9.17 – Линейка из МОП-конденсаторов: 1- зарядовые пакеты; 2 – электроды.

Преобразователи свет-сигнал на базе ПЗС находят широкое применение в технике телевидения. Для построения преобразователей используют две линейки, разделенных между собой затвором (рис.9.18). На верхнюю линейку, секцию накопления 1, падает изображение. В ней светочувствительные элементы накапливают зарядовые пакеты за время активной работы этой строки. Распределение зарядов вдоль строки соответствует освещенности соответствующих точек изображения. Затем накопление прерывается и с помощью электрического затвора 2 зарядовые пакеты вводятся параллельно в секцию переноса 3. После закрытия затвора вновь происходит накопление зарядов в секции 1, а из секции 3 зарядовые пакеты $E_{\text{вых}}$ через устройство считывания 4 выводятся из преобразователя.

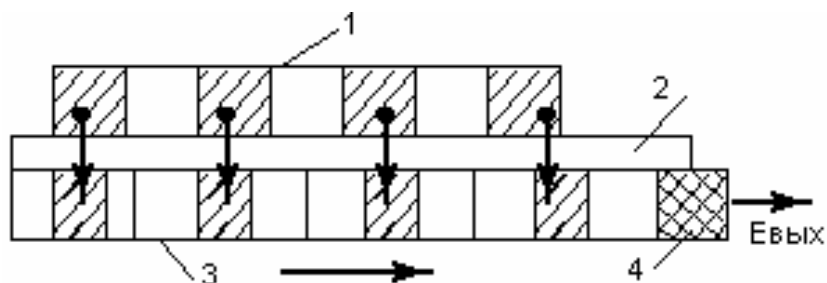
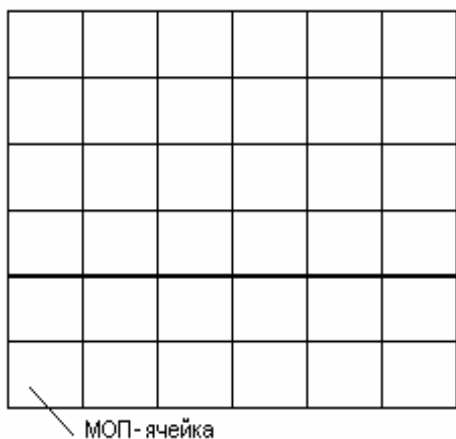


Рисунок 9.18 – Линейный преобразователь на ПЗС: 1- секция накопления; 2- затвор переноса; 3- секция переноса; 4- устройство считывания зарядов.



ПЗС-матрица (рис.9.19) – это матрица из МОП-ячеек, аналогичных ПЗС-линейке, но имеющая две координаты считывания информации.

Рисунок 9.19 – Матрица из МОП-ячеек.

Такие преобразователи бывают двух видов – с покадровым и межстрочным переносом. Рассмотрим матричный преобразователь с покадровым переносом (рис. 9.20). В нем поверхность экрана, поверхность проецирования изображения, образована секцией накопления 1. Накопление зарядов происходит в светочувствительных ячейках этой секции во время прямого хода развертки по кадру. После завершения накопления в течение короткого промежутка времени (обратный ход по кадру) через открывшийся затвор переноса кадра 2 зарядовые пакеты переносятся в секцию хранения 3. Секция хранения защищена от света и имеет такую же структуру, как и секция накопления. Во время прямого хода кадровой развертки режим накопления в секции 1 возобновляется. В это же время информация из хранения построчно передается в секцию переноса заряда – сдвиговый регистр 5. Сдвиг в секцию переноса осуществляется во время обратного хода развертки по строкам через затвор переноса 4. Зарядовые пакеты $E_{\text{вых}}$ из секции переноса выводятся поэлементно в устройство считывания зарядов б за время прямого хода строчной развертки. Промышленностью выпускается и широкий спектр ПЗС-приборов для видимой и инфракрасной областей спектра оптического излучения, на базе которых изготавливаются телевизионные датчики различного назначения.

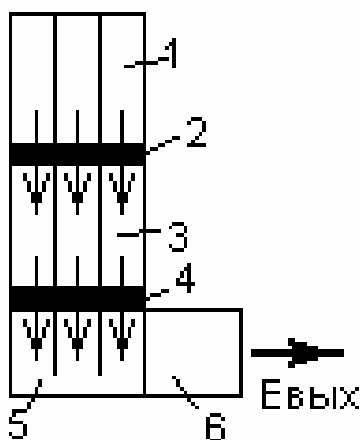


Рисунок 9.20 – Матричный преобразователь на ПЗС с покадровым переносом: 1 - секции накопления; 2, 4 - затворы переноса; 3 - секции хранения; 5 - секции переноса; 6 - устройства считывания зарядов.

9.2.8. Элементы, чувствительные к температуре

Температура является одним из основных параметров технологических процессов. Температура среды оказывает влияние на параметры многих материалов – размеры, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущую силу и т.д. В качестве чувствительных элементов датчиков температуры применяются тепломеханические элементы, термопары, терморезисторы, р-п- переходы, кристаллы кварца, кремния и их соединений и многие другие материалы и явления в них.

Тепломеханические датчики (термобиметаллические, дилатометрические) используются в качестве чувствительных элементов, преобразующих изменение фактического значения регулируемой температуры в перемещение (рис.9.21).

Биметаллический чувствительный элемент (рис.9.21а) представляет собой две узкие металлические пластинки 1 и 2 с различными коэффициентами температурного расширения, жестко скрепленные между собой по всей плоскости касания (спаянные).

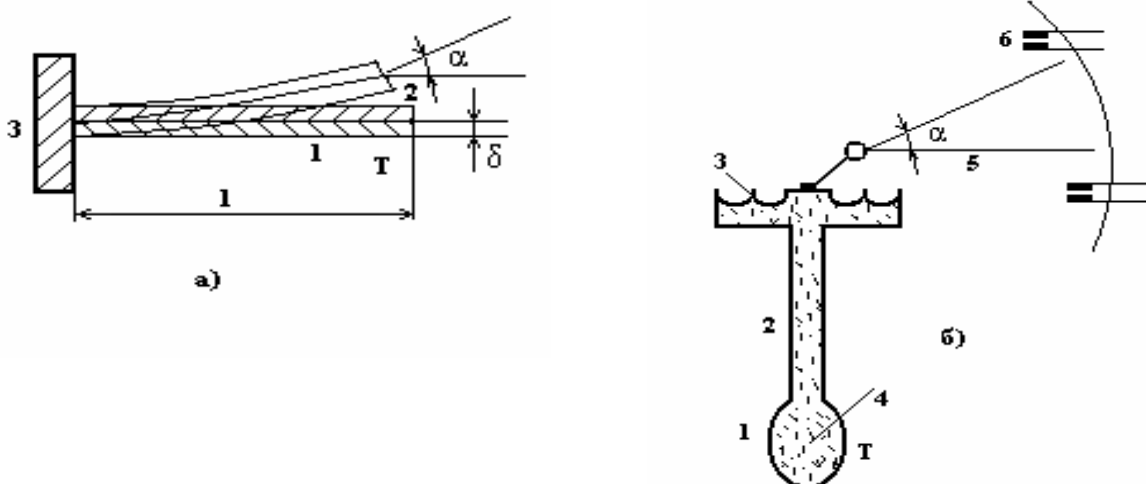


Рисунок 9.21 – Тепломеханические чувствительные элементы: а)- биметаллический; б)- дилатометрический.

Один конец биметаллической пластинки неподвижно закреплен в основании 1, а второй – свободен. При длине плоской пластинки l , значительно превышающей ее толщину δ , угол перемещения свободного конца α будет зависеть от температуры окружающей среды T . На пути изгиба биметаллической пластинки можно поставить, например, электрические контакты, которые будут включать электрическую сеть.

Подобные чувствительные элементы используют для двухпозиционного регулирования (включено-выключено) температуры.

На рис. 9.21б показан *тепломеханический-дилатометрический* преобразователь с расширяющейся жидкостью или газом. Изменение температуры T металлического баллона 1 связано с изменением давления находящихся в нем жидкости или газа 4, так как коэффициенты объемного расширения жидкостей и газов гораздо выше, чем металлов. При изменении давления перемещается свободный конец мембраны 3, связанный с баллоном через капилляр 2. Указатель 5, связанный с мембраной 3, может включать электрические контакты 6, установленные под определенным углом α , соответствующим температуре T .

В качестве термометрических жидкостей применяются амиловый спирт, ацетон, ртуть, и газовые наполнители – азот, гелий и др. Термо-биметаллические и дилатометрические чувствительные элементы применяются для измерения температур в диапазоне от -60 до $+450^{\circ}\text{C}$. Погрешность преобразования составляет 1...5%.

Терморезисторами называют элементы, электрическое сопротивление которых зависит от температуры. Для их изготовления используют медь, платину и другие металлы, удельное сопротивление ρ которых увеличивается с повышением температуры T по закону

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление металла при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления Ом/К, показывающий на сколько увеличивается удельное сопротивление терморезистора при увеличении температуры на 1°C .

Чувствительный элемент металлического терморезистора помещается в стальной или латунный корпус с клеммой головкой и представляет собой бифилярную обмотку из проволоки диаметром 0,04...0,08 мм, размещенную на изолированном корпусе, к концам которой припаиваются выводы из серебряной, а при температуре до 100°C — из медной проволоки.

Погрешность измерений металлических терморезисторов не превышает 0,5...1%. Из металлических терморезисторов наибольшее распространение получили термометры сопротивления типа ТСП (платиновые) и ТСМ (медные).

Термисторы – это полупроводниковые терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, а *позисторы* – с положительным.

Нелинейность характеристик ограничивает применение термисторов при измерениях температуры в узких пределах. Большой разброс по номинальному сопротивлению затрудняет их взаимозаменяемость.

Распространены медно-марганцевые (ММТ), кобальто-марганцевые (КМТ), косвенного подогрева (ТКП) и другие термисторы для температур от -203 °К до 523 °К. Чувствительность термисторов в 5...30 раз выше чувствительности металлических терморезисторов.

Зависимость термистора от температуры и схема его включения приведены на рис.9.22. В практике измерения температуры в рабочем диапазоне -60...+120° С с погрешностью измерения 0,1 % получили распространение кремниевые *p-n* переходы, выполненные в виде смещённых в прямом направлении диодов или базэмитерных переходов транзисторов. Отрицательный температурный коэффициент падения напряжения на базэмитерном переходе кремниевого биполярного транзистора составляет $2,2 \cdot 10^{-3}$ В/ °С, а германиевого - $2,7...3,1 \cdot 10^{-3}$ В/ °С.

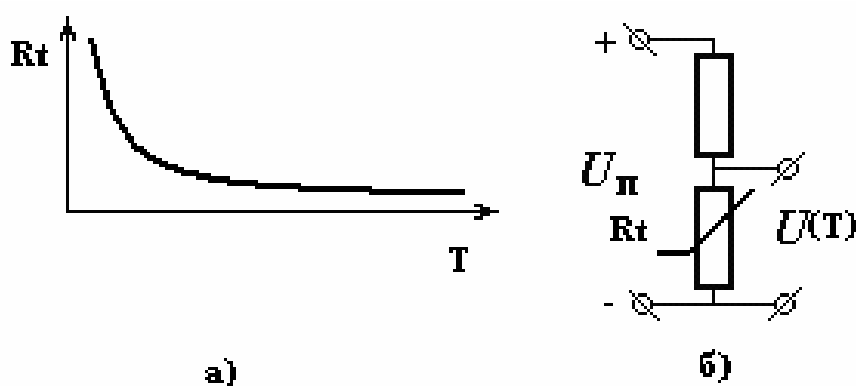


Рисунок 9.22 – Зависимость электрического сопротивления термистора R_t от температуры T (а) и схема его включения (б).

Терморезисторы и р-п переходы (диоды, транзисторы) используются для построения датчиков температуры, теплосчетчиков, термоанемометров и т.п.

Термопары. Термопара – термоэлектрический преобразователь (рис.9.23) состоит из двух 1 и 2 металлов, концы которых А и Б спаяны. Металлы обладают разными термоэлектрическими свойствами. Для изготовления термопар используют пары сплавов «хромель-копель» или «хромель-алюмель».

Спаянный конец называется рабочим спаем, он погружается в измеряемую среду (температура T_1), а свободные концы (холодный спай- температура T_0) подключаются ко входу измерительной схемы П.

Если температуры рабочего спая и свободных концов различны, то термопара вырабатывает термоэлектродвижущую силу. Она зависит от разности температур двух спаев термопары, и для снижения погрешности показаний необходимо знать температуру холодного спая, чтобы компенсировать эту разницу в дальнейших вычислениях. Подключение термопары к схеме измерения осуществляется проводами тех же металлов, что и термопары.

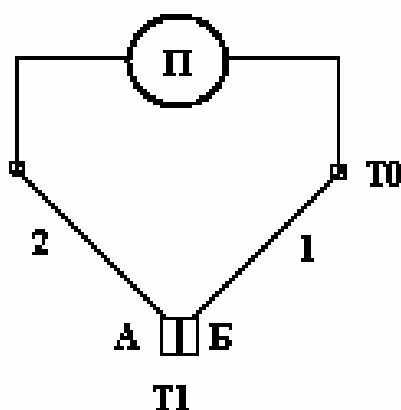


Рисунок 9.23 – Термопара.

Термопары применяются в системах автоматического регулирования и контроля в диапазоне температур от 373 до 3000 °К. Чувствительность термопары обычно невелика и составляет для разных термопар 0,01...0,07 мВ/°С.

Контрольные вопросы к главе 9.

1. Дайте определение датчика.
2. Перечислите основные характеристики датчиков.
3. Что такое чувствительный элемент датчика?
4. Дайте определение диапазона измерений датчика.
5. Дайте определение статической характеристики датчика.
6. Дайте определение коэффициенту чувствительности датчика.
7. Может ли быть коэффициент чувствительности переменной величиной?
8. Дайте определение точности датчика.
9. Дайте определение быстродействию датчика.
10. Дайте определение времени успокоения датчика.
11. Требуется ли параметрический чувствительный элемент для своей работы дополнительного источника энергии?
12. Назовите основные недостатки механических чувствительных элементов.
13. Назовите вид входной величины, которая должна поступать на вход потенциометрического элемента.
14. Какие материалы могут использоваться в тензочувствительных элементах?
15. Какой параметр индуктивного чувствительного элемента изменяется при измерении перемещения объекта?
16. Назовите два типа индукционных преобразователей.
17. Почему сигнал индукционного преобразователя зависит от скорости перемещения ферромагнетика?
18. Какие параметры вещества должны измениться, чтобы на выходе емкостного чувствительного элемента появился полезный сигнал?
19. Опишите прямой пьезоэффект.
20. Опишите обратный пьезоэффект.
21. Опишите работу кварцевого генератора.
22. Назовите виды фотоэлектрических преобразователей.
23. От чего зависит ток фотоэлектрического преобразователя?
24. Опишите работу фотоэлемента с внешним фотоэффектом.
25. Опишите работу с внутренним фотоэффектом.
26. В чем преимущество фотодиода, включенного по генераторной схеме?
27. Назовите разницу между светодиодом и оптроном.
28. Опишите принцип работы ПЗС-матрицы.
29. Поясните принцип действия термопары.
30. Поясните принцип действия терморезистора.
31. Для чего необходим холодный спай термопары?
32. Перечислите возможные виды элементов, чувствительных к температуре.
33. Из каких частей состоит биметаллический чувствительный элемент?

Глава 10. Принципиальные схемы датчиков

10.1. Датчики температуры

На рис.10.1а приведена схема цифрового датчика температуры-генератора импульсов на операционном усилителе, позволяющая получать выходной сигнал, частота которого F линейно зависит от температуры термочувствительного элемента R_t . Термочувствительный элемент R_t выполнен в виде термосопротивления.

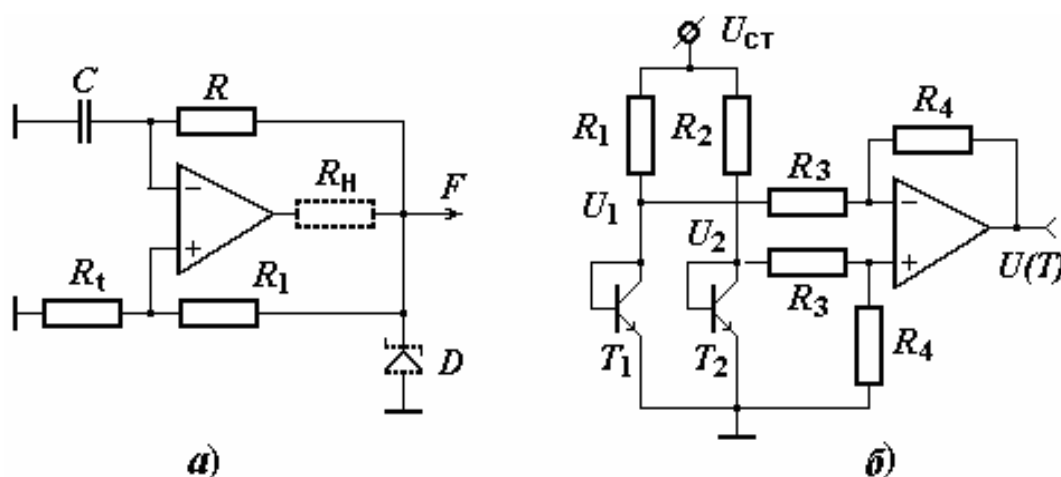


Рисунок 10.1 – Принципиальная схема включения терморезистора (а) и транзистора в качестве датчика температуры (б)

На рис.10.1б приведен пример аналогового термодатчика на р-п переходах- транзисторах T_1 и T_2 , которые являются идентичными, но с той лишь разницей, что за счёт выбора разных номиналов резисторов R_1 и R_2 их рабочие токи являются разными. Резисторы R_1 и R_2 , транзисторы T_1 и T_2 включены в мостовую схему, питание которой осуществляется стабилизированным напряжением $U_{ст}$. Прямые токи через р-п переходы первого и второго транзисторов являются величинами постоянными, при этом резисторы R_1 и R_2 , включенные последовательно с р-п переходами, должны быть высокоомными и температурно независимыми. Сигналы U_1 и U_2 с транзисторов подаются на дифференциальный усилитель, на выходе которого сигнал $U(T)$ зависит от температуры термодатчиков.

10.2. Датчики перемещений

Датчики перемещений преобразуют линейные или угловые перемещения в сигнал, удобный для использования в схемах контроля и управления. Ёмкостный преобразователь перемещений изображен на рис.10.2.

Перемещение X измеряется с помощью емкостей C_1 и C_2 , имеющими общий подвижной элемент ПЭ, механически связанный с перемещаемой деталью. Измерительные ёмкости представляют собой плоскопараллельные конденсаторы с изменяющимся зазором.

На триггере T_p собран генератор противофазных импульсов q и \bar{q} , которые подаются на ключи $Кл_1 \dots Кл_5$.

Измерительные ёмкости C_1 и C_2 включены последовательно и посредством ключевой схемы $Кл_1 \dots Кл_4$ эта цепь за первый полупериод импульса q заряжается, а за второй полупериод, переключившись, разряжается этим же опорным источником.

Напряжение в измерительной диагонали моста при равенстве между собой абсолютных значений напряжений положительного и отрицательного опорных источников равно:

$$\Delta U = \frac{U}{2} \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1}$$

С моста заряды с емкостей подаются на операционный усилитель $ОУ_1$, который одновременно выполняет функции трансформирования высокого сопротивления в низкое и функции сравнения сигналов моста и цепи обратной связи. Цикл работы преобразователя условно можно разделить на два такта.

Первый такт подготовительный, при этом происходит заряд измерительных конденсаторов C_1 и C_2 от источников опорных напряжений $\pm U$. Ключ $Кл_5$ заперт, а интегратор на $ОУ_2$ выполняет функции аналоговой запоминающей ячейки.

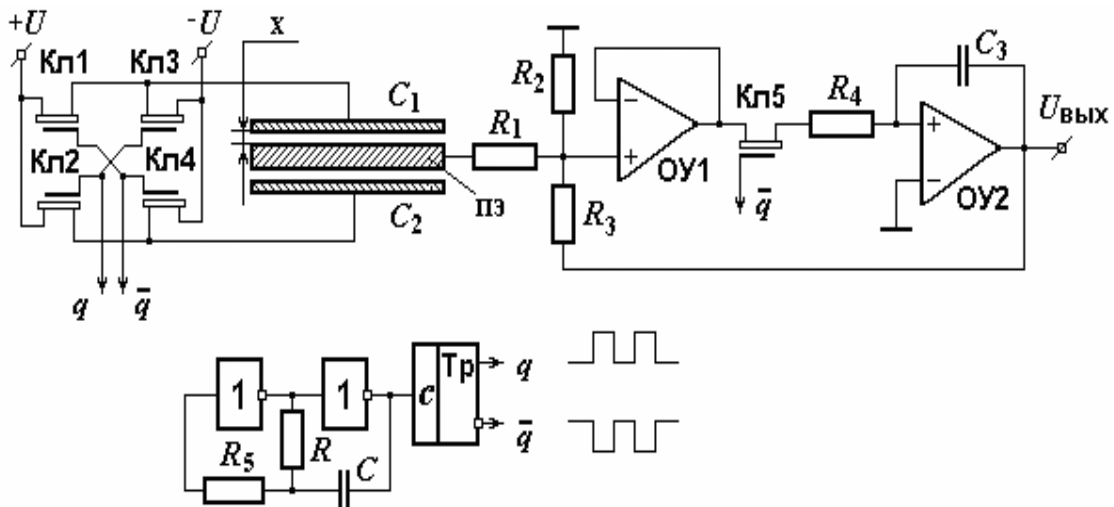


Рисунок 10.2 – Принципиальная схема ёмкостного преобразователя перемещений.

Второй такт - измерительный, при этом происходит перезаряд измерительных ёмкостей, ключ КЛ₅ открыт, что приводит к появлению сигнала интегратора ОУ₂ и цепи отрицательной обратной связи. На выходе интегратора ОУ₂ выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ пропорционально перемещению X и его знаку.

10.3. Термоанемометр постоянной температуры

Термоанемометры – приборы для измерения параметров движущихся сред (газов и жидкостей). Ими измеряют скорость течения, расход, тепловые характеристики. Принципиальная схема термоанемометра с поддержанием постоянной температуры терморезистора приведена на рис.10.3.

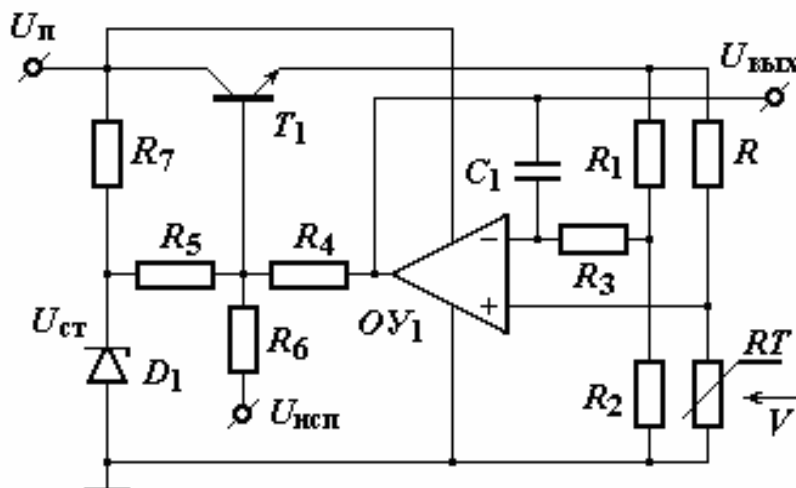


Рисунок 10.3 – Принципиальная схема термоанемометра постоянной температуры

В качестве чувствительного элемента используется терморезистор RT , который помещается в среду, параметры которой необходимо измерить. Среда обтекает его со скоростью V . Терморезистор RT включен в мост R_1, R_2, R, RT , питание которого осуществляется напряжением U_n , стабилизирующемся с помощью схемы на транзисторе T_1 и стабилитрона D_1 .

Сигнал с моста подается на ОУ₁. Отрицательная обратная связь в схеме осуществляется по температуре разогрева датчика RT . Начальный разогрев датчику RT задаётся от стабилизатора напряжения (транзистор T_1 и стабилитрон D_1). При нулевой скорости обтекания датчика термочувствительный мост сбалансирован. По мере увеличения скорости обтекания датчика его сопротивление изменяется из-за снижения температуры.

Термочувствительный мост разбалансируется и напряжение измерительной диагонали моста, преобразованное операционным усилителем ОУ₁, подаётся в суммирующую точку стабилизатора напряжения. Датчик разогревается за счёт добавки к начальному напряжению стабилизатора выходного напряжения ОУ₁. На выходе термоанемометра выходное напряжение зависит от параметров схемы и потока:

$$U_{вых} = KR_T [H_o(T - T_o) / (R + R_T)] (1 + (\nu / 4 \lambda)),$$

где: T - температура в градусах Кельвина разогретого датчика; T_o - температура окружающей среды; $K = R_1 / R_2$ - коэффициент усиления ОУ₁; R_T - сопротивление разогретого датчика; R_o - сопротивление датчика без нагрева; R - постоянный резистор, включенный последовательно с терморезистором RT ; H_o - коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции; ν - скорость потока; λ - коэффициент, зависящий от размеров температурного датчика и тепловых параметров среды.

Независимо от температуры среды термоанемометр можно настроить на измерение скорости или расхода. Подобные приборы можно применять для измерения скорости потока воздуха в помещениях, исследованиях тепловых характеристик жидкостей, паст и т.д.

10.4. Датчик давления с ёмкостным преобразователем

Электронная схема датчика давления может быть выполнена с выходом по частоте по схеме несимметричного мультивибратора (рис.10.4).

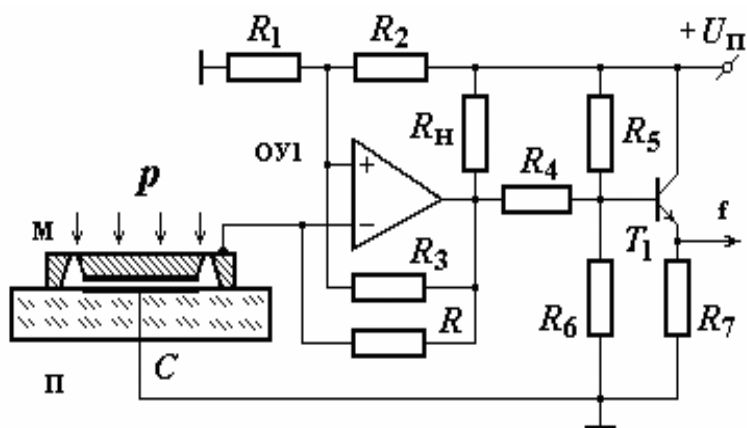


Рисунок 10.4 – Генераторная схема датчика давления.

В качестве чувствительного элемента используется емкость C , состоящая из кремниевой мембраны M и неподвижного электрода, выполняемым на подложке Π .

Ёмкостно-резисторная R - C цепочка является времязадающей для работы операционного усилителя $ОУ_1$. При изменении давления p на мембрану M расстояние между ней и подложкой Π изменяется – меняется и электрическая емкость C .

Установившееся значение частоты f колебаний генератора на $ОУ_1$ равно

$$f = \frac{1}{2CR \ln [1 + R_1/R_2]},$$

где C - измерительная ёмкость преобразователя перемещений.

Транзистор T_1 , включенный по схеме эмиттерного повторителя, предназначен для усиления выходного сигнала по току.

10.5. Датчик влажности газов

Конструктивно чувствительный элемент датчика влажности (гигрометра) выполнен (рис.10.5а) в виде пластины проводящего кремния – выполнен резистор R_k в виде полевого транзистора (МОП - резистор), имеющий электроды стока и истока (позиции 4 и 5 на рис.10.5а) и пористого электрода затвора 2, необходимого для проникновения в него влажного воздуха среды.

На рис.10.5б приведена принципиальная схема электронного преобразователя, реализующая зависимость выходного сигнала от диэлектрической проницаемости резистора R_k . Управляемое влажностью сопротивление R_k включено в обратную связь операционного усилителя ОУ₁.

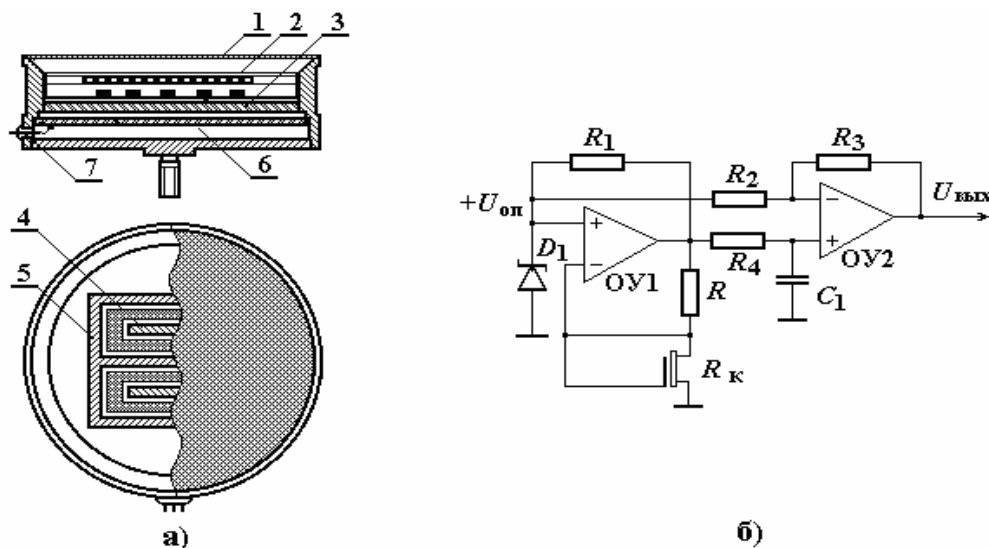


Рисунок 10.5 – Датчик влажности: а) чувствительный элемент датчика влажности: 1 - кристалл кремния, 2 - пористый электрод затвора, 3 - защитная сетка, 4 и 5 – гребенчатые электроды стока и истока, б – герметические вводы, 7 – электронная плата; б) принципиальная схема датчика влажности.

Диэлектрическая проницаемость смеси газов теоретически может быть вычислена по известным диэлектрическим проницаемостям компонент и весовых долей, входящих в ее состав:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i G_i}{\sum_{i=1}^n G_i},$$

где ε_i , G_i - соответственно диэлектрическая проницаемость и весовая доля вещества, входящего в состав смеси, ε - диэлектрическая проницаемость смеси веществ.

В зависимости от влажности воздуха, находящегося в промежутке между электродами 4 и 5 – пористом электроде 2 (рис.10.5а), диэлектрическая проницаемость и проводимость резистора R_k будет изменяться. При постоянном R на выходе ОУ₂ будет равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОП}} \left(1 + \varepsilon_{\text{ВОЗД}} / \varepsilon_{\text{КР}} + (\varepsilon_{\text{ВОДЫ}} G_{\text{ВОДЫ}}) / (\varepsilon_{\text{КР}} G_{\text{ВОЗД}}) - R_3 / R_2 \right),$$

где: $U_{оп}$ – опорное напряжение ОУ₁, $\epsilon_{возд}$, $\epsilon_{воды}$ и $\epsilon_{кр}$ – соответственно постоянные значения диэлектрической проницаемости сухого воздуха, воды без примесей и окиси кремния; $G_{воды}$, $G_{возд}$ - доли воды и воздуха.

При соответствующем выборе параметров схемы зависимость выходного сигнала датчика от влажности $W_{абс}$ выглядит следующим образом:

$$U_{вых} = KW_{абс},$$

где $K = (\epsilon_{воды} U_{оп}) / (\epsilon_{кр} G_{возд})$ - крутизна статической характеристики датчика.

10.6. Датчики, использующие фотоэлектрические элементы

Датчики, использующие фотоэлектрические элементы, применяются для измерения параметров среды, счета, определения цветовых характеристик, в целях безопасности и т.д. В основе датчика лежат элементы, чувствительные к излучению. Они могут работать на поглощение и отражение излучения и использовать как видимое излучение, так и невидимое, инфракрасное.

Датчик контроля проникновения предмета в определенную зону.

Для контроля проникновения человека или предметов в определенную зону применяют разнесенные пары приемник-передатчик оптического излучения, работающие на пресечение оптического луча (рис.10.6).

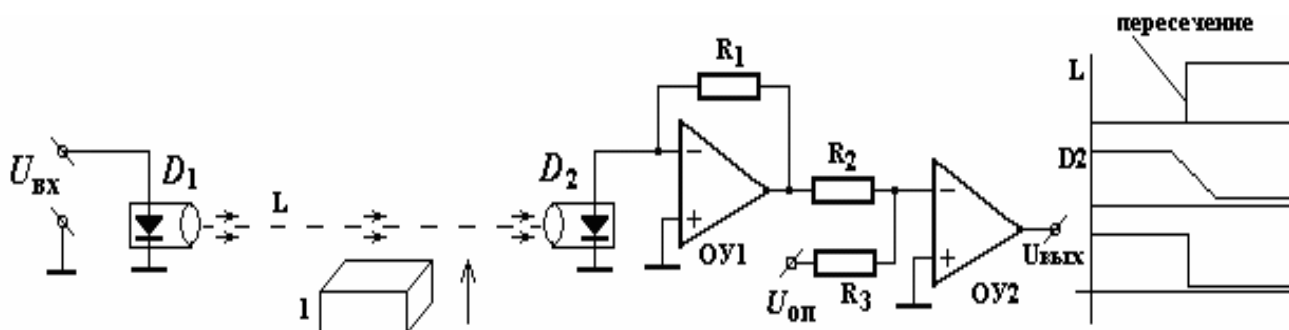


Рисунок 10.6 – Фотоэлектрический датчик проникновения предмета в зону: D₁-светодиод с линзовой системой; D₂- фотодиод; L- луч света; ОУ₁- усилитель фототока; ОУ₂- компаратор; 1- предмет.

Светодиод с оптической системой D_1 создает луч света L , направленный строго по оси оптической системы фотодиода D_2 , который включен на вход усилителя OY_1 , сигнал которого в свою очередь подается на компаратор OY_2 .

Если в зоне луча L нет посторонних предметов, то он освещает фотодиод D_2 , который своим током через усилитель OY_1 поддерживает на выходе компаратора OY_2 высокий потенциал (логическую единицу) – «предмета в зоне нет».

Если предмет 1 пересекает луч L , то последний не попадает на фотодиод D_2 , в результате чего его ток снижается, а компаратор OY_2 переключается в режим низкого потенциала (логический ноль) – «предмет находится в зоне действия луча».

Подобные системы применяются для создания систем безопасности, чтобы человек не проникал в зону, очерченную лучом, охраны объектов, а также счета продукции. Каждое пересечение луча принимается за еще вновь поступивший предмет.

В качестве задающего элемента генератора используется кварцевая емкость Π_3 . Генератор с элемента L_1 питает красный светодиод DR , а с элемента L_2 – зеленый DG . Красный и зеленый светодиоды горят попеременно, поэтому поверхность плода O попеременно освещается то красным, то зеленым светом. Частота следования импульсов облучения должна на порядок превышать частоту подачи плодов в зону контроля.

Датчики цветовых характеристик продукции. На рис.10.7. приведена схема датчика цвета поверхности продукции (томаты, перец, вишня), в которой используют осмотр поверхности, попавшей в зону его действия, например, при сортировании. Схема состоит: из генератора прямоугольных импульсов, собранного на логических элементах ИЛИ L_1 и L_2 ; светодиодной сборки CD на два цвета – зеленой DG и красной DR ; фотоприемника $\Phi Д$; усилителя фототока на OY_1 ; переключателя тока $КЛ$ и двух интеграторов OY_2 и OY_3 .

Отраженный от всей поверхности плода поток излучения воспринимается фотоприемником $\Phi Д$, на выходе которого имеется электрический сигнал $U(RG)$, пропорциональный величине красного или зеленого отраженного от поверхности плода потока.

Импульсы на выходе фотодиода по величине соответствуют уровню красного (первый импульс) или зеленого (второй импульс) света, отраженного от поверхности плода.

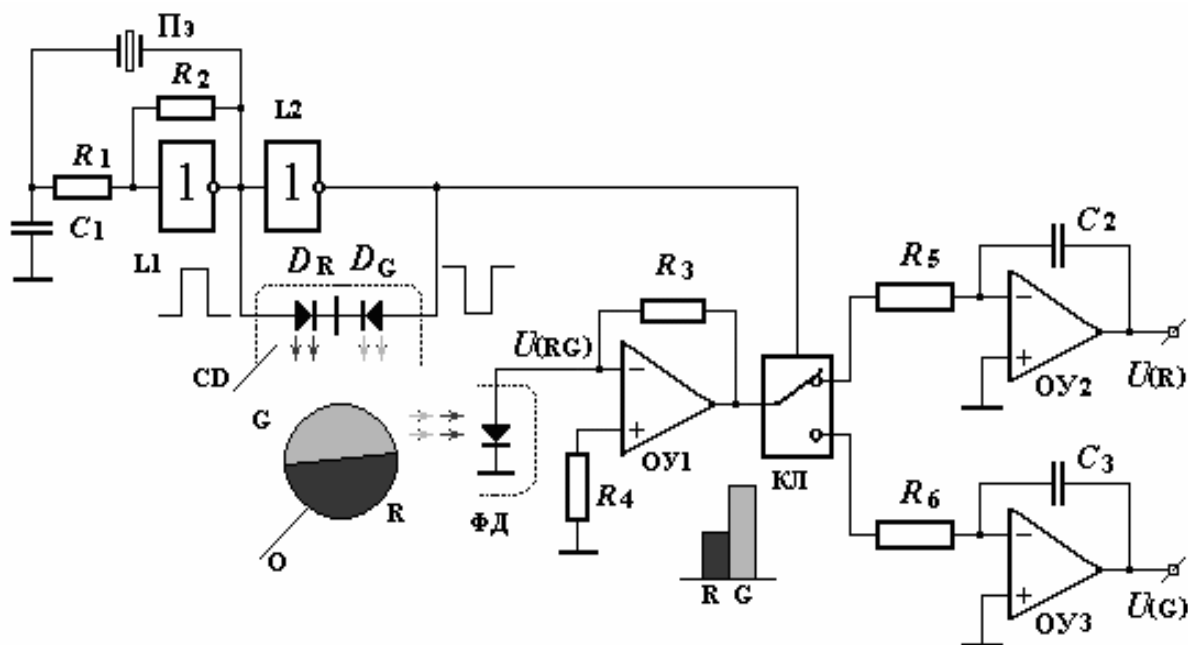


Рисунок 10.7 – Схема датчика цвета продукции: CD-осветитель; DR-светодиод красного света; DG- светодиод зеленого света; ФД- фотодиод; КЛ- управляемый переключатель тока; ОУ2- интегратор красного цвета; ОУ3- интегратор зеленого цвета.

С помощью переключателя КЛ, управляемого с элемента генератора L_2 , подаются: первый, «красный» импульс, – на интегратор ОУ₂ красного света, второй, «зеленый» импульс – на ОУ₃. На выходах этих интеграторов устанавливаются напряжения $U(R)$ и $U(G)$ соответственно для количества красного и зеленого цвета поверхности.

Эти сигналы могут быть поданы на индикатор или в автоматическое устройство сортирования.

10.7. Основные требования к датчикам, применяемым в сельскохозяйственном производстве

В сельскохозяйственном производстве и переработке имеется ряд особых условий, обуславливающих специфику работы датчиков:

1. Работа датчиков, особенно на мобильных объектах, связана с большим уровнем шумов- механических напряжений, вибраций, температурной нестабильности и влажности, снижающих точность измерений.

2. Датчики контактируют с агрессивными средами- аммиак, влажный воздух, сероводород, пыль, грязь и другие;

3. Многообразие технологий, процессов, параметров и режимов их работы.

4. Невозможность нанесения при измерении параметров дополнительных механических повреждений объекту.

5. Невозможность применения сильных полей и излучений в силу их влияния на структуру, рост и качество продукта.

6. Высокие санитарные требования к продукту, связанные с последующим употреблением в пищу человеком.

7. Удаленность расположения датчиков от места сбора информации до места ее обработки (кабина водителя комбайна- жатка).

8. Распределенность общей схемы в пространстве (мобильный агрегат, поле, оросительная система и т.п.).

9. Пожаро и взрывоопасность в условиях запыленности технологического процесса.

10. Высока интенсивность работы (уборочный процесс) с малыми перерывами на техническое обслуживание.

Отсюда возникают специфические требования к датчикам сельскохозяйственной автоматики:

- высокая точность при высоком уровне шумов;
- стойкость к агрессивным средам;
- простота настройки на измерение определенного параметра в условиях шумов (вибрации, влажность, запыленность и т.п.) и мобильного производства;
- ремонтнопригодность общей схемы;
- высокая надежность;
- пожаро- и взрывобезопасность.

Следует стремиться к оптимальному сочетанию вышеприведенных требований и применять или вновь создавать датчики с лучшим соотношением цена / качество.

Контрольные вопросы к главе 10.

1. Каким образом термосопротивление может управлять частотой электронного генератора?
2. Какое свойство транзистора используется для измерения температуры?
3. Опишите схему включения транзистора в качестве датчика температуры.
4. Какое свойство емкостного преобразователя используется для измерения перемещения?

5. Опишите схему включения емкости в качестве датчика перемещения.
6. Для чего используются термоанемометры?
7. Опишите принцип действия термоанемометра постоянной температуры.
8. Какие свойства кристалла используют для построения датчика давления и силы?
9. Какие свойства кристалла используют для построения датчика влажности газов?
10. Каким образом можно зафиксировать появление предмета в зоне контроля?
11. Назовите чувствительные элементы с помощью которых можно измерить цвет?
12. Каковы требования к датчикам сельскохозяйственной автоматики?

Глава 11. Задающие, сравнивающие и усилительные устройства САР

11.1. Задающие устройства

Задающее устройство САР формирует и хранит величину воздействия, переменные величины, уставки, коэффициенты, метки времени и т.п. Задающее устройство вырабатывает условия протекания технологического процесса $Y_3(t)$ - функцию времени. Эта функция может быть одномерной (одна величина) или многомерной (несколько величин). В системах автоматического управления чаще встречаются многомерные функции времени, когда задаются условия одновременно по нескольким параметрам - температуре, давлению и т.д.

В некоторых случаях задающая величина является постоянной во времени – тогда задается не функция времени, а отдельные величины.

Задающие устройства выдают сигнал в аналоговой или цифровой форме.

В качестве задающего устройства ранее применялись кулачковые механизмы, функциональные потенциометры, перфокарты, магнитные пленки и кинопленки и т. п. В настоящее время используются электронные аналоговые и цифровые устройства.

На рис.11.1. приведены некоторые типы задающих устройств - задатчиков постоянных аналоговых и цифровых величин. Существует достаточно широкий класс потенциометрических задающих устройств, в основе которых лежит уставка величины с помощью потенциометра R (рис.11.1а). На переменный резистор R подается опорное напряжение U_{on} .

Постоянный сигнал Y_3 задается и запоминается положением движка потенциометра R . Например, при необходимости задать величину “1” положение движка устанавливают таким образом, что $Y_3 = 1B$, величину “1,4” - = $1,4B$ и т.д. Для этого к движку подсоединяют измерительный прибор Π , проградуированный в единицах задаваемой величины, например, температуры. Иногда уставки имеют постоянные величины – их задают с помощью дискретного потенциометра, имеющего переключатель резисторов Π_k (рис.11.1б). Положение переключателя 1-ое, 2-ое и т.д. также градуируется в единицах задаваемой величины.

При исчезновении внешнего напряжения заданная величина остается введенной и вновь подается в САУ при его появлении.

При необходимости использования задаваемой величины в цифровом виде потенциометрический задатчик снабжается аналого-цифровым преобразователем-АЦП (рис.11.1в). На его выходе имеется цифровой код D_3 задаваемой величины Y_3 .

Запоминание заданной величины осуществляется за счет неизменного положения движка потенциометра или переключателя.

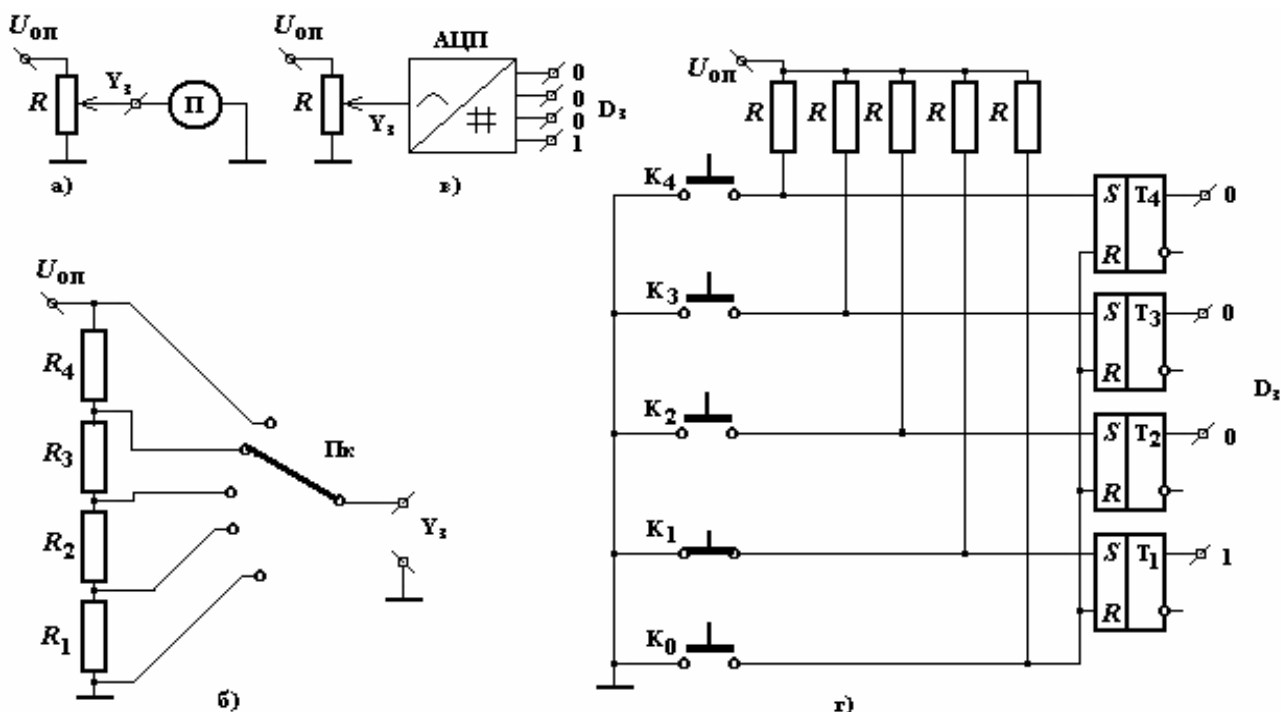


Рисунок 11.1 – Аналоговые и цифровые постоянные задающие устройства:
 а- аналоговый потенциометрический; б- цифровой потенциометрический; в- дискретный потенциометрический; г- цифровой; R- потенциометр; П_к- переключатель; П- измерительный прибор; АЦП- аналого-цифровой преобразователь; Т₁-Т₄ – триггеры; К₀ - К₄- кнопки ввода сигнала;
 $U_{оп}$ – опорное напряжение.

Для управления цифровыми системами на базе микропроцессоров и компьютеров используются кнопочные задатчики. На рис.11.1г приведена схема дискретного четырехразрядного задатчика сигнала. Он состоит из кнопок ввода K_1 - K_4 , кнопки сброса K_0 и триггеров памяти T_1 - T_4 .

Если кнопки K_1 - K_5 отжаты, не соединяют общую шину со входами триггеров T_1 - T_4 , то на S - выходах последних имеются логические “0”. Логический “0” триггеров устанавливается путем нажатия кнопки K_0 .

Для ввода цифрового кода нажимаются кнопки K_1 - K_4 . Например, для ввода “1” нажимается K_1 . Триггер T_1 перекидывается, и на его S-выходе появляется логическая “1”, которая запоминается, несмотря на то, что кнопка K_1 отпускается. Далее можно вводить другие цифры, например, “2”, нажимая на соответствующие кнопки – K_2 и т.д. В результате на выходе триггеров появляется цифровой позиционный код вводимой величины, который используется далее САУ для получения управляющего сигнала. Цифровой код сохраняется до нажатия кнопки K_0 или снятия напряжения со схемы. Последнее обстоятельство является недостатком описанной схемы. Для его устранения используют специальные источники питания – аккумуляторы или постоянные запоминающие устройства.

При многопараметрических задающих аналоговых сигналах задание каждого параметра производится отдельно, что предопределяет соответствующее количество вводных потенциометров.

При использовании цифровой формы ввода информации отдельно хранятся только введенные величины, их ввод может осуществляться одними и теми же потенциометрами и кнопками.

Для получения функциональных зависимостей используют возможности микропроцессоров к хранению и выполнению сдвиговых и математических операций. Функциональные зависимости в микропроцессорном устройстве генерируются с помощью специальной рабочей программы, записываемой в его память.

Для хранения рабочей программы используются постоянные запоминающие устройства – ПЗУ, выполняемые на отдельных микросхемах. Отличительной чертой ПЗУ является однократная запись информации. В последующем возможно только считывание записанной информации. Достоинством микросхем ПЗУ является их низкая стоимость и возможность хранения информации при отключенном питании.

Широко применяются перепрограммируемые устройства памяти – ППЗУ. Они используются для устройств, рабочая программа которых должна изменяться в процессе эксплуатации. Логическая часть этих устройств создается пользователем из базовых логических функций типа И, ИЛИ, ТРИГГЕР и т.д. ППЗУ является энергонезависимой памятью, т.е. хранимая в ней информация не разрушается в обесточенном состоянии.

Для временного хранения результатов промежуточных вычислений используются оперативные запоминающие устройства (ОЗУ).

11.2. Сравнивающие устройства

Сравнивающие устройства измеряют рассогласование

$$\varepsilon(t) = Y_3(t) - Y(t)$$

– отклонение управляемой величины $Y(t)$ от ее заданного значения $Y_3(t)$. Сравнивающие устройства в зависимости от вида обрабатываемого сигнала могут быть аналоговые и цифровые, а по результату сравнения – релейными (двух- и более позиционными) или иметь на выходе абсолютную разность рассогласования.

На рис.11.2а приведена схема сравнивающего устройства на операционном усилителе ОУ с отрицательной обратной связью через резистор R_0 . На оба входа ОУ подаются: на инвертирующий (-)- сигнал выходной управляемой величины САУ $Y(t)$, а на неинвертирующий (+) - сигнал с задающего устройства $Y_3(t)$. Если принять в схеме

$$R_2/R_3 = R_1/R_0,$$

то сигнал на выходе будет пропорционален разности

$$\varepsilon(t) = [Y_3(t) - Y(t)] R_0/R_1.$$

Этот сигнал подается на другие элементы САУ, в частности в регулирующее устройство для выработки соответствующего сигнала управления.

Для двухпозиционного регулирования используются компараторы (нуль-органы) (рис.11.2б), в котором в отличие от схемы (рис.11.2а) отрицательная обратная связь отсутствует, т.е. ОУ работает с коэффициентом усиления, стремящимся к бесконечности. В этом случае на выходе ОУ при $\varepsilon(t) < 0$ сигнал $d(t)$ скачком изменяется с логической “1” на логический “0”. Аналоговые схемы сравнения сигналов просты, но не всегда имеют достаточную точность и стабильность работы.

Для сравнения цифровых величин применяются цифровые логические схемы. Сравнение производится поразрядно. На рис.11.3 приведена схема сравнения одноразрядных кодов двух сравниваемых величин $Y(t)$ и $Y_3(t)$, собранная на логических элементах И.

Схему сравнения для двух и более разрядов составляют из одноразрядных схем. Цифровые схемы более громоздки в исполнении, но более надежны в работе в сравнении с аналоговыми.

Поэтому в отдельности они применяются достаточно редко. Все большее применение находят цифровые сравнивающие устройства, реализуемые рабочими программами микропроцессорных устройств.

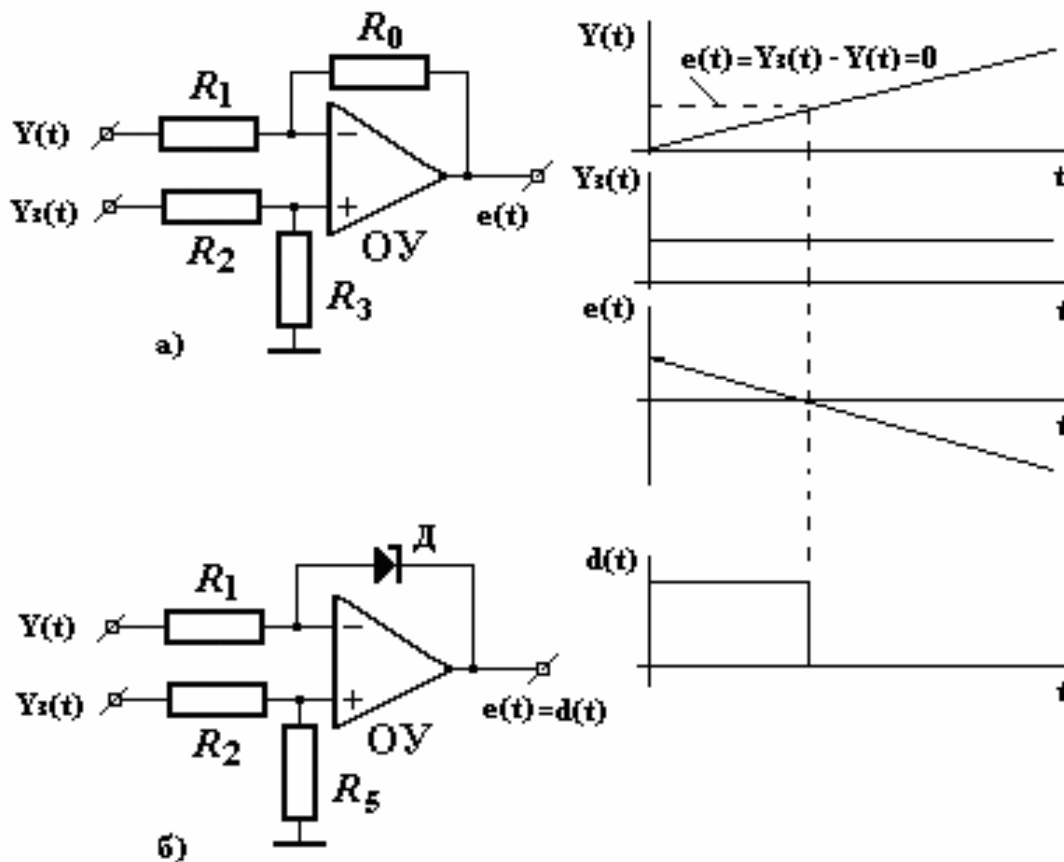


Рисунок 11.2 – Аналоговые сравнивающие устройства.

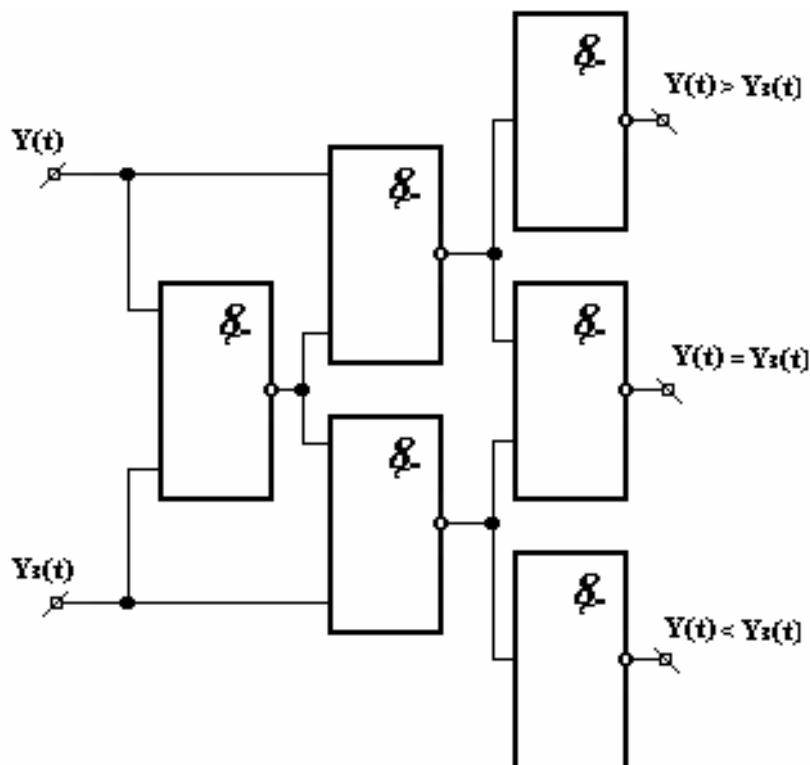


Рисунок 11.3 – Схема сравнения одноразрядных кодов двух сравниваемых величин $Y(t)$ и $Y_3(t)$.

11.3. Усилители

Общие сведения и классификация и классификация усилителей.

Усилитель- это устройство, в котором происходит усиление выходного сигнала датчика или преобразователя до величины, необходимой для питания исполнительных устройств за счет дополнительного источника энергии. В усилителях входная и выходная величины имеют одинаковую физическую природу. Усилители являются элементами датчиков, преобразователей, исполнительных устройств.

Усилители классифицируются по виду энергии – механические, гидравлические, пневматические, электрические.

Основными характеристиками усилителя являются:

- вид статической характеристики (линейная, нелинейная);
- коэффициент усиления;
- чувствительность;
- быстродействие;
- точность воспроизведения входной величины.

Тип и характеристики усилителя зависит от типа и характеристик датчика, преобразователя и исполнительного устройства.

Электрические усилители подразделяют по роду усиливаемого тока – на усилители постоянного и переменного тока.

Усилители постоянного тока. Применяются для усиления сигналов для управления исполнительными устройствами небольшой мощности – электромагнитными реле и обмотками возбуждения электродвигателей постоянного и переменного тока. В простейших усилителях применяется непосредственная связь между каскадами транзисторов T_1 и T_2 , рис.11.4. Входной сигнал U_1 (с датчика) поступает на вход транзистора T_1 . Связь между каскадами осуществляется через делитель напряжения - резисторы R_5 - R_4 . Выходной сигнал снимается с коллектора транзистора T_2 . Резисторы R_1 и R_2 определяют рабочую точку транзистора T_1 , а резисторы R_3 и R_6 - ток коллекторов транзисторов.

Мощность подобного усилителя может достигать нескольких десятков Ватт. Недостатком подобных схем является наличие дрейфа нуля, вызванного изменением температуры окружающей среды и величины питающего напряжения $U_{п}$.

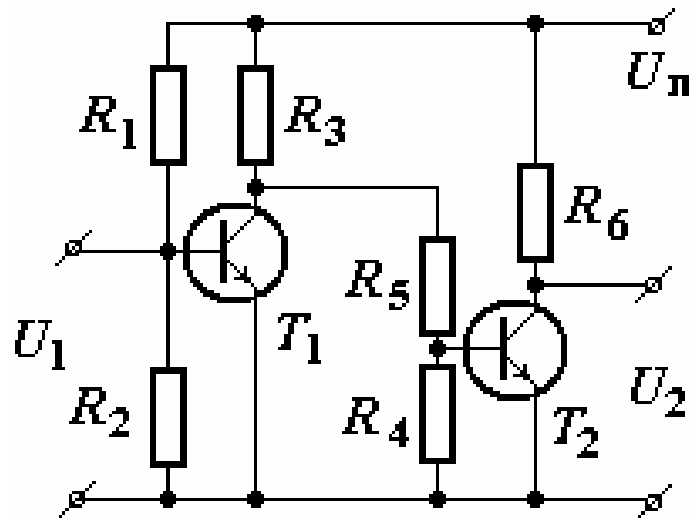


Рисунок 11.4 – Усилитель на транзисторах.

Для усиления малых сигналов, порядка сотен и тысячных долей Вольта и ниже применяют специальные схемы включения транзисторов (модулятор-демодулятор), а также операционные усилители, которые были рассмотрены выше.

Тиристорные усилители применяют для управления однофазными и многофазными электродвигателями переменного тока, двигателями постоянного тока и другой мощной нагрузкой.

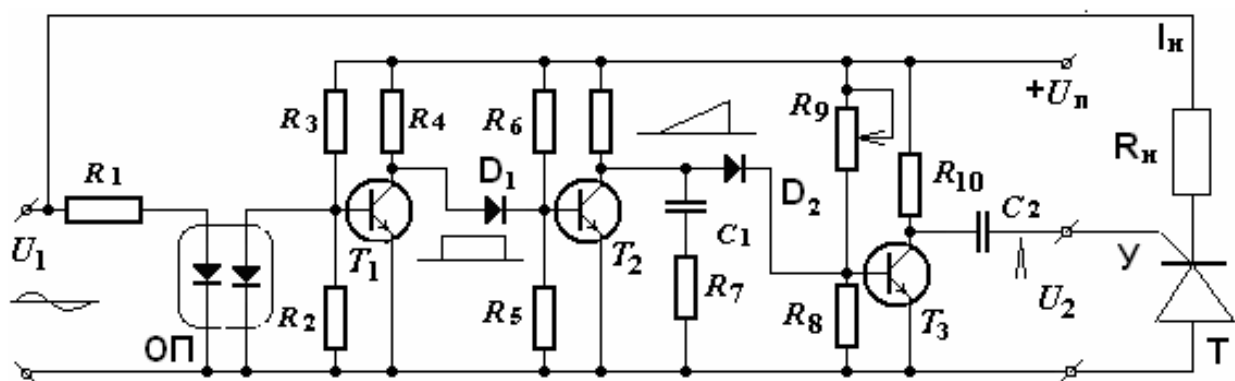


Рисунок 11.5 – Тиристорный усилитель: U_1 - входное синусоидальное напряжение; Т- тиристор; У- управляющий электрод тиристора; R_n - нагрузка тиристора; T_1 , T_2 , T_3 - транзисторы; ОП- оптрон; D_1 , D_2 - диоды; C_1 – интегрирующий конденсатор; C_2 - дифференцирующий конденсатор; R_9 – регулирующий резистор; U_2 – импульс открытия тиристора; R_i - резисторы режима работы схемы; I_n - ток нагрузки.

Принцип действия тиристорного усилителя, рис.14.4., основан на способности тиристора Т пропускать часть полуволны входного синусоидального напряжения сети U_1 , поданного на нагрузку R_n , в за-

висимости от фазы управляющего импульса U_2 относительно входного синусоидального сигнала. Для управления тиристором на его управляющий электрод U подается короткий импульс U_2 .

Тиристорные усилители имеют большой коэффициент усиления по току (десятки и сотни тысяч) и пропускают токи в сотни Ампер.

Гидравлические и пневматические усилители. Гидравлические и пневматические усилители имеют одинаковый принцип действия, т.к. в обоих случаях используются одни и те же законы физики, но в первом случае в качестве промежуточного носителя энергии используется жидкость, например, масло.

Золотниковый гидравлический усилитель, рис.11.6, состоит из золотниковой пары: втулки со щелями, внутри которой перемещается золотник. В зависимости от назначения применяют одно-, двух и четырехщелевые золотниковые пары, изготовленные с высокой точностью. В пневматических усилителях золотниковые пары работают без смазки при малом зазоре между золотником и втулкой. Шток золотника 5 является управляющим – он соединен с ручной или автоматической системой управления. Шток силового цилиндра 7 соединен с рабочим органом.

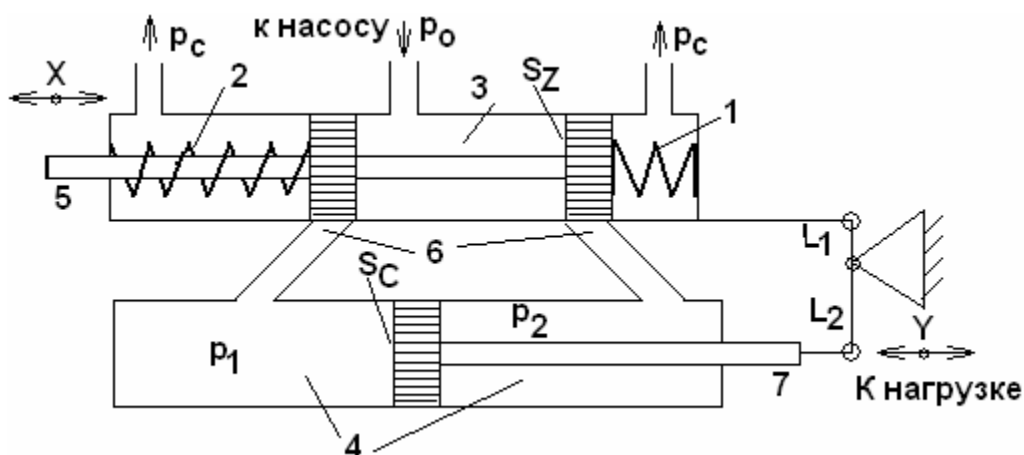


Рисунок 11.6 – Золотниковый гидравлический усилитель: 1,2 – пружины; 3- золотниковый цилиндр; 4- силовые цилиндры; 5- шток золотника; 6- каналы сообщения; 7- шток силового цилиндра; X- входное перемещение штока золотника; Y- выходное перемещение силового цилиндра; L_1 , L_2 - рычаги.

Принцип действия гидравлического усилителя заключается в том, что под действием внешнего гидронасоса в золотниковом и силовом цилиндре существует одинаковое давление P_0 . Площадь силового цилиндра S_c намного больше площади золотникового цилиндра S_z , поэтому для перемещения золотника требуется намного меньше уси-

лий, например движением кисти руки, чем развиваемое при этом усилие на конце штока цилиндра.

В исходном положении под воздействием пружин 1 и 2 полностью перекрыты соединительные каналы между золотниковым 3 и силовым цилиндрами. В золотник 3 постоянно поступает извне жидкость под давлением P_0 . При перемещении X , например, влево, штока 5 золотника открываются каналы 6, и жидкость под давлением P_0 поступает в левую полость силового цилиндра 4 и вытесняется из его правой части. При этом давление P_1 превысит давление P_2 , и шток 7 силового цилиндра будет перемещаться вправо. При изменении направления движения золотника изменяется также направление перемещения поршня силового цилиндра.

Чтобы движение силового цилиндра точнее повторяло входное перемещение золотника, используют жесткую обратную связь в виде рычага длиной $L_1 + L_2$, концы которого соединены с золотниковым цилиндром и штоком поршня силового цилиндра. Входное перемещение штока золотника будет вызывать движение поршня силового цилиндра и цилиндра золотника до тех пор, пока каналы не будут перекрыты и шток силового цилиндра не остановится в определенном положении Y , задаваемом положением штока золотника X .

Коэффициент усиления гидравлических усилителей достигает десятков тысяч, пневматических – меньше.

Гидравлические усилители отличаются большими – до нескольких сотен тонн усилий, пневматические могут развивать усилия до нескольких тонн. Быстродействие гидравлических усилителей выше за счет большей плотности жидкости, чем воздуха.

Контрольные вопросы к главе 11.

1. Определите назначение задающего устройства.
2. Каким образом можно задать аналоговую величину?
3. Каким образом можно задать цифровую величину?
4. Опишите аналоговый потенциометрический задатчик
5. Опишите цифровой потенциометрический задатчик.
6. Опишите дискретный потенциометрический задатчик.
7. Опишите цифровой задатчик.
8. Для чего необходимо постоянное запоминающее устройство?
9. Для чего необходимо ОЗУ?
10. Поясните назначение сравнивающего устройства.
11. Какие элементы содержит аналоговое сравнивающее устройство?

12. Какие элементы содержит цифровое сравнивающее устройство?
13. Опишите устройство компаратора.
14. Дайте определение усилителя.
15. Назовите характеристики усилителя.
16. Какие типы усилителей вы знаете?
17. Усиливает ли усилитель постоянного тока переменный сигнал?
18. За счет чего происходит усиление тока в тиристорном усилителе?
18. Зависит ли коэффициент усиления в тиристорном усилителе от величины сопротивления нагрузки?
19. Дайте определение гидравлического усилителя.
20. Дайте назначение золотникового цилиндра.
21. Дайте назначение силового цилиндра.
22. За счет чего происходит усиление сигнала в гидравлическом усилителе?
23. Назовите недостатки пневматического усилителя в сравнении с гидравлическим.

Глава 12. Исполнительные устройства автоматики

Исполнительное устройство осуществляет при поступлении на его вход сигналов управления определенные воздействия на объект регулирования. К ним относятся электродвигатели, муфты, тяговые электромагниты, реле и т.п. Исполнительные устройства через рабочие органы воздействуют на объект регулирования.

Рабочие органы обеспечивают при выполнении технологической операции соответствующее воздействие на среду, изменяя ее температуру, состав, давление, скорость, расход и т.п.

Рабочими органами могут быть различного рода заслонки, клапаны, задвижки, шиберы, направляющие аппараты, электрические нагреватели (трубчатые, СВЧ, ИК-излучатели) и другие устройства, так или иначе непосредственно влияющие на протекание технологической операции.

Исполнительное устройство обычно состоит из двигателя, передаточного или преобразующего узла (например, редуктора), а также систем защиты, контроля и сигнализации положения выходного элемента, блокировки и отключения. Классифицируются исполнительные устройства по виду используемой энергии на гидравлические, пневматические, электродвигательные и электромагнитные.

Электрические исполнительные устройства. Электрические исполнительные устройства можно разделить на электромагнитные и электродвигательные.

К электромагнитным исполнительным устройствам относятся прежде всего *соленоидные электроприводы*, предназначенные для управления различного рода регулирующими и запорными вентилями, золотниками и т. п. (рис.12.1).

Необходимое для перемещения рабочего органа усилие в них создается за счет электромагнита, являющегося неотъемлемой частью подобного исполнительного устройства.

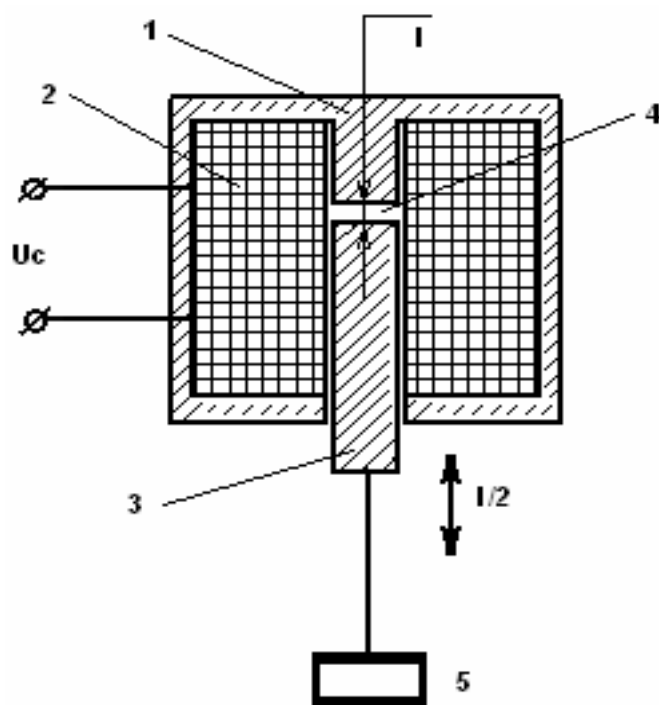


Рисунок 12.1 – Электромагнитный соленоид: 1-ярмо; 2- электрическая катушка; 3- якорь соленоида; 4- зазор между якорем и ярмом; 5- перемещаемая механическая нагрузка.

Исполнительное устройство с электромагнитным соленоидным приводом состоит из электромагнита с ярмом 1 и якорем 2, между которыми имеется зазор 4 величиной l . С якорем соединяется механическая нагрузка 5, которую необходимо переместить (груз, рабочий орган – заслонки, задвижки, клапаны, рычаги и т.п.).

При подаче на электромагнит питающего напряжения U под действием возникающего при этом электромагнитного усилия якорь 3 поднимается вверх на величину воздушного зазора l .

Электромагниты делятся на электромагниты постоянного и переменного тока, на удерживающие и притягивающие, на длинноходные (ход якоря до 150 мм) и короткоходные (ход якоря 2...5 мм); с поступательным движением якоря и с поворотным якорем.

Электромагниты широко применяются в электропневматических и электрогидравлических исполнительных устройствах для перемещения золотника.

К этому типу исполнительных устройств относятся и электромагнитные реле, которые широко применяются в автоматике. Схема электромагнитного контактного реле с поворотным якорем показана на рис.12.2.

Реле с поворотным якорем состоит из магнитопровода 1, возвратной пружины 2, якоря 3, латунного штифта 4, предохраняющего залипание якоря, 7,8- контактной пары.

При прохождении по обмотке 5 постоянного тока в магнитопроводе 1 создается магнитный поток Φ , стальной якорь 3 притягивается к сердечнику 6, а при исчезновении тока пружина 2 возвращает якорь в исходное положение.

Когда происходит притягивание якоря, замыкается контактная пара 7,8, которая подает, например, напряжение U_{po} на рабочий орган (включение электродвигателя).

Контактных пар может быть несколько, причем они могут быть как замыкающиеся, так и размыкающиеся. Подачу напряжения U для срабатывания реле осуществляет система управления.

Электромагнитные реле переменного тока срабатывают при подаче на их обмотки переменного тока определенной частоты и конструктивно отличаются от реле постоянного тока только тем, что сердечник и якорь реле изготавливаются из листовой электротехнической стали для уменьшения потерь на гистерезис и вихревые токи. Реле переменного тока менее чувствительны и развивают меньшее электромагнитное усилие, чем реле постоянного тока.

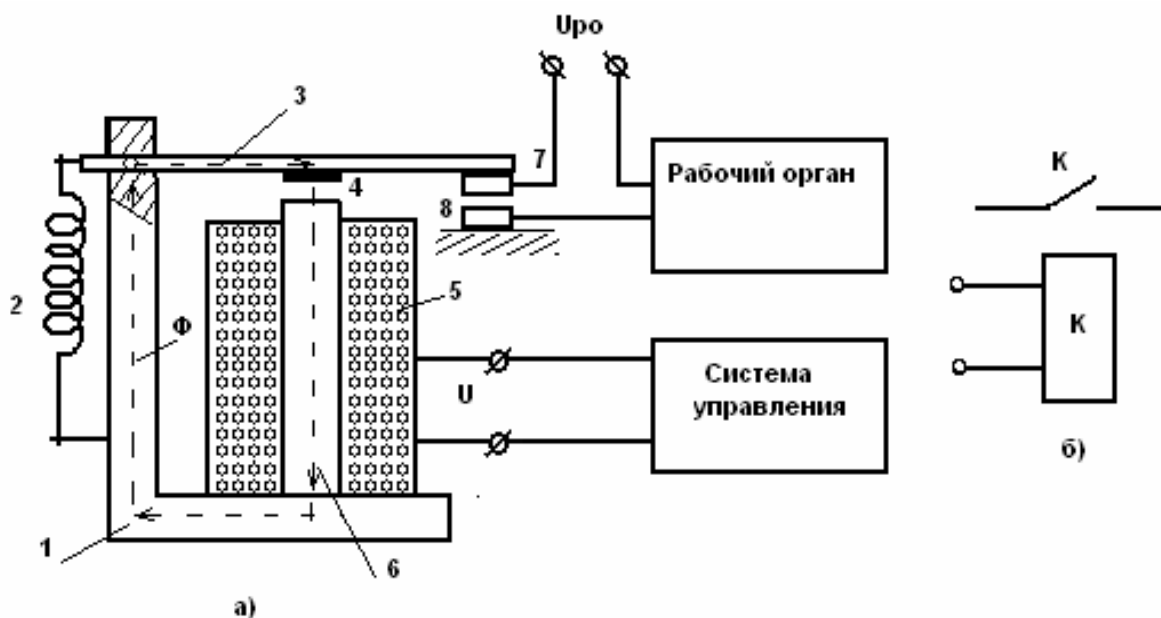


Рисунок 12.2 – Электромагнитное контактное реле (а) и схема его включения (б): 1- магнитопровод; 2- возвратная пружина; 3- якорь; 4- латунный штифт; 5- электрическая обмотка; 6- сердечник; 7,8- контактная пара.

Контакторы и магнитные пускатели (силовые реле) — это электромагнитные реле, которые имеют мощную контактную систему, служащую для замыкания и размыкания главных цепей двигателей и других устройств при автоматическом управлении.

Контакторы имеют главные контакты и вспомогательные, или блок-контакты, служащие для коммутации вспомогательных цепей сигнализации или цепей обмоток других контакторов, реле. Контакторы бывают постоянного и переменного тока, одно- и многополюсные.

Магнитные пускатели представляют собой контакторы, которые служат главным образом для дистанционного управления трехфазными асинхронными двигателями и делятся на нереверсивные и реверсивные.

Электродвигательные исполнительные устройства. В них используют электродвигатели постоянного и переменного тока. Большинство электродвигательных исполнительных устройств работает в режиме, когда скорость перемещения не зависит от величины отклонения регулируемого параметра от заданного значения.

Асинхронный электродвигатель. Асинхронный электродвигатель является машиной переменного тока, состоящей из статора и ротора.

Статор представляет собой полый цилиндр, составленный из листов электротехнической стали; листы имеют форму колец со штампованными пазами. В пазах, находящихся на внутренней поверхности цилиндра, укладывается статорная обмотка. Эта обмотка выполняется так, что при включении ее в сеть трехфазного переменного тока в расточке статора (внутри цилиндра) образуется магнитное поле, вращающееся вокруг оси статора с постоянной скоростью.

Ротор машины имеет вид цилиндра, набранного из круглых листов стали. У поверхности ротора вдоль его образующих расположены проводники, составляющие обмотку ротора. Проводники представляют собой замкнутые в кольцо провода, уложенные в пазы ротора. Обмотка ротора не связана с внешней электрической сетью — между ротором и статором имеется воздушный зазор.

У асинхронного двигателя движущий момент возникает в роторе как результат взаимодействия вращающегося магнитного потока с индуцируемыми им в роторе токами. Этот момент увлекает ротор в сторону вращения магнитного потока.¹

¹ Более подробно электродвигатели изучаются в курсе «Электрические машины»

Применяются трехфазные, двухфазные и однофазные асинхронные машины.

Схема управления трехфазным асинхронным короткозамкнутым электродвигателем приведена на рис 12,3.

Предохранители PR служат для защиты схемы от коротких замыканий и перегрева схемы управления. Двигатель М подключается к фазам АВС. Для защиты электродвигателя от значительных перегрузок, заклинивания ротора, а также от коротких замыканий во все фазы питания включаются катушки реле максимального тока КА₁, КА₂ и КА₃, а их размыкающие контакты КА₁, КА₂ и КА₃ соединяются последовательно с катушкой L магнитного пускателя напряжения сети питания через контакты электромагнитного пускателя КМ. Контакт управления КУ принадлежит системе управления и в зависимости от ее состояния может быть разомкнут или замкнут.

Приведенная схема может работать в ручном и автоматическом режиме.

При ручном управлении электродвигателем нажимается кнопка пуска S₂, в результате чего срабатывает магнитный пускатель КМ, который своими контактами подключает все три фазы питания через реле максимального тока КА₁, КА₂, КА₃ к двигателю М. Двигатель начинает работать и работает до тех пор, пока нажата кнопка S₂. В автоматическом режиме двигатель включает контактом КУ системы управления, который включен параллельно кнопке пуска S₂, и работает до тех пор, пока контакт КУ замкнут системой управления.

В случае возникновения аварийных режимов, например, остановки ротора вследствие увеличения механической нагрузки рабочего органа, увеличивается ток статора двигателя и срабатывают реле максимального тока КА₁, КА₂, КА₃, которые своими контактами отключают катушку магнитного пускателя КМ, а та в свою очередь своими контактами отключает все три фазы напряжения питания от электродвигателя.

Однофазные асинхронные двигатели. Однофазные асинхронные двигатели имеют одну статорную обмотку. Она выполняется аналогично одной фазе обмотки трехфазного статора, но заполняет не 1/3 окружности статора, а несколько большую часть – до 2/3 его окружности. Схема включения однофазного двигателя приведена на рис 12,4. В большинстве случаев для пуска однофазных двигателей предусматривается пусковая обмотка; она укладывается в пазах статора, свободных от рабочей обмотки, причем ось пусковой обмотки

ориентируется перпендикулярно оси рабочей обмотки. Пусковая обмотка включает через добавочное активное или реактивное сопротивление с тем, чтобы ток в ней был сдвинут по фазе относительно тока в рабочей обмотке РО. Две взаимно перпендикулярные обмотки, питаемые токами, сдвинутыми по фазе, создают вращающееся магнитное поле.

Наиболее благоприятны условия для получения вращающегося поля включением пусковой обмотки через конденсатор С. Под действием вращающегося поля двигатель разгоняется, затем пусковая обмотка отключается, так как она не рассчитана на длительный ток. Для пуска двигателя в обратном направлении необходимо поменять местами зажимы пусковой или рабочей обмотки.

Однофазные двигатели имеют значительно меньший коэффициент полезного действия. Поэтому они используются только в случаях, где требуется сравнительно небольшая мощность – единицы и десятки Ватт.

Промышленность выпускает асинхронные двигатели от единиц ватт до нескольких сотен киловатт на напряжение 220, 380, 660 В в различном исполнении: с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, многоскоростные.

Электродвигатели постоянного тока. Электродвигатели постоянного тока служат для привода различных установок и механизмов, в которых требуется простое и экономичное регулирование скорости вращения в широком диапазоне. Для получения энергии постоянного тока разработаны и широко применяются различные преобразователи переменного тока в постоянный.

Двигатель постоянного тока состоит из корпуса, на котором крепятся два диаметрально расположенные полюса с обмотками полюсов (возбуждения).

Полюса установлены таким образом, чтобы они вместе с корпусом составляли единую магнитную систему $N-S$. Вместо обмоток иногда применяют постоянные магниты. Внутри корпуса по его оси находится якорь-цилиндр с обмоткой, выходной вал которого вращается в подшипниках. Обмотка якоря представляет собой равномерно распределенные по окружности витки, концы которых выходят наружу и подсоединяются к источнику постоянного напряжения через коллектор.

Частота вращения якоря n зависит от напряжения на якоре $U_{я}$, магнитного потока Φ обмотки возбуждения, зависящего от напряжения, тока и сопротивления обмотки возбуждения:

$$n = U_{я} / k\Phi,$$

где k – конструктивная постоянная электродвигателя.

Электродвигатели постоянного тока могут выполняться с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением, рис. 12.5.

Независимое включение обмотки возбуждения предполагает отдельные источники питания для якоря U и обмотки возбуждения $U_{об}$. Обе обмотки включает независимо друг от друга: якорная обмотка через отдельные сопротивления $R_{я}$, обмотка возбуждения – через сопротивление $R_{об}$. Токи в обмотках, а значит и скорость и вращающийся момент двигателя могут регулироваться сопротивлениями независимо друг от друга.

При параллельном включении используется один источник питания U , а обе обмотки включается независимо друг от друга: якорная обмотка через отдельные сопротивления $R_{я}$, обмотка возбуждения – через сопротивление $R_{об}$. Требуется только один источник питания. Регулировки двигателя производятся друг от друга сопротивлениями $R_{я}$ и $R_{об}$.

При последовательном включении обе обмотки включается последовательно через сопротивление R . Регулировка токов обмотки и якоря и обмотки возбуждения производится одновременно.

Смешанное включение использует параллельное и последовательное включение обмоток одновременно.

В зависимости от способа включения обмотки возбуждения получают различные механические характеристики электродвигателя.

Вместо обмотки возбуждения при мощностях до нескольких десятков Ватт применяют постоянные магниты.

При отработке сигналов управления в автоматизированных системах часто приходится приводить в движение рабочие органы с большим начальным моментом сопротивления. Для этого в качестве исполнительных устройств используются высокомоментные двигатели.

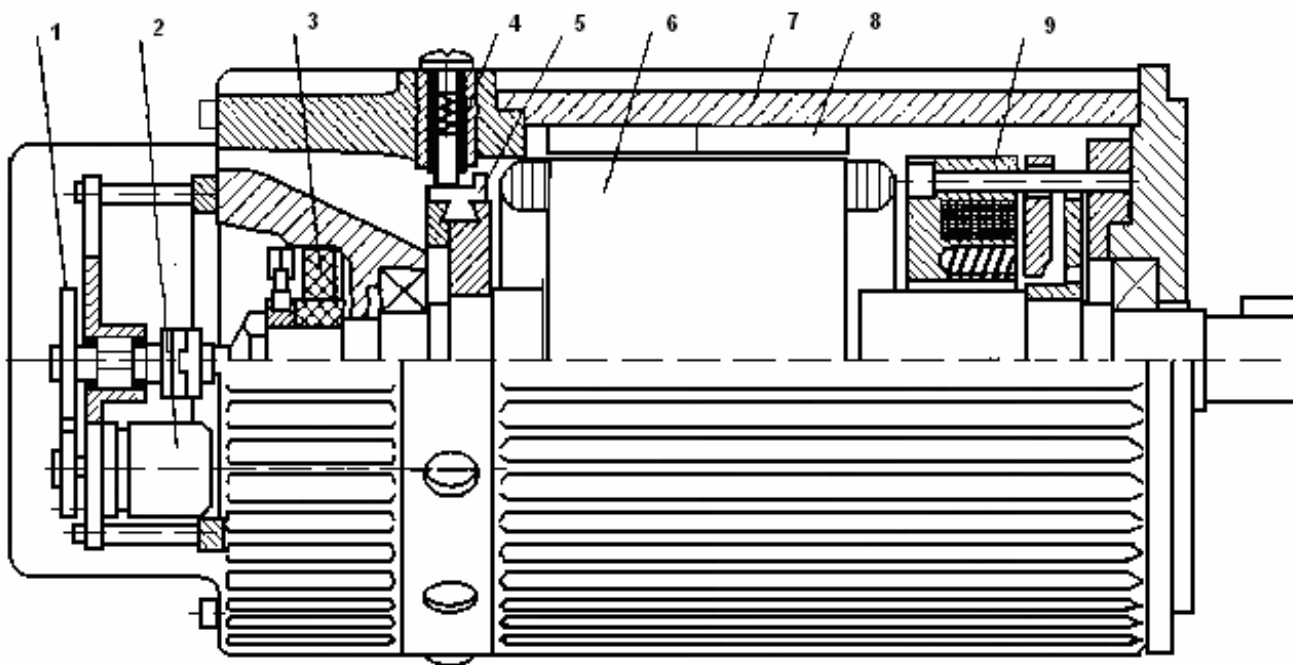


Рисунок 12.6 – Устройство высокомоментного двигателя: 1- механическая повышающая передача; 2- револьвер; 3- тахогенератор; 4- щетки; 5- коллектор; 6- якорь; 7- цилиндрический корпус; 8- ферритовые сегменты; 9- электромагнитный тормоз.

Конструкция высокомоментного двигателя с ферритовыми магнитами представлена на рис. 12.6. Ферритовые сегменты 8 многополюсной магнитной системы располагаются в цилиндрическом корпусе 7 и охватывают якорь 6. На валу двигателя для подачи электрического напряжения питания расположен коллектор 5 со щетками 4. Двигатель снабжен электромагнитным тормозом 9 для уменьшения холостого хода (выбега вала двигателя) и встроенным тахогенератором 3 для контроля скорости вращения двигателя. Для осуществления обратной связи по перемещению рабочего органа имеется револьвер 2, который связан с валом двигателя прецизионной повышающей передачей 1. Применение постоянных магнитов упрощает коммутацию электрического тока в машине и обеспечивает равномерное распределение магнитной индукции в зазоре. Двигатели сохраняют равномерное вращение на частотах до 0,1 об/мин., а время пуска и торможения – минимальны.

Гидравлические исполнительные устройства. Они преобразуют энергию потока рабочей жидкости в энергию механического движения поршня (поступательное движение) или ротора (вращательное движение) и состоят из двух элементов: управляющего и исполнительного.

Поток рабочей жидкости создается специальным гидравлическим насосом, приводимым в движение электрическим или иным двигателем.

В зависимости от вида управляющего элемента различают гидравлические исполнительные устройства с золотниковым и объемным регулированием.

Гидравлические исполнительные механизмы с объемным регулированием управляются за счет изменения производительности насоса, а золотниковые - с помощью перекрываемых отверстий. Золотник управляется электромагнитным приводом. Схема гидравлического исполнительного устройства приведена на рис.12.7.

Оно состоит из цилиндра 7 с поршнем 2, соединенным со штоком 4, который приводит в движение рабочий орган. Цилиндр имеет два отверстия 5 и 6 через которые насосом подается рабочая жидкость (масло). Масляный насос подает через отверстие 5 масло с расходом Q в полость цилиндра 1, которое создает в нем давление P_6 . Благодаря этому давлению поршень 2 перемещается вправо. При этом масло из полости 3 выходит через отверстие 6. Если масло подается в полость 3 через отверстие 6, то поршень под действием давления P_a перемещается влево.

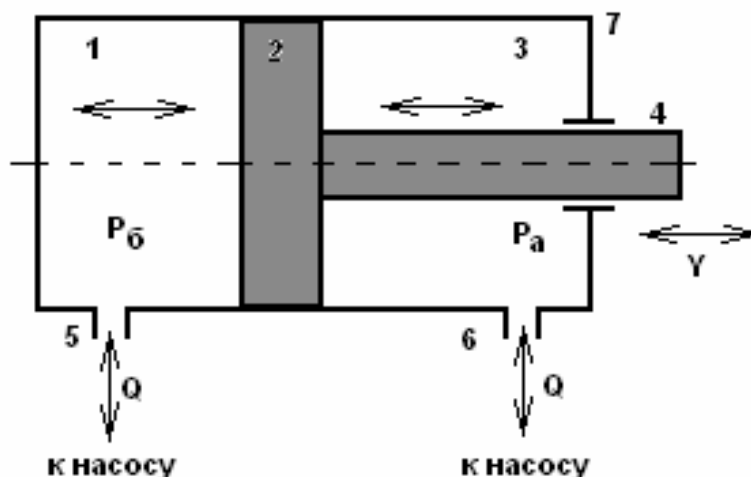


Рисунок 12.7 – Схема гидравлического исполнительного устройства: 1-левая полость; 2-поршень; 3- правая полость; 4- шток поршня; 5,6- вход рабочей жидкости; 7- цилиндр.

Скорость перемещения поршня исполнительного механизма зависит от площади F поршня и расхода Q рабочей жидкости. Вместо поршня используют иногда эластичную мембрану, закрепленную в центре цилиндра. Мембранные гидравлические исполнительные уст-

ройства имеют небольшой ход штока – не более нескольких сантиметров. Поршневые гидравлические исполнительные устройства могут иметь ход поршня до нескольких десятков сантиметров.

Гидравлические исполнительные устройства обладают очень большим быстродействием и выходной мощностью, потому их применяют в системах автоматизации мобильных машин и агрегатов. Усилия, развиваемые гидравлическими исполнительными устройствами, могут достигать нескольких десятков тонн. Однако их применение непосредственно в оборудовании переработки продукции иногда ограничивают по санитарным условиям – масло, используемое в подобных устройствах, может попасть непосредственно в пищевой продукт.

Пневматические исполнительные механизмы. По устройству аналогичны гидравлическим. Они получили распространение благодаря высокой надежности, простоте конструкции и возможности получения усилий до нескольких тонн. Усилия, развиваемые пневматическим приводом, сравнительно невелики. Это связано с тем, что силовое давление воздуха в промышленных пневмосетях составляет обычно 0,4...0,6 МПа.

Обычно используют поршневые и мембранные исполнительные механизмы, так как они просты по конструкции и имеют высокую надежность. По сравнению с электрическим приводом поступательного движения, развивающим те же усилия, пневмопривод значительно легче, дешевле и проще по конструкции.

Широкое внедрение технических средств пневмоавтоматики объясняется высокой пожаро- и взрывобезопасностью, надежностью и дешевизной.

Общие недостатки пневматических и гидравлических исполнительных устройств: сложность операций по их наладке и, главное, необходимость в специальных компрессорных (насосных) установках для их питания.

Контрольные вопросы к главе 12.

1. Определите назначение исполнительных устройств.
2. Определите назначение рабочего органа.
3. Перечислите известные вам виды исполнительных устройств.
4. Перечислите известные вам виды рабочих органов.
5. Опишите принцип работы электромагнитных исполнительных устройств.
6. Опишите принцип работы электродвигательных исполнительных устройств.
7. Назовите типы электромагнитных исполнительных устройств.

8. Какие электродвигательные исполнительные устройства вы знаете?
9. Перечислите элементы электромагнитного соленоидного привода.
10. Перечислите элементы электромагнитного реле.
11. Перечислите элементы магнитного пускателя.
12. Перечислите элементы высокомоментного двигателя.
13. Опишите принцип работы гидравлических исполнительных устройств.
14. Опишите принцип работы пневматических исполнительных устройств.
15. Назовите достоинства гидравлических исполнительных устройств.
16. Назовите недостатки гидравлических исполнительных устройств.
17. Назовите достоинства пневматических исполнительных устройств.
18. Назовите недостатки пневматических исполнительных устройств.

Часть 3. Микропроцессорные средства обработки информации в системах автоматике

Глава 13. Микропроцессорные средства и их использование в автоматике

13.1. Базовые средства микропроцессорной техники

В настоящее время микропроцессорные средства широко применяются для обработки информации в измерительных системах. Структурный состав в каждом конкретном случае определяется требованиями измерительной системы.

В простых случаях это может быть однокристалльный специализированный вычислитель, работающий по короткой неизменяемой программе.

В сложных случаях микропроцессорные средства объединяются в универсальную микро-ЭВМ, имеющую сложные аппаратные устройства и развитое программное обеспечение.

Примером может служить измерительно-вычислительная система (ИВС) на основе “*Pentium*”, оснащённая платой АЦП. При объёме ОЗУ в 32 мегабайт, жёстком диске до одного гигабайта и тактовой частоте 200 мегагерц, такая ИВС может удовлетворить большинству современных требований. Аналогично применяется портативная вычислительная система на основе “*Notebook*” с такими же вычислительными возможностями.

Для программирования задач обработки измерительной информации используется ассемблер и языки высокого уровня, например, *C/C++* со всеми известными на данный момент программными наборами.

Высокая степень интеграции во всех случаях позволяет выполнять микропроцессорные средства компактными, гибкими в настройке и надёжными в эксплуатации. На рис. 13.1. приведена обобщённая структура аппаратной части микропроцессора семейства 8086...80486. Отличительная особенность архитектуры микропроцессора характеризуется рядом структурных и схемотехнических решений, среди которых, прежде всего нужно выделить следующие:

1 - микропроцессор имеет развитую регистровую структуру, что даёт возможность снизить количество обращений к памяти;

2 - использование конвейерного принципа выполнения команд с предварительной выборкой обеспечивает максимальную пропускную способность канала;

3 - распределённое аппаратно-микропрограммное устройство управления позволяет совмещать операции выборки команд с арифметико-логическими операциями;

4 - мультиплексированный канал адреса и данных с разделением по времени, а также совмещение функций многих выводов управления в зависимости от конфигурации режимов использования позволяет значительно сократить число выводов центрального процессорного элемента ЦПЭ, т.е. решить компромиссную задачу между числом функций ЦПЭ и числом выводов.

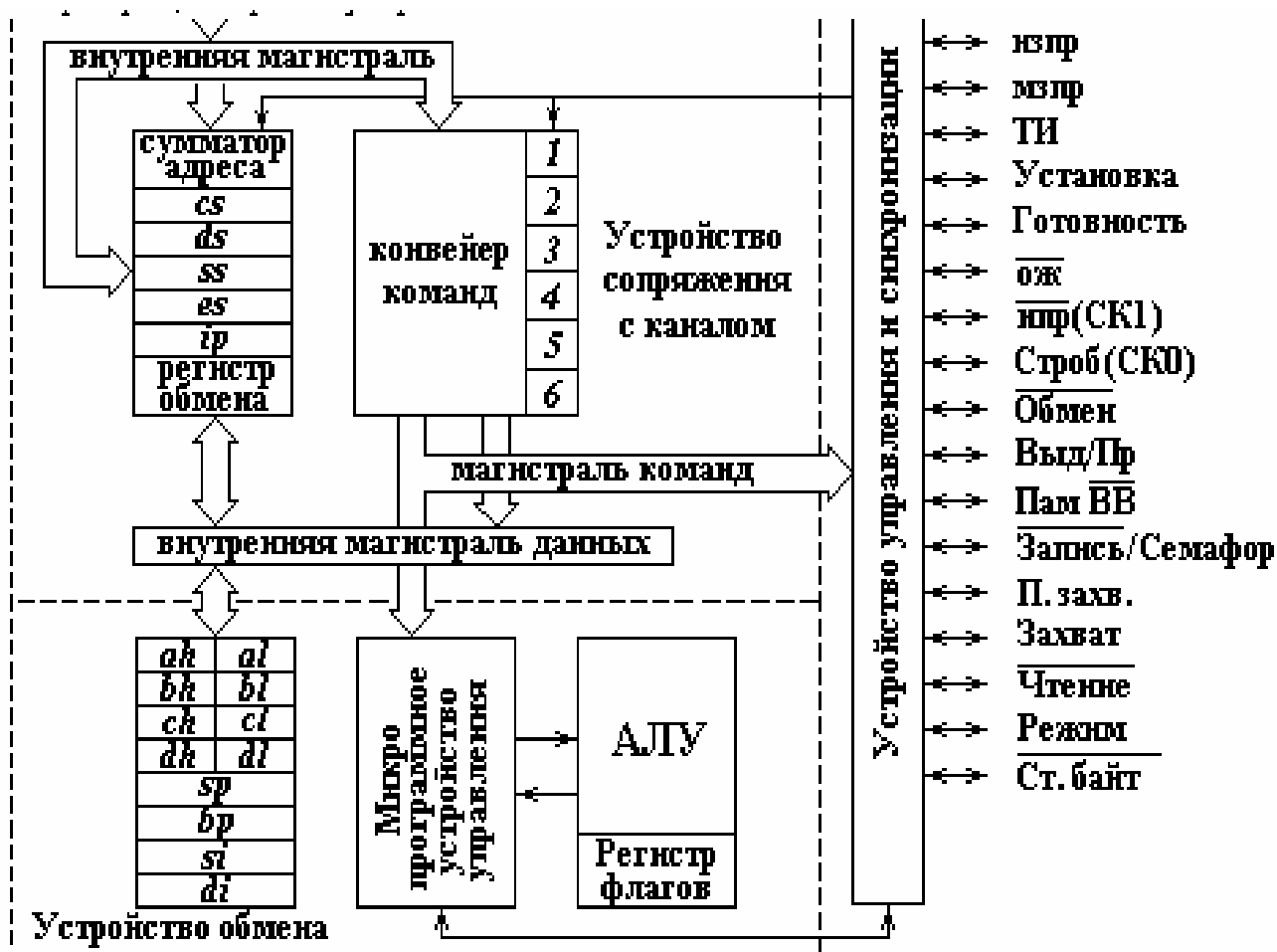


Рисунок 13.1 – Аппаратная часть микропроцессора

Микропроцессоры, стоящие на разных уровнях этого ряда отличаются друг от друга только разрядностью и методами технологических реализаций. В микропроцессорах этого ряда ЦПЭ разделён на два специализированных процессорных устройства: устройство об-

мена (УО) и устройство сопряжения с каналом (УСК). Это позволило совместить в командах следующие этапы:

- 1 - извлечение кодов и операторов команд из памяти;
- 2 - выполнение команд в операционном блоке;
- 3 - запись результата в регистры общего назначения или во внешнюю память микроЭВМ или выдача во внешние устройства.

Таблица 13.1 – Обозначение выводов микропроцессора

Номер вывода	Обозначение вывода	Функциональное назначение вывода
1, 20	Земля	Общая точка питания
2...16, 39	АД0...АД15	Канал адреса данных
17	нзпр	Немаскируемый запрос прерывания
18	мзпр	Маскируемый запрос прерывания
19	ТИ	Вход тактовых импульсов
21	Установка	Установка в начальное состояние
22	Готовность	Готовность внешних устройств для работы с ЦПЭ
23	$\overline{\text{ож}}$	Ожидание
32	чт	Чтение
33	Режим	Однопроцессорный - вывод соединён с $+U_{\text{пит}}$. Многопроцессорный - вывод соединён с землёй.
34	$\overline{\text{ст. байт}}$	Разрешение передачи старшего байта по каналу данных (сигнал состояния).
35...38	A19/C6, A18/C5, A17/C4, A16/C3	Линия канала адреса/сигналы состояния
40	$U_{\text{пит}}$	Напряжение питания +5 В.
Однопроцессорный режим		
24	$\overline{\text{ППр}}$	Подтверждение прерывания
25	Строб	Строб адреса
26	Обмен	Разрешение передачи данных
27	$\text{Выд} / \overline{\text{Пр}}$	Выдача/Приём данных
28	Пам/Пр	Память/внешнее устройство
29	$\overline{\text{запись}}$	Запись в память или ВВ
30	П.захв.	Подтверждение захвата
31	Захв	Захват
Многопроцессорный режим		
24, 25	СК1, СК0	Сигналы состояния конвейера команд
26, 27, 28	С0, С1, С2	Сигналы состояния цикла канала
29	Семафор	Канал занят
30, 31	П.захв., Захв	Запрос сопроцессоров/разрешение доступа к магистралам

Устройство обмена включает в себя 64, 32 (или 16 в зависимости от уровня в ряду) - разрядное арифметико-логическое устройство (АЛУ) с регистром признаков, восемь 64, 32 или 16 - разрядных регистров общего назначения (РОН) и микропрограммное устройство управления. Устройство сопряжения с каналом состоит из конвейера команд, представляющего собой очередь из шести регистров команд, регистра обмена и сумматора для вычисления адреса. Между собой УО и УСК соединены шиной данных и шиной команд. Координация и управление блоками ЦПЭ осуществляется общим блоком управления и синхронизации.

Устройство обработки предназначено для осуществления арифметико-логических операций с данными: сложения и вычитания, умножения и деления, инверсии, конъюнкции, дизъюнкции и тестирования операнда. Арифметические операции производятся с четырьмя различными типами представления чисел: двоичными числами со знаком и без знака, упакованными и неупакованными форматами чисел со знаком и без знака. Произведение и делимое представляются числами двойной длины.

Команды по запросам от УО выбираются из памяти и записываются в регистры конвейера команд УСК. Очередь команд из конвейера поступает по внутренней магистрали команд на вход микропрограммного устройства управления УО, где они декодируются, и вырабатывается последовательность микрокоманд, управляющая выполнением операций в соответствии с кодом команды. УО не имеет непосредственной связи с внешней магистралью вычислительной системы и обменивается данными посредством регистра обмена УСК.

Устройство сопряжения с каналом выполняет функции, связанные с формированием физического адреса памяти, выборку из памяти команд и операндов, формирование очереди в конвейере команд и запоминание в памяти результатов выполнения команд. После освобождения двух регистров конвейера УСК заполняет их следующими командами. Состояние конвейера команд индицируется специальными сигналами, выдаваемыми на внешние выводы СКО и СК1.

Однопроцессорный (минимальный) режим ЦПЭ обеспечивается посредством соединения вывода "Режим" с выводом $+U_{пит}$, а многопроцессорная конфигурация (максимальная) - посредством соединения этого вывода с "Землёй". В минимальном и максимальном режимах управления внешние выводы ЦПЭ несут различные функции, отмеченные в таблице 13.1.

С точки зрения программиста микропроцессор может быть представлен следующей совокупностью адресуемых регистров (рис. 13.2). Все программно-доступные регистры микропроцессора можно разделить на три группы.

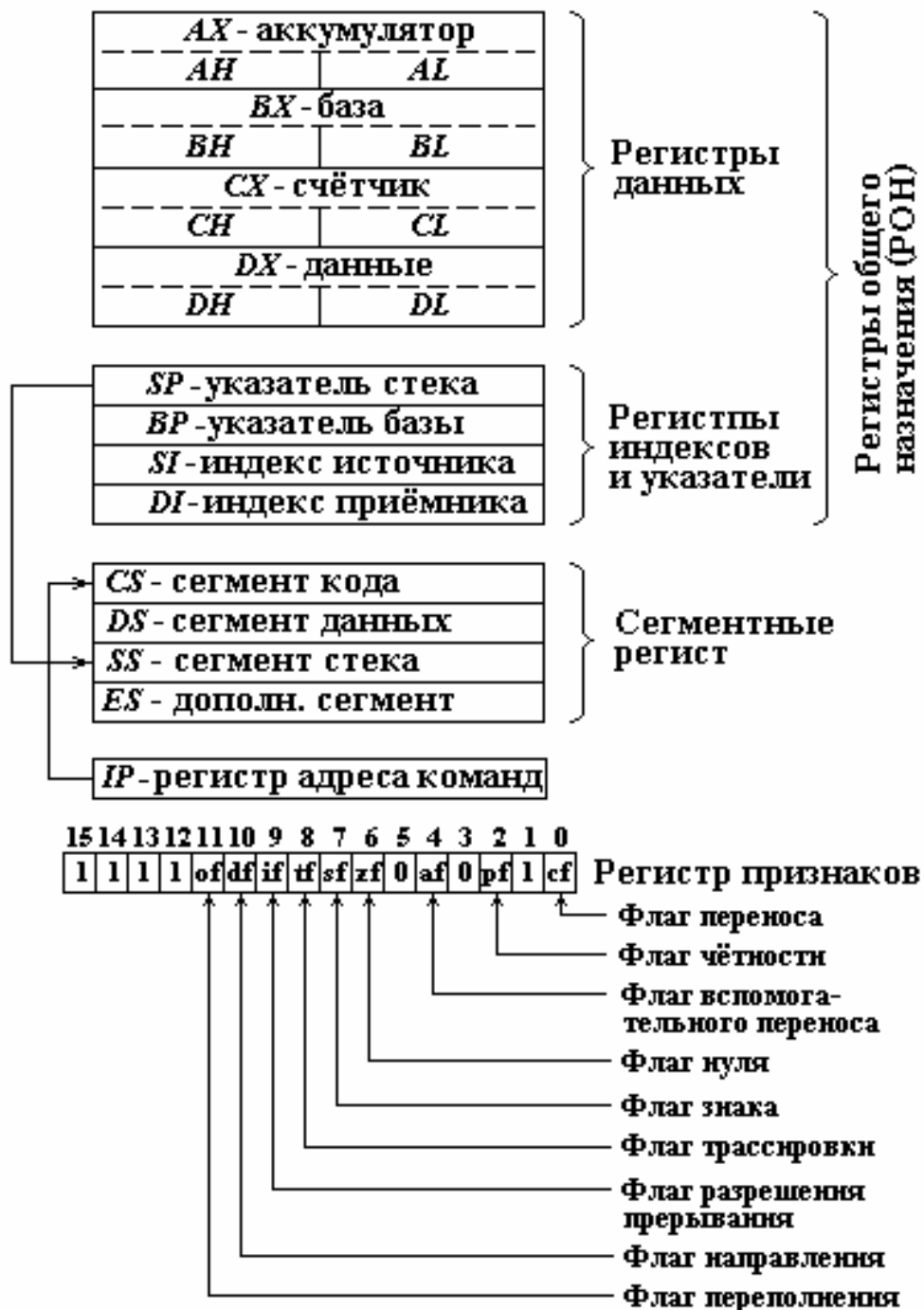


Рисунок 13.2 – Регистры микропроцессора.

К первой группе относятся регистры, предназначенные для временного хранения данных: 16-разрядный регистр - аккумулятор AX, 16-разрядный регистр базы BX, 16-разрядный регистр-счётчик CX и 16-разрядный регистр данных DX. Эти регистры допускают разделя-

ную адресацию старших *AH, BH, CH, DH* и младших *AL, BL, CL, DL* 8-разрядных регистров. Двойственный характер этих регистров обеспечивает простую обработку 8- и 16-разрядных данных. Все эти регистры могут одинаково использоваться при арифметико-логической обработке данных. Но имеется значительное число команд, которые специализируют регистры данных, что отражено в аббревиатуре их названий. Например, регистр *AH* выполняет функции аккумулятора, он является источником и получателем в операциях ввода-вывода, с ним связаны операции преобразования, десятичной коррекции, умножения и деления. Регистр *BH* в некоторых командах участвует как регистр базового адреса.

Регистр *CH* используется как счётчик в операциях с цепочками байт и слов, в операциях сдвигов и командах зацикливания. Наконец, регистр косвенной адресации для указания адресов портов ввода-вывода.

DH может неявно адресоваться в операциях умножения и деления, а также используется в режиме хранения информации.

Ко второй группе относятся регистры *SI* и *DI* и указатели *SP* и *BP*, предназначенные для извлечения информации из сегментов памяти. Содержимое этих регистров задаёт смещения в сегментах при определении логических адресов. Это позволяет компактно писать программы каждый раз непосредственно, не приводя используемого адреса. Обычно в индексных регистрах записывается адресное смещение по отношению к сегменту данных, а в указателях - адресное смещение по отношению к стековому сегменту.

Несмотря на то, что регистры специализированы и каждый имеет своё мнемоническое обозначение, они могут участвовать в арифметико-логических операциях как регистры общего назначения, что придаёт гибкость при программировании

К третьей группе относятся сегментные регистры: 16-разрядный регистр начального адреса сегмента кода *CS*, 16-разрядный регистр начального адреса сегмента данных *DS*, 16-разрядный регистр начального адреса сегмента стека *SS* и 16-разрядный регистр начального адреса дополнительного сегмента *ES*.

Коды команд извлекаются из сегмента текущего кода с использованием смещения, задаваемого 16-разрядным регистром адреса команд *IP*, а операнды команд обычно извлекаются путём записи специального однобайтного префикса перед командой. Префикс позволяет отличать операнд от кода команды.

Микропроцессор имеет 16-разрядный регистр признаков, девять разрядов которого задействованы для флагов состояний, а остальные семь не используются, т.е. заполнены постоянными нулями или единицами. По функциональным признакам флаги состояний можно разделить на две категории: флаги, характеризующие результат, и флаги, предназначенные для управления режимами ЦПЭ. Выполнение какой-либо операции в ЦПЭ может ставиться в зависимость от результата выполнения предыдущей операции. При этом флаги признаков результата могут быть установлены в нуль или единицу и содержать сведения об информации, обмениваемой между АЛУ и аккумулятором.

Одним из важнейших признаков является признак переноса, изображаемый флагом *CF*. При сложении или умножении многоразрядных чисел флаг *CF* показывает, нужно ли переносить единицу в младший разряд следующего байта или слова, а при вычитании или делении этот флаг показывает, нужно ли занимать единицу в следующем байте или слове.

Вычитание в микропроцессоре выполняется преобразованием отрицательных чисел в дополнительный код и последующим их сложением, поэтому функции переноса и заем одни и те же.

Разновидностью признака переноса является признак вспомогательного переноса, изображаемый флагом *AF*. Этот флаг участвует при работе с числами, кодированными в двоично-десятичном коде. Независимо от причин, порождающих перенос из третьего разряда в четвёртый в каждой тетради чисел, участвующих в арифметических операциях, возникновение этого переноса говорит о необходимости применения десятичной коррекции.

Признак нуля отмечает случай появления в АЛУ после выполнения какой-либо операции нулевого результата и изображается флагом *ZF*. Признак нуля используется для программной реализации счётчиков циклов, а также для сравнения двух чисел на равенство.

Признак знака необходим для различения положительных и отрицательных чисел и изображается флагом *SF*. Старший знак любого числа всегда несёт информацию о знаке: 0 - положительное число, 1 - отрицательное. При наличии единицы во флаге *SF* числа автоматически преобразуются в дополнительный код. Значение флага *SF* участвует в арифметических операциях наравне со значащими разрядами чисел.

Признак переполнения изображается флагом *OF* и предназначается для автоматического контроля длины слова и её адаптации к воз-

можному переполнению разрядной сетки. Наличие единичного значения во флаге SF свидетельствует о том, что результат больше длины разрядной сетки и необходимо последовательное увеличение длины слова. В микропроцессоре предусмотрена возможность неограниченного увеличения длины слов данных при последовательном наращивании по байту или по слову.

Признак чётного паритета изображается флагом PF и применяется для выявления одиночных ошибок при передаче информации между блоками микро-ЭВМ. Флаг устанавливается равным единице, если в результате операции общее число единиц является чётным. При нечётном числе единиц в результате в сопровождающем контрольном бите устанавливается единица, так что при контроле передаваемый результат всегда является чётным. В случае нарушения чётности передаваемой информации вычисление длины автоматически прекращается. Сигналом для этого является нулевое значение во флаге PF .

Флаг DF определяет направление сканирования массива в операциях цепочками, а флаг IF выполняет функцию маскирования внешних прерываний. Прерывания воспринимаются между командами, причём запросы по входу маскируемых прерываний “мзпр” воспринимаются только при условии, что флаг IF имеет единичное значение.

Флаг TF применяется для организации пошагового выполнения команд программ при их отладке. При установке флага $TF=1$ микропроцессор сразу после выполнения любой текущей команды автоматически формирует прерывания. Следующая команда выполняется подачей сигнала на вход готовности.

Системе команд микропроцессора с классифицирована в традиционные для микропроцессоров группы по функциональным признакам: команды пересылок, арифметические команды, команды поразрядной обработки данных, строковые команды, команды передачи управления и команды управления микропроцессором. Системе команд разработана с учётом опыта программирования микропроцессоров предыдущих серий, она позволяет повысить производительность, сократить трудоёмкость программирования, обеспечить проектирование измерительно-вычислительных систем.

Обобщённый алгоритм (рис. 13.3.) ИВС представляет совокупность функционально связанных между собой частных алгоритмов, реализующих единую задачу обработки информации с требуемой точностью. Основными особенностями ИВС является использование

в них методов цифровой обработки информации, оптимальных алгоритмов оценивания измеряемых процессов.

13.2. Системы сбора информации с датчиков на базе микроЭВМ

Для автоматизированного сбора и обработки электрических сигналов, поступающих с различного рода датчиков (температуры, давления, частоты вращения, счетчиков количества жидкости или газа, вибрации и т.п.) широко используются компьютерные системы, оснащенные преобразователями таких сигналов в цифровую форму (АЦП, таймерами/счетчиками, коммутаторами и др.).

Эти системы конструируются на базе одноплатных микроЭВМ, наиболее совершенными из которых на настоящее время являются так называемые микроРС. В состав микроРС входит материнская плата IBM-совместимого компьютера, уменьшенная в несколько раз, оснащенная современным мощным и быстродействующим процессором X86. С материнской платой сопрягается плата, предназначенная для сбора сигналов с датчиков, которые удалены от компьютера.

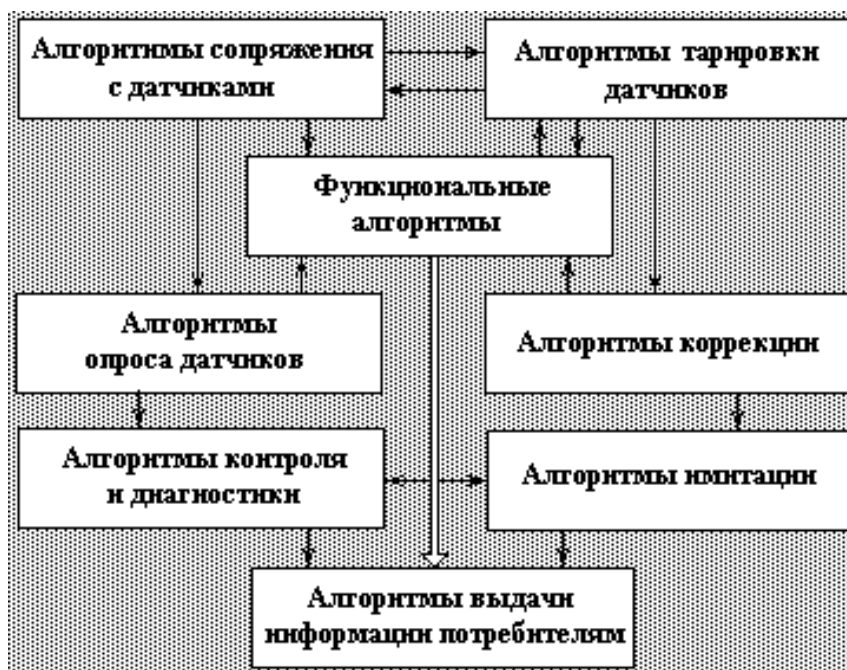


Рисунок 13.3 – Обобщенный алгоритм ИВС.

С компьютером микроРС обычно сопрягается с помощью какого-либо последовательного интерфейса. Удаленные системы сбора на базе одноплатных микроРС не лишены недостатков, одним из которых является очень высокая стоимость самой микроРС (как

минимум равная стоимости стандартного IBM-совместимого компьютера, а подчас в несколько раз больше).

Применение таких удаленных систем целесообразно лишь в случае сбора сигналов с очень большого количества датчиков (100 и более), когда требуется высокоскоростная обработка поступающих сигналов. В случае, когда сигналов немного - десятки или даже единицы, применять системы на базе микроРС нецелесообразно.

С другой стороны, существует масса задач, где как раз и требуется именно удаленная компьютерная система сбора сигналов с небольшого количества датчиков. Здесь на помощь приходят однокристалльные микроЭВМ.

Однокристалльные микроЭВМ - микрокомпьютеры, расположенные в одной микросхеме. В состав такой микроЭВМ входят основные атрибуты компьютера - память, процессор, различные периферийные устройства, интерфейсы (например, для связи с другим компьютером). В последнее время в такую микросхему стали встраивать даже многие атрибуты систем сбора (АЦП, счетчики и генераторы импульсов, параллельные и последовательные порты и др.). Стоимость однокристалльных микроЭВМ невысокая. Они не обладают такими колоссальными быстродействием и памятью, как микроРС, но это от них и не требуется.

Применение однокристалльных микроЭВМ в удаленных системах сбора сигналов с небольшого количества датчиков наиболее целесообразно и оптимально.

Основная идея применения однокристалльных микроЭВМ в удаленных системах сбора заключается в том, что программа их работы передается в нее из компьютера по последовательному интерфейсу (кабелю), а результаты работы этой программы передаются в компьютер по этому же кабелю и полноценно обрабатываются компьютером.

Удаление системы сбора от компьютера может достигать десятков и даже сотен метров; при этом, поскольку передача информации осуществляется в цифровом виде, потерь информации нет.

Структурная блок-схема подобной системы приведена на рис.16.4.

Основой системы является устройство сбора и предварительной обработки аналоговых и частотных сигналов, к которому подсоединяются кабели от датчиков, и которое сопрягается с компьютером с помощью оптронной развязки на максимальное пробивное напряжение до 3000 вольт. В устройстве применяется однокристалльный

микроконтроллер со встроенным АЦП. Устройство содержит внешнюю память программ и данных.

Отличительная особенность системы сбора - ее программируемость, т.е. возможность оперативного изменения программы однокристалльного микроконтроллера, которая передается из компьютера и записывается в память. Это позволяет приспособлять устройство сбора к самым различным задачам (т.е. оно достаточно универсально). Программное обеспечение, написанное на компьютере, также может легко изменяться, и поэтому вся система сбора является исключительно гибкой в программном отношении и может использоваться для самых различных целей.

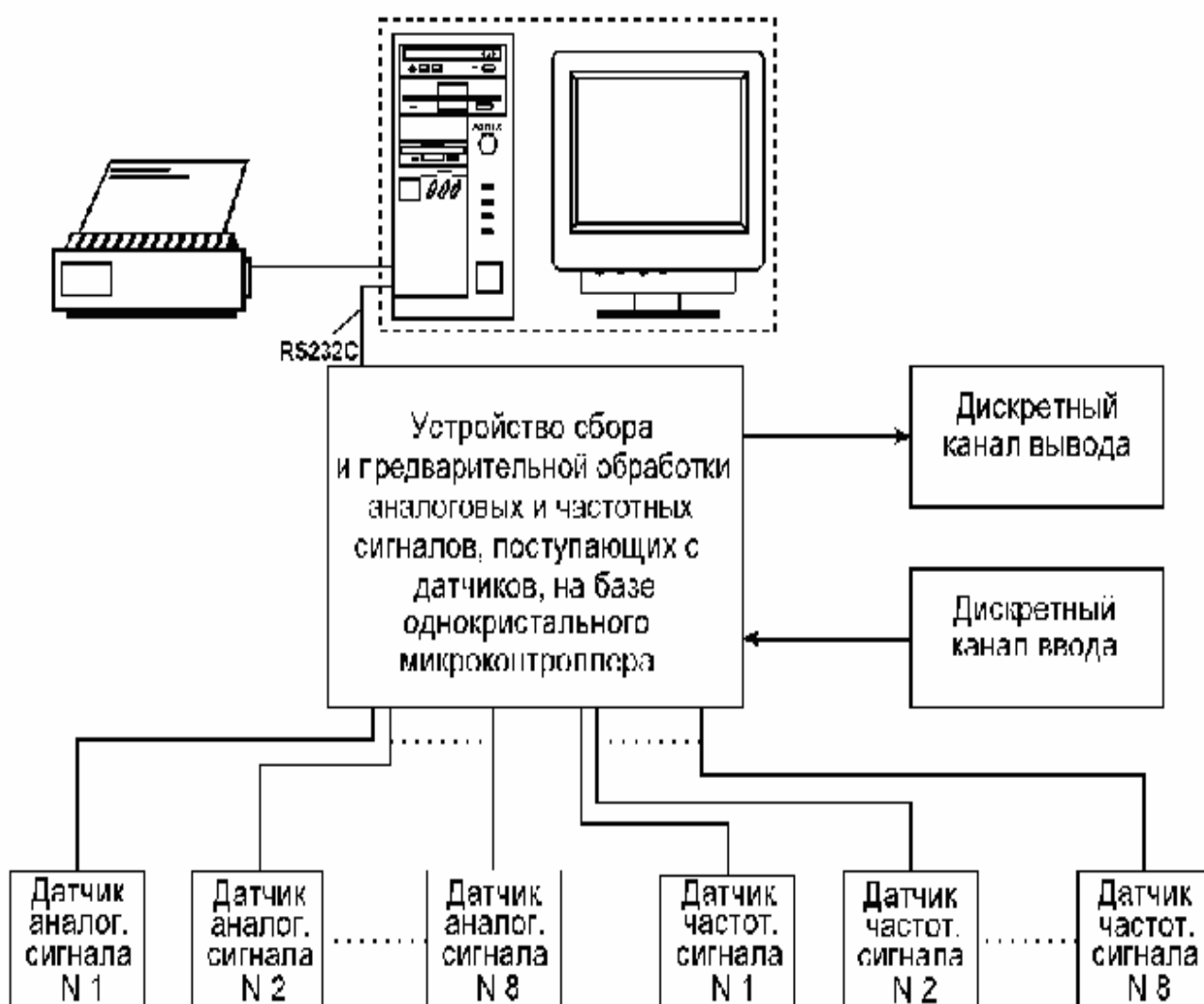


Рисунок 13.4 – Структурная блок-схема удаленной компьютерной системы измерения, регистрации и обработки сигналов.

Контрольные вопросы к главе 13.

1. Из каких устройств состоит микропроцессор?
2. Для чего необходимо устройство обмена?
3. Что такое регистр?
4. Что такое микропрограммное устройство управления?
5. Что такое шина данных?
6. Что такое шина команд?
7. Каким устройством осуществляется координация работы блоками микропроцессора?
8. Для чего предназначено устройство обработки?
9. Какие арифметико-логические операции с данными выполняет устройство обработки?
10. Для чего необходимо устройство сопряжения с каналом?
11. Какие группы регистров существуют в микропроцессоре?
12. Для чего необходимы регистры, предназначенные для временного хранения данных?
13. Для чего необходимы регистры сегментов памяти?
14. Что такое сегментный регистр начального адреса?
15. Что такое обобщенный алгоритм работы микропроцессора?
16. Для чего необходим аккумулятор микропроцессора?
17. Для чего используются микроРС?
18. Какими дополнительными элементами должны быть снабжены датчики для подачи их сигнала в микропроцессор?
19. Определите назначение интерфейса в системе сбора информации с датчиков?
20. Почему для удаленных систем сбора информации целесообразно применять однокристалльные микропроцессорные средства?
21. Как вы понимаете гибкость микропроцессорной системы сбора информации?

Глава 14. Программируемые регуляторы

Для контроля и управления технологическими процессами все большее применение находят многофункциональные микропроцессорные программируемые регуляторы.

Центральным узлом подобного цифрового устройства является микроЭВМ, которая через свои устройства ввода-вывода обменивается информацией с периферийными узлами. С помощью этих дополнительных узлов осуществляется сопряжение микроЭВМ (микропроцессора) с внешней средой: датчиками исходной информации, объектом управления, оператором и т.д. В реальном устройстве может использоваться несколько микропроцессоров, каждый из которых занят решением отдельного фрагмента общей задачи с целью обеспечения высокого быстродействия.

Непременными узлами любого цифрового устройства являются:

- входные и выходные преобразователи сигналов;
 - тракт аналого-цифрового преобразования;
 - кнопки управления и ввода информации от оператора;
 - дисплей для отображения информации;
 - коммуникационный порт для связи с другими цифровыми устройствами.
- блок питания.

Основные функции вышеперечисленных узлов следующие.

Входные преобразователи. Они обеспечивают гальваническую развязку внешних цепей от внутренних цепей устройства. Одновременно входные преобразователи осуществляют приведение контролируемых сигналов к единому виду (как правило, к напряжению) и нормированному уровню. Здесь же осуществляется предварительная частотная фильтрация входных сигналов перед их аналого-цифровым преобразованием. Одновременно принимаются меры по защите внутренних элементов устройства от воздействия помех и перенапряжений.

Сигналы, контролируемые устройствами входными средствами автоматики, имеют, в общем случае, разную физическую природу - ток, напряжение, температуру и т.д.

При подключении микропроцессорных устройств к традиционным датчикам тока и напряжения требуется приведение их сигналов к единому виду и диапазону изменения, приемлемому для обработки электронными узлами.

Практически во всей современной электронной аппаратуре ввод дискретных сигналов осуществляется через преобразователи на основе оптронов. Собственное время переключения у оптронов составляет доли микросекунды. Для оптрона характерна малая проходная емкость, что препятствует проникновению помех по этому пути. Допустимое напряжение между цепью управления и элементами управляемой цепи достигает нескольких киловольт, а рабочий ток светодиода составляет 3-5 мА.

Различают преобразователи аналоговых и логических входных сигналов.

Первые стремятся выполнить так, чтобы обеспечить линейную (или нелинейную, но с известным законом) передачу контролируемого сигнала во всем диапазоне его изменения.

Преобразователи логических сигналов, наоборот, стремятся сделать чувствительными только к узкой области диапазона возможного нахождения контролируемого сигнала.

Выходные преобразователи. Воздействия на объект управления традиционно осуществляются в виде дискретных сигналов управления. При этом выходные цепи устройства выполняют так, чтобы обеспечить гальваническую развязку коммутируемых цепей, как между собой, так и относительно внутренних цепей системы управления.

Несмотря на очевидные достижения электроники в области коммутации высоких потенциалов и сильных токов в цифровых реле, в большинстве случаев по-прежнему используются промежуточные электромагнитные реле. Контактная пара пока еще остается вне конкуренции, как единственное устройство, обеспечивающее видимый разрыв в коммутируемой цепи. К тому же это и самое дешевое решение.

Как правило, в цифровых устройствах применяются несколько типов малогабаритных реле: с большей коммутационной способностью - для работы непосредственно в цепях управления выключателей, с меньшей - для работы в цепях сигнализации. Мощные реле способны включать цепи с током порядка (5-30)А, но их отключающая способность обычно не превосходит 1А при напряжении 220В. Отключающая способность сигнальных реле обычно не превышает 0,15 А в цепях постоянного тока напряжением 220 В.

Помимо электромагнитных реле в выходных цепях широко применяются также мощные транзисторы на токи 10-30 А и тиристоры.

Тракт аналого-цифрового преобразования включает мультиплексор и собственно аналого-цифровой преобразователь - АЦП.

Мультиплексор - это электронный коммутатор, поочередно подающий контролируемые сигналы на вход АЦП. Применение мультиплексора позволяет использовать один АЦП (как правило, дорогостоящий) для нескольких каналов.

В АЦП осуществляется преобразование мгновенного значения входного сигнала в пропорциональную ему цифровую величину. Преобразования выполняются с заданной периодичностью во времени. В последующем по этим выборкам из входных сигналов в микро-ЭВМ рассчитываются интегральные параметры контролируемых сигналов - их амплитудные или действующие значения.

Блок питания обеспечивает стабилизированным напряжением все узлы рассматриваемого устройства независимо от возможных изменений напряжения в питающей сети. Как правило, в нем формируется ряд дополнительных сигналов, исключающих неправильную работу ЭВМ и некоторых других электронных узлов устройства в момент появления и исчезновения напряжения питания.

Дисплей и клавиатура. Они являются непременными атрибутами любого цифрового устройства, позволяя оператору получать информацию от устройства, изменять режим его работы, вводить новую информацию.

Для отображения информации используются и отдельные светодиодные индикаторы, и табло, и даже графические экраны. Для простоты совокупность элементов визуального отображения информации называют дисплеем.

Дисплей должен обеспечивать быстрое и однозначное представление информации. Наилучшим образом этим требованиям удовлетворяют простые дисплеи в виде светодиодных индикаторов. С другой стороны, цифровое устройство защиты - это устройство, которое способно предоставить оператору очень большой объем информации.

В некоторых устройствах применяются цифро-буквенные многострочные табло, что обеспечивает удобство считывания информации. Такие табло выполняются на основе жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ). Основными недостатками ЖКИ-дисплеев являются относительно низкая контрастность изображения и неработоспособность при низких температурах. Однако невысокая стоимость и легкость управления ЖКИ способствуют их широкому применению.

Порт связи с внешними цифровыми устройствами. Достоинством цифровых устройств является возможность передачи имеющейся информации в другие цифровые системы: АСУ ТП, персональный компьютер и т.д., что позволяет интегрировать различные системы, экономя на каналах связи, затратах на предварительную обработку сигналов и т.п. Коммуникационный порт - необходимый элемент для дистанционной работы с данным устройством.

Наряду с вышеперечисленными, в цифровых устройствах, в общем случае, могут встретиться и другие узлы. Например, цифро-аналоговые преобразователи при формировании аналоговых сигналов управления и регулирования.

Практически вся обработка информации в цифровом устройстве осуществляется внутри микроЭВМ по определенному алгоритму, реализованному в виде программы работы этой ЭВМ.

Цифровые устройства подобного типа (вместе с датчиком) имеют погрешность (2-5)%. С учетом этой погрешности и выполняются дисплеи - с возможностью отображения лишь трех-четырех значащих цифр.

В цифровых устройствах используются в основном два способа представления величин - в именованных единицах (вольтах, амперах, градусах, метрах, килограммах и т.д.) и в относительных. Оперативному персоналу удобнее работать с именованными величинами, отражающими реальные значения токов, напряжений и других параметров технологического процесса. Но это требует занесения дополнительной информации - коэффициентов преобразования датчиков, а на дисплей необходимо дополнительно выводить размерность отображаемой величины. Альтернативным решением является представление всех величин в относительных единицах или процентах. Чаще всего за базисные единицы принимают номинальные значения контролируемых величин.

В последнее время применение сложного дисплея становится менее актуальным. Современные цифровые устройства, как правило, предусматривают подключение к компьютеру, и вся необходимая информация может в любой удобной форме быть представлена на привычном дисплее компьютера.

Кнопки управления или клавиатура являются неотъемлемыми элементами связи человека с цифровым устройством. С помощью клавиатуры можно изменить режим работы устройства, вызвать на

дисплей интересующие параметры и величины, ввести новые уставки и т.д.

Число кнопок, используемых в клавиатурах различных устройств, варьируется от двух до десяти. Чем больше кнопок в клавиатуре, тем удобнее и быстрее можно вводить информацию в устройство. Однако кнопки являются наиболее ненадежными элементами цифровой аппаратуры. Поэтому там, где пользоваться клавиатурой приходится крайне редко, стремятся использовать минимальное число кнопок. Минимальное число кнопок клавиатуры, позволяющее вводить любую информацию, равно двум.

Для хранения рабочей программы обычно используются постоянные запоминающие устройства - ПЗУ. Отличительной чертой ПЗУ является однократная запись информации. В последующем возможно только считывание записанной информации. Достоинством микросхем ПЗУ является их низкая стоимость и возможность хранения информации при отключенном питании.

Рабочая программа может располагаться в перепрограммируемом постоянном запоминающем устройстве – ППЗУ с энергонезависимой памятью, т.е. хранимая в ней информация не разрушается в обесточенном состоянии.

Для временного хранения результатов промежуточных вычислений используются оперативные запоминающие устройства (ОЗУ). Существенным недостатком ОЗУ является разрушение информации при отключении питания.

Для хранения уставок и других параметров, которые приходится изменять в процессе эксплуатации, используются ППЗУ, допускающие многократное изменение уставок. До появления этих микросхем уставки хранились либо в аналоговом виде, как некое регулируемое опорное напряжение, либо в ОЗУ с независимым источником питания. В таких устройствах применяют специальные малопотребляющие микросхемы и литиевые батареи, имеющие срок службы 5-6 лет.

Одним из таких регуляторов является регулятор МПР-51. Структура прибора МПР51 приведена на рис.14.1.

Прибор имеет 5 входов для контроля температуры, влажности и положения задвижек. Три входа предназначены для подключения термодатчиков (тип – ТСМ, ТСП, ТХА, ТХК) и два входа для датчиков положения задвижек трубопроводов. Прибор измеряет влажность психрометрическим методом, поэтому один из термодатчиков используется в качестве влажного термометра

Прибор имеет 2 канала регулирования по Т, П, ПД или ПИД-закону, которые позволяют поддерживать заданные значения влажности, температуры или скорости ее нарастания, а также режим D-варки (поддержания разности между температурой в сердцевине продукта и в шкафу).

На выходе прибора имеются восемь ключей с открытым коллектором для сигнализации о выполняемом шаге программы и 5 двухпозиционных реле с нормально разомкнутыми контактами. Одно реле сигнализирует об аварии («реле тревоги») или об окончании технологического процесса, когда измеряемые параметры выходят за программно заданные пределы. Четыре других реле управляют исполнительными устройствами.

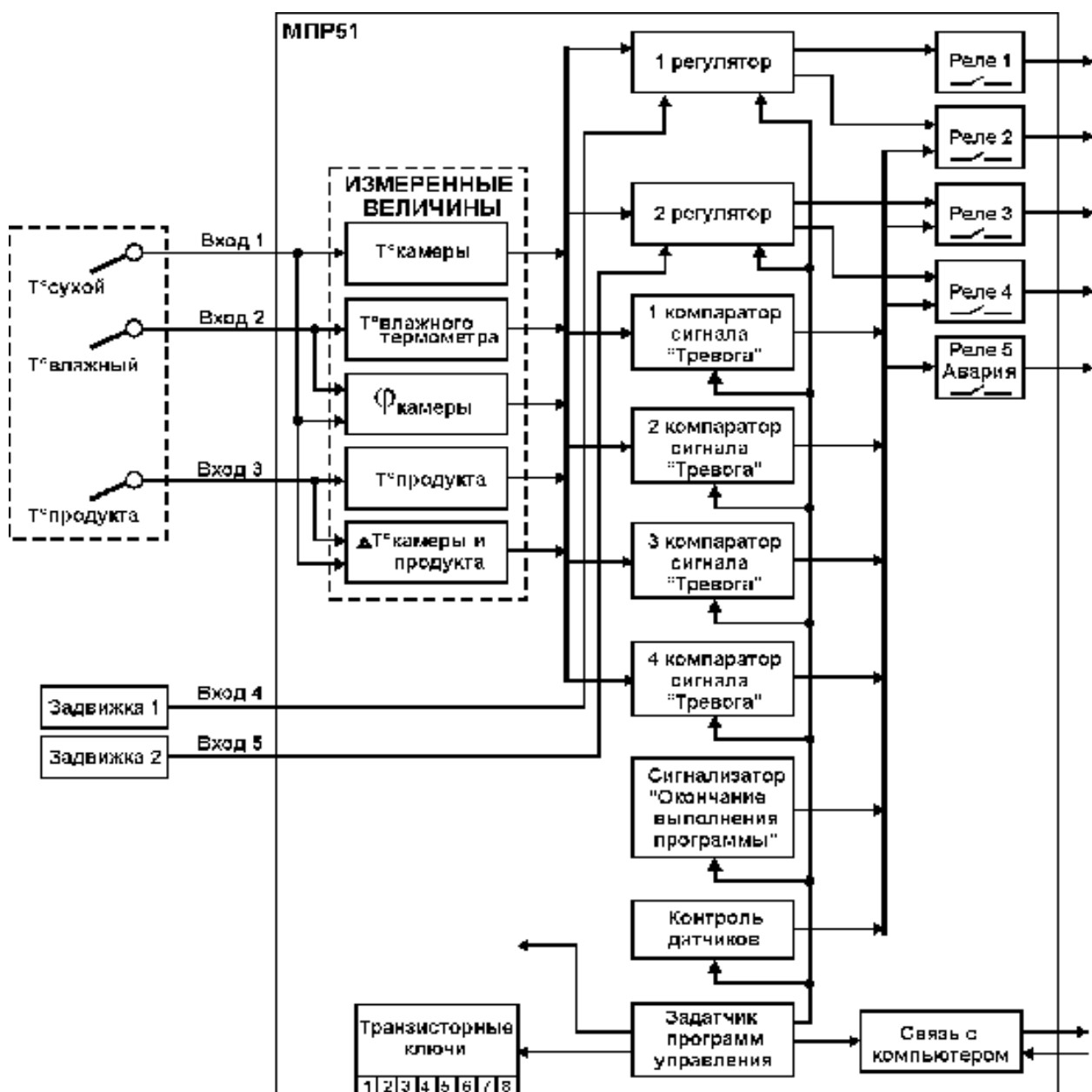


Рисунок 14.1 – Структура прибора МПР51.

Управление исполнительными устройствами осуществляется по одной из 16 хранящихся в памяти прибора программ, в каждой из которых можно задать от одного до восьми однородных участков – шагов.

При выполнении программы переход к следующему шагу осуществляется либо по времени, либо по достижении заданной уставки. Оператор имеет возможность оперативно выбрать нужную программу и шаг, с которого ее необходимо запустить. Имеется возможность временной остановки или перезапуска выполняемой программы. Изменение хранящихся в памяти прибора программ, коэффициентов настройки регуляторов, переконфигурирование прибора под необходимый тип датчиков возможно только через пароль, что исключает несанкционированный доступ к энергонезависимой памяти прибора.

Прибор может использоваться в хлебопекарнях для поддержания режима в расстоечных шкафах, в печах для выпечки хлеба; на мясо- и рыбокомбинатах для обеспечения технологического процесса в камерах варки и копчения, в камерах созревания, в универсальных климатических камерах, в камерах сушки древесины и т.д.

Сигналы от термодатчиков обрабатываются сначала аппаратно, а затем программным способом и в качестве измеренных величин поступают на входы регуляторов и компараторов. Входных сигналов от термодатчиков три, а измеренных величин - пять. Дополнительно вычисляются относительная влажность и разность температур 1-го и 3-го входов (камеры и внутри продукта).

Сигналы с входов 4 и 5, информирующие о положении задвижки, используются в качестве вспомогательных для повышения качества процесса регулирования, когда в качестве исполнительных механизмов используются запорнорегулирующие вентили.

За каждым регулятором закреплено по два выходных реле. При двухпозиционном регулировании, второе реле может быть использовано для сигнализации срабатывания одного из четырех компараторов "Тревога".

На входы регуляторов можно подать любую измеренную величину. Для компараторов "Тревога" можно задавать закон функционирования:

- срабатывание по верхнему пределу;
- по нижнему пределу;

- по нижнему и верхнему пределам ("окно" и "коридор").

Также задается время задержки срабатывания и длительность сигнала "Тревога". На вход любого из 4-х компараторов можно подать любую измеренную величину. На выход любого из компараторов можно подключить реле 5 или любое не участвующее в регулировании реле 1, 2, 3, 4. Возможно подключение выходов сразу нескольких компараторов на одно реле.

Устройство "Контроль датчиков" проверяет датчики на обрыв или короткое замыкание. Сигнал об одном из этих событий можно вывести на любое свободное в процессе регулирования реле.

Сигнализатор "Окончание выполнения программы" сигнализирует о моменте окончания программы регулирования. Этот сигнал можно подключить к любому свободному от процесса регулирования реле.

Прибор имеет восемь транзисторных ключей (n-p-n) с открытым коллектором. На каждом шаге программы может замыкаться один транзисторный ключ. Номер транзисторного ключа, замкнутого на данном шаге, задается при программировании.

В приборе имеется возможность связи с ЭВМ. Специальная программа позволяет опрашивать температурные каналы с определенной периодичностью и выводить полученные данные на принтер или на экран в табличном или графическом виде.

Прибор может находиться в двух основных режимах - "РАБОТА" и "ПРОГРАММИРОВАНИЕ".

Режим "РАБОТА" - это основной режим, в котором происходит выполнение выбранной программы управления технологическим процессом.

Режим "ПРОГРАММИРОВАНИЕ" - это режим, в котором осуществляется задание ("написание") программ для технологических процессов, настройка параметров регуляторов и компараторов и конфигурирование прибора под конкретный объект.

При перебоях в электроснабжении прибора параметры регулирования сохраняются в памяти прибора в течение 1 часа. После возобновления питания выполнение программы может быть продолжено или остановлено с выдачей сигнала "Авария", что задается специальными параметрами. Прибор сохраняет информацию о прерванном процессе регулирования до одного часа.

Многофункциональные программируемые регуляторы – это приборы, позволяющие управлять многоступенчатыми технологическими процессами при производстве мясных и колбасных изделий, в хлебопекарной промышленности, обжиге металлов, изготовлении железобетонных конструкций.

Требуется поддержание определенных температуры и влажности на каждой стадии процесса, а на некоторых стадиях - плавное возрастание и снижение этих параметров. Кроме того, требуется включение дополнительных устройств в процессе выполнения технологического процесса. Пример использования прибора МПР51 для процесса сушки древесины приведен на рис.14.2.

Процесс сушки древесины состоит из нескольких этапов, во время которых поддерживаются постоянными температура и влажность в камере сушки. Все этапы имеют определенную длительность. Для поддержания заданной температуры в камере установлен теплоэлектронагреватель – ТЭН. Пар для увлажнения подается через запорно-регулирующий вентиль. В камере установлены 2 датчика – влажности и температуры. Один поддерживает необходимую на каждом шаге температуру в камере, управляя ТЭНом через реле 1 по двухпозиционному (включено/выключено) закону. Второй поддерживает влажность путем выдачи на реле 3 и реле 4 управляющих импульсов "больше-меньше" для привода запорно-регулирующего вентиля.

Текущее значение влажности вычисляется психрометрическим методом по температуре сухого и влажного термометра. После окончания процесса выдается сигнал заданной длительности на реле 5.

В примере, изображенном на рис. 14.3, прибор МПР51 использован для управления процессом термообработки и копчения мясопродуктов в коптильной камере.

В камере находятся 3 датчика температуры – сухой датчик температуры, влажный датчик температуры и датчик температуры мяса. Регулирование температуры ведется при помощи реле 1, 2, а влажности при помощи реле 3, 4. Для включения дополнительных устройств – дымогенератора и вентилятора – используются соответственно транзисторные ключи 2 и 1.

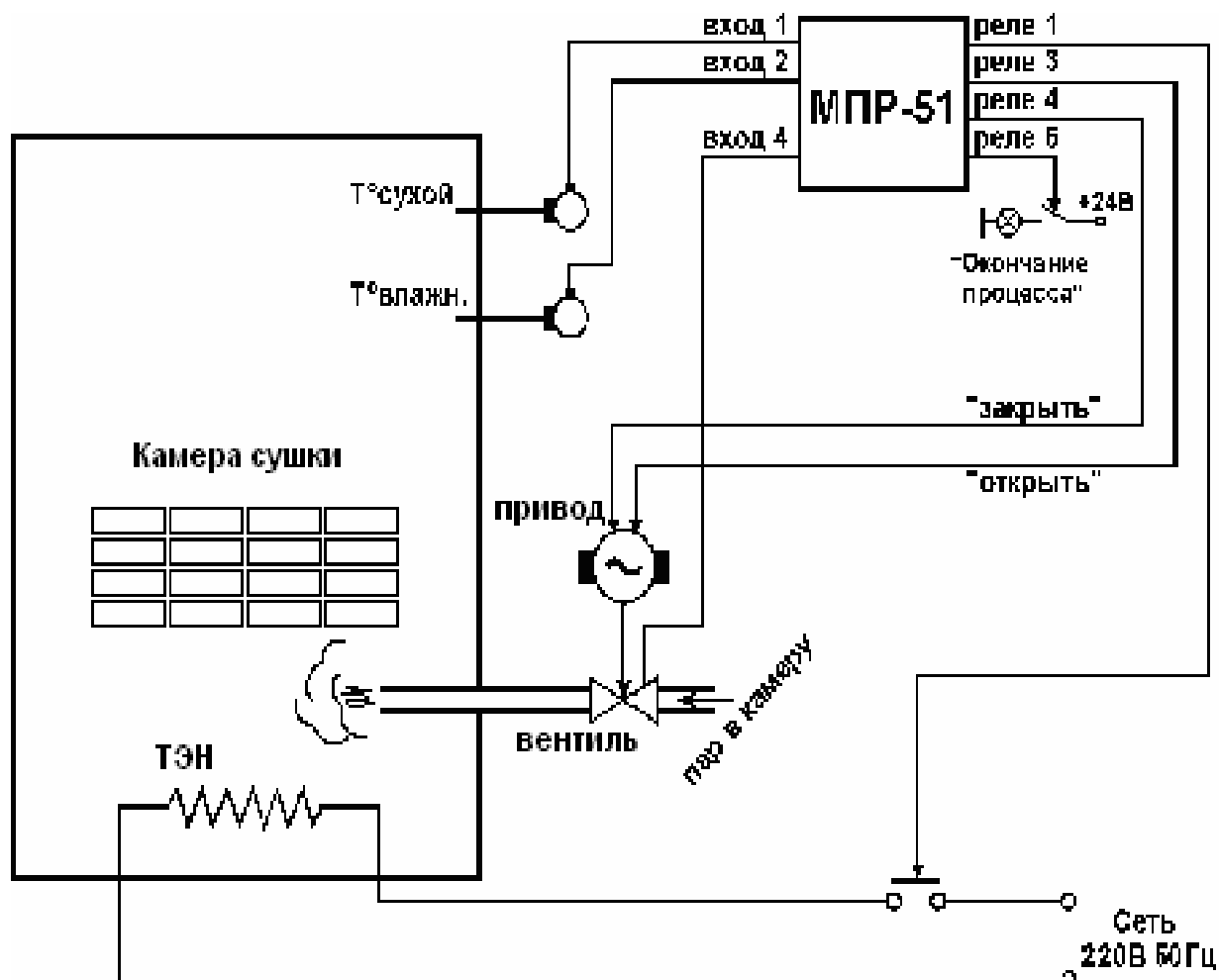


Рисунок 14.2 – Сушка древесины под управлением МПП-51.

Другим примером микропроцессорной техники для управления объектами являются регуляторы температуры серии ТРМ (ТРМ-4, ТРМ-5) и др.

Микропроцессорный регулятор температуры ТРМ-4 обеспечивает измерение температуры среды, в которую помещен термочувствительный датчик, последующее отображение результатов измерения на четырехразрядном жидкокристаллическом индикаторе и двухпозиционное регулирование данной температуры с помощью внешнего нагревателя в соответствии с введенными оператором величинами заданной температуры $T_{уст}$ и допустимого отклонения ΔT .

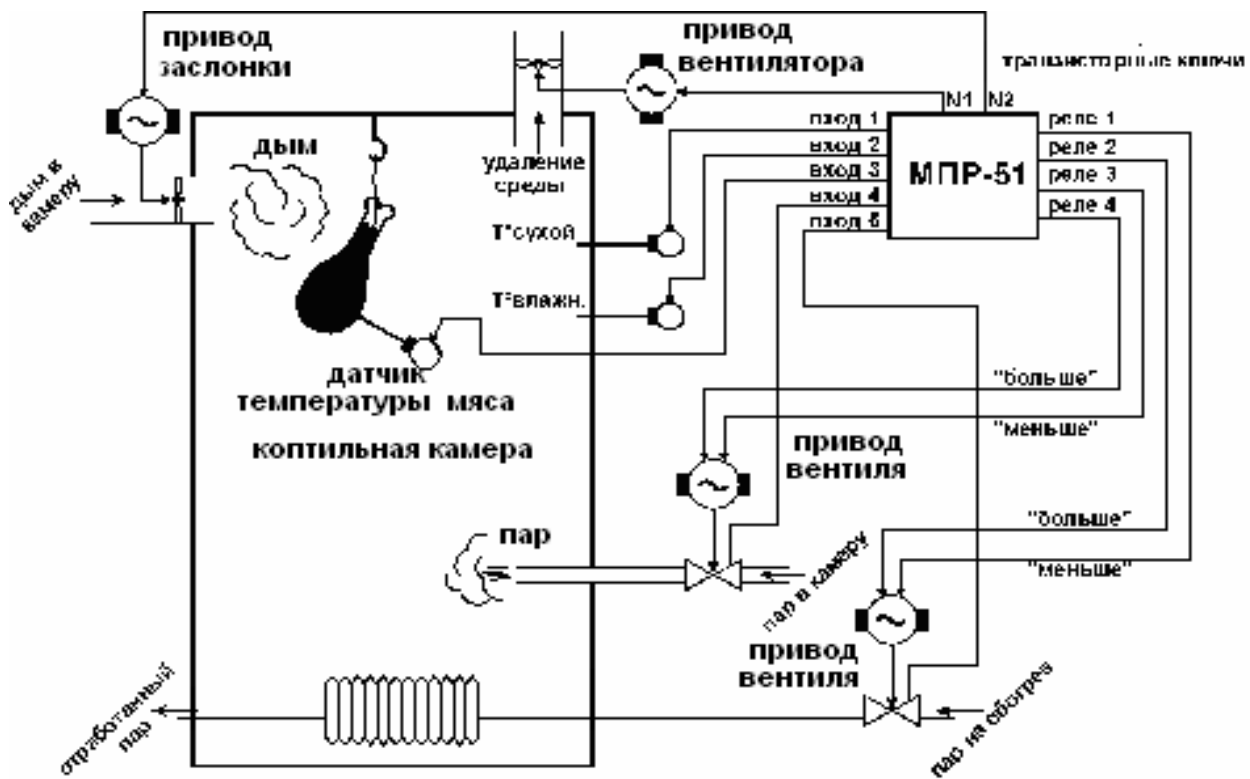


Рисунок 14.3 – Управление режимами копчения мяса.

Рассмотрим упрощенную схему прибора ТРМ-4, приведенную на рис.14.4.

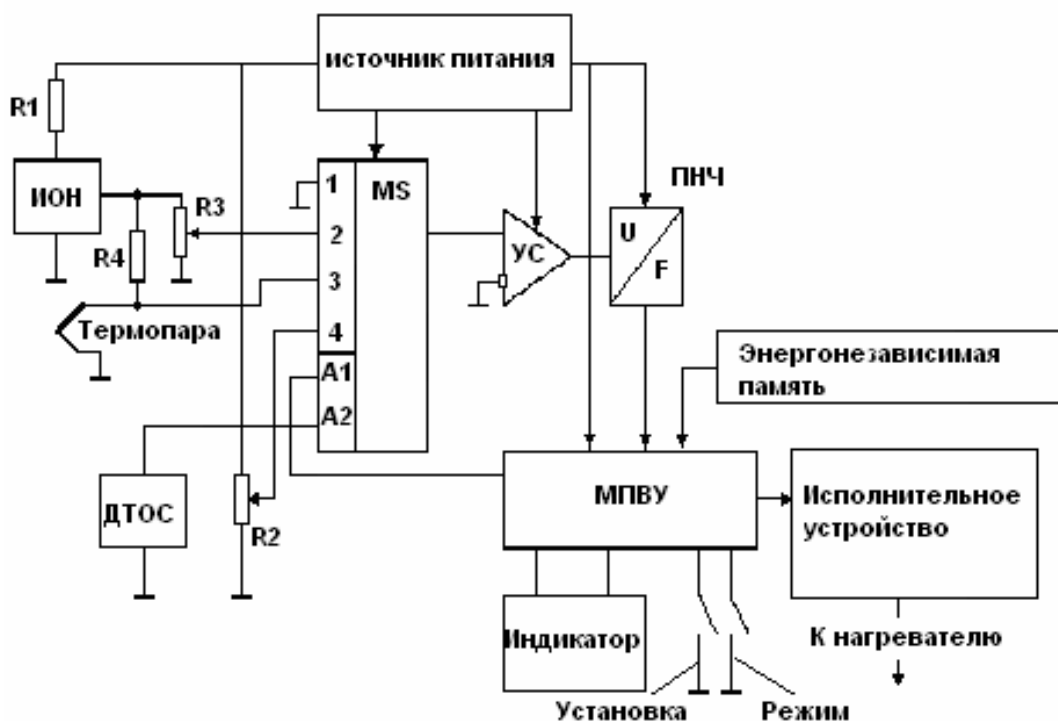


Рисунок 14.4 – схема прибора ТРМ4.

Центральным узлом прибора является микропроцессорное вычислительное устройство МПВУ. Оно обеспечивает управление всеми составными частями схемы: выработку сигналов управления аналоговой частью измерителя; обработку результатов измерения и выдачу их на индикатор; ввод значения заданной температуры и допустимой погрешности с помощью набора кнопок и управление исполнительным ключевым устройством, включающим нагреватель.

В терморегуляторе ТРМ-4 МПВУ реализовано на основе однокристалльной микроЭВМ фирмы Intel.

Программа, обеспечивающая функционирование данного микропроцессора в составе терморегулятора ТРМ-4, записывается во внутреннее ПЗУ микросхемы.

Для обеспечения работоспособности прибора без вмешательства оператора в случае периодического отключения электропитания предусмотрено наличие энергонезависимого электрически перепрограммируемого запоминающего устройства EEPROM. Оно предназначено для хранения заданных значений температуры объекта регулирования $T_{уст}$, величины ее допустимого отклонения ΔT и некоторой служебной информации, необходимой для перезапуска процессора.

Служебная информация представляет из себя некоторое контрольное число, значение которого зависит от наличия или отсутствия сбоев в работе процессора при предшествующих запусках. Если ранее произошел сбой (или если производится первый запуск микропроцессора в работу по данной программе), то микропроцессор сам запишет в соответствующие ячейки EEPROM некоторые заранее заданные значения параметров регулирования. Если же значение контрольного числа указывает на отсутствие сбоев, то микропроцессор считает записанные ранее значения параметров регулирования верными и в дальнейшем использует их в работе.

Микропроцессор сравнивает получаемые в результате измерения значения текущей температуры объекта с хранящимся в памяти заданием и на основании результатов сравнения управляет работой силовых ключей. При этом реле, коммутирующее силовые цепи внешнего нагревателя, будет замкнуто, когда измеряемая температура объекта $T_{об} = T_{уст} - \Delta T$, и это реле выключится при достижении значения $T_{об} = T_{уст} + \Delta T$.

Таким образом, устанавливается периодический процесс включения и отключения нагревателя, который обеспечивает поддержание

средней температуры объекта регулирования вблизи заданного значения $T_{уст}$.

Для осуществления процесса измерения микропроцессор выдает последовательность адресных кодов, обеспечивающих управление переключением каналов мультиплексора MS.

Так как величины измеряемых напряжений малы, то для полного использования динамического диапазона преобразователя их необходимо усилить. Для этого используется усилитель УС. Кроме того, большое входное сопротивление усилителя позволяет исключить влияние ненулевого сопротивления ключей на величину напряжения на выходе мультиплексора. С выхода усилителя сигнал поступает на вход преобразователя напряжения в частоту ПНЧ.

Преобразователь служит для преобразования аналоговых величин измеряемых напряжений в цифровую форму, необходимую для обработки в микропроцессоре. В приборе ТРМ-4 ПНЧ выполнен на микросхеме КР1108ПП1. На выходе преобразователя возникает последовательность частот, каждая из которых прямо пропорциональна напряжению источника сигнала, выбираемого переключением каналов мультиплексора.

При подаче на адресные входы мультиплексора адреса «1» вход усилителя оказывается соединенными с общим проводом. При этом на выходе усилителя вырабатывается некоторое напряжение, характеризующее реальные погрешности схемы измерителя.

Источниками таких погрешностей могут служить токи утечки ключей мультиплексора, входные токи и напряжения смещения ОУ, пульсации напряжений питания, временные и температурные дрейфы параметров компонентов и т.д. При этом на выходе ПНЧ будет выработана частота $F_{погр}$, в значении которой будут учтены все вышеперечисленные факторы. В дальнейшем это позволит при вычислении значения температуры объекта скомпенсировать влияние этих факторов.

При подаче на адресные входы мультиплексора адреса «2» на вход усилителя будет подано напряжение с источника образцового напряжения (ИОН), а с ПНИ – частота $F_{обр}$. Точное значение этого напряжения устанавливается резистором R_1 при регулировке прибора.

При подаче адреса «3» ко входу усилителя подключено напряжение, поступающее с термопары. При этом на выходе ПНЧ будет вырабатываться импульсный сигнал с частотой $F_{изм}$.

И наконец, при подаче адреса «4» ко входу усилителя будет подключено напряжение с датчика температуры опорного спая (ДТОС), а с ПНИ – частоту $F_{\text{комп}}$. Конкретная величина этого напряжения устанавливается резистором R_2 в процессе калибровки прибора.

Микропроцессор постоянно производит циклическую смену адресов мультиплексора. В результате с выхода ПНЧ на специальный счетный вход микропроцессора поступают периодически повторяющиеся импульсные последовательности с частотами $F_{\text{погр}}$, $F_{\text{обр}}$, $F_{\text{изм}}$ и $F_{\text{комп}}$. После каждой смены адреса микропроцессор отсчитывает некоторый защитный интервал времени, необходимый для завершения переходного процесса в преобразователе, а затем переходит к измерению поступающей частоты. Измерение частоты происходит путем подсчета количества импульсов на калиброванном интервале времени. Длительность этого интервала стабилизирована кварцевым резонатором тактового генератора микропроцессора и равна приблизительно 1 сек.

В результате измерения частот, поступающих на счетный вход, микропроцессор получает численные значения (они соответствуют числу импульсов за образцовый интервал времени): $N_{\text{погр}}$, $N_{\text{обр}}$, $N_{\text{изм}}$ и $N_{\text{комп}}$ соответственно.

Далее для вычисления значения измеряемой температуры микропроцессор производит с этими числами следующее преобразование:

$$T_{\text{об}} = \frac{N_{\text{изм}} - N_{\text{погр}}}{N_{\text{оп}} - N_{\text{погр}}} + \frac{N_{\text{комп}} - N_{\text{погр}}}{N_{\text{оп}} - N_{\text{погр}}} 1000 - 273.$$

Здесь величины $N_{\text{обр}}$, $N_{\text{изм}}$ и $N_{\text{комп}}$ - это значения числа импульсов соответствующих частот, которые получились бы в случае применения идеального преобразователя, не содержащего погрешностей. Поэтому вычитание величины $N_{\text{погр}}$ позволяет скомпенсировать влияние погрешностей схемы на результаты измерения. Умножение на 1000 необходимо для получения реального значения температуры, выводимого на индикатор, т.к. максимальная измеряемая температура +1300°C (для термопары ТХА). Вычитание 273 необходимо для перевода показаний датчика температуры холодного спая к шкале Цельсия.

Оператор может управлять работой регулятора с помощью двух кнопок. Нажатием кнопки «Режим» прибор последовательно переводится в режимы записи значений заданной температуры $T_{\text{уст}}$, преде-

лов ее допустимого отклонения DT и величины корректирующей поправки (о назначении этой поправки будет сказано далее). При этом значения задаваемых параметров высвечиваются на индикаторе.

Управление процессом записи осуществляется с помощью кнопки «Установка». При однократном ее нажатии выбранная цифра изменяет свое значение на единицу, а длительное удержание в нажатом состоянии обеспечивает последовательный выбор других цифр. Для удобства работы оператора замыкание внутреннего исполнительного реле прибора отображается зажиганием светодиода «Нагрев».

Если по каким-либо причинам при эксплуатации прибора будет выявлено наличие систематической погрешности измерения (например, из-за плохого теплового контакта между объектом и датчиком), то такую погрешность можно компенсировать за счет дополнительно вводимой оператором поправки. Значение этой поправки вводится в режиме «Коррекция» и хранится в EEPROM наряду с другими параметрами регулирования.

Схема процесса пастеризации молока, выполненное прибором ТРМ4, приведено на рис.14.5.

Пастеризация молока осуществляется в пластинчатой автоматизированной установке. Обработка молока осуществляется в два этапа: предварительная обработка в секции регенерации, окончательный нагрев до 76°C и выдержка в секции пастеризации.

В секции регенерации использованы теплообменники для передачи тепла от готовой продукции сырому молоку. В секции пастеризации подача тепла осуществляется водой, подогреваемой паром.

Для автоматизации этого двухступенчатого процесса обработки могут быть использованы три двухпозиционных терморегулятора ТРМ-4.

По первому каналу осуществляется регулирование подачи тепла от котельной: ТРМ-4-1 через промежуточное реле подает команды запирающему вентилю с электромагнитным приводом для управления подачей пара.

По второму каналу ТРМ-4-2 через промежуточный пускатель управляет регулирующим трехходовым клапаном с электрическим исполнительным механизмом. При закрытом клапане молоко направляется в нормализованную ванну, а при достижении 76°C переключается на трубопровод для выхода готового продукта.

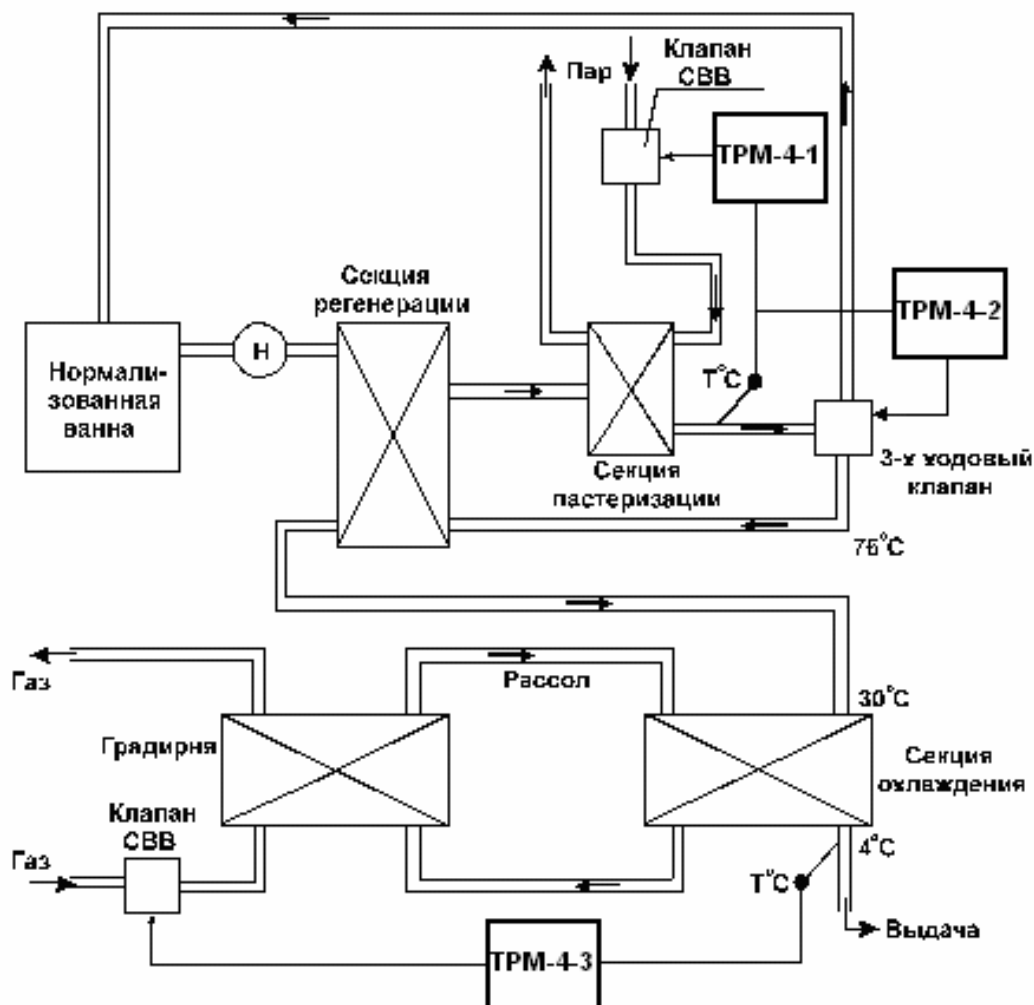


Рисунок 14.5 – Блок-схема процесса пастеризации и охлаждения молока

Затем в охлаждающей секции при помощи рассола продукт охлаждается до температуры 4...6°C. Этим процессом управляет другой терморегулятор ТРМ-4-3, который через промежуточное реле дает команду запирающему вентилю СВВ. Затем готовое молоко из танка поступает на линию упаковки в промежуточную емкость, где сигнализатор уровня жидкости контролирует степень наполнения резервуара.

Контрольные вопросы к главе 14.

1. Перечислите узлы многофункционального микропроцессорного программируемого регулятора.
2. Перечислите функции входного преобразователя.
3. Зачем необходимо нормирование входных сигналов?
4. Через какой преобразователь подается входной сигнал в цифровое устройство?

5. Для чего служит выходной преобразователь?
6. Какие узлы содержит выходной преобразователь?
7. Определите назначение мультиплексора.
8. Какой тип дисплея вам больше нравится?
9. Определите назначение порта связи с внешними устройствами.
10. Как хранится в микропроцессорном регуляторе программа работы?
11. Каким образом вводятся в микропроцессорный регулятор уставки?
12. Что необходимо предпринять для восстановления программы после исчезновения внешнего питания?
13. Какие законы регулирования можно обрабатывать в МПР-51?
14. Сколько входов имеет МПР-51?
15. Сколько выходов имеет МПР-51?
16. Сколько встроенных программ имеет прибор МПР-51?
17. Для чего в МПР-51 необходимы четыре компаратора "Тревога"?
18. Сколько пределов срабатывания имеет компаратор "Тревога"?
19. Для чего служит устройство "Контроль датчиков"?
20. В каких режимах может находиться МПР-51?
21. Каким образом в приборе ТРМ-4 можно компенсировать погрешность датчика?

Список терминов

А

Автоматизация
Автоматизированная линия
- структура
Автоматизированные производства:
- однопоточные
- параллельного агрегатирования
- многопоточные
Автоматизированный участок
Автоматика
Астатическое:
- звено
- регулирование

В

Воздействия:
- возмущающие
- управляющие
- типовые
- ступенчатые
- импульсные
- гармонические
Вольт - амперная характеристика
Время регулирования

Г

Годограф вектора

Д

Датчик:
- температуры:
- терморезистор
- термисторы
- емкостной
- перемещений
- давления
- влажности газов
- контроля проникновения
- цветовых характеристик
Диод
Дифференциальный оператор p

З

Задающие устройства
- аналоговые
- цифровые
Затухания:
- степень
Замкнутые системы:
- одноконтурными
- многоконтурными
Законы алгебры логики:
- дизъюнкция
- конъюнкция
- инверсия
Закон регулирования:
- П
- И
- ПИ
- ПИД
Звено:
- без инерционное
- динамическое
- дифференцирующее
- идеальное
- реальное
- запаздывающее (чистого или транспортно запаздывания)
- инерционное первого порядка (апериодическое)
- инерционное второго порядка
- интегрирующее
- пропорциональное
- усилительное
- эквивалентное
- параллельно - согласное соединение
- параллельно - встречное соединение
- цепь обратной связи

И

Интегральная микросхема:
- аналоговая
- цифровая
Исполнительные устройства:
- гидравлические

- пневматические
- электродвигательные
- электромагнитные

К

Кварцевый автогенератор

Комбинационные устройства

Компаратор:

- аналоговый
- цифровой
- нуль-орган

Конструкторская документация

Коэффициент:

- усиления звена
- динамический
- передачи
- передачи звена
- затухания
- усиления по току

М

Микропроцессор, устройство:

- обмена (УО)
- сопряжения с каналом (УСК)
- арифметико-логическое устройство (АЛУ)
- регистр признаков
- регистр общего назначения (РОН)
- микропрограммное устройство управления

О

Однокристалльные микроЭВМ

Отклонение

Ошибка:

- статическая
- динамическая

П

Память:

- ПЗУ
- ППЗУ

Параметры:

- состояния объекта
- технологические

- регулируемые

Перерегулирование

Принцип:

- завершенности
- малооперационной технологии
- малолюдной технологии
- групповой технологии
- без отладочной технологии
- оптимальности
- разомкнутого управления
- компенсации
- обратной связи

Постоянная времени объекта

Показатель качества регулирования

- обобщённый

P - n переход

Преобразователь:

- цифро-аналоговый (ЦАП)
- аналого-цифровой (АЦП)

Производственный:

- модуль
- ячейка

Процесс:

- колебательный
- затухающий
- незатухающий
- переходный
- оптимальные

Р

Рабочие органы

Разгонная кривая объекта регулирования

Регистр:

- памяти
- сдвига

Регулятор:

- позиционные (релейные)
- двухпозиционные
- трехпозиционные
- пропорциональные
- П
- И
- ПИ
- ПИД

- программируемый:
 - преобразователи сигналов
 - аналого-цифровой преобразователь
 - кнопки управления и ввода
 - дисплей для отображения
 - порт для связи
 - МПР-51
- Регулирование:
- апериодическое
 - П
 - И
 - ПИ
 - ПИД

С

Самовыравнивание

САУ

- стабилизации;
- программные;
- следящие;
- самонастраивающиеся:
- экстремальные;
- оптимальные;
- адаптивные системы

САР:

- синтез
 - коррекция
- Системы:
- многомерные
 - одномерные
 - многоконтурные
 - статические
 - астатические
 - ручного регулирования

Сопротивление:

- входное
- выходное

Сравнивающие устройства:

- аналоговые
- цифровые

Стабилитрон

Статизм

Статические характеристики:

- звена

Структура

- удаленной компьютерной системы измерения

- МПР51

- ТРМ4

Схемы:

структурные

- ТАУ

- преобразования

принципиальные

функциональные

монтажные

соединения

подключения

общие

Счетчик

Т

ТАУ

Термоанемометр

Термосопротивление

Тиристор

транзистор:

- биполярный

- полевой

Триггер

У

Удаленные системы сбора

Управление:

- автоматическое

- автоматизированное

- объект

- цель

Усилитель:

- гидравлический

- дифференцирующий

- инвертирующий

- интегрирующий

- масштабирующий

- не инвертирующий

- операционный

- пневматический

- суммирующий

Устойчивость САР:

- условия устойчивости

- алгебраические

- частотные
- Гурвица
- Ляпунову
- Михайлова
- Найквиста
- Рауса

Устройство:

- сравнивающее
- возведения в квадрат
- извлечения корня
- умножения – деления
- зоны нечувствительности
- гистерезиса
- люфта
- насыщения
- ПЗУ
- ППЗУ
- МПР-51
- коптильной камеры
- сушилки древесины
- пастеризатора молока
- ТРМ4

Уравнение:

- динамики

Уровень автоматизации

Ф

Фоторезистор

Функция:

- передаточная
- переключательная

Функциональная:

- схема
- звено

Х

Характеристика:

- диапазон измерений
- статическая
- точность измерений
- чувствительность
- разрешающая способность
- время успокоения
- быстродействие
- выходная мощность
- выходное сопротивление

Характеристическое уравнение

- полином
- корни

Ц

Цифровые автоматы

Ч

Частотные характеристики САУ:

- частотная передаточная функция
- вещественная ЧХ (ВЧХ)
- мнимая ЧХ (МЧХ)
- амплитудная ЧХ (АЧХ):
- фазовая ЧХ (ФЧХ).
- амплитудно - фазовую частотная (АФЧХ)
- логарифмические частотные (ЛЧХ)
- логарифмическая амплитудная ЧХ (ЛАЧХ) $L(\omega)$
- логарифмическая фазовая ЧХ (ЛФЧХ) $\Phi(\omega)$

Чувствительные элементы:

- параметрические
- генераторные
- механические
- потенциометрические
- тензочувствительные
- индуктивные
- индукционные
- емкостные
- пьезоэлектрические
- фотоэлектрические:
- с внешним фотоэффектом
- с внутренним фотоэффектом
- фоторезистор
- вентильным фотоэффектом
- фотодиод
- диодные оптроны
- зарядовой связью (ПЗС):
- линейка
- матрица
- покадровым переносом
- МОП-структура
- температурные:
- биметаллический
- тепломеханический

Э

Элемент:

- мажоритарный

Список используемой литературы

1. Автоматизация и производство N1...21. Бесплатное информационное обозрение фирмы ПО ОВЕН, г. Москва, 2000-2005.
2. Бородин И.Ф., Недилько Н.М. Автоматизация технологических процессов.-М.: Агропромиздат, 1986.
3. Интегральные датчики: Учебник для вузов / В.Д. Вавилов; Нижегород. гос. техн. ун - т. Н. Новгород, 1999. 364 с.
4. Практикум по автоматике. Математическое моделирование САР. Под ред. Б.А.Карташова.- М.: Колос С, 2004.- 184с.: ил.
5. Проектирование автоматизированных участков и цехов: Учеб. для машиностроит. спецвузов/ В.П.Вороненко, В.А.Егоров, М.Г.Косов и др. Под ред. Ю.М.Соломенцева.- 3-е изд., стер.- М.: Высш. шк., 2003.- 272с.: ил.
6. Радиотехника: Энциклопедия/ Под ред. Ю.Л.Мазора, Е.А.Мачусского, В.И.Правды.- М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002.-944с.
7. Г.Г.Сазонов. Основы теории автоматического управления (ТАУ) (для студентов-технологов).- М.: Издательство «Истек», 2003, - 100с.
8. Средства автоматики и телемеханики/ Н.И. Бохан, И.Ф. Бородин, Ю.В. Дробышев и др. М.: Агропромиздат, 1992.-351 с.: ил. – (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).
9. Теория автоматического управления. /Под ред. Воронова А.А.- М.; Высш. шк., 1986 – 367 с.
10. Шавров А.В., Коломиец А.П. Автоматика. – М.:Колос,1999.- 264с.: ил.- (Учебники и учеб. пособия для высших учебных заведений).

Содержание

Введение.....	3
Часть 1. Основы теории автоматического управления.....	5
Глава 1. Принципы построения автоматизированных производств.....	5
1.1. Автоматизация производства.....	5
1.2. Основные термины и определения автоматизированных производств.....	11
1.3. Конструкторская документация - схемы систем автоматики.....	13
Глава 2. Принципы построения САУ.....	17
2.1. Фундаментальные принципы управления.....	17
2.2. Основные виды САУ.....	24
Глава 3. Режимы работы САУ.....	27
3.1. Статические режимы работы САУ.....	27
3.1.1. Статические характеристики.....	27
3.1.2. Статическое и астатическое регулирование.....	30
3.2. Динамический режим САУ.....	33
3.2.1. Уравнение динамики.....	33
3.2.2. Передаточная функция.....	35
3.2.3. Элементарные динамические звенья.....	36
3.3. Структурные схемы в ТАУ.....	37
Глава 4. Временные характеристики САУ.....	44
4.1. Понятие временных характеристик.....	44
4.2. Переходные характеристики элементарных звеньев.....	45
4.2.1. Безинерционное (пропорциональное, усилительное) звено.....	45
4.2.2. Интегрирующее (астатическое) звено.....	46
4.2.3. Инерционное звено первого порядка (апериодическое).....	48
4.2.4. Инерционные звенья второго порядка.....	50
4.2.5. Дифференцирующее звено.....	51
4.2.6. Запоздывающее (чистого или транспортного запаздывания) звено.....	52
Глава 5. Частотные характеристики САУ.....	56
5.1. Понятие частотных характеристик.....	56
5.2. Частотные характеристики типовых звеньев.....	59
5.3. Частотные характеристики разомкнутых одноконтурных САУ.....	63
Глава 6. Законы регулирования и качество САУ.....	66
6.1. Характеристика объекта управления.....	66
6.2. Законы регулирования.....	68
6.3. Понятие устойчивости системы.....	77
6.4. Основные условия устойчивости.....	79
6.5. Частотные критерии устойчивости САУ.....	86
6.6. Качество регулирования САУ.....	92
6.7. Синтез и коррекция САУ.....	95
Часть 2. Технические средства автоматики.....	99
Глава 7. Элементная база устройств автоматики.....	99
7.1. Элементная база автоматики.....	99
7.2. Аналоговые схемы устройств автоматики.....	103
Глава 8. Цифровые схемы автоматики.....	118
8.1. Комбинационная логика.....	118
8.2. Элементы комбинационных логических устройств.....	119
8.3. Цифровые автоматы.....	124

Глава 9. Датчики параметров технологического процесса.....	128
9.1. Характеристики датчиков.....	128
9.2. Чувствительные элементы датчиков.....	131
9.2.1. Механические чувствительные элементы датчиков.....	132
9.2.2. Потенциометрические чувствительные элементы.....	134
9.2.3. Тензочувствительные элементы.....	135
9.2.4. Индуктивные чувствительные элементы.....	137
9.2.5. Индукционные чувствительные элементы.....	138
9.2.6. Емкостные чувствительные элементы.....	140
9.2.7. Фотоэлектрические чувствительные элементы.....	142
9.2.8. Элементы, чувствительные к температуре.....	148
Глава 10. Принципиальные схемы датчиков.....	153
10.1. Датчики температуры.....	153
10.2. Датчики перемещений.....	154
10.3. Термоанемометр постоянной температуры.....	155
10.4. Датчик давления с ёмкостным преобразователем.....	157
10.5. Датчик влажности газов.....	157
10.6. Датчики, использующие фотоэлектрические элементы.....	159
10.7. Основные требования к датчикам, применяемым в сельскохозяйственном производстве.....	161
Глава 11. Задающие и сравнивающие устройства САР.....	164
11.1. Задающие устройства.....	164
11.2. Сравнивающие устройства.....	167
11.3. Усилители.....	169
Глава 12. Исполнительные устройства автоматики.....	174
Часть 3. Микропроцессорные средства обработки информации в системах автоматики.....	185
Глава 13. Микропроцессорные средства и их использование в автоматике.....	185
13.1. Базовые средства микропроцессорной техники.....	185
13.2. Системы сбора информации с датчиков на базе микроЭВМ.....	193
Глава 14. Программируемые регуляторы.....	197
Список терминов.....	214
Список литературы.....	218

Технический редактор – О.А. Прохорович

Отпечатано в типографии ФГОУ ВПО МичГАУ
 Подписано в печать 10.06.06. г. Формат 60x84^{1/16},
 Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 12,7 Тираж экз. Ризограф
 Заказ

Мичуринский государственный аграрный университет
 393760, Тамбовская обл., г.Мичуринск, ул. Интернациональная, 101,
 тел. +7 (47545) 5-26-35
 E-mail: mgau@mich.ru